

4. 浚渫土砂ブロックの材料特性の把握、最適な製造条件の提案（高圧脱水固化処理した浚渫土砂ブロックの力学特性と強度推定）

4.1 実験概要

4.1.1 はじめに

本章では、4.1.2～4.1.4 に3種類の実験を紹介する。大まかな内容は以下のようになる。

4.1.2 室内試験

4.1.3 脱水固化装置

4.1.4 大型脱水固化装置

4.1.5 含水比調整

4.1.6 一軸圧縮試験

4.1.2～4.1.4 で、それぞれの実験に用いた試料と物理特性、装置、作製方法を示す。4.1.5 では、供試体、ブロックを作製する際の粘土の含水比の調整方法を示した。4.1.6 では、作製した供試体、ブロックの一軸圧縮試験を行ったため、装置、実験方法を示す。

4.1.2 室内試験

(1) 実験に用いた試料と物理特性

土質試料には、関門海峡で浚渫された粘土（以降、関門粘土と呼ぶ）を用いた。固化材には、高炉セメントB種を用いた。写真-4.1、写真-4.2 にそれぞれ使用した関門粘土と高炉セメントB種の写真を示す。また、図-4.1 に粒径加積曲線、表-4.1 に物理特性を示す。

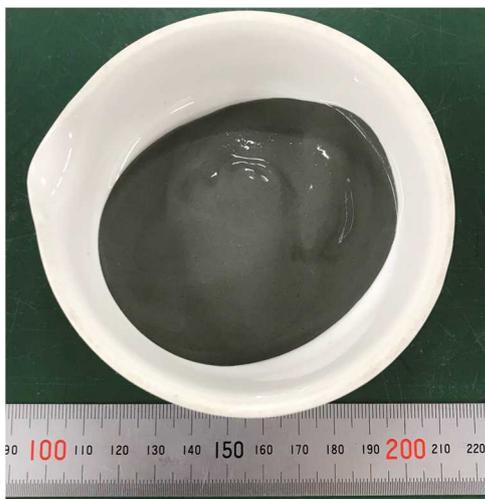


写真-4.1 関門粘土



写真-4.2 高炉セメントB種

表-4.1 物理特性

	関門粘土
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.697
液性限界 w_L (%)	95.0
塑性指数 I_P	59.1
強熱減量 (%)	6.08

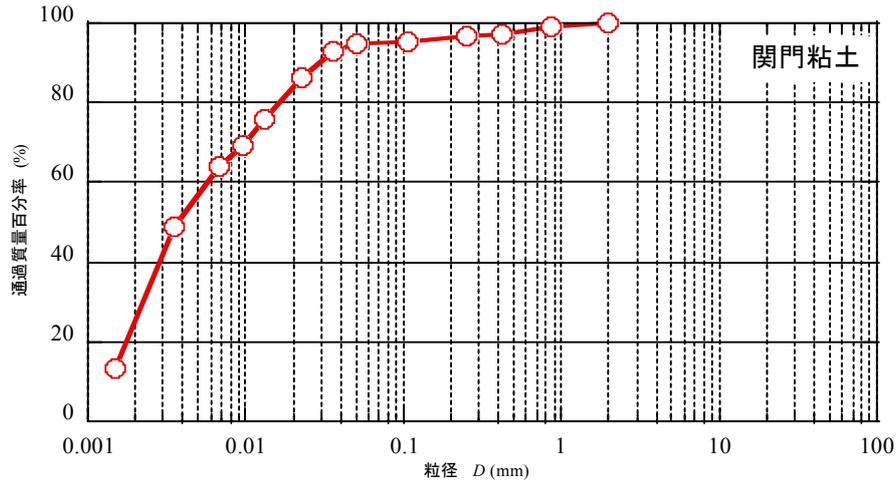


図-4.1 粒径加積曲線

(2) 実験に用いた装置

図-4.2 に室内試験として用いた定圧载荷装置 (高圧大変位圧密装置) の概略図、図-4.3 に締め固めモールドの概略図を示す。写真-4.3 に定圧载荷装置正面からの写真、写真-4.4 に締め固めモールド ($\phi=50\text{mm}$ 、 $H=250\text{mm}$) の写真を示す。定圧载荷装置は、3 連式定圧载荷装置であり、同時に 3 個の供試体を作製することが可能である。

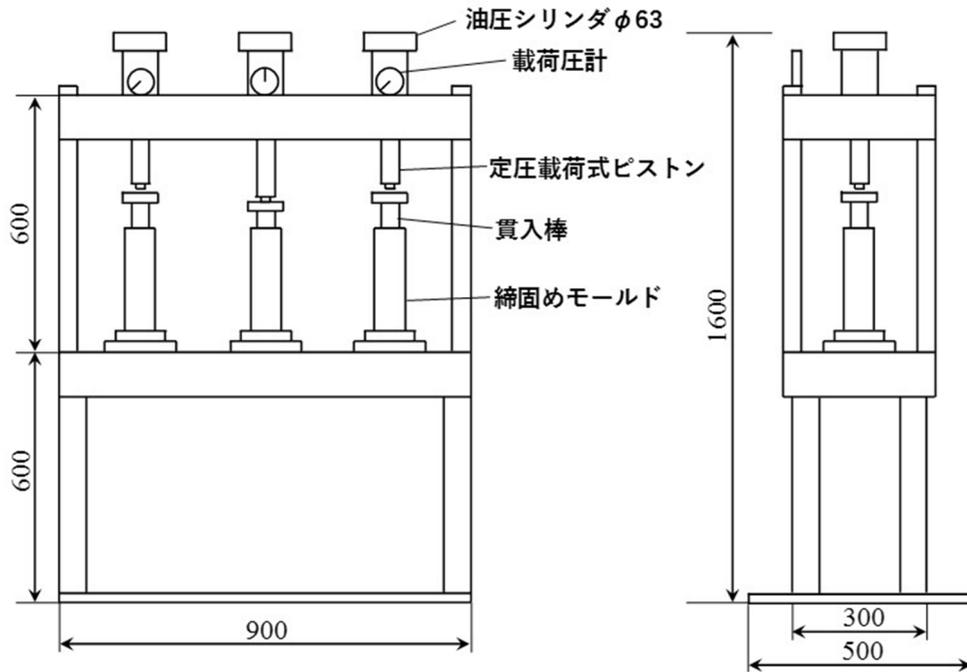


図-4.2 定圧载荷装置概略図

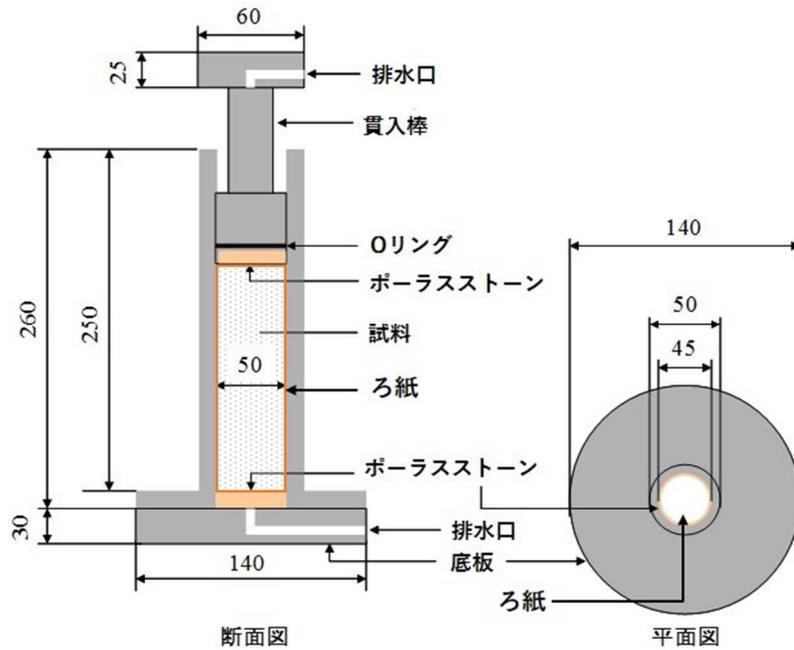


図-4.3 締め固めモールド概略図



写真-4.3 定圧载荷装置



写真-4.4 締め固めモールド

(3) 供試体作製方法

供試体は、写真-4.4 に示す円形の締め固めモールドを用いて作製した。まず、関門粘土の初期含水比を調整後、高炉セメント B 種と混合した。高炉セメント B 種を混合したことによって含水比が変わるため、再度含水比を調整した。含水比調整方法に関しては、後の 4.4 に記述している。また、セメントを混合する際は、写真-4.5 に示すハンドミキサーを用いてばらつきがでないように約 5 分攪拌した。

締め固めモールドの内側には、ろ紙を貼り付けることによって周面からの排水を可能とした。また、モ

ールド内に充填する試料の上下端、つまり試料とポーラストーンのあいだにもろ紙を敷いた。

図-4.3 に示す上部と底板を六角穴付ボルトで固定した。固定した後、セメント混合土をモールドに充填する。その際、モールドの内側に貼り付けたろ紙がはがれないように気をつけなければならない。ろ紙がはがれてしまうと、充填した試料の間に挟まり、出来上がった供試体がそこからひび割れ、破壊し、強度に大きく影響してしまう。

試料を充填したモールドを写真-4.4 に示す定圧載荷装置にセットする。そして、写真-4.6 に示す変位計を0セットし、5MPa で圧密を開始した。圧密中の変位計から得られた変位と時間は写真-4.7 に示すデータロガーで収集した。また、片対数グラフを用いて $3t$ 法により圧密終了時間を求めた。図-4.4 に $3t$ 法による圧密の打ち切り方法を示す。

供試体作成後、所定期間養生した後に一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験方法に関しては、後の 4.1.5 に記述している。



写真-4.5 ハンドミキサー



写真-4.6 変位計

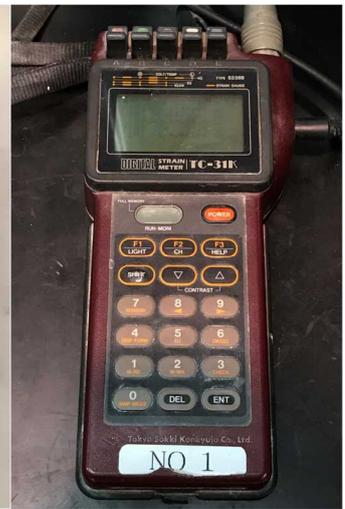


写真-4.7 データロガー

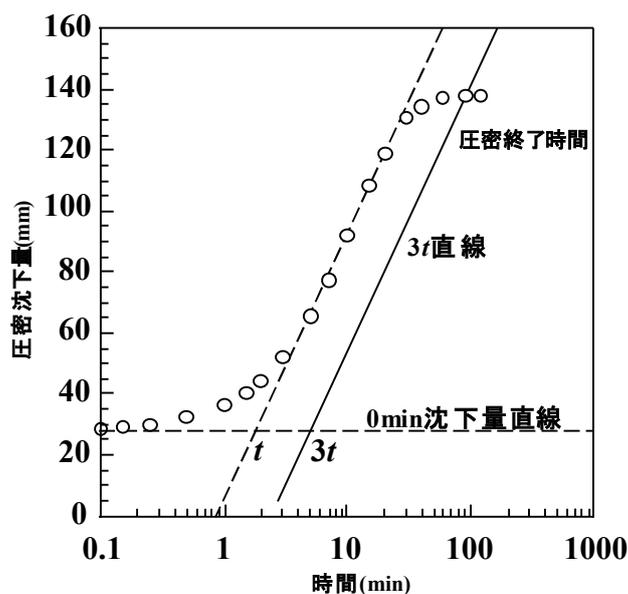


図-4.4 $3t$ 法による圧密の打ち切り方

(4) 実験条件

表-4.2 に本実験で行なった実験条件を示す。母材には関門粘土を用い、固化材には高炉セメント B 種を用いた。圧密する際の脱水圧力は、5 MPa とした。母材に固化材を添加した混合土の初期含水比を母材の液性限界の 1.5 倍に設定した。固化材の添加率は、10～40 % の 4 種類、養生日数は 7 日、28 日、91 日の 3 条件で実験を行なった。脱水条件は、上下端のみではなく周面からの排水も行なった。

表-4.2 実験条件

母材	関門粘土
固化材	高炉セメント B 種
固化材添加率	10 %, 20 %, 30 %, 40 %
脱水圧力	5 MPa
初期含水比	1.5 w_L
脱水条件	上下端および周面排水
養生日数	7 日, 28 日, 91 日
養生条件	温度 : 20 °C, 40 °C, 60 °C 湿度 : 95 % 以上

4.1.3 脱水固化装置

(1) 実験に用いた試料と物理特性

土質試料には、関門海峡で浚渫された粘土 (以降、関門粘土と呼ぶ) を用いた。固化材には、高炉セメント B 種を用いた。使用した関門粘土と高炉セメント B 種は、写真-4.1、写真-4.2 に示す。また、粒径加積曲線、物理特性に関しても前に示した図-4.1、表-4.1 に示す。

(2) 実験に用いた装置

図-4.5 に本研究で用いた脱水固化装置の概略図を示す。また、写真-4.8 および写真-4.9 に脱水固化装置全体の写真、角柱モールド ($W=350\text{mm}$ 、 $D=350\text{mm}$ 、 $H=1000\text{mm}$) の写真をそれぞれ示す。

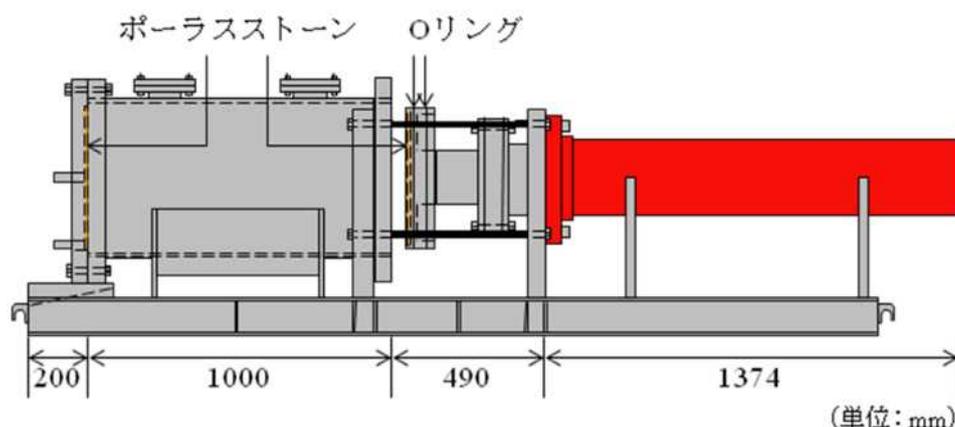


図-4.5 脱水固化装置



写真-4.8 脱水固化装置

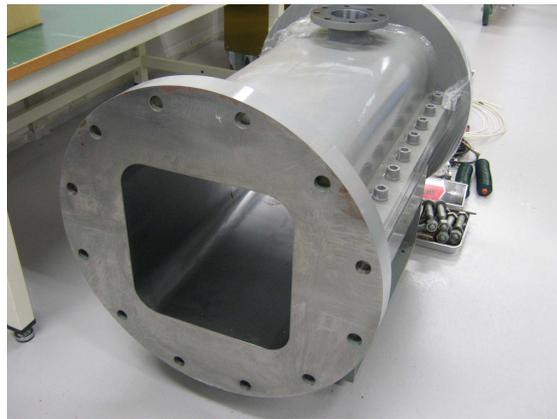


写真-4.9 角柱モールド

(3) ブロック作成方法

ブロックは、写真-4.9 に示す角柱型のモールドを用いて作製した。まず、関門粘土の初期含水比を調整後、高炉セメント B 種と混合した。高炉セメント B 種を混合したことによって含水比が変わるため、再度含水比を調整した。含水比調整方法に関しては、後の 4.1.5 に記述している。また、セメントを混合する際は、ハンドミキサーを用いてばらつきがでないように十分に攪拌混合した。

攪拌混合した試料を、振動を与えながらモールドに充填した後、脱水圧力 2MPa で 30 分定圧載荷した。30 分経過後、圧密終了までは 5MPa で定圧載荷した。排水条件は、上下端排水とし、上下端のポーラスストーンには目詰まりを防ぐためにろ紙を敷いた。5MPa での圧密終了時間は、片対数グラフを用いて 3 t 法により圧密終了時間を求めた。3 t 法による圧密の打ち切り方法は、前の図-4.4 に示す。

作製して所定期間養生したブロックから、写真-4.10 に示すコアリング装置を用いてくり抜き、一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験方法に関しては、後の 4.1.6 に記述している。



写真-4.10 コアリング装置

(4) 実験条件

表-4.3 に本実験で行なった実験条件を示す。母材には関門粘土を用い、固化材には高炉セメント B 種を用いた。固化材添加率は、母材の乾燥重量に対して 10%、20%、30%とし、初期含水比は約 300%とした。荷重の載荷は定圧載荷で行い、2MPa で 30 分間の圧密を行なった後、5MPa で圧密終了まで載荷した。作製した供試体は、水中で養生した。実験ケースを表-4.4 に示す。

表-4.3 実験条件

土質材料	関門粘土
固化材	高炉スラグセメントB種
固化材添加率	20 %
脱水圧力	2 MPa (~30 min) → 5 MPa (30 min ~)
初期含水比	約300 %
養生条件	水中養生, 温度:20 °C

表-4.4 実験ケース

case	固化材添加率(%)	供試体厚(mm)
1	20	100
2		155
3		110
4		140
5		107
6		130

4.1.3 大型脱水固化装置

(1) 実験に用いた試料と物理特性

土質試料には、宇部港港湾で写真-4.11 に示すグラブ浚渫船を用いて浚渫された粘土 (以降、宇部粘土と呼ぶ) を用いた。固化材には、高炉セメント B 種を用いた。写真-4.12、写真-4.13 にそれぞれ使用した宇部粘土、高炉セメント B 種、図-4.6 に粒径加積曲線、表-4.5 に物理特性を示す。



写真-4.11 グラブ浚渫船

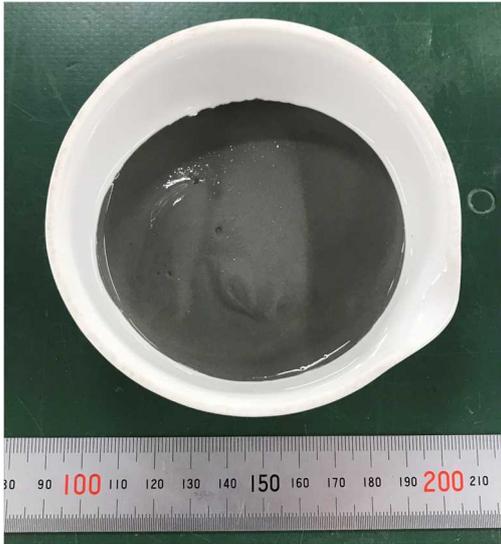


写真-4.12 宇部粘土

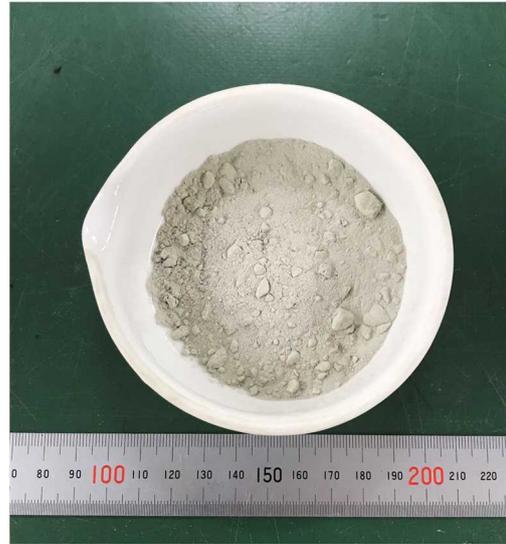


写真-4.13 高炉セメント B種

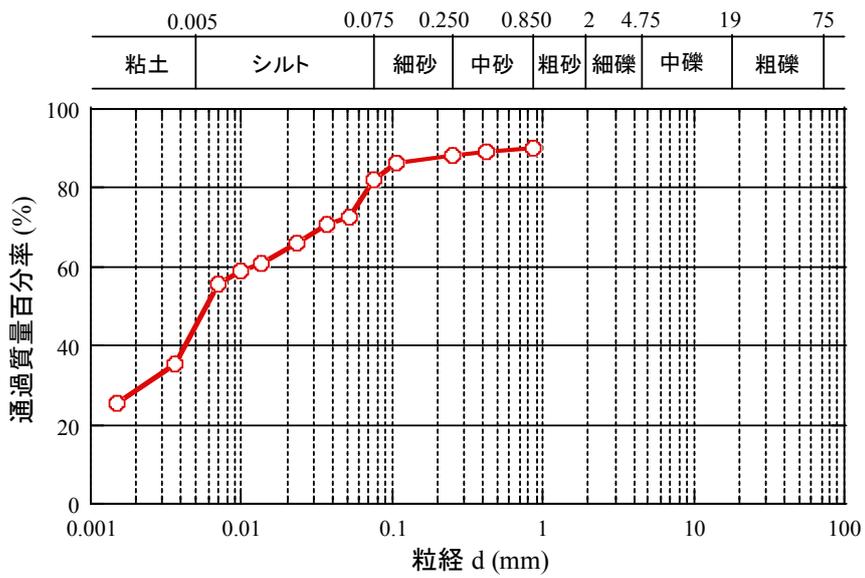


図-4.6 粒径加積曲線

表-4.5 物理特性

	宇部粘土
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.614
液性限界 w_L (%)	97.3
塑性指数 I_P	58.5
強熱減量 (%)	8.31

(2) 実験に用いた装置

図-4.7 に大型脱水固化装置 (幅 4.5m、高さ 3.7m、長さ 15m) の概略図、図-4.8 に大型脱水固化装置脱水棒側からの断面概略図を示す。写真-4.14 に大型脱水固化装置側面からの写真を示す。写真-4.15 に関門粘土を投入しブロックを作成する部分のモールド ($W=1.0\text{m}$ 、 $D=1.0\text{m}$ 、 $H=2.0\text{m}$) を示す。

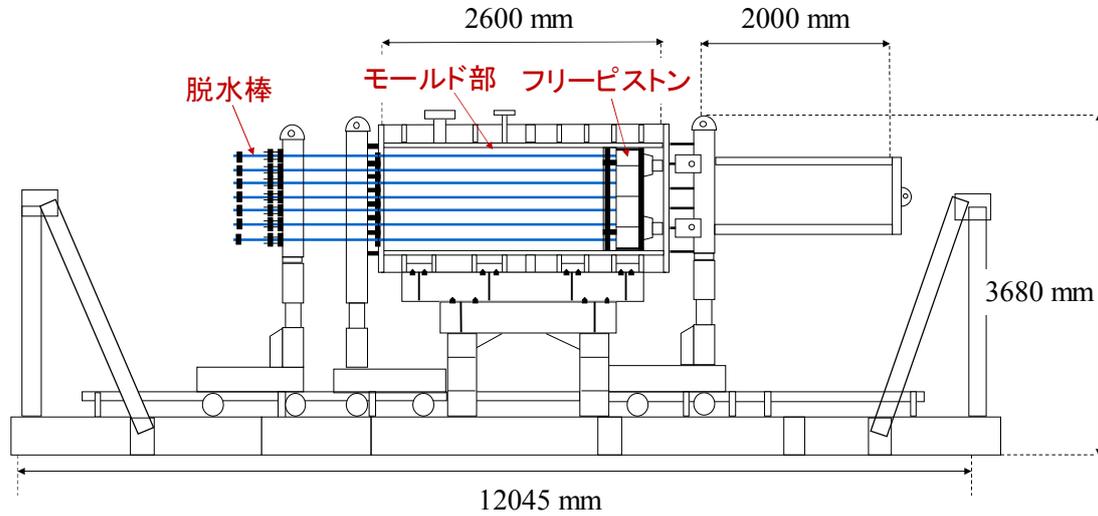


図-4.7 大型脱水固化装置概略図

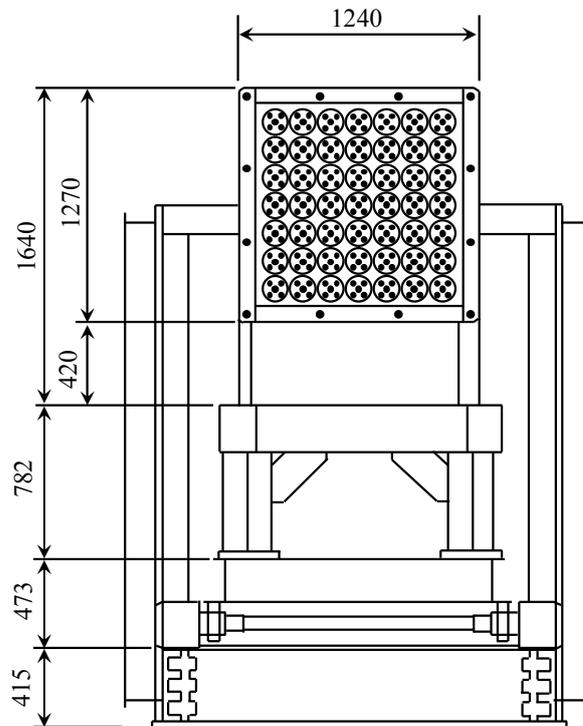


図-4.8 大型脱水固化装置脱水棒側からの断面概略図



写真-4.14 大型脱水固化装置



写真-4.15 モールド

(3) ブロック作製方法

ブロックは、写真-4.15 に示すモールドを用いて作製した。実験に使用した宇部粘土は、約 2m^3 と大量に使用するため、ベッセル内にて含水比調整等を行なう際は写真-4.16 に示すようにバックホウを用いて攪拌、含水比の調整を行なった。含水比調整方法に関しては、後の 4.1.5 に記述している。

含水比調整後、セメントを攪拌混合する際は写真-4.17 に示す攪拌機を用いた。攪拌機の中に、高炉セメント B 種と宇部粘土を同時に投入し攪拌混合を行なった。また、セメントを添加したことによって含水比が変化するため再度含水比調整した。高炉セメント B 種を混合した粘土は、再度ベッセル内に戻した。そして、バックホウを用いて写真-4.18 に示すホッパを通すことによって宇部粘土に混入している大きな石等を除去した。石等を除去したセメント混合土は、写真-4.19 に示すモルタルポンプを用いて、モールド上端まで圧送し、モールド内に充填した。



写真-4.16 攪拌状況



写真-4.17 攪拌機



写真-4.18 ホッパ



写真-4.19 モルタルポンプ

モールド内にセメント混合土を充填した後、モールド内にあるフリーピストンを、写真-4.14の右側から左側にむけて水圧を利用し移動させ、セメント混合土を圧密、脱水させることによってブロックを製作した。その際、写真-4.20に示すポンプを用いて水をモールド内に圧送した。また、脱水する際は写真-4.21に示す脱水棒をモールド内に差し込んだ状態でセメント混合土を充填し、圧密することで排水を行なった。圧密中の変位は、写真-4.22に示す巻込型変位計を用いて測定した。測定した変位と時間は、写真-4.23に示すデータロガーで収集した。そして、片対数グラフを用いて3t法により圧密終了時間を求めた。4.1の図-4.4に3t法による圧密の打ち切り方法を示す。

ブロック作成後は、脱水棒をブロックから抜き、フリーピストンを圧密時と同様に右側から左側に移動させながら押し出し、写真-4.24に示すフォークリフトを用いて受け取る。モールドから取り出した供試体は写真-4.25に示す容器を用いて水中養生を行い、所定日数養生したのちにコアリングし一軸圧縮試験を行なった。



写真-4.20 ポンプ



写真-4.21 脱水棒



写真-4.22 巻込型変位計

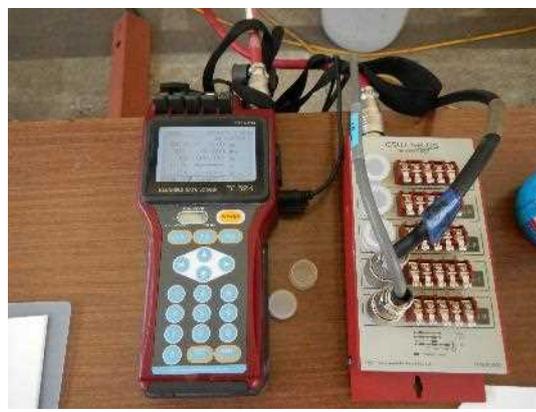


写真-4.23 データロガー



写真-4.24 ブロック取り出し状況



写真-4.25 養生容器

(4) 実験条件

表-4.6 に実験条件を示す。母材には宇部粘土を用い、固化材に高炉セメント B 種を用いた。圧密する際の脱水圧力は 5MPa とした。母材に固化材を添加した混合土の初期含水比を 200% とし、養生日数は 28 日、91 日、養生条件は温度が約 20℃ の水中で養生を行なった。セメント添加を 0%、40%、脱水棒の本数を 16 本、49 本とすることによって、セメント添加率の違い、脱水棒の本数の違いによる供試体作成時、また供試体作成後に与える影響について考察した。表-4.7 に実験ケースを示す。

表-4.6 実験条件

母材	宇部粘土
固化材	高炉セメント B 種
固化材添加率	0 %, 40 %
脱水圧力	5 MPa
初期含水比	200 %
脱水棒本数	16 本, 49 本
養生日数	28 日, 91 日
養生条件	水中養生 温度 : 約 20 °C

表-4.7 実験ケース

Case	初期含水比	固化材添加率	圧密度	脱水棒
1	200 %	0 %	100 %	49 本
2				
3		40 %		16 本

4.1.5 含水比調整

(1) 試料の含水比調整方法

調整の方法は、あらかじめ母材の自然含水比を測定し、不足分の水を加え、ハンドミキサーで均一になるように、約 5 分間攪拌して調整した。なお、含水比 $x\%$ の試料を $y\%$ に調整する場合、その不足分の水の質量を算出する式は、図-4.9 に示す土の構成模式図を用いて求めた。

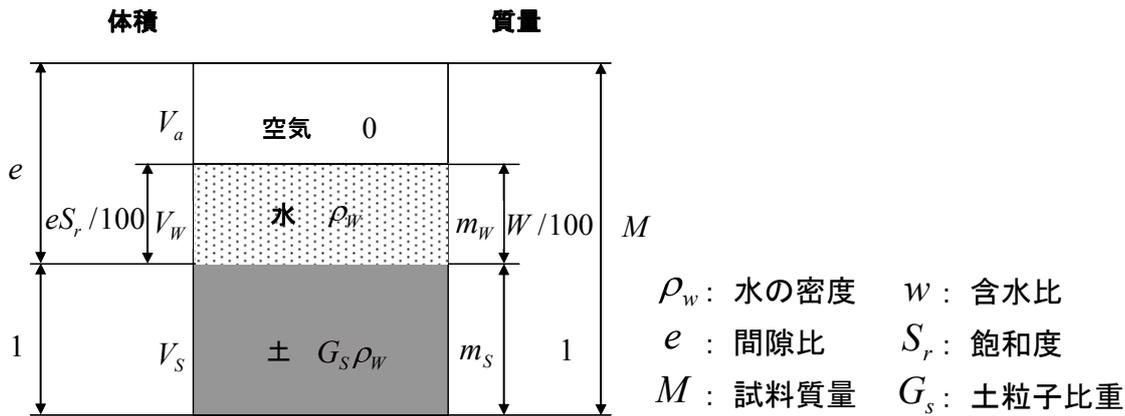


図-4.9 土の構成模式図

試料質量 M の絶乾状態の質量 m_s は、式(4.1)で求められる。

$$m_s = \frac{M}{1 + \frac{w}{100}} \quad (4.1)$$

また、試料質量 M に含まれている水の質量 m_w は、式(4.2)で求められる。

$$m_w = \frac{w}{100} \times m_s \quad (4.2)$$

したがって、含水比 x % の試料を設定含水比 y % に調整する場合、その不足分となる水の質量 m_w' は式(4.3)で求められる。

$$m_w' = \frac{y}{100} \times m_s - \frac{x}{100} \times m_s = \frac{(y-x)}{100} \times m_s \quad (4.3)$$

(2) 固化材の添加に対する含水比の調整方法

固化材を添加することにより含水比が変化するため、固化材の添加に対する含水比の調整も行った。設定含水比 y % の試料を固化材添加率 z % で改良する場合、固化材添加によって含水比が低下してしまう。

固化材質量 m_c を添加した際、設定含水比 y % に調整するための不足水分質量 m_{wc} は、式(4.4)、式(4.5)

で求められる。

$$m_c = \frac{z}{100} \times m_s \quad (4.4)$$

$$m_{wc} = \frac{y}{100} \times m_c \quad (4.5)$$

また、添加する固化材が自然含水比 α %の場合、式(4.5)は式(4.6)のようになる。

$$m_{wc} = \frac{y - \alpha}{100} \times m_c \quad (4.6)$$

4.1.6 一軸圧縮試験

(1) 実験に用いた装置

ブロックを作製したものに関しては、写真-4.26に示すコアドリルを用いてコアリングを行なった。定圧荷重装置によって作製された供試体、コアリングされた供試体は、写真-4.27に示す研磨機を用いて端面を研磨した。写真-4.28に一軸圧縮試験機を示す。一軸圧縮試験時、写真-4.29、写真-4.30に示す巻込型変位計と荷重計で値を測定し、写真-4.31に示すデータロガーで計測の値を収集した。一軸圧縮試験終了後、含水比を計測するために写真-4.32に示す炉乾燥機を用いた。



写真-4.26 コアドリル



写真-4.27 研磨機



写真-4.28 一軸圧縮試験機



写真-4.29 巻込型変位計



写真-4.30 荷重計



写真-4.31 データロガー



写真-4.32 炉乾燥機

(2) 一軸圧縮試験方法

一軸圧縮試験は、自立する供試体に対して拘束圧が作用しない状態で圧縮する試験である。JIS A 1216で規定されており、円柱形供試体に毎分1%の圧縮ひずみが生じる割合で連続的に圧縮を加える。圧縮中は、変位計で圧縮量 ΔH (cm)と荷重計で圧縮力 P (N)を測定する。その結果から圧縮応力 σ (kN/m²)と圧縮ひずみ ε (%)を算定する。

一軸圧縮試験は、以下の手順で行なった。

1. 浚渫ブロックに関しては、一軸圧縮試験用供試体のコアリングを行い、端面を研磨する。
2. 研磨し整形したものの高さ、直径をそれぞれ3箇所ずつ計測する。
3. 一軸圧縮試験機に供試体をセットし、ロードセルと変位計の初期設定を行う。
4. 載荷速度 1.0 mm/min に設定し、載荷を開始する。
5. 載荷中は、変位計、荷重計で圧縮量と圧縮力を測定し、データロガーで収集した。
6. 圧縮力がピーク強度の3分の2程度に減少したのを確認し、試験を終了させる。
7. 一軸圧縮試験後の供試体を炉乾燥機にて乾燥させ、含水比を算出する。

4.1.7 まとめ

本章では、室内試験、脱水固化装置、大型脱水固化装置の3種類の実験装置や実験方法を紹介した。そ

して、供試体、ブロックを作製する際の試料の含水比の調整方法、また作製して養生が終了したあとの一軸圧縮試験方法を示した。

以降、得られた結果を示す。

4.2 室内試験における浚渫土砂の脱水特性および強度特性

4.2.1 はじめに

本章では、室内試験として行なった定圧載荷試験の結果を示す。定圧載荷試験を行う際に、沈下量や沈下時間等を計測することによる脱水特性の評価を行なった。また、作製した供試体を所定の期間養生し一軸圧縮試験を行った。固化材添加率の違い、養生日数、養生温度の違いによる一軸圧縮強度への影響について評価考察を行なった。

4.2.2 脱水特性

(1) 圧密沈下曲線

図-4.10～図-4.13 に固化材添加率が 10%～40%の 4 種類の圧密沈下曲線を示す。固化材添加率 10%で最終沈下量 14.69cm、13.68cm、13.53cm、固化材添加率 20%で最終沈下量 13.83cm、13.62cm、13.19cm、固化材添加率 30%で最終沈下量 13.81cm、13.06cm、13.44cm、固化材添加率 40%で最終沈下量 13.80cm、11.35cm、13.72cm、13.60cm であった。固化材添加率 10%～40%の全ての条件において、若干のばらつきはあるものの、最終沈下量は約 14mm と大体等しい値となった。つまり、固化材添加率の違いによる圧密沈下量への影響はないことが分かった。

圧密終了時間は、固化材添加率 10%で 160 分、140 分、180 分、固化材添加率 20%で 140 分、150 分、90 分、固化材添加率 30%で 140 分、120 分、150 分、固化材添加率 40%で 90 分、250 分、120 分、50 分であった。この結果も多少のばらつきがあるものの、全体的に固化材添加率の増加に伴って圧密終了時間が短くなった。これは、添加した固化材によって圧密中の試料が小さな団粒を作り、空隙ができ脱水が促進されたためであると考えられる。このことは、勝又ら¹⁾が示すように、セメントなどの固化材には、硫酸アルミニウムなどの凝集剤と同様に粘土粒子を凝集させフロックを形成する効果があり、フロック形成によって土粒子の間隙が大きくなり透水性が増したということからもわかる。

土質試料に宇部粘土を用いた固化材添加率 40%の圧密沈下曲線も、同じ固化材添加率 40%の曲線と比較すると類似した挙動を示すことが分かった。

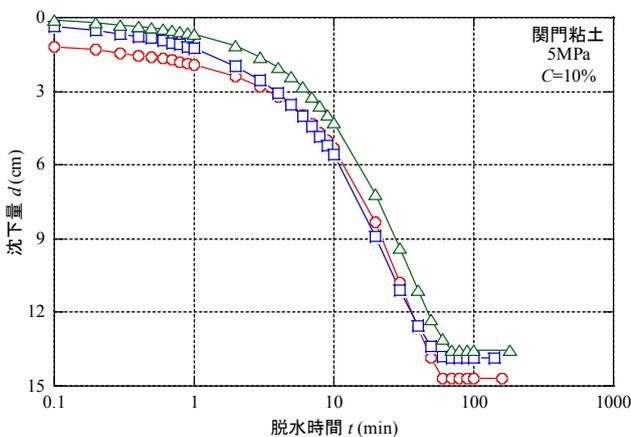


図-4.10 圧密沈下曲線 (C=10%)

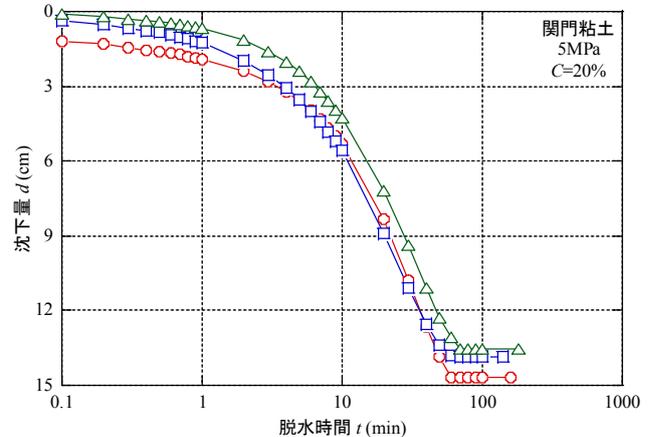


図-4.11 圧密沈下曲線 (C=20%)

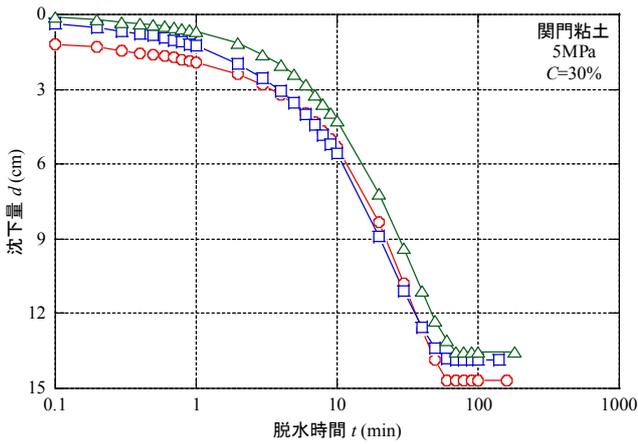


図-4.12 圧密沈下曲線 (C=30%)

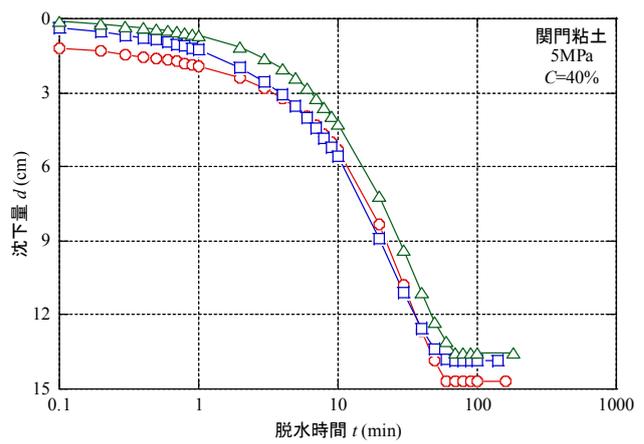


図-4.13 圧密沈下曲線 (C=40%)

(2) 減容化率

図-4.14 に、固化材添加率と減容化率の関係を示す。ここで減容化率とは、圧密終了時の供試体高さを初期状態の供試体高さで除した値を 1 から引いた値に 100 をかけた値とした。以下に分かりやすくまとめた式を示す。

$$\text{減容化率} = \left(1 - \frac{\text{圧密終了時の供試体高さ}}{\text{初期状態の供試体高さ}} \right) \times 100 \quad (4.7)$$

固化材添加率 10%では減容化率 40.16%、45.28%、45.88%、固化材添加率 20%では減容化率 44.68%、45.52%、47.24%、固化材添加率 30%では減容化率 44.76%、47.76%、46.24%、固化材添加率 40%では減容化率 44.80%、54.60%、45.12%、45.60%であった。固化材添加率 10%~40%の全ての条件において、5MPa の圧力で圧密を行なうことによって減容化率 40%を上回った。つまり、浚渫された粘土は、5MPa という条件で圧密することによって体積を半分近くまで減少させることができることが分かった。

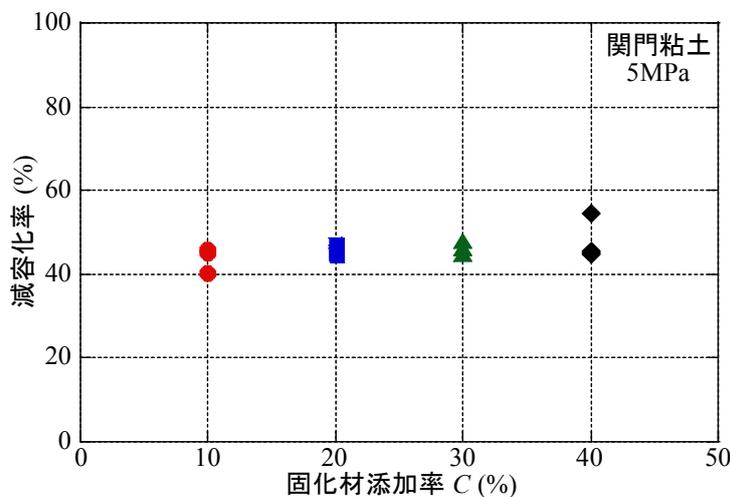


図-4.14 固化材添加率と減容化率

4.2.3 強度特性

(1) 応力ひずみ曲線

図-4.15～図-4.18 に 20℃養生、養生 7 日の応力ひずみ曲線を示す。

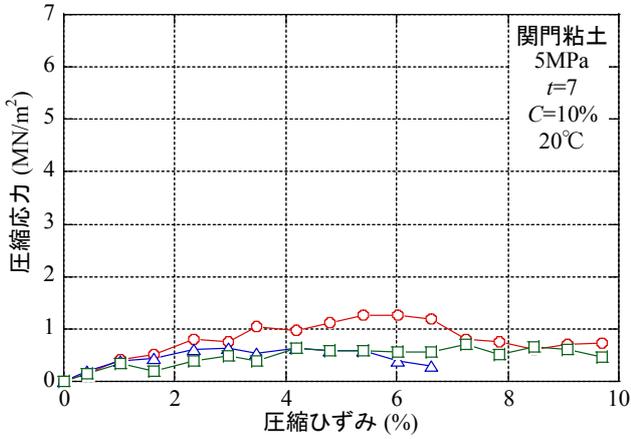


図-4.15 固化材添加率 C=10% 20℃

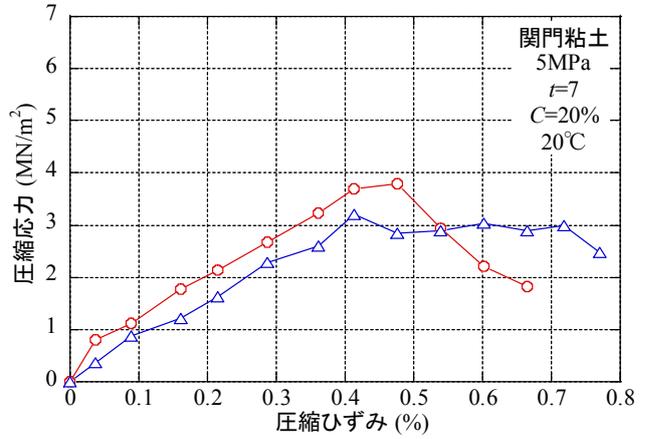


図-4.16 固化材添加率 C=20% 20℃

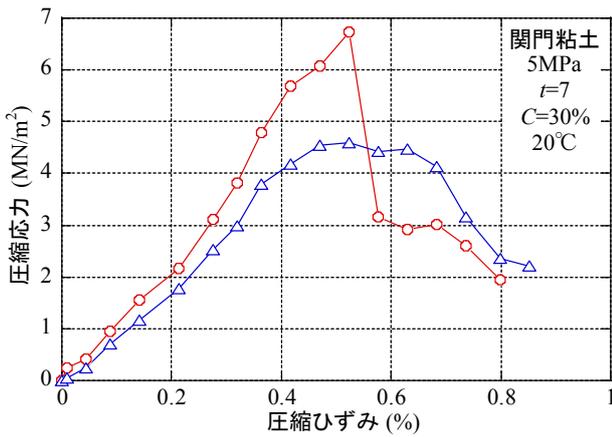


図-4.17 固化材添加率 C=30% 20℃

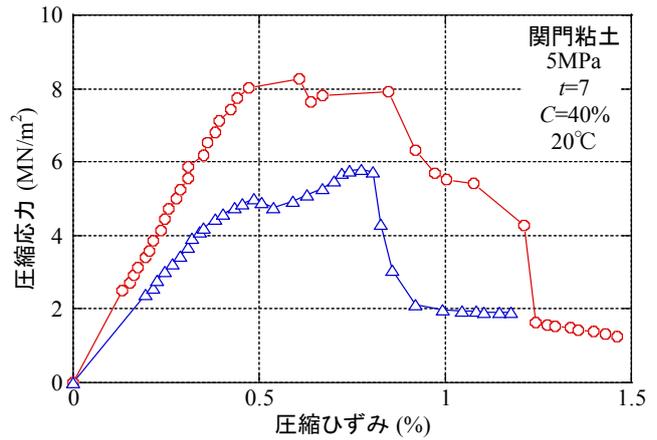


図-4.18 固化材添加率 C=40% 20℃

図-4.19～図-4.22 に 20℃養生、養生 28 日の応力ひずみ曲線を示す。

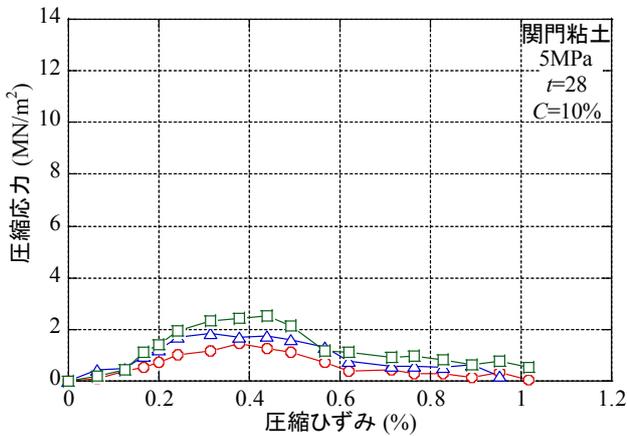


図-4.19 固化材添加率 C=10% 20℃

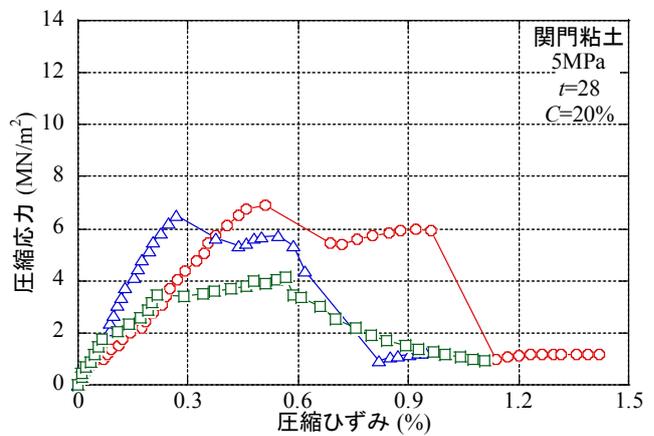


図-4.20 固化材添加率 C=20% 20℃

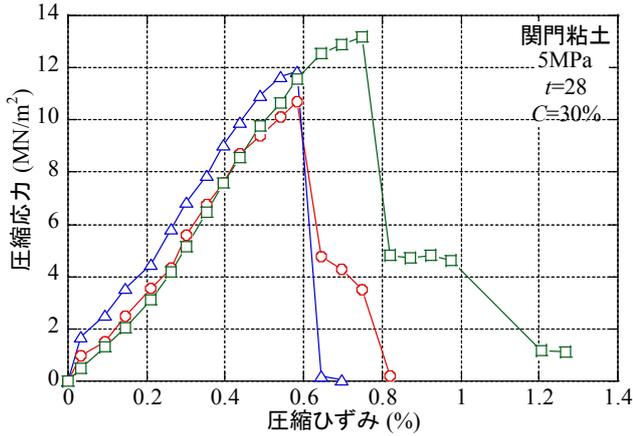


図-4.21 固化材添加率 C=30% 20°C

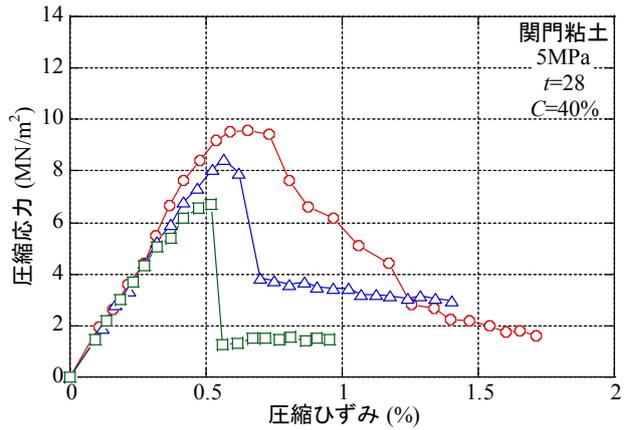


図-4.22 固化材添加率 C=40% 20°C

図-4.23～図-4.25 に 20°C養生、養生 91 日の応力ひずみ曲線を示す。固化材添加率 10%に関しては一軸圧縮試験の結果が得られなかった。

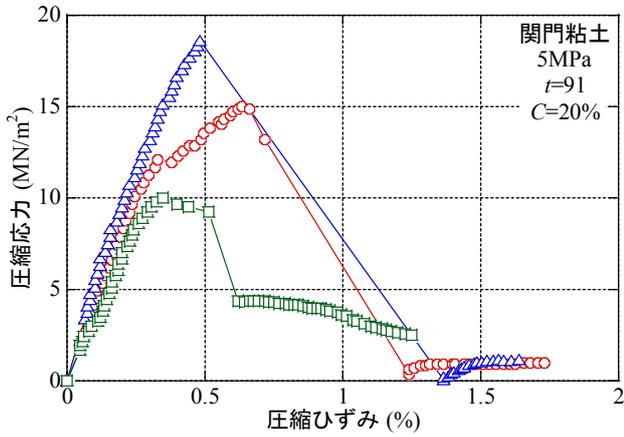


図-4.23 固化材添加率 C=20% 20°C

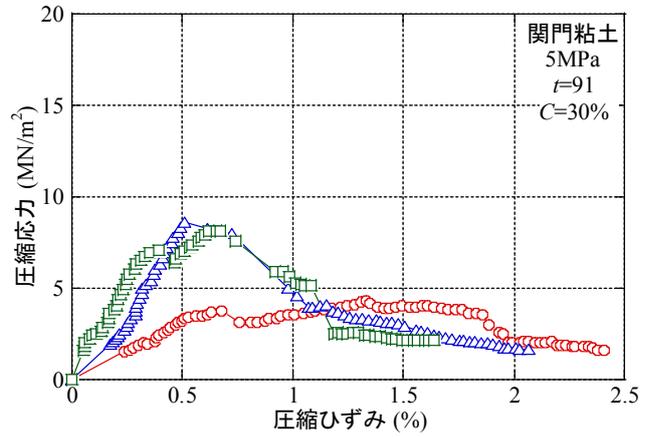


図-4.24 固化材添加率 C=30% 20°C

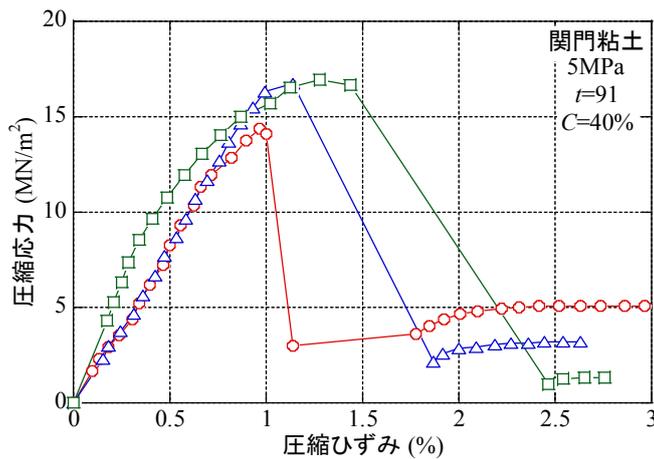


図-4.25 固化材添加率 C=40% 20°C

図-4.26～図-4.28に40℃養生、養生7日、28日、91日の応力ひずみ曲線を示す。

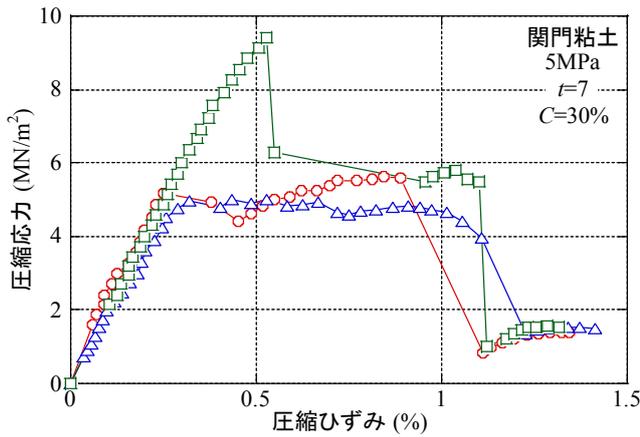


図-4.26 養生日数 $t=7$ 40℃

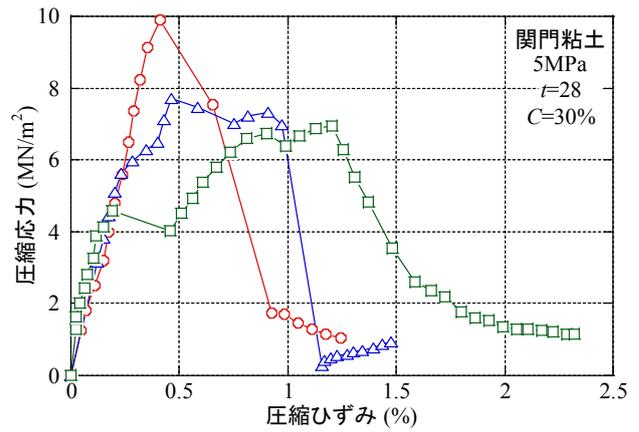


図-4.27 養生日数 $t=28$ 40℃

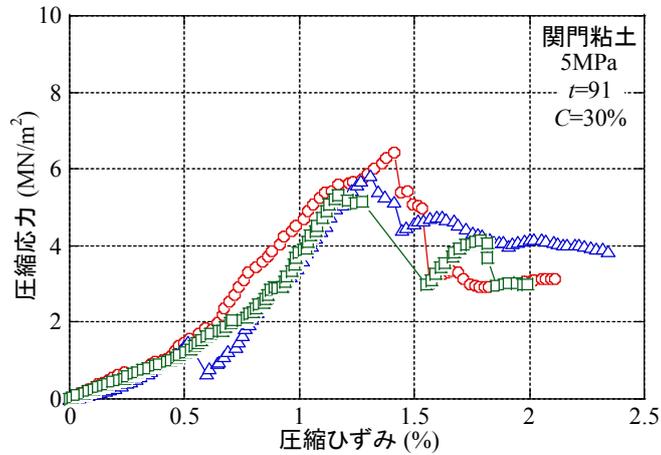


図-4.28 養生日数 $t=91$ 40℃

図-4.29～図-4.31に60℃養生、養生7日、28日、91日の応力ひずみ曲線を示す。

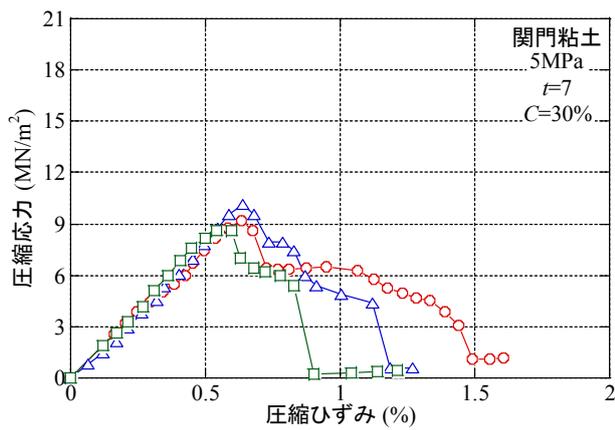


図-4.29 養生日数 $t=7$ 60℃

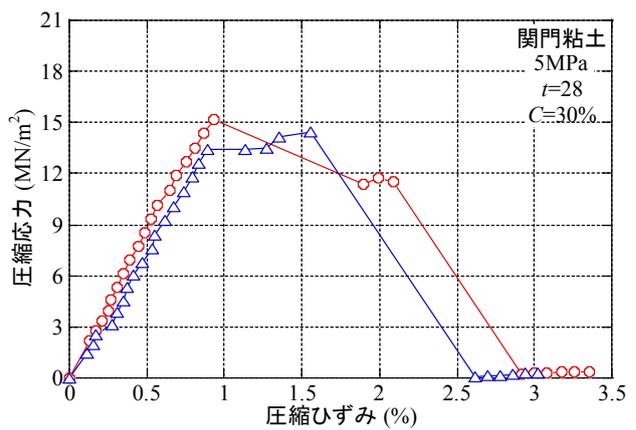


図-4.30 養生日数 $t=28$ 60℃

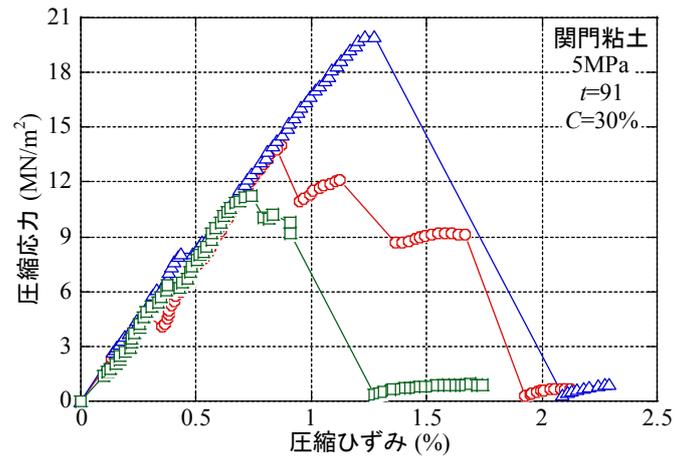


図-4.31 養生日数 $t=91$ 60°C

全てのグラフを通して、同じ固化材添加率、養生日数、養生温度においても、一軸圧縮強度に大きな誤差が見られるものもある。これは、浚渫された粘土に固化材を添加し圧密することによって、コンクリートと同等の強度を発揮することができることで、破壊する際は縦割れ、引っ張り破壊することによって生じるものと考えられる。また、縦割れ、引っ張り破壊が生じることによって、強度の大きいものに関しては、ピーク強度を迎えたのち、直ちに圧縮応力が減少している。

破壊ひずみに関しては、多少のばらつきはあるものの $0.5\% \sim 1.0\%$ であり、固化材添加率養生日数、養生温度による違いはないと考えられる。

各実験ケースにおける一軸圧縮試験結果の値を以下の表-4.8、表-4.9 にまとめた。

表-4.8 一軸圧縮試験結果-1

固化材添加率 C (%)	養生温度 (°C)	養生日数 t (days)	一軸圧縮強さ q_u (MN/m ²)	含水比 w (%)	破壊ひずみ ϵ (%)	水セメント重量比 w/c
10	20	7	1.32	56.45	0.48	5.65
10	20	7	0.66	49.13	0.32	4.91
10	20	7	0.75	48.00	0.72	4.80
10	20	28	1.47	49.32	0.40	4.93
10	20	28	1.83	45.59	0.31	4.56
10	20	28	2.53	59.87	0.44	5.99
10	20	91	—	32.63	—	1.63
10	20	91	—	39.87	—	1.99
10	20	91	—	—	—	—
10	60	7	4.55	48.23	0.89	4.82
10	60	7	4.26	51.48	1.01	5.15
10	60	7	—	—	—	—
20	20	7	3.79	48.98	0.64	2.45
20	20	7	3.04	50.27	0.70	2.51
20	20	7	—	—	—	—
20	20	28	6.89	43.11	0.89	2.16
20	20	28	6.51	42.90	0.32	2.15
20	20	28	4.13	45.15	0.58	2.26
20	20	91	15.03	39.83	0.74	1.99
20	20	91	18.58	50.80	0.69	2.54
20	20	91	10.01	60.80	0.46	3.04
20	60	7	12.46	46.39	1.12	2.32
20	60	7	8.80	42.54	0.93	2.13
20	60	7	—	—	—	—
30	20	7	6.73	51.53	0.87	1.72
30	20	7	4.59	60.65	0.52	2.02
30	20	7	—	—	—	—
30	20	28	10.71	50.99	0.82	1.70
30	20	28	11.84	50.50	1.01	1.68
30	20	28	13.20	47.29	0.81	1.58
30	20	91	4.28	40.70	2.15	1.36
30	20	91	8.61	40.10	0.67	1.34
30	20	91	8.14	38.45	0.75	1.28
30	40	7	5.62	42.41	0.96	1.41
30	40	7	5.02	41.26	0.49	1.38
30	40	7	9.43	41.71	0.79	1.39
30	40	28	9.90	40.07	0.59	1.34
30	40	28	7.69	40.89	0.60	1.36
30	40	28	6.96	43.75	1.26	1.46
30	40	91	6.42	41.30	1.41	1.38
30	40	91	5.82	35.50	1.31	1.18
30	40	91	5.13	38.13	1.27	1.27
30	60	7	9.19	45.76	0.97	1.53
30	60	7	8.80	56.06	0.93	1.87
30	60	7	8.61	51.30	0.73	1.71
30	60	28	15.18	39.51	1.12	1.32
30	60	28	14.47	41.57	1.83	1.39
30	60	28	—	—	—	—
30	60	91	13.98	40.77	1.01	1.36
30	60	91	20.01	35.16	1.49	1.17
30	60	91	11.21	38.06	0.84	1.27
40	20	7	8.26	40.68	1.05	1.017
40	20	7	5.80	40.38	1.97	1.009
40	20	7	—	—	—	—
40	20	28	9.43	33.20	0.92	0.83
40	20	28	8.46	38.89	0.67	0.97
40	20	28	6.73	54.47	0.60	1.36
40	20	91	14.35	40.76	1.52	1.02
40	20	91	16.76	45.35	1.53	1.13
40	20	91	16.98	34.13	2.14	0.85
40	60	91	14.71	40.37	0.80	1.01
40	60	91	10.34	41.35	0.75	1.03
40	60	91	16.04	41.60	1.02	1.04

表-4.9 一軸壓縮試驗結果-2

固化材添加率 C (%)	養生温度 (°C)	養生日数 t (days)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	間隙比 e	変形係数 E_{50} (MN/m ²)
10	20	7	1.707	1.091	1.472	454.65
10	20	7	1.734	1.163	1.320	237.32
10	20	7	1.709	1.155	1.335	165.35
10	20	28	1.735	1.162	1.321	317.27
10	20	28	1.685	1.157	1.330	532.01
10	20	28	1.714	1.072	1.516	691.84
10	20	91	1.624	1.224	1.203	—
10	20	91	1.569	1.122	1.404	—
10	20	91	—	—	—	—
10	60	7	1.713	1.156	1.334	543.95
10	60	7	1.695	1.119	1.410	661.60
10	60	7	—	—	—	—
20	20	7	1.750	1.175	1.296	839.34
20	20	7	1.723	1.147	1.352	761.31
20	20	7	—	—	—	—
20	20	28	1.765	1.233	1.187	1435.82
20	20	28	1.762	1.233	1.188	2820.32
20	20	28	1.741	1.200	1.248	1920.00
20	20	91	1.794	1.283	1.103	4060.51
20	20	91	1.690	1.121	1.406	4844.11
20	20	91	1.630	1.014	1.660	3121.96
20	60	7	1.698	1.160	1.325	1490.92
20	60	7	1.734	1.217	1.217	1605.89
20	60	7	—	—	—	—
30	20	7	1.741	1.149	1.348	897.00
30	20	7	1.635	1.018	1.649	899.53
30	20	7	—	—	—	—
30	20	28	1.732	1.147	1.352	1560.02
30	20	28	1.739	1.155	1.334	1434.59
30	20	28	1.744	1.184	1.277	1834.35
30	20	91	1.745	1.241	1.174	608.06
30	20	91	1.795	1.281	1.105	1435.00
30	20	91	1.794	1.296	1.081	2035.00
30	40	7	1.733	1.217	1.216	2422.59
30	40	7	1.764	1.249	1.159	1753.71
30	40	7	1.760	1.242	1.171	1988.48
30	40	28	1.783	1.273	1.119	2339.70
30	40	28	1.781	1.264	1.134	2537.47
30	40	28	1.758	1.223	1.206	3268.22
30	40	91	1.718	1.216	1.218	421.71
30	40	91	1.753	1.294	1.084	709.76
30	40	91	1.763	1.276	1.113	309.30
30	60	7	1.684	1.155	1.334	1497.11
30	60	7	1.696	1.087	1.482	1558.46
30	60	7	1.693	1.119	1.410	1577.83
30	60	28	1.739	1.246	1.164	1725.05
30	60	28	1.750	1.236	1.182	1431.72
30	60	28	—	—	—	—
30	60	91	1.827	1.298	1.078	1456.56
30	60	91	1.758	1.301	1.074	1640.16
30	60	91	1.760	1.275	1.116	1474.61
40	20	7	1.788	1.271	1.122	1720.19
40	20	7	1.775	1.265	1.132	1208.33
40	20	7	—	—	—	—
40	20	28	1.755	1.318	1.047	1672.04
40	20	28	1.577	1.135	1.375	1606.66
40	20	28	1.559	1.009	1.673	1606.52
40	20	91	1.740	1.236	1.181	1539.60
40	20	91	1.688	1.162	1.322	1632.79
40	20	91	1.780	1.327	1.033	2506.65
40	60	91	1.799	1.281	1.105	2535.86
40	60	91	1.761	1.246	1.165	2609.79
40	60	91	1.758	1.242	1.172	1900.71

(2) 一軸圧縮強度特性

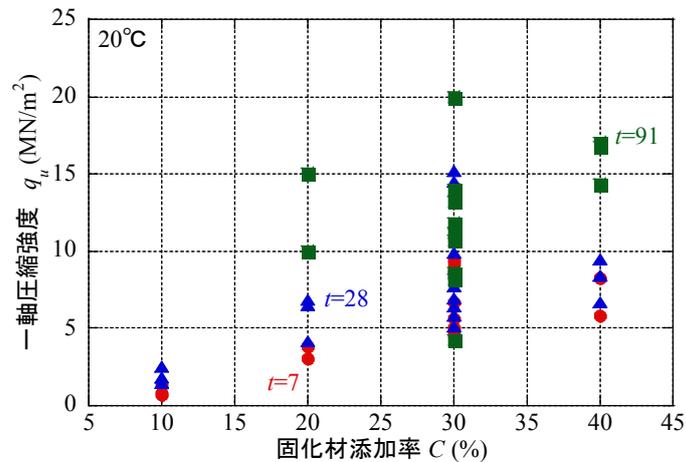


図-4.32 固化材添加率と一軸圧縮強度の関係

図-4.32 に養生温度 20°C、養生日数 7 日、28 日、91 日の固化材添加率と一軸圧縮強度の関係を示す。どの養生日数の条件においても、固化材添加率の増加に伴って一軸圧縮強度が増加していることが分かる。特に固化材添加率が 30%まで増加する過程で、強度増加が大きくなっており、固化材添加率 30%から 40%の増加に関してはわずかな増加、または増加していない結果となった。また、図中の緑色のプロットで示す養生 91 日に着目すると強度に大きなばらつきがみえる。これは、強度が非常に大きくなったことによってコアリングした供試体が縦割れ、引っ張り破壊したためと考えられる。写真-4.33、写真-4.34 に供試体破壊状況を示す。一般的に、粘土に対して一軸圧縮試験を行うと、すべり面が斜めに生じてせん断破壊するが、本研究では固化材を添加し、圧密したため写真に示すような破壊状況となった。



写真-4.33 供試体破壊状況(1)



写真-4.34 供試体破壊状況(2)

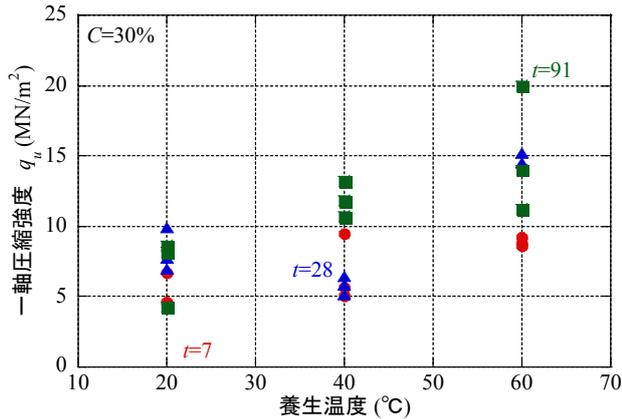


図-4.33 養生温度と一軸圧縮強度の関係

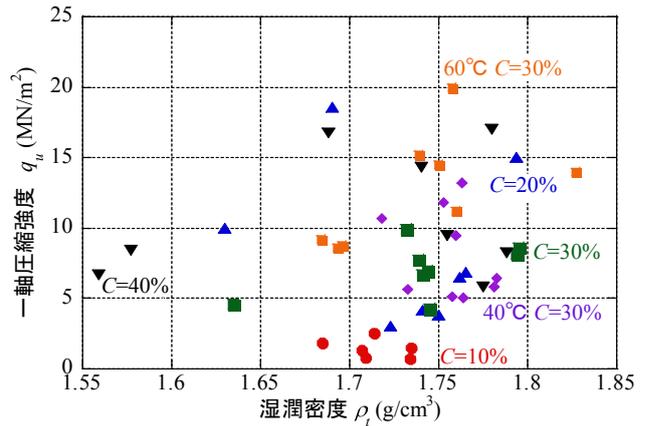


図-4.34 湿潤密度と一軸圧縮強度の関係

図-4.33 に固化材添加率 30%、養生日数 7 日、28 日、91 日の養生温度と一軸圧縮強度の関係を示す。全体的にみると、一軸圧縮強度の値に多少のばらつきはあるが、養生温度の上昇に伴って一軸圧縮強度は増加していることが分かる。これは、養生温度が上昇することによって固化材の固化作用が早まったと考えられる。また、養生日数 91 日で強度増加が一番大きくなっている。したがって、固化材の固化効果を発揮する時間のみではなく、固化作用による強度と養生温度には直接関係性があると考えられる。

図-4.34 に、本研究で行なった室内試験の全ての条件における湿潤密度と一軸圧縮強度の関係を示す。湿潤密度の値は、多少のばらつきはあるが、固化材添加率、養生日数に関わらず、概ね $1.7\text{g/cm}^3 \sim 1.8\text{g/cm}^3$ であった。このことから、本研究では湿潤密度は一軸圧縮強度と直接的に関係性があるとはいえないことが分かった。

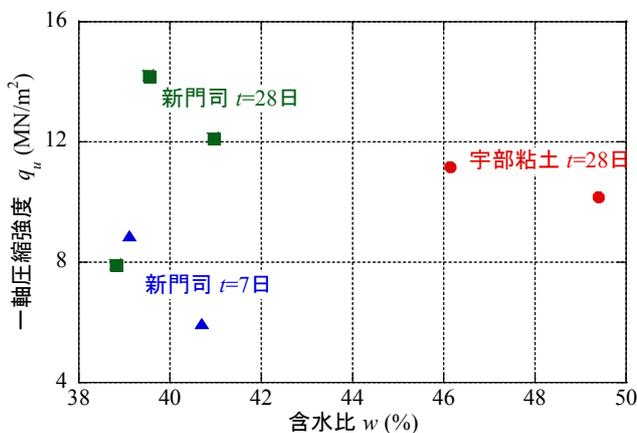


図-4.35 含水比と一軸圧縮強度の関係

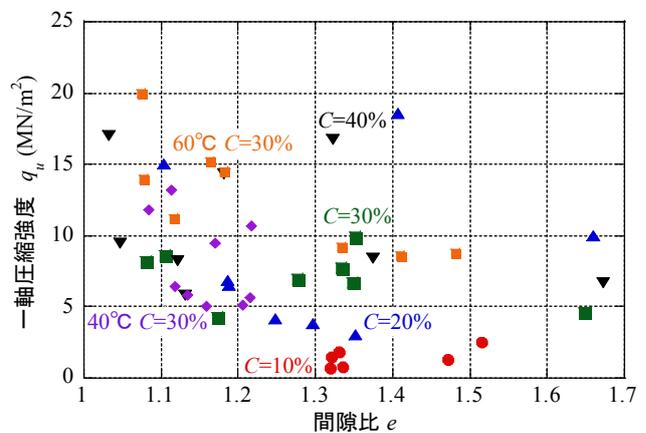


図-4.36 間隙比と一軸圧縮強度の関係

図-4.35 に、本研究で行なった室内試験の全ての条件における含水比と一軸圧縮強度の関係を示す。全ての条件をみると、含水比と一軸圧縮強度の相関はないように見えるが、固化材添加率ごとに着目すると含水比の低下に伴って一軸圧縮強度が増加していることが分かる。これは、固化材の水和反応によってブロック内の水分を利用し固化効果を発揮したためである。また、同じ固化材添加率の条件で、養生温度の増加に伴って含水比が低下し一軸圧縮強度が増加していることが分かる。養生温度が上昇することによって固化材の固化作用がより生じるためであると考えられる。

図-4.36 に本研究で行なった室内試験の全ての条件における間隙比と一軸圧縮強度の関係を示す。間隙

比の値は、固化材添加率、養生日数に関わらず、間隙比の減少に伴って一軸圧縮強度が増加した。ばらつきがあり一概には言えないが、固化材添加率が多いほど、また養生温度が高いほど間隙比が小さくなっている。つまり、図-4.32 で示した固化材添加率の影響、図-4.33 で示した養生温度の影響により、固化材の固化効果が発揮され密なブロックが作製されたと考えられる。

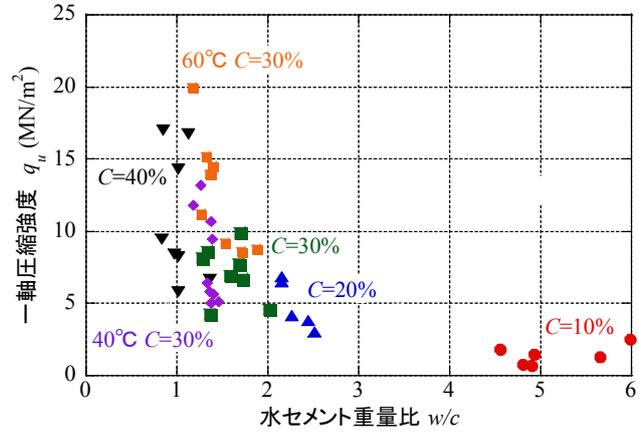


図-4.37 水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係

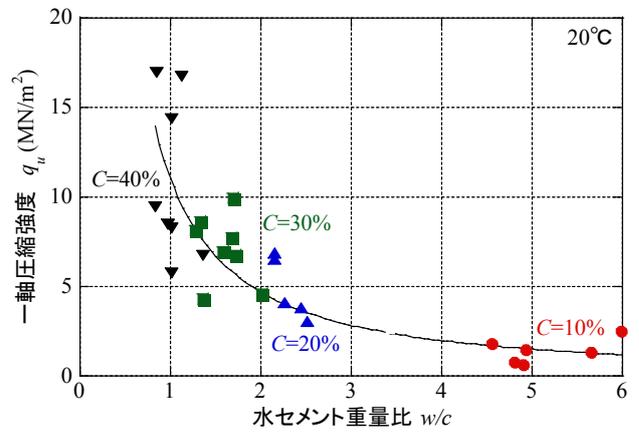


図-4.38 水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係

図-4.37 に、本研究で行なった室内試験の全ての条件における水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係を示す。浚渫土砂ブロックの強度に強い相関性がある簡便な指標²⁾として、供試体内の水分量と添加した固化材の重量比である水セメント重量比を用いた。この関係を以下の式で表すことができる。

$$q_u = \alpha(w/c)^\beta \tag{4.8}$$

ここで、 α は水セメント重量比が 1.0 の時の一軸圧縮強度であり、 β は強度増加率を示す。 w は供試体の含水比、 c は固化材の添加率を示す。

水セメント重量比は、作製したブロック内の含水比と固化材の関係を表しており、図-4.33 で示したように養生温度は一軸圧縮強度の増減に影響するということが明らかとなっているために、以下の図-4.38 に養生温度 20°C のみの水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係を示す。

図中に示す曲線は、固化材添加率 10%~40% の全てのプロットを 1 つの関係式にまとめたものであり、以下の式で表すことができる。

$$q_u = 11.071(w/c)^{-1.2393} \tag{4.9}$$

この式の相関係数は、 $R=0.7966$ であり高い相関を示した。このことから、固化材添加率、養生日数が異なるそれぞれの水セメント重量比と一軸圧縮強さの関係について 1 つの関係式で精度よく推定できることが分かった。また、この式から、高強度のブロックを作製するためには水セメント重量比を小さくすることが重要であることが分かった。

(3) 他の浚渫粘土の一軸圧縮強度特性

宇部粘土、新門司粘土を用いて、室内試験を行った結果を示す。

図-4.39 に、土質材料に宇部粘土を用いた養生温度 20°C、固化材添加率 40%、脱水圧力 5MPa、養生 28 日の応力ひずみ曲線を示す。図-4.40、図-4.41 にそれぞれ、土質材料に新門司粘土を用いた養生温度 20°C、

固化材添加率 40%、脱水圧力 5MPa、養生 7 日、28 日の応力ひずみ曲線を示す。

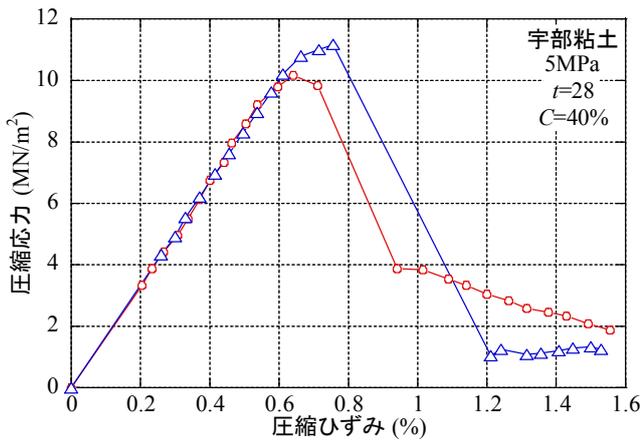


図-4.39 宇部粘土 養生日数 $t=28$

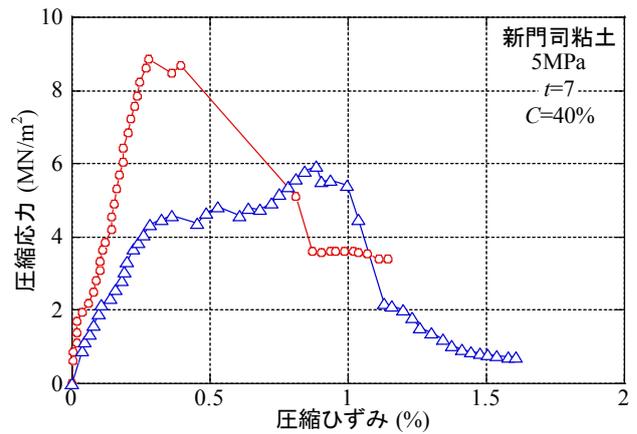


図-4.40 新門司粘土 養生日数 $t=7$

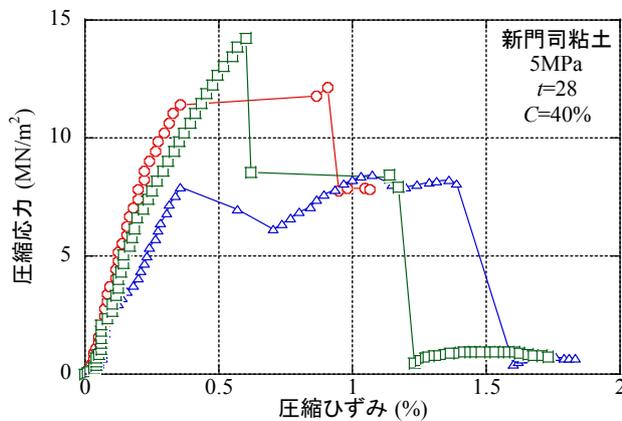


図-4.41 新門司粘土 養生日数 $t=28$

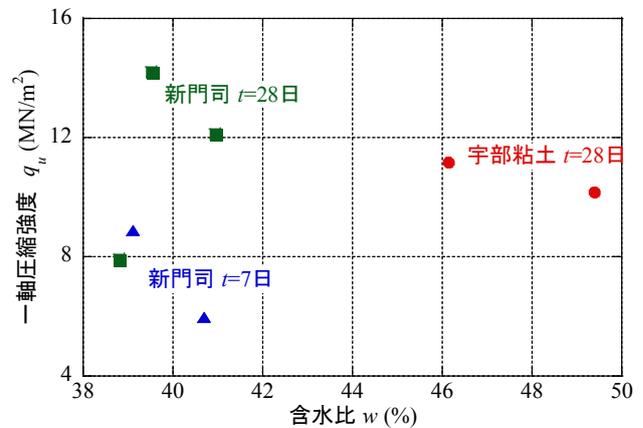


図-4.42 含水比と一軸圧縮強度の関係

土質材料に新門司粘土を用いた同じ条件のものと比較すると、養生 28 日において破壊ひずみは 0.6%程度と概ね同じ値を示した。また、一軸圧縮強度に関しても若干の違いはあるが約 10MN/m^2 と、この値も概ね同じ値を示した。つまり、土質材料の違いによる一軸圧縮強度への影響はほぼないと考えられる。また、ピーク強度後には直ちに強度が減少している。これも土質試料の影響は考えられず、縦割れ、引っ張り破壊が生じたためであると考えられる。

図-4.42 に、土質試料に宇部粘土、新門司粘土を用いた含水比と一軸圧縮強度の関係を示す。プロット数が少なく十分なデータではないと考えられるが、含水比は 40%~50%程度であり、土質試料に新門司粘土を用いた場合とさほど違いはないと考えられる。

4.2.4 まとめ

室内試験として定圧荷重試験を行った際の脱水特性について評価考察を行なった。さらに、定圧荷重試験によって作製された供試体を所定期間養生したのちに、一軸圧縮試験を行い、強度特性についても評価考察を行なった。得られた結論について以下に示す。

- ・脱水特性

- 1) 最終圧密沈下量に関しては、固化材添加量の違いによって変化することはなかったが、圧密終了時間に関しては、固化材添加量の増加に伴って短くなった。これは、添加した固化材によって小さな団粒ができ透水性が増したためと考えられる。
- 2) 5MPa の圧力で圧密を行なうことによって減容化率 40%を上回り、圧密することによって体積を半分近くまで減少させることができることが分かった。

・強度特性

- 1) 固化材添加率の増加、養生温度の上昇に伴って、一軸圧縮強度は増加する傾向を示した。これらの要因として含水比、間隙比が影響していると考えられる。
- 2) 本研究で行なった室内試験では、水セメント重量比と一軸圧縮強度には強い相関が見られ、以下の式で表すことが出来た。

$$q_u = 11.071 (w/c)^{-1.2393} \quad (4.9)$$

- 3) 土質試料の違いによる強度特性への影響は、今回の室内試験の条件においてはほぼないと考えられる。

参考文献

- 1) 勝又正治、滝口健一、清水英樹、安田昭彦、大林成行:高含水建設搬出土の改良システムの開発, 土木学会論文集, No.560/VI-34, pp.117-129,1997.
- 2) 土田孝, 湯怡新, 嶋川奈津美, 安部太紀 : 高含水比の海成粘土を原料土とするセメント固化処理土の強度発現過程に関する研究, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.1, pp.53-70, 2013.

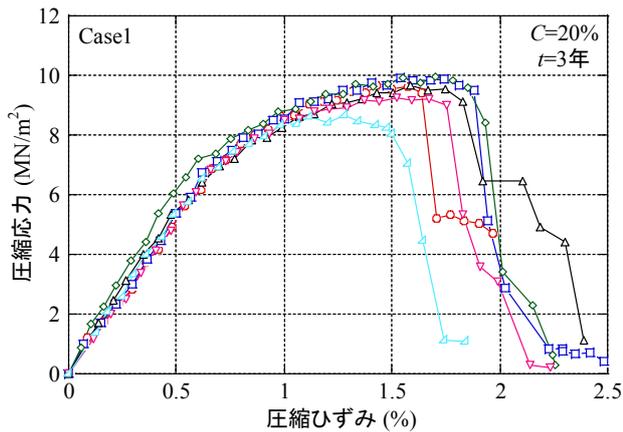


図-4.43 応力ひずみ曲線 (Case1)

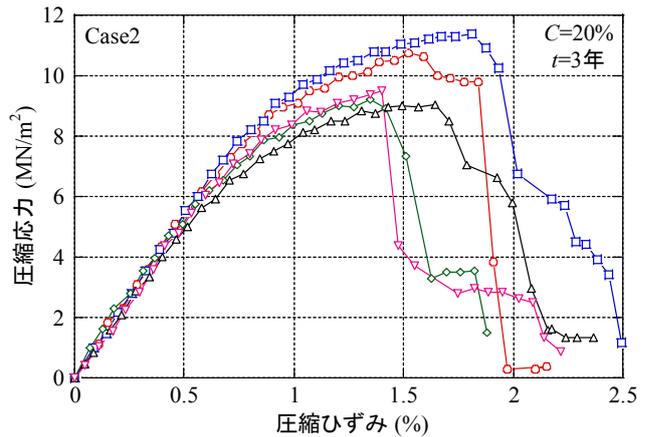


図-4.44 応力ひずみ曲線 (Case2)

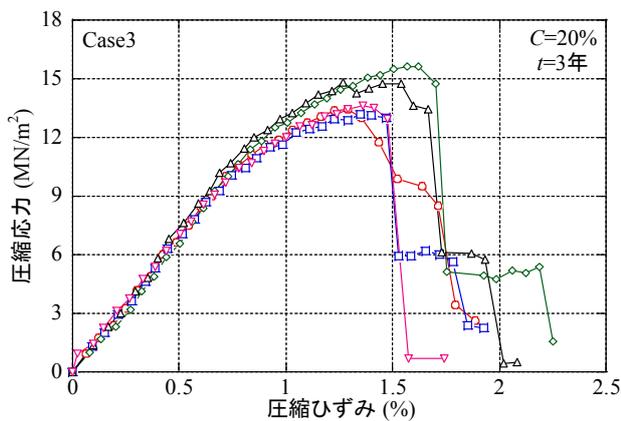


図-4.45 応力ひずみ曲線 (Case3)

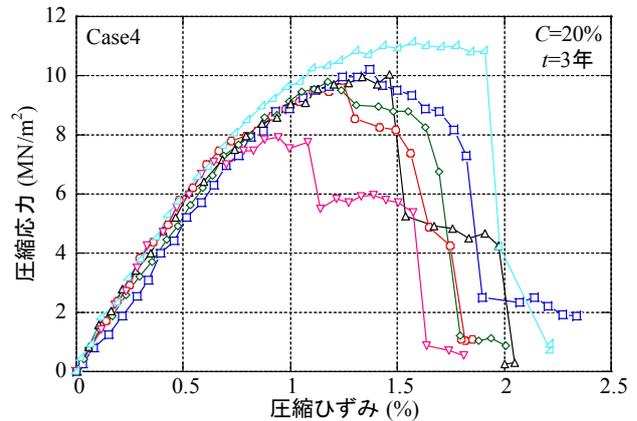


図-4.46 応力ひずみ曲線 (Case4)

4.3 脱水固化装置を用いて作製したブロックの強度特性

4.3.1 はじめに

本章では、脱水固化装置を用いて作製した浚渫土砂ブロックの一軸圧縮強度特性について評価した。このブロックの脱水特性に関しては、既往の研究¹⁾で考察が行なわれているため、本章には掲載していない。また、一軸圧縮強度特性の中でも、養生日数、作製後のブロックの高さの違いによる一軸圧縮強度への影響、ブロックの含水比、湿潤密度、間隙比等について評価、考察を行なった。

4.3.2 強度特性

(1) 応力ひずみ曲線

図-4.43 に固化材添加率 20%、養生 3 年、Case1 (供試体高さ : 100mm) のブロックからコアリングを行った供試体の応力ひずみ曲線を示す。図-4.44 に固化材添加率 20%、養生 3 年、Case2 (供試体高さ : 155mm) のブロックからコアリングを行った供試体の応力ひずみ曲線を示す。図-4.45 に固化材添加率 20%、養生 3 年、Case3 (供試体高さ : 110mm) のブロックからコアリングを行った供試体の応力ひずみ曲線を示す。図-4.46 に固化材添加率 20%、養生 3 年、Case4 (供試体高さ : 140mm) のブロックからコアリングを行った供試体の応力ひずみ曲線を示す。

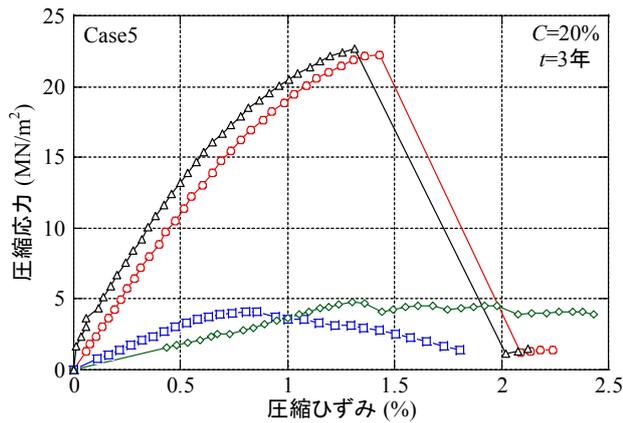


図-4.47 応力ひずみ曲線 (Case5)

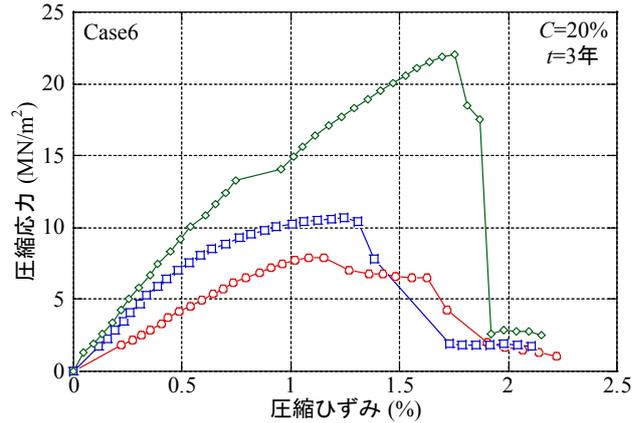


図-4.48 応力ひずみ曲線 (Case6)

図-4.47 に固化材添加率 20%、養生 3 年、Case5 (供試体高さ : 107mm) のブロックからコアリングを行った供試体の応力ひずみ曲線を示す。図-4.48 に固化材添加率 20%、養生 3 年、Case6 (供試体高さ : 130mm) のブロックからコアリングを行った供試体の応力ひずみ曲線を示す。

図-4.43～図-4.48 より、多少のずれはあるが、全てのグラフの破壊ひずみは約 1.5%程度であった。固化材添加率 20%と全ての条件は同じであったが、圧密終了時の供試体高さは大きく異なっており、これが原因で一軸圧縮強度にも大きな違いが見られたと考えられる。

また、Case ごとにみても一軸圧縮強度には大きな違いがある。これは、一軸圧縮強度は非常に大きく、破壊する際は縦割れ、引っ張り破壊することによって生じるものと考えられる。さらに、以下の写真-4.35、写真-4.36 に示すように、脱水固化装置で作製したブロックからコアリングを行い、抜いた供試体を一軸圧縮試験したため、コアリングした場所の違いによる一軸圧縮強度の違いが出たのも要因の 1 つと考えられる。



写真-4.35 コアリング後のブロック
(Case5)



写真-4.36 コアリング後のブロック
(Case6)

各実験ケースにおける養生日数3年の一軸圧縮試験結果、Case1～Case3を表-4.10に、Case4～Case6を表-4.11に示す。

表-4.10 一軸圧縮試験結果 (養生日数3年)-1

Case	ブロック高さ(mm)	養生日数(年)	一軸圧縮強度(MPa)	含水比(%)	湿潤密度(g/cm ³)	乾燥密度(g/cm ³)	重量(g)	水セメント重量比
1	100	0.5	7.174	55.33	1.641	1.057	295.27	2.77
			6.145	58.12	1.632	1.032	285.06	2.91
			6.006	57.42	1.624	1.032	289.00	2.87
			7.697	57.22	1.641	1.044	289.28	2.86
			7.366	55.67	1.638	1.052	297.52	2.78
		1	6.183	56.34	1.634	1.045	293.72	2.82
			7.703	57.33	1.620	1.030	290.74	2.87
			8.141	56.79	1.634	1.042	291.69	2.84
			6.029	57.68	1.627	1.032	286.38	2.88
			7.697	56.69	1.634	1.043	295.39	2.83
		3	9.649	54.30	1.640	1.063	287.65	2.71
			9.881	55.26	1.643	1.059	280.63	2.76
			9.965	54.93	1.648	1.063	272.48	2.75
			9.066	54.46	1.650	1.068	270.70	2.72
			9.266	55.75	1.640	1.053	273.42	2.79
8.664	55.64	1.647	1.058	286.88	2.78			
2	155	0.5	4.361	82.97	1.500	0.820	283.25	4.15
			4.277	77.12	1.509	0.852	287.15	3.86
			3.702	77.48	1.511	0.851	275.91	3.87
			5.435	72.61	1.526	0.884	296.03	3.63
			5.799	79.60	1.510	0.841	287.84	3.98
		1	7.471	68.89	1.577	0.934	278.24	3.44
			6.352	74.10	1.525	0.876	268.97	3.71
			7.675	68.73	1.566	0.928	289.19	3.44
			5.416	78.51	1.519	0.851	267.36	3.93
			7.728	68.49	1.566	0.929	292.38	3.42
		3	5.031	67.84	1.564	0.932	295.03	3.39
			10.744	54.32	1.608	1.042	301.02	2.72
			11.375	54.79	1.616	1.044	297.82	2.74
			9.215	58.24	1.595	1.008	295.90	2.91
			9.042	63.37	1.578	0.966	287.37	3.17
9.492	59.05	1.600	1.006	281.02	2.95			
3	110	0.5	13.618	42.79	1.752	1.227	316.89	2.14
			12.413	42.36	1.756	1.233	339.35	2.12
			12.612	41.78	1.755	1.238	338.70	2.09
			1.188	44.49	1.728	1.196	338.35	2.22
			11.080	42.50	1.763	1.237	343.78	2.12
		1	11.000	43.81	1.749	1.216	334.30	2.19
			11.715	44.00	1.717	1.192	323.01	2.20
			10.738	43.44	1.726	1.203	324.18	2.17
			12.887	40.51	1.753	1.248	332.48	2.03
			12.935	41.55	1.745	1.232	331.29	2.08
		3	9.103	45.88	1.707	1.170	313.42	2.29
			12.162	42.27	1.746	1.227	315.23	2.11
			13.448	35.52	1.769	1.305	338.31	1.78
			13.183	42.45	1.723	1.210	314.26	2.12
			15.611	38.56	1.763	1.272	334.35	1.93
14.756	38.86	1.756	1.265	331.27	1.94			
13.361	37.76	1.757	1.275	336.31	1.89			

表-4.11 一軸圧縮試験結果 (養生日数 3 年) -2

Case	ブロック高さ(mm)	養生日数(年)	一軸圧縮強度(MPa)	含水比(%)	湿潤密度(g/cm ³)	乾燥密度(g/cm ³)	重量(g)	水セメント重量比
4	140	0.5	9.168	59.09	1.629	1.024	292.86	2.95
			6.246	57.63	1.632	1.035	302.20	2.88
			9.021	58.71	1.630	1.027	301.44	2.94
			7.886	57.61	1.634	1.036	319.91	2.88
			9.261	57.25	1.635	1.040	291.38	2.86
		6.174	58.67	1.629	1.026	297.26	2.93	
		8.245	55.33	1.641	1.057	295.27	2.77	
		6.298	58.12	1.632	1.032	285.06	2.91	
		7.860	57.42	1.624	1.032	289.00	2.87	
		9.237	57.22	1.641	1.044	289.28	2.86	
		8.839	55.67	1.638	1.052	297.52	2.78	
		9.215	55.33	1.641	1.057	295.27	2.77	
		9.826	53.01	1.637	1.070	305.68	2.65	
		10.194	56.13	1.637	1.049	300.44	2.81	
		9.799	54.17	1.638	1.062	313.43	2.71	
10.031	56.48	1.639	1.047	303.04	2.82			
7.902	54.95	1.640	1.059	311.87	2.75			
11.147	54.59	1.636	1.058	305.92	2.73			
5	107	0.5	9.666	34.53	1.848	1.374	356.60	1.73
			9.750	35.91	1.832	1.348	349.40	1.80
			8.597	34.63	1.842	1.368	360.00	1.73
			10.083	35.26	1.838	1.359	353.67	1.76
			10.286	35.17	1.841	1.362	344.65	1.76
		10.186	36.68	1.823	1.334	355.06	1.83	
		19.825	33.94	1.848	1.380	333.64	1.70	
		19.185	34.79	1.834	1.360	327.99	1.74	
		20.170	33.99	1.842	1.375	357.59	1.70	
		19.738	33.65	1.848	1.383	351.60	1.68	
		12.814	33.57	1.842	1.379	354.36	1.68	
		20.613	34.08	1.842	1.374	349.57	1.70	
		17.386	33.16	1.848	1.388	351.63	1.66	
		22.225	32.30	1.858	1.404	372.01	1.62	
		4.075	64.48	1.578	0.959	290.54	3.22	
4.545	47.57	1.684	1.141	321.86	2.38			
22.659	32.75	1.843	1.389	372.55	1.64			
6	130	0.5	5.664	55.33	1.720	1.107	312.07	2.77
			5.710	58.12	1.689	1.068	322.85	2.91
			6.306	57.42	1.706	1.146	315.92	2.87
			5.686	57.22	1.688	1.112	313.43	2.86
			5.878	55.33	1.695	1.127	303.58	2.77
		11.312	48.05	1.641	1.057	295.27	2.40	
		5.738	51.51	1.632	1.032	285.06	2.58	
		12.575	48.92	1.624	1.032	289.00	2.45	
		9.170	51.80	1.641	1.044	289.28	2.59	
		8.274	45.84	1.638	1.052	297.52	2.29	
		10.959	50.35	1.641	1.057	295.27	2.52	
		10.599	55.33	1.641	1.057	295.27	2.77	
		7.902	48.96	1.700	1.141	314.65	2.45	
		10.654	47.49	1.706	1.157	310.97	2.37	
		22.032	32.19	1.863	1.409	375.51	1.61	

また、養生日数 0.5 年、養生日数 1 年の一軸圧縮試験結果を既往の研究から引用し、表-4. 12、表-4. 13 に示す。

表-4. 12 一軸圧縮試験結果 (養生日数 0.5 年)

case	固化材添加率(%)	使用スラリー量(L)	一軸圧縮強度(MPa)	含水比(%)	湿潤密度(g/cm ³)	乾燥密度(g/cm ³)	間隙比	変形係数(MN/m ²)	破壊ひずみ(%)
1	15	55	1.12	90.25	1.48	0.78	2.47	155.45	0.93
			1.65	75.25	1.53	0.88	2.08	273.72	0.77
			0.99	94.00	1.46	0.75	2.57	196.59	0.61
			1.64	79.12	1.53	0.85	2.17	197.92	1.05
			1.95	80.76	1.51	0.84	2.22	257.84	1.18
			1.40	83.89	1.50	0.82	2.30	215.57	0.77
2	20	50	7.17	55.33	1.64	1.06	1.55	1083.47	1.06
			6.14	58.12	1.63	1.03	1.61	882.41	1.03
			6.01	57.42	1.62	1.03	1.61	856.82	0.99
			7.70	57.22	1.64	1.04	1.58	1069.21	1.38
			7.37	55.67	1.64	1.05	1.56	1197.53	1.05
			4.36	82.97	1.50	0.82	2.07	660.74	1.02
3	20	55	4.28	77.12	1.51	0.85	2.17	42202.77	0.63
			3.70	77.48	1.51	0.85	2.17	839.59	0.72
			5.80	79.60	1.51	0.84	2.21	57277.83	0.95
			7.47	68.89	1.58	0.93	1.89	1087.45	1.22
			13.62	42.79	1.75	1.23	1.20	1593.87	1.57
			12.41	42.36	1.76	1.23	1.19	1815.06	1.19
4	20	60	12.61	41.78	1.75	1.24	1.18	1375.34	1.41
			11.08	42.50	1.76	1.24	1.18	1454.95	0.84
			11.00	43.81	1.75	1.22	1.22	1590.44	1.04
			9.17	59.09	1.63	1.02	1.63	1299.84	1.39
			6.25	57.63	1.63	1.04	1.61	1149.62	0.80
			9.02	58.71	1.63	1.03	1.63	1213.11	1.28
5	20	60	7.89	57.61	1.63	1.04	1.60	1049.07	1.19
			9.26	57.25	1.63	1.04	1.59	1289.35	1.42
			6.17	58.67	1.63	1.03	1.63	763.07	1.49
			13.21	47.78	1.69	1.15	1.35	1582.59	1.21
			13.59	47.17	1.69	1.15	1.34	1477.26	1.38
			13.54	49.26	1.70	1.14	1.37	1537.85	1.30
6	25	60	13.95	47.56	1.70	1.15	1.34	1469.14	1.52
			14.12	47.82	1.70	1.15	1.34	1638.97	1.57
			12.16	49.69	1.69	1.13	1.39	1664.70	1.12

表-4. 13 一軸圧縮試験結果 (養生日数 1 年)

case	固化材添加率(%)	供試体厚(mm)	一軸圧縮強度(MPa)	含水比(%)	湿潤密度(g/cm ³)	乾燥密度(g/cm ³)	間隙比	変形係数(MN/m ²)	破壊ひずみ(%)
1	20	100	6.18	56.34	1.63	1.05	1.58	1189.0	1.02
			7.70	57.33	1.62	1.03	1.62	664.02	1.80
			8.14	56.79	1.63	1.04	1.59	1233.4	1.50
			6.03	57.68	1.63	1.03	1.61	685.08	1.07
			7.70	56.69	1.63	1.04	1.59	1069.1	1.19
			6.35	74.10	1.52	0.88	2.08	907.46	1.64
2	20	155	7.67	68.73	1.57	0.93	1.91	892.41	1.68
			5.42	78.51	1.52	0.85	2.17	820.68	1.20
			7.73	68.49	1.57	0.93	1.90	1016.8	1.55
			5.03	67.84	1.56	0.93	1.89	931.72	0.72
			11.71	44.00	1.72	1.19	1.26	1394.6	1.32
			10.74	43.44	1.73	1.20	1.24	1376.7	0.97
3	20	110	12.89	40.51	1.75	1.25	1.16	1571.6	1.21
			12.94	41.55	1.74	1.23	1.19	1577.5	1.51
			9.10	45.88	1.71	1.17	1.30	1300.4	0.83
			12.16	42.27	1.75	1.23	1.20	1447.9	1.28
			8.29	58.35	1.61	1.02	1.65	845.77	1.42
			6.30	57.52	1.62	1.03	1.62	1049.6	0.90
4	20	140	7.86	57.42	1.62	1.03	1.61	913.99	1.07
			9.24	58.10	1.62	1.03	1.63	1215.4	1.25
			8.84	57.88	1.62	1.03	1.63	982.06	1.56
			9.21	56.87	1.63	1.04	1.60	1245.2	1.23
			19.82	33.94	1.85	1.38	0.95	2109.0	1.34
			19.19	34.79	1.83	1.36	0.98	2131.7	1.36
5	20	107	20.17	33.99	1.84	1.37	0.96	2058.1	1.38
			19.74	33.65	1.85	1.38	0.95	2243.0	1.25
			20.61	34.08	1.84	1.37	0.96	2290.4	1.37
			17.39	33.16	1.85	1.39	0.94	2287.6	0.92
			11.31	45.05	1.73	1.19	1.27	1616.1	1.33
			12.58	43.22	1.74	1.22	1.21	1571.9	1.51
6	20	130	9.17	45.83	1.65	1.13	1.38	1528.3	0.88
			8.27	50.66	1.69	1.12	1.41	1088.7	1.00
			10.96	46.60	1.71	1.17	1.31	1369.9	1.40
			10.60	44.85	1.73	1.20	1.25	1514.1	1.13

(2) 一軸圧縮強度特性

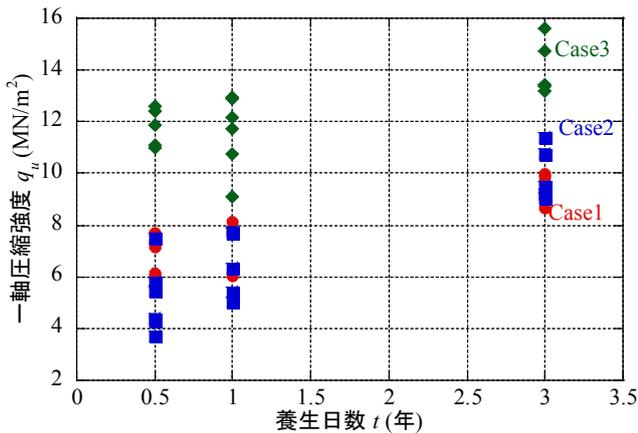


図-4.49 養生日数と一軸圧縮強度 (Case1~Case3)

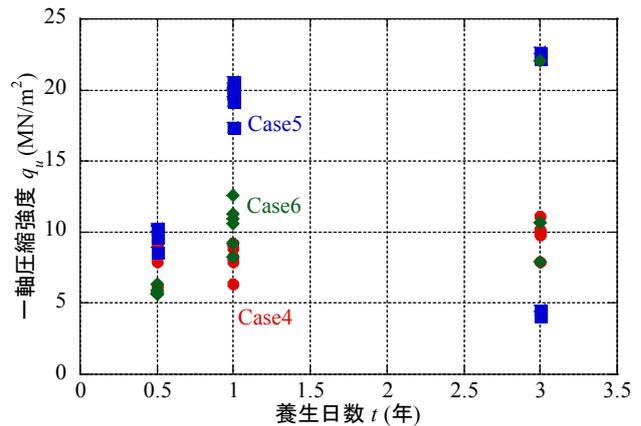


図-4.50 養生日数と一軸圧縮強度 (Case4~Case6)

図-4.49、図-4.50 にそれぞれ Case1~3、Case4~Case6 の養生日数と一軸圧縮強度の関係を示す。多少のばらつきはあるものの、養生日数の経過に伴い、一軸圧縮強度は増加した。Case3 は、養生日数 0.5 年から一軸圧縮強度が約 12MN/m² でありその後は養生日数 3 年まで徐々に増加したのに対して、Case5 では、養生日数 0.5 年で約 11MN/m² と Case3 と同等の値を示したが、養生日数 1 年では約 20MN/m² となり 0.5 年間の間に倍程度大きくなったことが分かった。このような養生日数の経過に伴う強度増加の違いは、作製したブロックの高さの違いによるものも考えられる。さらに、ブロックを作製した時期に関しても異なり、8 月と 10 月末では平均気温が 10 度程度異なり、温度の違いも要因であると考えられる。

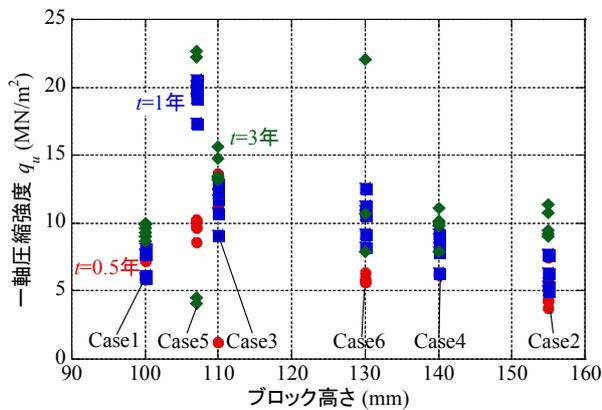


図-4.51 ブロック高さで一軸圧縮強度

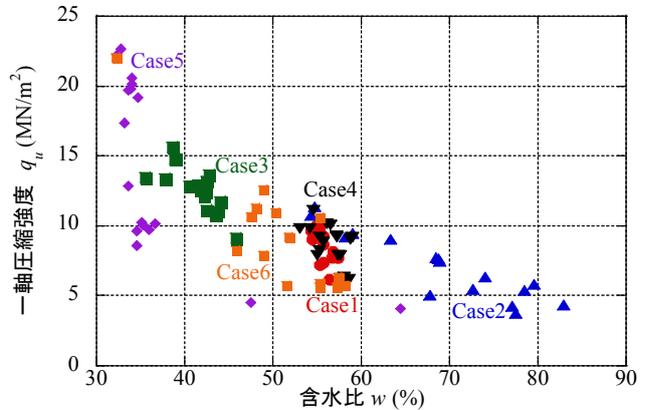


図-4.52 含水比と一軸圧縮強度

図-4.51 に Case1~Case6 のブロック作製時の高さで一軸圧縮強度の関係を示す。ブロックの高さの違いは、一軸圧縮強度が異なる要因の 1 つと考えられると示したが、図をみても分かるように、ブロック高さで一軸圧縮強度の関係には相関があるわけではないことが分かった。

図-4.52 に Case1~Case6 の含水比と一軸圧縮強度の関係を示す。全ての条件において、含水比の低下に伴って、一軸圧縮強度が大きくなった。また、Case2 では養生日数 0.5 年のとき含水比は約 80%であり養生日数 3 年の時には含水比約 55%と 35%減少し、その際一軸圧縮強度は約 5MN/m² 大きくなった。それに対して、Case5 では養生日数 0.5 年のとき含水比は約 35%であり養生日数 3 年の時には含水比約 22%と 13%減少し、その際一軸圧縮強度は約 12MN/m² 大きくなった。このことから、養生日数が短い時点で含水比が低いほうがより強度増加しやすいと考えられる。また、養生日数が短い時点で含水比が低いほ

うが圧密されより排水されたため、強度増加しやすかったと考えられる。

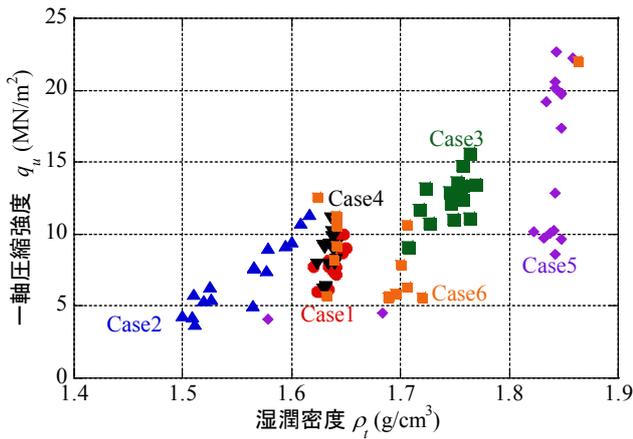


図-4.53 湿潤密度と一軸圧縮強度

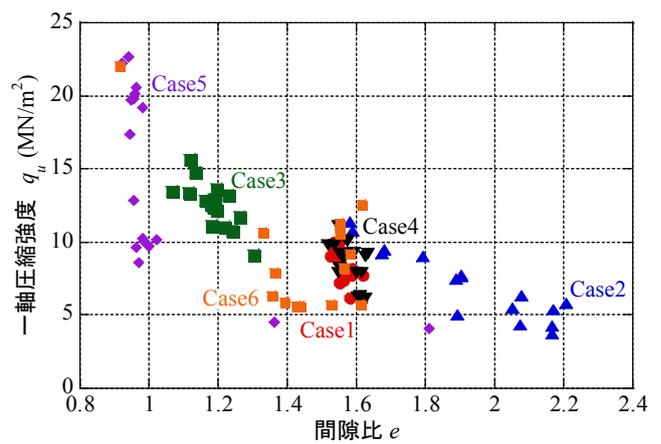


図-4.54 間隙比と一軸圧縮強度

図-4.53 に Case1～Case6 の湿潤密度と一軸圧縮強度の関係を示す。全ての Case をみても、Case ごとにみても、湿潤密度の増加に伴って一軸圧縮強度は増加した。Case2 の一番大きな一軸圧縮強度のときの湿潤密度と、Case5 の一番大きな一軸圧縮強度のときの湿潤密度を比較すると、約 10MN/m^2 で 0.2g/cm^3 異なることが分かる。湿潤密度が大きくなることによってより密なブロックが作製され一軸圧縮強度が大きくなることが分かった。

図-4.54 に Case1～Case6 の間隙比と一軸圧縮強度の関係を示す。こちらのグラフは、図-4.52 に示す含水比のグラフと傾向が似ており、図-4.53 に示す湿潤密度のグラフと反対の傾向を示すことがわかった。

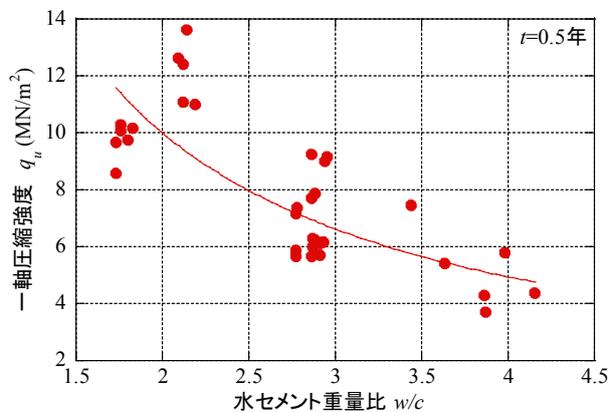


図-4.55 水セメント重量比と一軸圧縮強度 $t=0.5$ 年

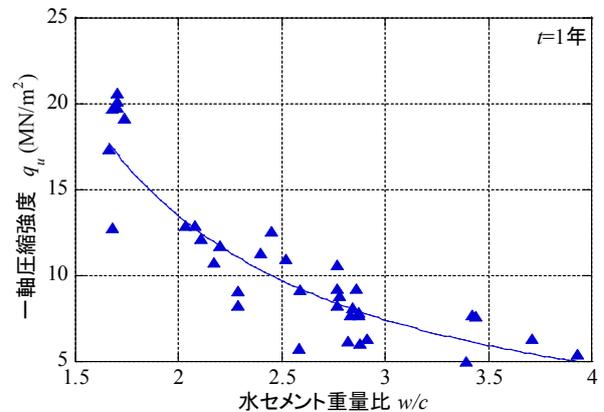


図-4.56 水セメント重量比と一軸圧縮強度 $t=1$ 年

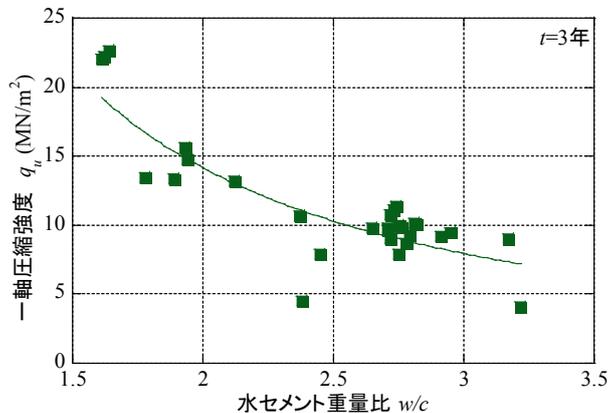


図-4.57 水セメント重量比と一軸圧縮強度 $t=3$ 年

図-4.55～図-4.57に、Case1～Case6の養生日数ごとの水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係を示す。

$$q_u = \alpha(w/c)^\beta \quad (4.10)$$

養生日数ごとに関係式を作成するとそれぞれ以下のようなになる。

$$q_u = 20.211(w/c)^{-1.016} \quad (4.11)$$

$$q_u = 37.261(w/c)^{-1.468} \quad (4.12)$$

$$q_u = 37.868(w/c)^{-1.421} \quad (4.13)$$

3つの式の相関係数はそれぞれ $R=0.74769$ 、 $R=0.91594$ 、 $R=0.88052$ となり高い相関性を示した。また、式4.10の α は水セメント重量比が1.0の時の一軸圧縮強さを表しており、3つの式を比較すると養生日数0.5年では約20であったのに対して養生日数1年、3年では約37となった。さらに、式4.10の β は強度増加率を表しており、養生日数0.5年では約1であったのに対して、養生日数1年、3年では1.4であった。したがって、以前のグラフでも示したように、養生日数に経過に伴って一軸圧縮強度は増加し、強度増加率も大きくなることが分かった。

また、養生日数に関係なく全てのプロットを示したものを以下の図-4.58に示す。

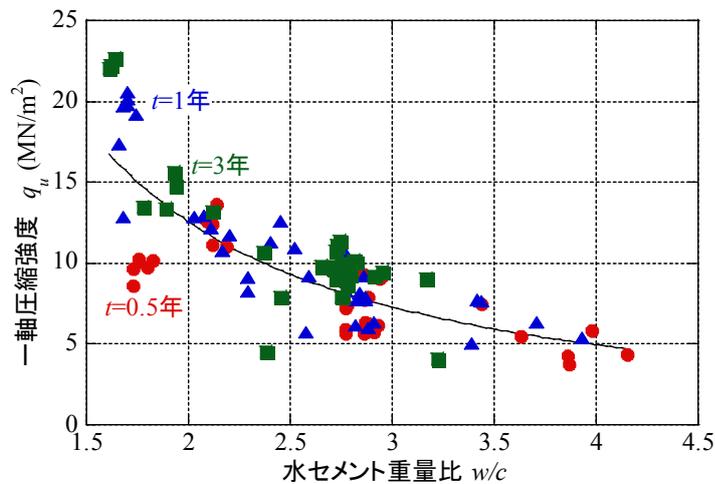


図-4.58 水セメント重量比と一軸圧縮強度

図中に示す曲線は、全てのプロットを1つの関係式にまとめたものであり以下の式で表すことができる。

$$q_u = 31.770(w/c)^{-1.3397} \quad (4.14)$$

この式の相関係数は、 $R=0.81835$ であり、高い相関を示した。このことから、養生日数が異なるそれぞれの水セメント重量比と一軸圧縮強さの関係について1つの関係式で精度よく表すことができることが分かった。また、この式から、高強度のブロックを作製するためには水セメント重量比を小さくすることが重要であることが分かった。

4.3.3 まとめ

本章では、脱水固化装置を用いて作製した浚渫土砂ブロックの強度特性について評価考察を行なった。得られた結論について以下に示す。

・応力ひずみ曲線

- 1) 応力ひずみ曲線より、多少のばらつきはあるものの、全てのグラフの破壊ひずみは約 1.5%程度であった。
- 2) 一軸圧縮強度は、全て等しい固化材添加率 20%であったが、Case ごとに大きな強度の違いがあった。これは、圧密終了時のブロックの高さの違いによるものと考えられる。

・一軸圧縮強度

- 1) 多少のばらつきはあるものの、養生日数の経過に伴い、一軸圧縮強度は増加し、含水比は低下した。また、一軸圧縮強度の増加に伴って湿潤密度は増加し、間隙比は減少する傾向を示した。
- 2) 脱水固化装置を用いて作製したブロックの水セメント重量比と一軸圧縮強度には強い相関が見られ、養生日数 7 日、28 日、91 日の結果をまとめて、以下の 1 つの式で表すことが出来た。

$$q_u = 31.770 (w/c)^{-1.3397} \quad (4.14)$$

相関係数は $R=0.81835$ と高い相関を示し、この式で精度良く表すことが出来ることが分かった。

参考文献

- 1) 堂本佳世：浚渫土砂ブロックの材料特性と道路舗装への活用に関する研究，九州大学修士論文，2017.

4.4 作製および養生温度に着目した高圧脱水固化処理土の強度特性

4.4.1 はじめに

本章では、室内試験として行った定圧载荷試験、含水比試験および強熱減量試験の結果を示す。作製した供試体を所定期間養生し試験を行うことで、養生日数、作製・養生温度の違いによる含水比、強熱減量および一軸圧縮強さへの影響を評価した。

大まかな内容は、以下のようになる。

4.4.2 圧密沈下特性

4.4.3 含水比、強熱減量試験

4.4.4 一軸圧縮試験

4.4.5 まとめ

4.4.2 圧密沈下特性

図-4.59 に脱水圧力 5MPa で養生 91 日用に作製した供試体の圧密沈下量と時間の関係を示す。

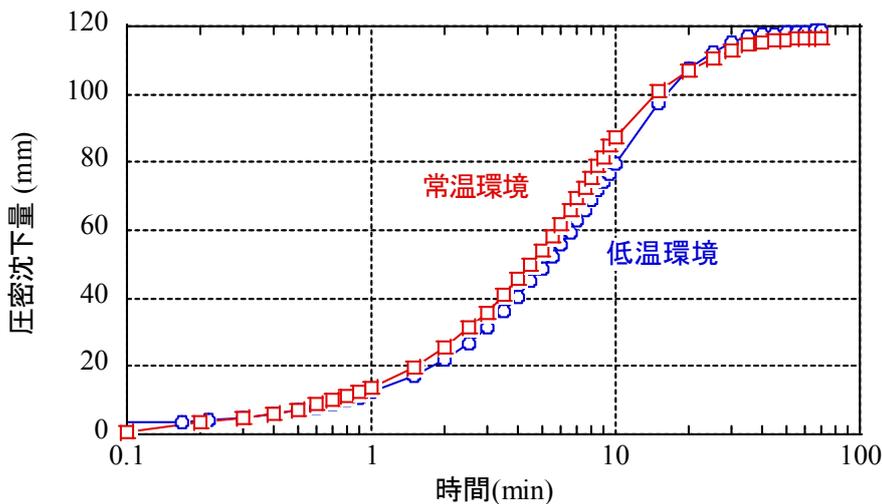


図-4.59 圧密沈下曲線（養生 91 日供試体）

常温環境と低温環境で作製した供試体の圧密沈下曲線を比較する。経過時間 1 分までは常温環境と低温環境に違いはみられないが、経過時間 1~20 分までは常温環境での圧密沈下が若干はやく進む傾向があり、常温環境と低温環境の間には 5mm 程度の差をもつ。20 分以降は、常温環境と低温環境共に圧密沈下量 120mm 付近で落ち着いた。この結果より圧密沈下量は、作製・養生環境によらずある程度同じ値をとり、圧密沈下はわずかであるが常温環境の方が低温環境よりはやく進むことがわかった。

図-4. 60~64 に脱水圧力 5MPa で供試体を作製した際の圧密沈下曲線を示す。

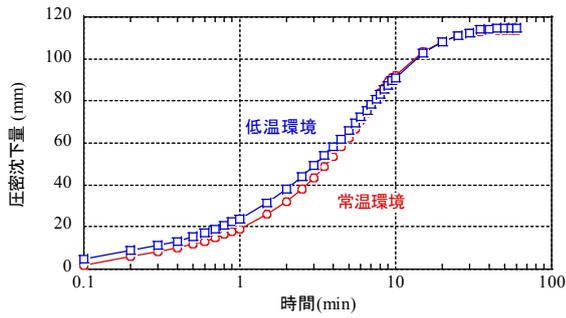


図-4. 60 圧密沈下曲線(養生 58 日供試体)

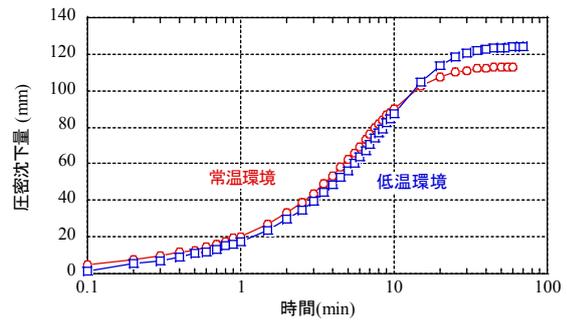


図-4. 61 圧密沈下曲線(養生 28 日供試体)

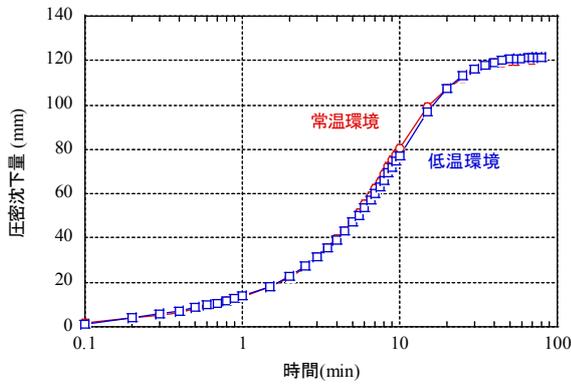


図-4. 62 圧密沈下曲線(養生 14 日供試体)

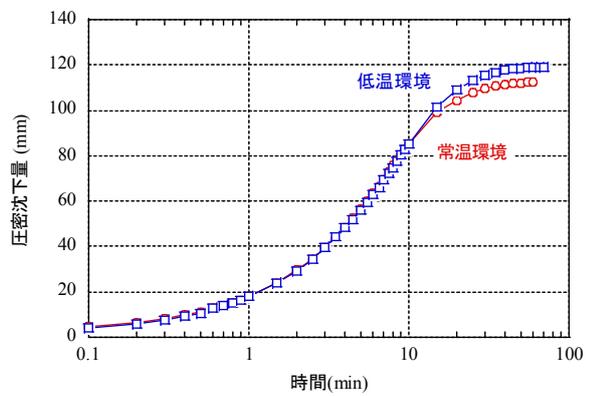


図-4. 63 圧密沈下曲線(養生 7 日供試体)

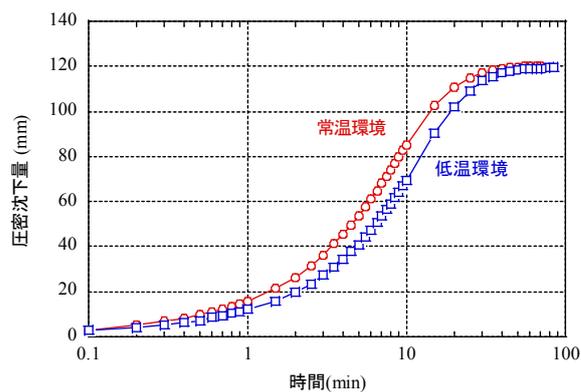


図-4. 64 圧密沈下曲線(養生 3 日供試体)

圧密沈下量や圧密終了時間にばらつきがみられるが、常温環境での圧密沈下が低温環境より若干速い傾向がみられた。また、室内試験装置を繰り返し用いて供試体を作製することで、モールド内上下にあるポーラスストーンに粘土が入りこみ目詰まりをおこし、脱水に時間がかかり圧密終了時間が長くなる供試体もあった。

図-4. 65 に脱水圧力 5MPa で作製した供試体の圧密度と時間の関係を示す。

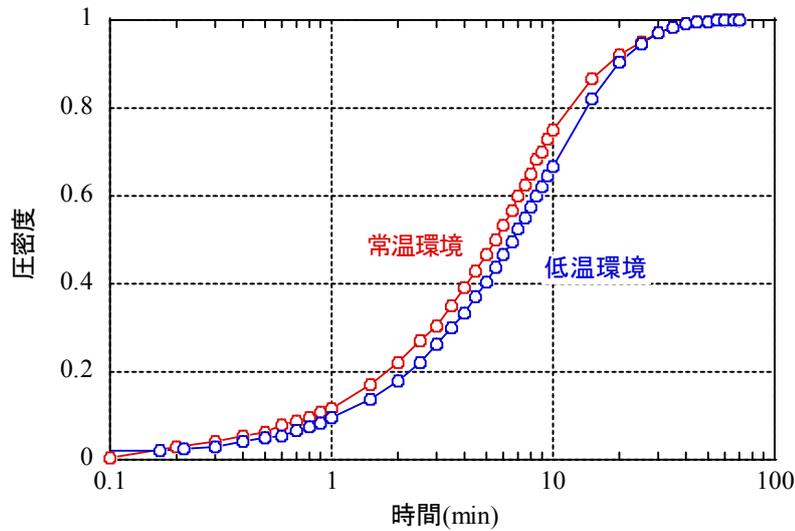


図-4. 65 圧密度と時間(養生 91 日供試体)

常温環境と低温環境の圧密度を比較すると、圧密時間 10 分では、常温環境の圧密度が 0.749、低温環境の圧密度が 0.669 となり、最大で圧密度は 0.08 程度の差が生じ、常温環境の方が低温環境よりも圧密がはやく進むことがわかる。圧密時間が 25 分になると、常温環境と低温環境の圧密度の差はなくなり、圧密時間 40 分でともに圧密度は 1 になった。

4. 4. 3 含水比、強熱減量試験

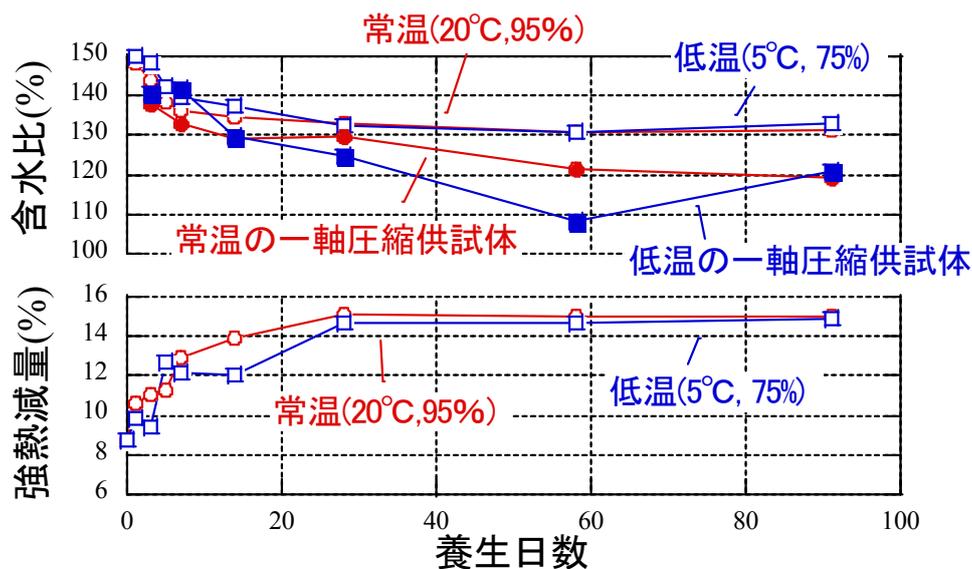


図-4. 66 養生日数と含水比、強熱減量 (脱水なし)

図-4.66 に脱水なし条件で作製した供試体の養生日数と含水比試験および強熱減量試験の結果を示す。含水比測定用に用いた試料の含水比は、常温環境と低温環境ともに養生日数の経過に伴い養生 28 日に 150%から 17%減少した後は、大きな変化はみられず、養生 91 日までに 20%減少した。常温環境の含水比は、養生初期では最大 4%低温環境より小さい値をとったが、養生 28 日にはその差はほぼみられなくなった。一軸圧縮試験で用いた供試体の含水比は、含水比測定用試料より全体的に 10%ほど減少量が大きくなった。これは一軸圧縮試験の供試体作製時におけるタッピングにともなう水のブリーディングが原因であると考えられる。

強熱減量は、含水比と同様に養生 28 日まで養生日数に経過に伴い 5%増加した後は大きな変化がみられなかった。また、わずかではあるが常温環境と低温環境の強熱減量の増加量には 1%の差が生じた。

図-4.67 に脱水圧力 5MPa で作製した供試体の養生日数と含水比試験の結果を示す。

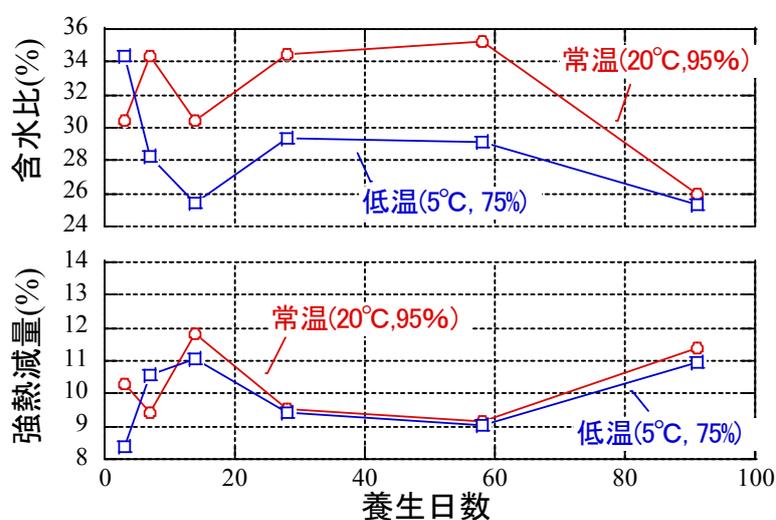


図-4.67 養生日数と含水比、強熱減量 (脱水圧力 5MPa)

脱水圧力 5MPa で作製した供試体の含水比は、常温環境では養生 3 日から養生 58 日までは 30~35%の間で変動し、養生 91 日で 26%まで減少した。低温環境では養生 7 日に 35%あり、養生 56 日まで 30%程度を推移したのち常温環境と同様に養生 91 日で 26%まで減少した。また、脱水なし条件とは異なり養生 3 日以外の日では常温環境の方が低温環境より 5%程度大きい傾向を示した。

脱水圧力 5MPa で作製した供試体の強熱減量は脱水なし条件の供試体と養生初期では 9%前後で違いはなかったが、脱水なし供試体とは異なりその後も養生日数の経過によらず 10%前後から大きく変化しないことがわかった。また、脱水なし供試体との間に養生 91 日に 4%程度の差が見られた。

高圧脱水をして供試体を作製することで、供試体内に含まれる水が減少し、養生日数の経過に伴って変化する含水比の変化量が小さくなったと考えられる。また、強熱減量の値が固化材による水和生成物の量であると仮定すると、高圧脱水によって供試体内に含まれる水が減少することで、水和生成物の量を示す強熱減量も減少したと考えられる。

また、固化処理土の含水比は供試体内に含まれる自由水の割合を、強熱減量は固化材として使用した高炉スラグセメントとの結合水の割合をそれぞれ表していると考えられる。つまり、含水比の減少、強熱減量の増加から、供試体内の水和反応が進んでいることがわかる。

4.4.4 一軸圧縮試験

(1) 応力ひずみ曲線

図-4.68~図-4.73 に常温環境、脱水なし条件で作製した供試体の養生日数 3 日、7 日、14 日、28 日、58 日、91 日の応力ひずみ曲線を示す。

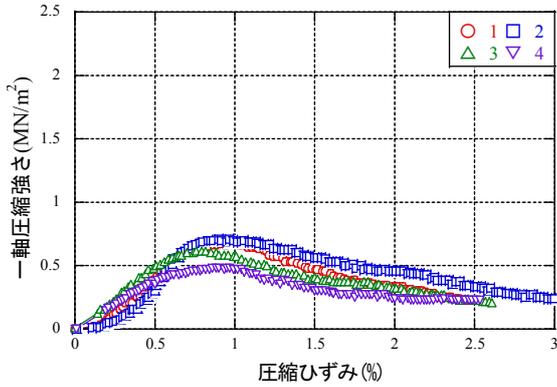


図-4.68 常温養生、脱水なし、t=3day

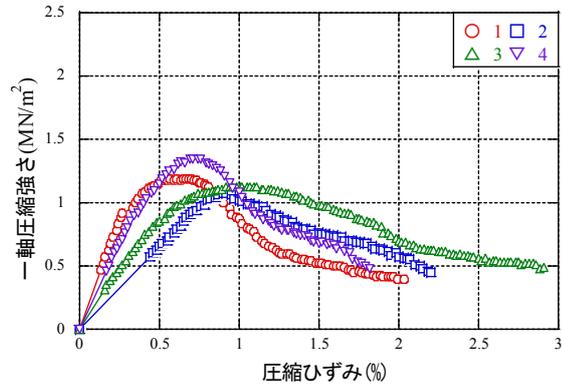


図-4.69 常温養生、脱水なし、t=7day

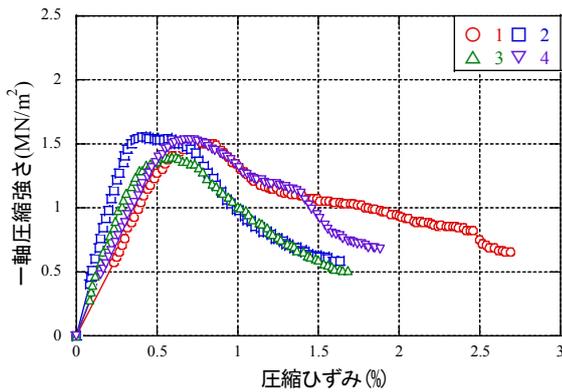


図-4.70 常温養生、脱水なし、t=14day

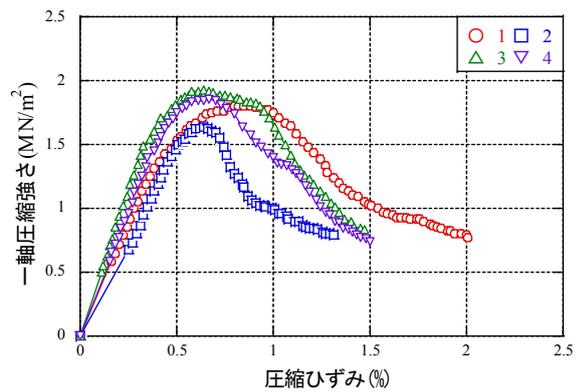


図-4.71 常温養生、脱水なし、t=28day

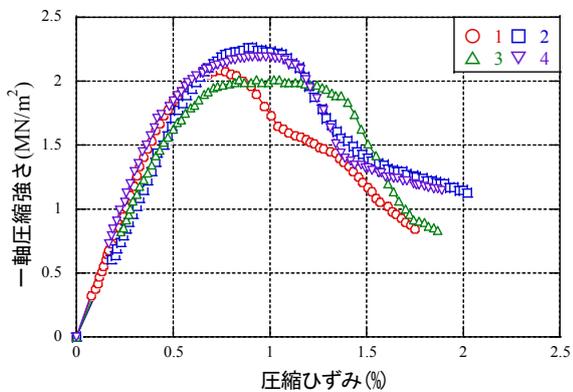


図-4.72 常温養生、脱水なし、t=58day

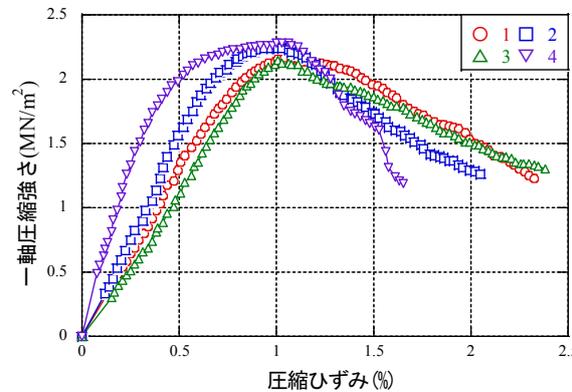


図-4.73 常温養生、脱水なし、t=91day

図-4.74~図-4.79 に低温環境、脱水なし条件で作製した供試体の養生日数 3 日、7 日、14 日、28 日、58 日、91 日の応力ひずみ曲線を示す。

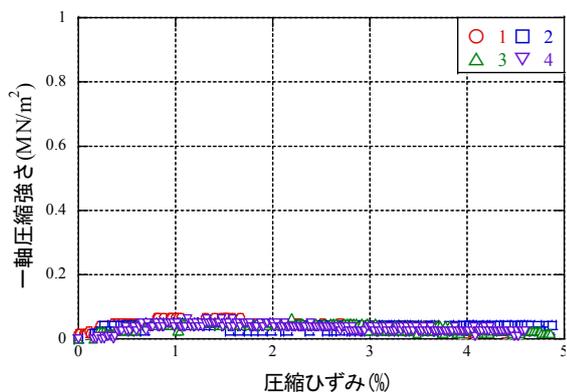


図-4.74 低温養生、脱水なし、t=3day

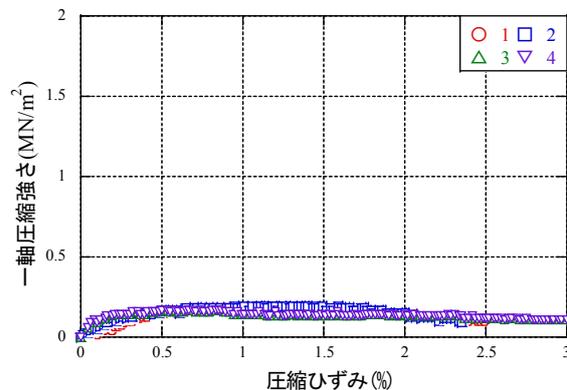


図 4.75 低温養生、脱水なし、t=7day

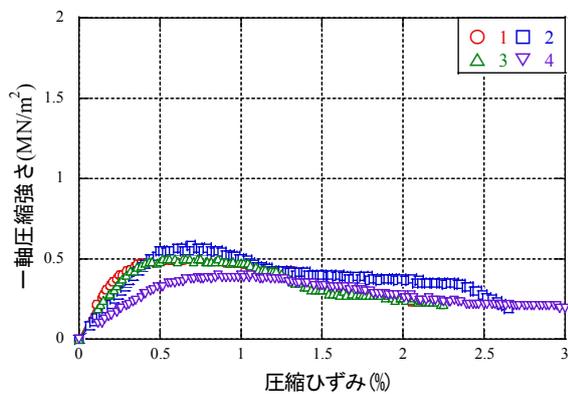


図-4.76 低温養生、脱水なし、t=14day

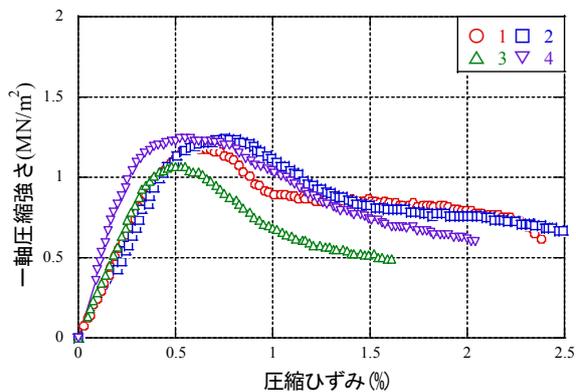


図-4.77 低温養生、脱水なし、t=28day

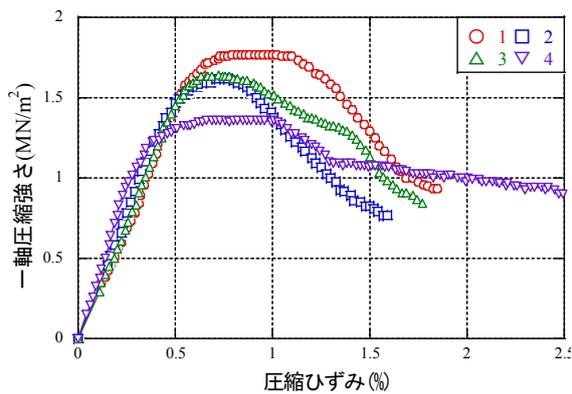


図-4.78 低温養生、脱水なし、t=58day

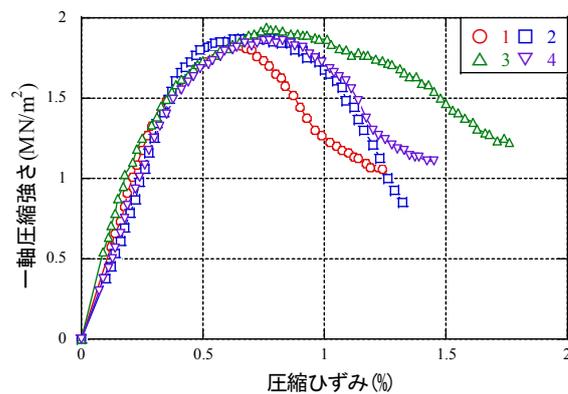


図-4.79 低温養生、脱水なし、t=91day

低温環境で作製し養生 58 日した供試体は、 0.5MN/m^2 程度の差が見られたが、ほとんどの条件では供試体ごとの一軸圧縮強さに大きな誤差はみられなかった。供試体を作成する日、試料の混合条件など供試体を作製する条件をすべての供試体で統一できたことや供試体作製方法が難しくなったことで供試体ごとの差がほとんどなかったと考えられる。

また、一軸圧縮強さの大きいものははっきりとピーク強度が現れ、低温環境で養生 3 日、7 日した条件などの強度の小さい供試体は緩やかな応力ひずみ曲線となった。破壊ひずみはどの条件でも 0.5~1.0% の範囲の値をとった。

図-4.80~図-4.85 に常温環境、脱水圧力 5MPa で作製した供試体の養生日数 3 日、7 日、14 日、28 日、58 日、91 日の応力ひずみ曲線を示す。

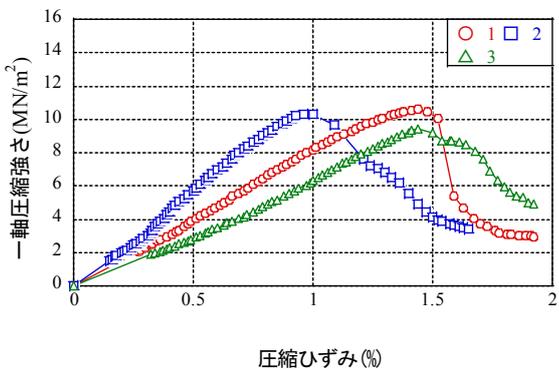


図-4.80 常温養生、脱水圧力 5MPa、 $t=3\text{day}$

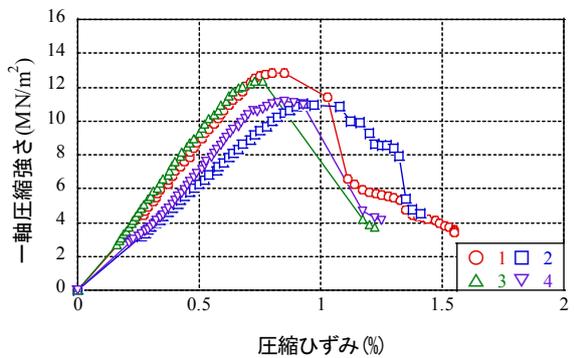


図-4.81 常温養生、脱水圧力 5MPa、 $t=7\text{day}$

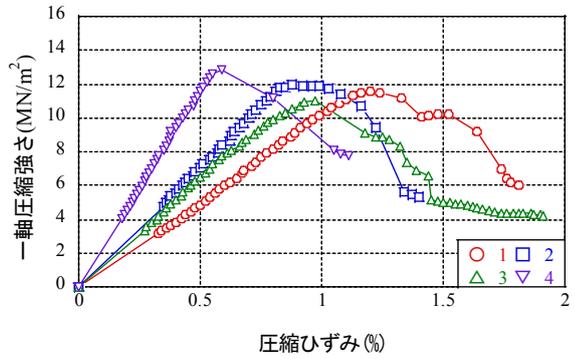


図-4.82 常温養生、脱水圧力 5MPa、 $t=14\text{day}$

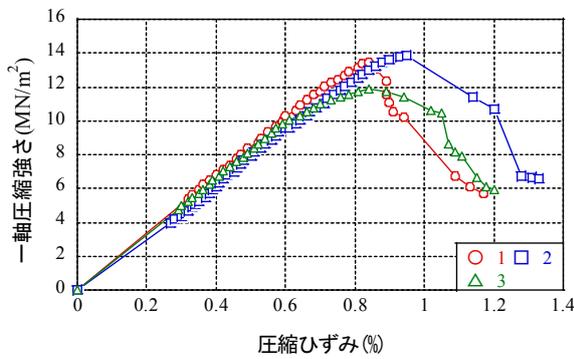


図-4.83 常温養生、脱水圧力 5MPa、 $t=28\text{day}$

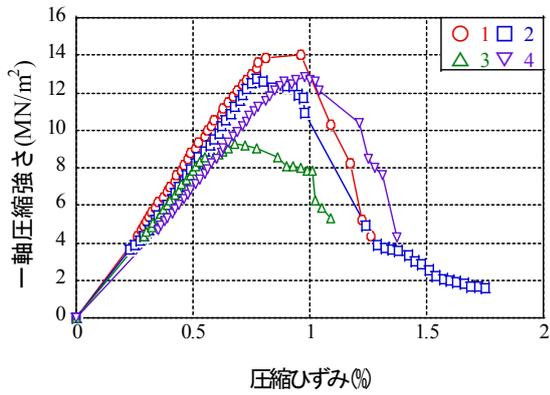


図-4.84 常温養生、脱水圧力 5MPa、t=58day

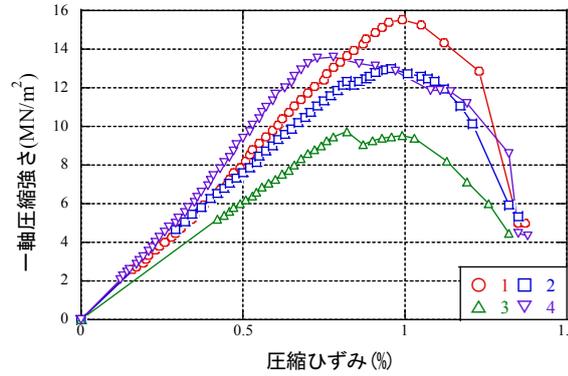


図-4.85 常温養生、脱水圧力 5MPa、t=91day

図-4.86~図-4.91 に低温環境、脱水圧力 5MPa で作製した供試体の養生日数 3 日、7 日、14 日、28 日、58 日、91 日の応力ひずみ曲線を示す。

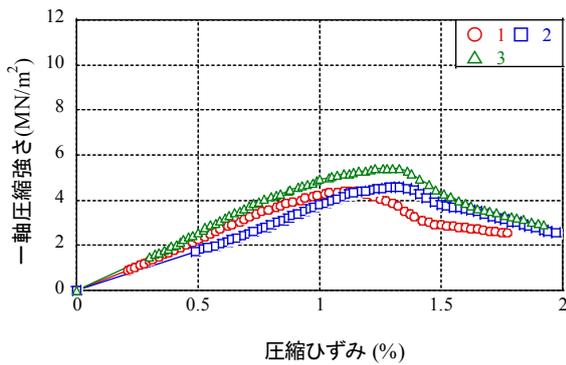


図-4.86 低温養生、脱水圧力 5MPa、t=3day

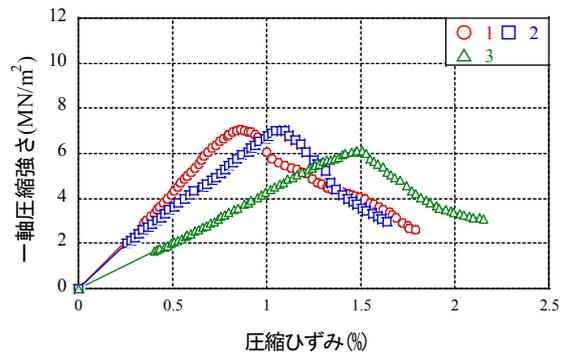


図-4.87 低温養生、脱水圧力 5MPa、t=7day

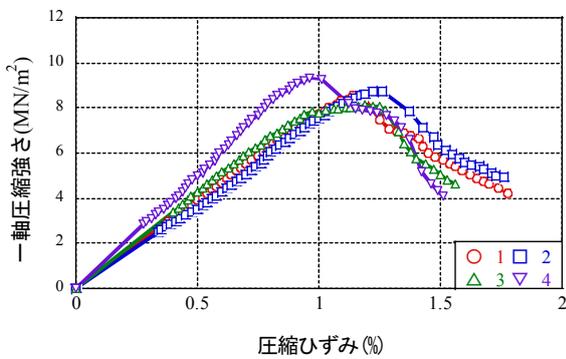


図 4.88 低温養生、脱水圧力 5MPa、t=14day

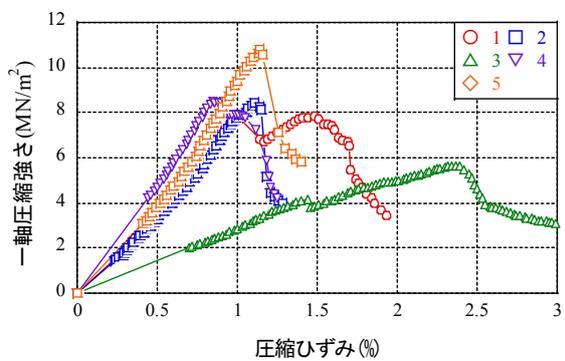


図-4.89 低温養生、脱水圧力 5MPa、t=28day

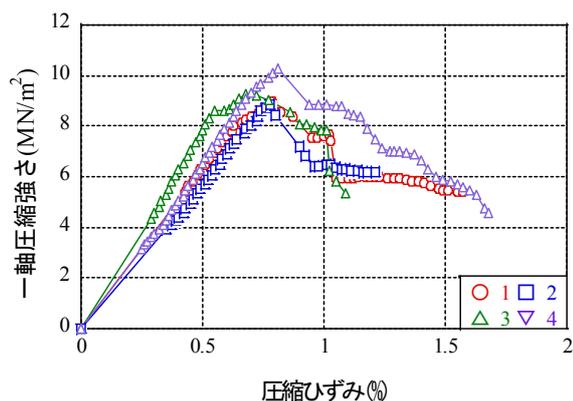


図-4.90 低温養生、脱水圧力 5MPa、t=58day

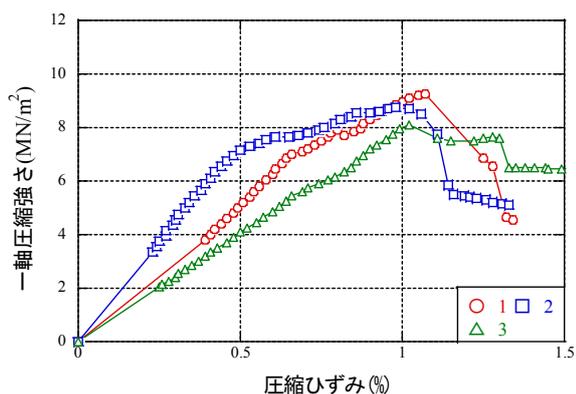


図-4.91 低温養生、脱水圧力 5MPa、t=91day

脱水なしの条件で作製した供試体と比較すると、脱水圧力 5MPa で作製した供試体の方がそれぞれの条件で供試体ごと一軸圧縮強さにばらつきがみられた。また、破壊ひずみも供試体によって 1%程度の差がみられた。誤差が生じた原因として、圧力をかけて供試体を作製する際に、脱水に用いたろ紙が試料の間に挟まり、出来上がった供試体内に裂け目となる部分がうまれた供試体があることで、正確な強度測定ができずにばらつきが生じたと考えられる。

脱水なし条件で含水比と強熱減量を測定するために用意した試料の含水比試験結果と強熱減量結果をそれぞれ表-4.14 と表-4.15 に示す。表-4.16 に脱水なし条件で作製した供試体、表-4.17 に脱水圧力 5MPa で作製した供試体の試験結果をそれぞれ示す。

表-4.14 含水比・強熱減量測定用試料(含水比)

養生日数	1日	3日	5日	7日	14日	28日	58日	98日
20°C	146.71	147.49	138.34	135.94	135.60	132.96	130.82	130.77
	164.92	143.15	137.98	136.66	134.18	133.22	129.73	130.55
	150.00	141.88	139.65	136.56	133.90	133.57	131.65	132.34
5°C	149.48	149.33	142.66	139.75	137.66	131.36	131.33	131.72
	149.88	147.83	141.00	138.95	137.97	132.13	131.22	132.08
	150.27	147.79	143.07	140.38	137.34	133.54	130.63	135.86

表-4.15 含水比・強熱減量測定用試料(強熱減量)

養生日数	1日	3日	5日	7日	14日	28日	58日	98日
20°C	10.38	10.92	11.26	12.66	14.42	15.30	14.94	15.41
	10.73	11.19	11.05	12.87	13.28	15.13	15.05	15.02
	10.65	10.99	11.46	13.31	13.95	14.87	15.14	14.75
5°C	9.83	9.39	12.35	12.22	11.68	15.21	15.24	15.23
	9.75	9.39	12.87	11.98	12.53	14.58	14.85	14.86
	9.93	9.39	12.95	12.25	12.02	14.31	13.84	14.79

表-4.16 脱水なし供試体試験結果

温度	養生日数	供試体番号	一軸圧縮強さ q_u (MN/m^2)	含水比 w (%)	破壊ひずみ(%)	水セメント量比	湿潤密度
20°C	3日	1	0.69	138.38	0.69	3.46	
		2	0.71	137.41	0.62	3.44	
		3	0.61	138.72	0.71	3.47	
		4	0.48	137.32	0.83	3.43	
5°C	3日	1	0.07	140.16	1.24	3.50	
		2	0.05	143.92	0.67	3.60	
		3	0.05	139.27	0.83	3.48	
		4	0.08	138.60	1.13	3.47	
20°C	7日	1	1.19	134.22	0.61	3.36	
		2	1.07	134.06	0.88	3.35	
		3	1.12	131.32	0.88	3.28	
		4	1.34	48.31	0.69	1.21	
5°C	7日	1	0.20	134.75	1.00	3.37	
		2	0.19	135.69	0.90	3.39	
		3	0.17	137.52	0.72	3.44	
		4	0.17	158.75	0.48	3.97	
20°C	14日	1	1.52	125.16	0.73	3.13	1.34
		2	1.56	133.82	0.45	3.35	1.34
		3	1.39	121.66	0.60	3.04	1.34
		4	1.53	135.36	0.71	3.38	1.34
5°C	14日	1	0.50	133.23	0.60	3.33	1.36
		2	0.58	135.07	0.66	3.38	1.36
		3	0.50	122.49	0.57	3.06	1.35
		4	0.40	128.49	0.86	3.21	1.36
20°C	28日	1	1.80	133.23	0.80	3.33	1.34
		2	1.63	135.07	0.50	3.38	1.34
		3	1.93	122.49	0.61	3.06	1.34
		4	1.86	128.49	0.67	3.21	1.34
5°C	28日	1	1.18	127.04	0.53	3.18	1.35
		2	1.24	115.74	0.68	2.89	1.36
		3	1.07	127.21	0.43	3.18	1.36
		4	1.24	128.50	0.48	3.21	1.36
20°C	59日	1	2.08	127.94	0.74	3.20	1.34
		2	2.26	123.18	0.89	3.08	1.33
		3	2.01	120.00	1.24	3.00	1.33
		4	2.19	115.02	0.89	2.88	1.33
5°C	59日	1	1.77	106.34	0.79	2.66	1.36
		2	1.62	109.80	0.71	2.75	1.36
		3	1.66	110.78	0.72	2.77	1.37
		4	1.36	106.68	0.66	2.67	1.37
20°C	91日	1	2.17	118.05	1.04	2.95	1.34
		2	2.24	120.17	0.92	3.00	1.33
		3	2.14	128.38	1.01	3.21	1.33
		4	2.30	109.45	1.00	2.74	1.32
5°C	91日	1	1.85	121.03	0.61	3.03	1.36
		2	1.88	124.59	0.72	3.11	1.36
		3	1.94	117.46	0.76	2.94	1.36
		4	1.86	121.09	0.83	3.03	1.36

表-4.17 脱水圧力 5MPa 供試体試験結果

温度	養生日数	供試体番号	一軸圧縮強さ q_u (N/m ²)	含水比w (%)	強熱減量 (%)	破壊ひずみ (%)	水セメント重量比	湿潤密度
20℃	3日	1	10.58	30.90	10.19	1.44	0.77	1.77
		2	10.30	30.04	10.26	0.96	0.75	1.77
		3	9.44	30.29	10.40	1.44	0.76	1.77
5℃	3日	1	4.40	35.05	8.62	1.12	0.88	1.75
		2	4.59	34.38	8.55	1.31	0.86	1.75
		3	5.42	33.56	7.98	1.3	0.84	1.76
20℃	7日	1	12.87	33.81	9.65	0.80	0.85	1.79
		2	11.00	34.48	9.45	0.93	0.86	1.77
		3	12.38	34.13	9.07	0.85	0.86	1.78
		4	11.19	35.17	9.58	0.85	0.88	1.75
5℃	7日	1	7.06	26.32	10.78	0.86	0.66	1.76
		2	7.03	28.72	10.68	1.08	0.72	1.77
		3	6.13	29.82	10.30	1.48	0.75	1.71
20℃	14日	1	11.57	31.92	12.08	1.20	0.80	1.78
		2	11.93	33.91	10.26	0.88	0.85	1.77
		3	11.04	30.58	12.60	0.97	0.76	1.78
		4	12.84	25.49	12.43	0.59	0.64	1.78
5℃	14日	1	8.56	24.15	10.76	1.18	0.60	1.73
		2	9.35	26.58	12.22	0.96	0.66	1.76
		3	8.71	24.28	10.82	1.22	0.61	1.75
		4	8.12	26.82	10.53	1.19	0.67	1.75
20℃	28日	1	13.51	33.57	9.97	0.84	0.84	1.78
		2	13.86	35.48	8.71	0.95	0.89	1.76
		3	11.87	34.33	9.84	0.84	0.86	1.78
5℃	28日	1	7.82	29.16	9.68	1.48	0.73	1.74
		2	8.45	29.02	8.85	1.11	0.73	1.73
		3	5.66	28.30	9.63	2.34	0.71	1.71
		4	8.52	30.36	10.00	0.92	0.76	1.71
		5	10.79	29.71	8.98	1.14	0.74	1.76
20℃	58日	1	12.76	34.60	9.39	0.77	0.71	1.75
		2	14.02	36.00	8.80	0.96	0.71	1.74
		3	9.26	34.15	9.56	0.68	0.73	1.74
		4	12.81	36.28	8.93	0.85	0.77	1.74
5℃	58日	1	8.96	28.29	9.70	0.79	0.87	1.74
		2	8.84	28.41	8.91	0.78	0.90	1.75
		3	8.35	29.23	8.94	0.82	0.85	1.74
		4	10.25	30.71	8.51	0.81	0.91	1.76
20℃	91日	1	15.53	25.57	11.13	0.99	0.64	1.77
		2	13.03	28.29	10.98	0.96	0.71	1.72
		3	9.73	25.38	11.65	0.82	0.63	1.74
		4	13.62	24.70	11.79	0.78	0.62	1.77
5℃	91日	1	9.25	26.18	10.68	1.07	0.65	1.73
		2	8.74	24.90	11.33	0.98	0.62	1.72
		3	8.11	24.72	10.89	1.02	0.62	2.08

(2) 強度特性

図-4.92 に脱水なし条件で作製した供試体の養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。

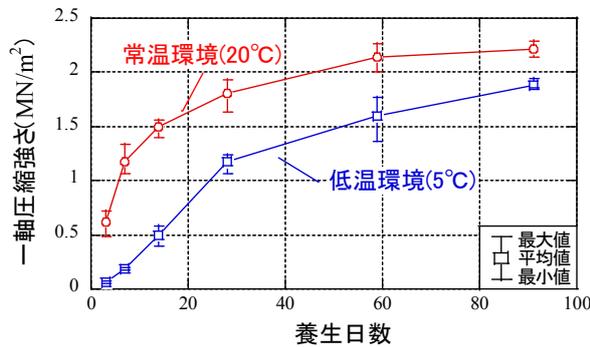


図-4.92 養生日数と一軸圧縮強さ（脱水なし）

養生 3 日では常温環境で作製した供試体が 0.6MN/m^2 、低温環境で作製した供試体が 0.06MN/m^2 となり、常温環境が低温環境の約 10 倍の強さをもつ。日数経過に伴いこの差は小さくなり養生 91 日で常温は 2.2MN/m^2 、低温は 1.9MN/m^2 程度まで上昇することがわかった。2つのグラフの傾きより、さらに養生日数を経過させるとほぼ同じ値となるところまで上昇すると予測できる。また、常温環境で作製した供試体の強度増加の割合は養生初期に大きく、日数経過に伴い小さくなった。特に低温環境では養生 28 日前後で強度増加に大きな違いがみられた。

図-4.93 に脱水圧力 5MPa で作製した供試体の養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。

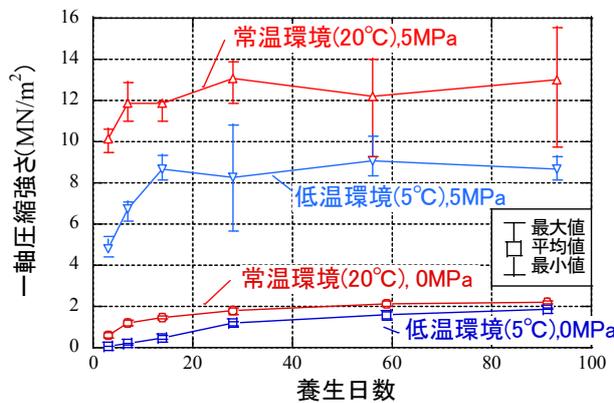


図-4.93 養生日数と一軸圧縮強さ（脱水圧力 5MPa）

脱水圧力 5MPa で作製した供試体の一軸圧縮強さは、常温では養生 7 日で 12MN/m^2 、低温では養生 14 日目で 8.5MN/m^2 に達したのち大きな変化はみられない。常温環境で作製した供試体の方が最大の一軸圧縮強さに到達するのが早いのは、固化材の固化反応が常温環境でより速く進み、固化反応の大部分が終わったからであると考えられる。2つのグラフより、脱水圧力の違いにより常温では約 10MN/m^2 、低温では約 6MN/m^2 の強度差がみられた。

図-4.94 に脱水なしの条件で作製した供試体と脱水圧力 5MPa で作製した供試体の水セメント比と一軸圧縮強さの関係を示す。ここで使用した水セメント比は含水比と固化材添加率を用いて求めたものを使用した。

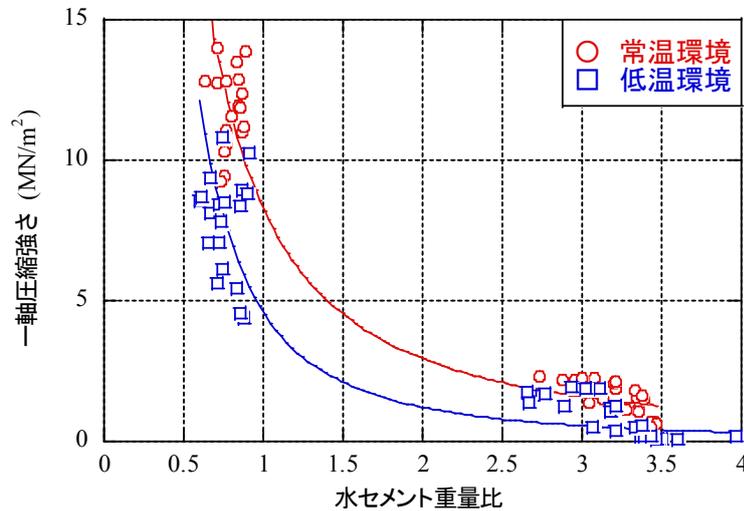


図-4.94 水セメント比と一軸圧縮強さ

図-4.94 のグラフにおいて水セメント比が 2.5~4 の間に脱水なしの条件で作製した供試体が分布し、水セメント比が 0.5~1 の間に脱水圧力 5MPa で作製した供試体が分布している。2種類の供試体の結果より、水セメント重量比の値が大きいかほど一軸圧縮強さは小さくなる傾向が見られる。また、常温環境供試体は低温環境供試体よりも全体的にグラフの右上部分に分布しており、常温環境供試体の方がより水セメント重量比が小さく一軸圧縮強さが大きくなることがわかる。一方、脱水圧力 5MPa で作製した供試体は、水セメント重量比の一軸圧縮強さに対する影響はみられなかった。高圧脱水した供試体の含水比が供試体によってあまり変化がないため、水セメント重量比の値に違いが出なかったためである。

図-4.94 より回帰式を求め、一軸圧縮強さと水セメント比の関係を示す式(4.15)の α と β にあたる値を求めた。 α は水セメント重量比が 1.0 の時の一軸圧縮強さ、 β は強度増加率を示す。

$$q_u = \alpha (W/C)^\beta \quad (4.15)$$

常温環境の供試体を式(4.16)に、低温環境の供試体を式(4.17)に示す。

$$q_u = 8.2966(W/C)^{-1.5011} \quad (4.16)$$

$$q_u = 4.5949(W/C)^{-1.9271} \quad (4.17)$$

常温環境の供試体は $R=0.95917$ 、低温環境の供試体は $R=0.90418$ となり、とても高い相関がみられた。ここで豊里の既往の研究で求められている脱水圧力 5MPa で作製した供試体の水セメント重量比と一軸圧縮強さの関係式を式(4.16)と式(4.17)に示す。式(4.18)には養生温度 20℃で設定した供試体、式(4.19)には養生温度 60℃で養生した供試体の関係式を示した。

$$q_u = 11.071(W/C)^{-1.2393} \quad (4.18)$$

$$q_u = 14.954(W/C)^{-0.7099} \quad (4.19)$$

ほぼ同じ条件（20℃養生）で作製した供試体から導かれた式(4.16)と式(4.17)を比較すると、 α の値と β の値ともに近い値となった。また、養生温度によって式を比較すると水セメント比が1.0の時の一軸圧縮強さは60MPaが最も高く、強度増加率は20℃が最も高くなった。これより、養生温度が高いと高強度となるが強度増加はみられず、逆に養生温度が低いと強度は弱くなるが、含水比や水セメント比の変化によって強度は大きく変化することがわかった。

図-4.95 に脱水なし条件で作製した供試体と脱水圧力5MPaで作製した供試体の湿潤密度と一軸圧縮強さの関係を示す。

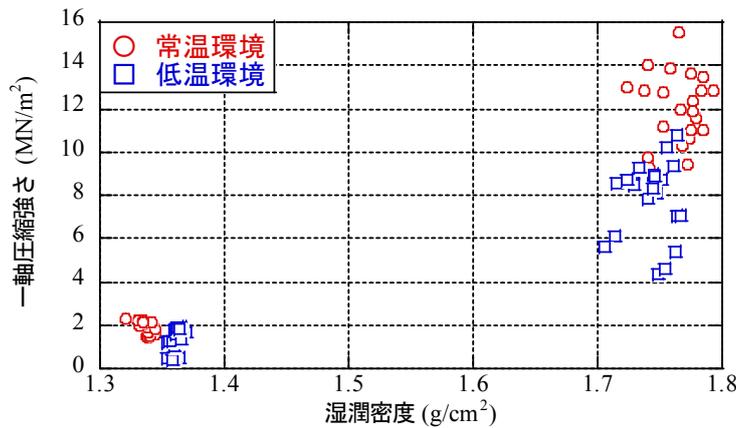


図-4.95 湿潤密度と一軸圧縮強さ

図-4.95 において、湿潤密度が1.3~1.4の間に分布するのが脱水なし条件で作製した供試体、湿潤密度が1.7~1.8の間に分布するのが脱水圧力5MPaで作製した供試体である。脱水なし条件で作製した供試体は常温環境と低温環境ともに湿潤密度は0.03程度の範囲に収まり、脱水圧力5MPaで作製した供試体の湿潤密度は0.08程度の範囲に収まった。2種類の供試体の結果より、湿潤密度が高くなると一軸圧縮強さも増加する傾向がみられた。また、常温環境で作製した供試体の方がグラフの左上に分布し、より強度が大きくなるといえる。

4.4.5 まとめ

本節では、室内試験として脱水なし条件で作製した供試体と脱水圧力5MPaで作製した供試体に対して行った含水比試験、強熱減量試験および一軸圧縮試験より得られた結果について評価考察を行った。結論を以下にまとめる。

圧密沈下特性

- 1) 脱水圧力5MPaで作製した供試体の圧密沈下量は養生・作製条件によらず圧密時間約40分で120mmとなるが、圧密途中では常温環境の方が低温環境よりも0.05程度圧密度が高くなった。

含水比試験・強熱減量試験

- 1) 脱水なし条件で作製した供試体の含水比は、養生温度によらず養生91日において20%減少した。含水比の変化の割合は、28日経過までが大きく、常温環境の方が低温環境より1~4%小さい値をとる。
- 2) 脱水圧力5MPaで作製した供試体の含水比は、養生日数によらず30%前後を、強熱減量は10%前後を推移した。常温環境の方が低温環境より5%大きい値をとる。

- 3) 脱水なし条件で作製した供試体の強熱減量は、養生 91 日目において 5%増加し養生条件の違いにより 1%程度の差がみられた。

一軸圧縮試験

- 1) 脱水なし条件で作製した供試体の一軸圧縮強さは、養生日数の経過に伴い増加するが、常温環境では 28 日経過時で 91 日養生の約 80%まで増加した。
- 2) 脱水圧力 5MPa で作製した供試体は、養生 7 日で 12MN/m² に達した後は大きく変化はしなかった。
- 3) 作製した供試体の水セメント重量比と一軸圧縮強さには常温環境では式 (4. 16)、低温環境で式 (4. 17) の関係があり、とても強い相関がみられた。

$$q_u=8.2966(W/C)^{-1.5011} \quad (4. 16)$$

$$q_u=4.5949(W/C)^{-1.9271} \quad (4. 17)$$

参考文献

- 1) 豊里 亮喜：高圧脱水固化処理した浚渫土砂ブロックの力学特性と強度推定に関する研究，九州大学工学院，修士論文，2018.

4.5 大型脱水固化装置を用いて作製したブロックの強度特性

4.5.1 はじめに

本章では、大型脱水固化装置を用いて作製した浚渫土砂ブロックの一軸圧縮強度特性について評価した。その中でも、養生日数の違いによる一軸圧縮強度への影響、ブロックの含水比、湿潤密度、間隙比等について評価、考察を行なった。また、作製することが出来なかった条件の含水比特性についても考察した。

4.5.2 強度特性

(1) 応力ひずみ曲線

図-4.96 に固化材添加率 40%、養生 28 日、脱水棒 49 本の Case2 のブロックからコアリングを行った供試体の応力ひずみ曲線を示す。

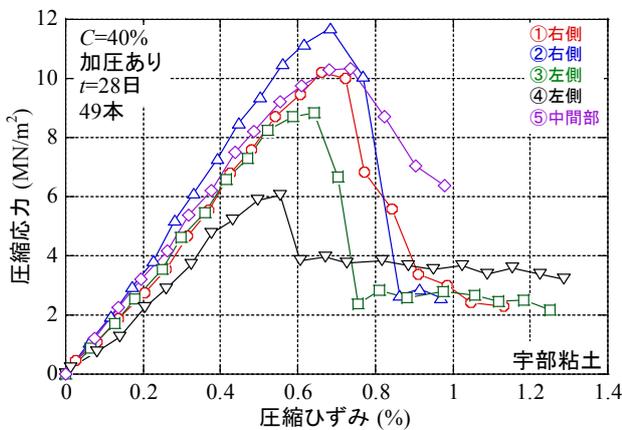


図-4.96 応力ひずみ曲線 (Case2、加圧有)

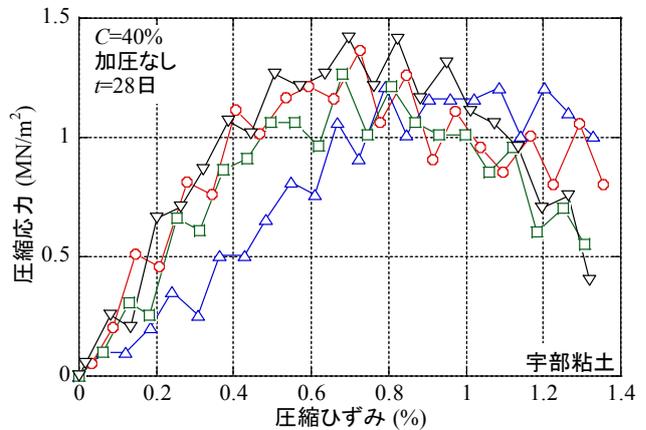


図-4.97 応力ひずみ曲線 (加圧無し)

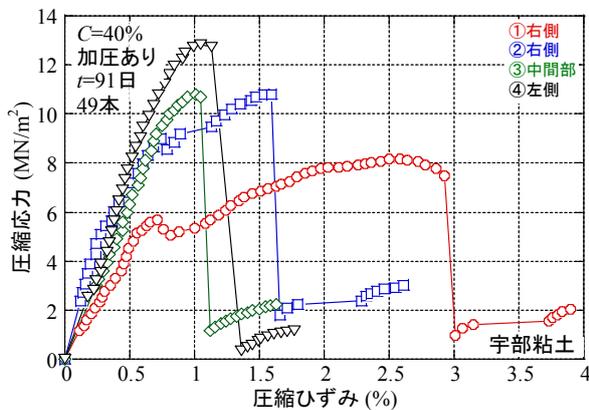


図-4.98 応力ひずみ曲線 (Case2、加圧有)

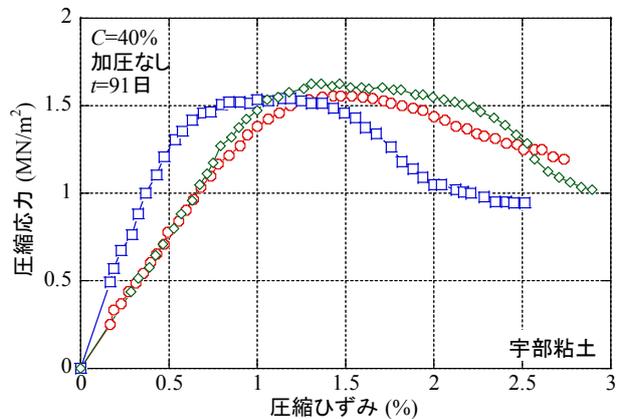


図-4.99 応力ひずみ曲線 (加圧無し)

図-4.97 に固化材添加率 40%、養生 28 日の加圧を行っていない粘土の塊からコアリングを行った供試体の応力ひずみ曲線を示す。図-4.98 に固化材添加率 40%、養生 91 日、脱水棒 49 本の Case2 のブロックからコアリングを行った供試体の応力ひずみ曲線を示す。図-4.99 に固化材添加率 40%、養生 91 日の加圧を行っていない粘土の塊からコアリングを行った供試体の応力ひずみ曲線を示す。図-4.100 に固化材添加率 40%、養生 28 日、脱水棒 16 本の Case3 のブロックからコアリングを行った供試体の応力ひずみ曲線を示す。図-4.101 に固化材添加率 40%、養生 91 日、脱水棒 16 本の Case3 のブロックからコアリングを行った供試体の応力ひずみ曲線を示す。

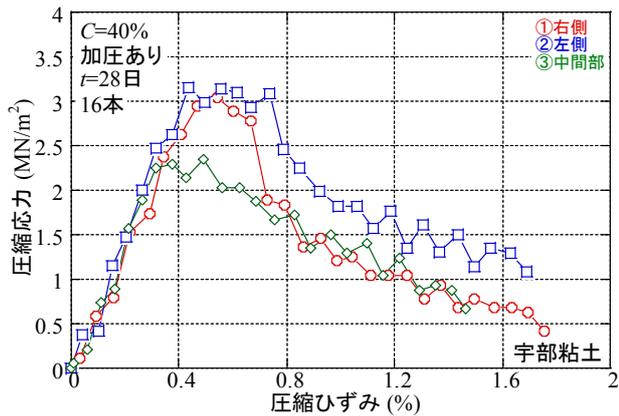


図-4.100 応力ひずみ曲線 (Case3、加圧有)

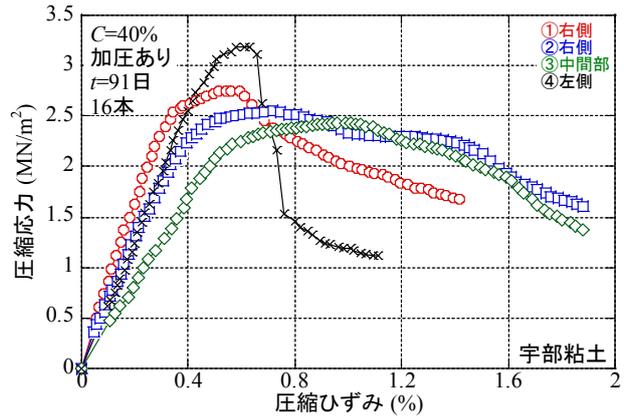


図-4.101 応力ひずみ曲線 (Case3、加圧有)

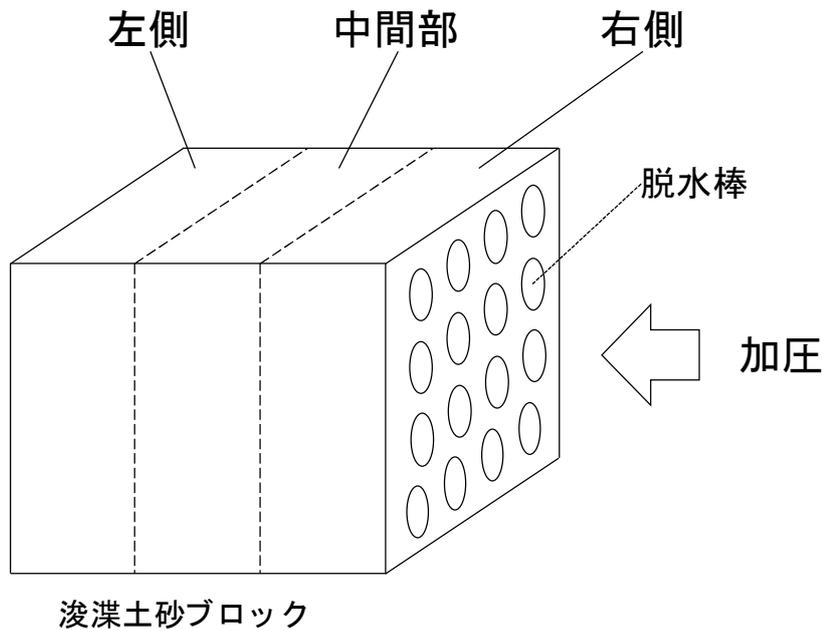


図-4.102 浚渫土砂ブロックのコアリング位置

また、圧力をかけて作製した条件における図中の「右側」「中間部」「左側」は、コアリングを行なった場所を指しており、上図のようになる。Case3の脱水棒が16本のブロック、また加圧していない固化材添加率40%の粘土の塊に関しては、ピーク強度が約 3MN/m^2 以下であり、ピーク強度を迎えた後に徐々に強度が減少した。それに対して、Case2の脱水棒が49本のブロックは、ピーク強度が約 10MN/m^2 であり、ピーク強度を迎えた後、直ちに強度が減少した。

破壊ひずみは、多少のばらつきはあるものの0.6%~1.0%であり、コアリング位置、養生日数、加圧の有無、脱水棒の本数による違いはないと考えられる。

各実験ケースにおける一軸圧縮試験結果を表-4.18、表-4.19に示す。

表-4.18 一軸圧縮試験結果-1

Case	固化材添加率 C (%)	養生日数 t (days)	加圧	一軸圧縮強さ q_u (MN/m ²)	含水比 w (%)	破壊ひずみ ϵ (%)	水セメント重量比 w/c
1	0	-	あり	-	98.17	-	-
2	40	28	あり	10.21	50.30	0.77	1.26
				11.70	51.50	0.85	1.29
				8.85	66.73	0.66	1.67
				6.03	60.44	0.57	1.51
				10.30	57.92	0.87	1.45
			1.37	170.08	0.73	4.25	
			1.21	179.48	0.79	4.49	
		91	なし	1.26	176.53	0.68	4.41
				1.42	173.48	0.70	4.34
				8.17	60.28	3.06	1.51
				10.80	63.39	2.00	1.58
			あり	10.77	66.06	1.56	1.65
				12.85	56.48	1.54	1.41
				1.56	176.63	1.65	4.42
3	40	28	あり	1.54	178.63	1.39	4.47
				1.63	177.15	1.94	4.43
				3.05	114.91	0.54	2.87
				3.15	109.07	0.43	2.73
				2.35	115.34	0.58	2.88
		91	あり	2.75	128.51	0.62	3.21
				2.55	130.19	0.84	3.25
				2.43	134.53	1.18	3.36
				-	135.01	-	3.38
				3.18	123.61	0.87	3.09

表-4.19 一軸圧縮試験結果-2

Case	固化材添加率 C (%)	養生日数 t (days)	加圧	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	間隙比 e	超音波速度 (m/s)	移送時間 (μ s)
1	0	-	あり	-	-	-	-
2	40	28	あり	-	-	2450	40.4
				-	-	2475	40.4
				-	-	2335	42.4
				-	-	2335	39.9
				-	-	2466	36.9
			-	-	1687	56.9	
			91	なし	-	-	1695
		-			-	1690	57.4
		-			-	1690	57.4
		1.632			1.567	2471	42.9
		あり		1.616	1.644	2482	41.9
				1.594	1.723	2476	42.4
				1.652	1.476	2589	39.4
		3	40	28	あり	1.284	4.630
1.270	4.733					1777	57.4
1.277	4.671					1787	55.4
91	あり			1.368	3.107	1943	49.4
				1.377	2.970	1964	49.9
				1.354	3.158	1925	50.4
				1.359	3.396	1948	53.4
91	あり	1.357	3.433	1947	52.4		
		1.350	3.542	1912	54.4		
		1.350	3.550	1880	56.9		
		1.377	3.244	1930	54.4		

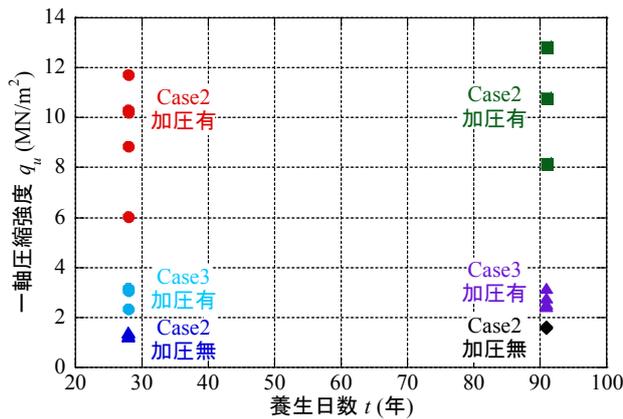


図-4.103 養生日数と一軸圧縮強度

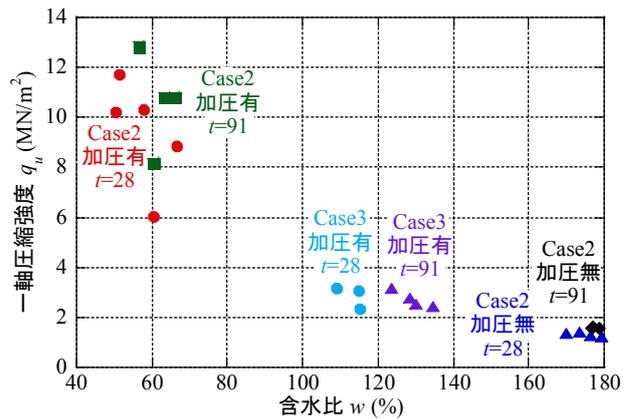


図-4.104 含水比と一軸圧縮強度

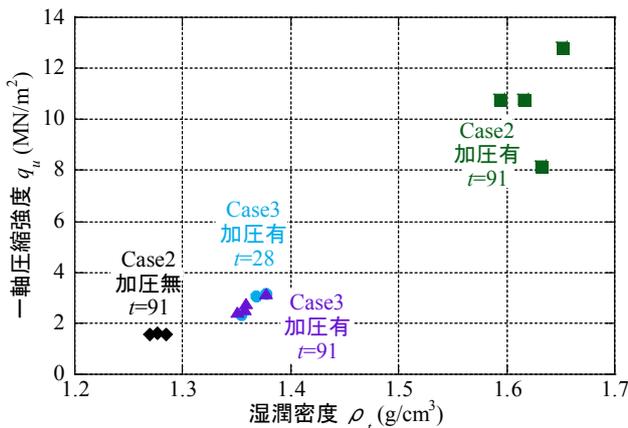


図-4.105 湿潤密度と一軸圧縮強度

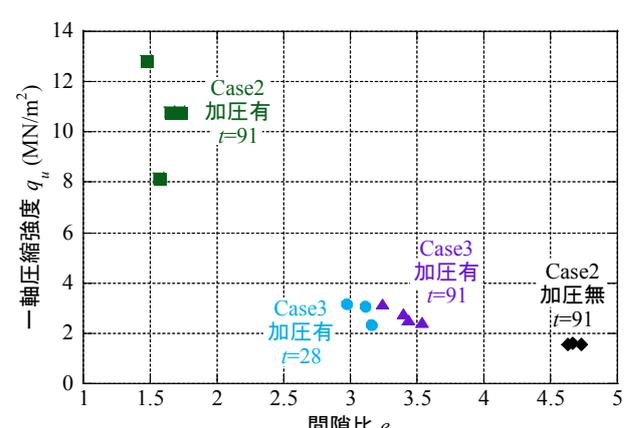


図-4.106 間隙比と一軸圧縮強度

(2) 一軸圧縮強度特性

図-4.103 に Case2、Case3 の養生日数と一軸圧縮強度の関係を示す。Case2 の脱水棒が 49 本の条件では、圧密中に十分に脱水できたと考えられ、養生日数 28 日で一軸圧縮強度は約 10MN/m²であった。Case3 は脱水棒が 16 本あったが、十分に脱水が出来ていなかったと考えられ、一軸圧縮強度は加圧をしていない固化材添加率 40%の粘土の塊と約 2MN/m²しか変わらなかった。

また、Case2 は多少のばらつきがあるが養生日数の経過に伴って一軸圧縮強度は増加した。しかし、脱水棒が 16 本の Case3、加圧をしていない固化材添加率 40%の粘土の塊は強度増加がほぼみられなかった。この要因として、含水比が考えられる。

図-4.104 に Case2、Case3 の含水比と一軸圧縮強度の関係を示す。図-4.103 で示した Case2 の脱水棒が 49 本で大きな一軸圧縮強度を示した条件では含水比が約 60%であったが、脱水棒が 16 本の Case3 では加圧したにも関わらず含水比は約 120%、加圧をしていない固化材添加率 40%の粘土の塊は含水比約 170%と、Case2 の 2 倍以上の含水比の値を示した。このことから、一軸圧縮強度はブロック内の含水比の割合によって、含水比が低いほど強度が大きくなることが分かった。Case3 に関しては、加圧を行なったが脱水棒 16 本では十分な脱水が出来ておらず、含水比も高い値となったと考えられる。

また、図-4.103 でも示したように加圧を行っていない Case2 や Case3 は、養生日数が経過しても一軸圧縮強度は増加しておらず、含水比は養生日数の経過に伴って若干増加した。通常、含水比は、固化材の水和反応によって固化効果を発揮するため、ブロック内の水分が減少し、含水比は低下する。今回の条件では、一軸圧縮強度は増加していないことからブロック内の水分が使われることなく、また水中養生

しているため含水比が若干ではあるが増加したと考えられる。

図-4.105 に Case2 の養生日数 91 日、Case3 の湿潤密度と一軸圧縮強度の関係を示す。含水比とは、反対の傾向を示し、一軸圧縮強度が大きい Case2 では湿潤密度が約 1.6g/cm^3 であるのに対して、一軸圧縮強度が比較的小さい加圧を行っていない Case2 や Case3 に関しては湿潤密度が 1.4g/cm^3 以下となった。つまり、湿潤密度が大きくなることによってより密なブロックが作製され、また含水比は低下し、一軸圧縮強度が大きくなることが分かった。

図-4.106 に Case2 の養生日数 91 日、Case3 の間隙比と一軸圧縮強度の関係を示す。間隙比に関しても、一軸圧縮強度が大きい Case2 は間隙比が約 1.5 と小さく、一軸圧縮強度が比較的小さい加圧を行っていない Case2 や Case3 は間隙比が 3 以上という値となった。また、Case3 の条件では加圧をしたにも関わらず間隙比は 3~3.5 であり、Case2 と比較すると 2 以上小さい値となった。これは、図-3.67 でも示したように脱水棒の本数が少なく粘土に含まれる水分の排水が十分ではなかったことによりブロック内の含水比が高い状態であったため、間隙比も大きくなったと考えられる。

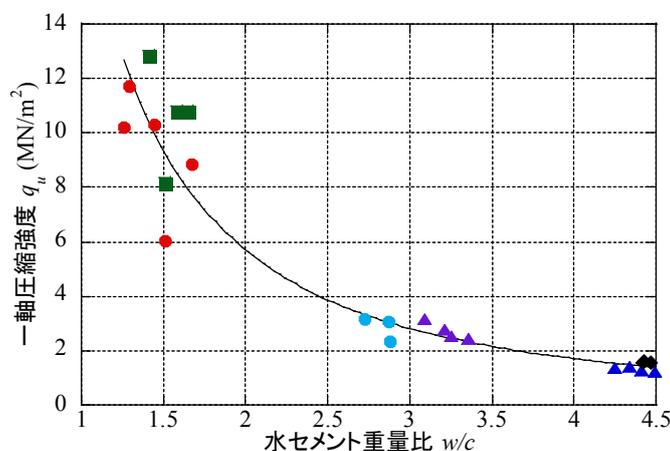


図-4.107 水セメント重量比と一軸圧縮強度

図-4.107 に Case2、Case3 の水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係を示す。

$$q_u = \alpha(w/c)^\beta \quad (4.18)$$

この式の形に当てはめていくと図中の曲線で表すことができ、式は以下に示すようになる。

$$q_u = 18.946(w/c)^{-1.7348} \quad (4.19)$$

この式の相関係数は、 $R=0.94733$ であり、高い相関を示した。養生日数の経過に伴って、一軸圧縮強度は増加していない条件があり、また湿潤密度、間隙比の値に大きな違いがあったとしても、水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係は 1 つの関係式で精度良く表すことが出来た。

(3) 新門司粘土の一軸圧縮強度特性

新門司粘土を用いて大型脱水固化装置を利用しブロックを作製して得られた結果を示す。

図-4.108、図-4.109、図-4.110 に、固化材添加率 40%、養生日数 7 日、脱水棒 49 本、ブロック作製日 2 月 6 日、2 月 16 日、2 月 21 日のブロックからコアリングを行った供試体の、それぞれの応力ひずみ曲線を示す。

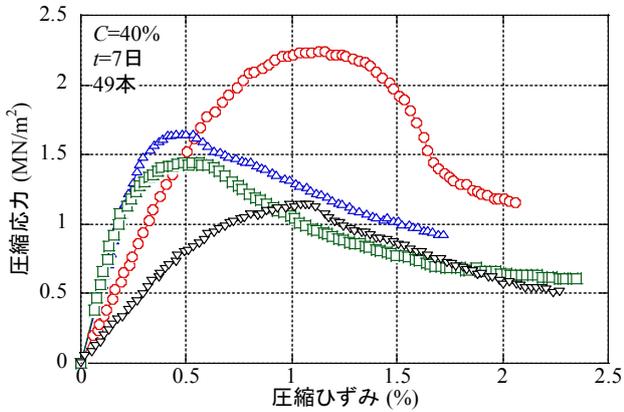


図-4.108 応力ひずみ曲線 (2月6日作製)

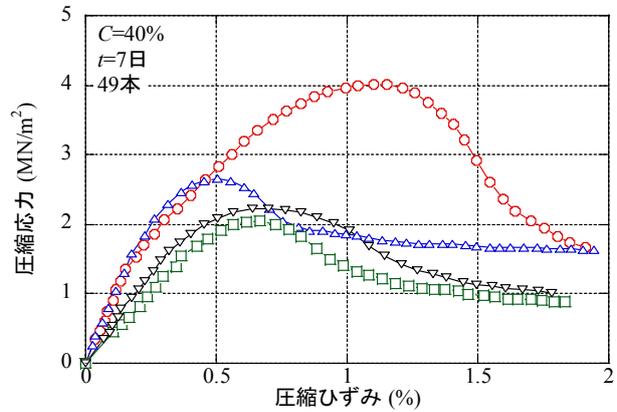


図-4.109 応力ひずみ曲線 (2月16日作製)

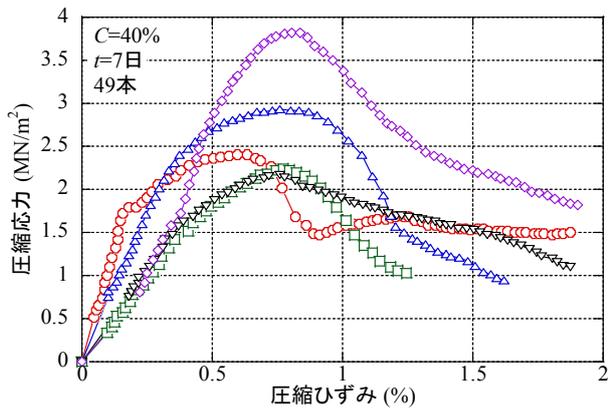


図-4.110 応力ひずみ曲線 (2月21日作製)

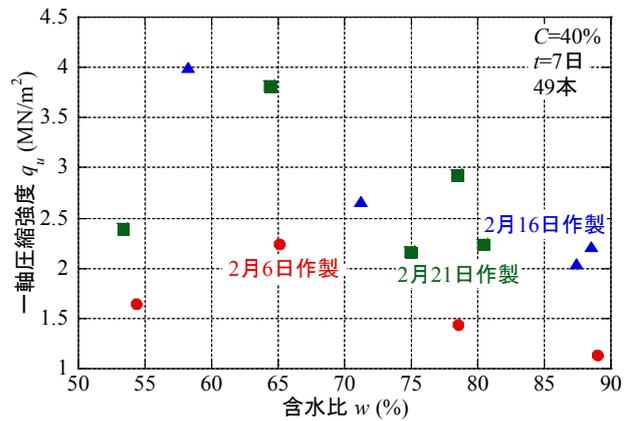


図-4.111 含水比と一軸圧縮強度

多少のばらつきはあるものの、ピーク強度は圧縮ひずみが 0.5%程度の際に 1.5~3.0MN/m²であった。全ての条件において、一番一軸圧縮強度が大きくなったのは約 4MN/m²であり、養生日数 7 日ということもあってコンクリートに匹敵するような強度までは得ることが出来なかった。ピーク強度を迎えた後に徐々に強度が減少していった。

図-4.111 に、大型脱水固化装置を用いて作製したブロックの含水比と一軸圧縮強度の関係を示す。同じブロックからコアリングした供試体の結果にも関わらず、条件によっては一軸圧縮強度が約 1.5MN/m²異なった。これは、コアリングをした場所の違いによってでた誤差であると考えられる。しかし、含水比に関しては、どの条件においても一軸圧縮強度の増加に伴って減少するという傾向が見られた。このことから、強度には含水比が重要な要因であると考えられる。

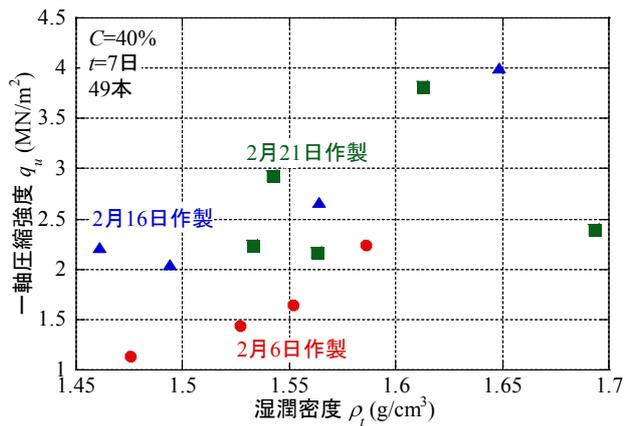


図-4.112 湿潤密度と一軸圧縮強度

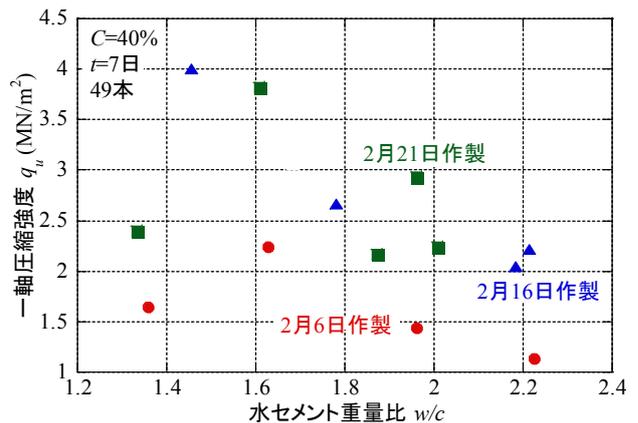


図-4.113 水セメント重量比と一軸圧縮強度

図-4.112 に大型脱水固化装置を用いて作製したブロックの湿潤密度と一軸圧縮強度の関係を示す。土質試料に新門司粘土を用いた場合でも土質試料に関門粘土を用いた場合と同様に、含水比とは反対の傾向を示し一軸圧縮強度の増加に伴って湿潤密度も増加した。

図-4.113 に大型脱水固化装置を用いて作製したブロックの水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係を示す。含水比を固化材添加率で除した値を水セメント重量比で定義していることから、固化材添加率が40%と一定である今回の条件に関しては、含水比と一軸圧縮強度の関係と類似した傾向を示した。また、土質試料に関門粘土を用いた結果は、養生日数が数種類あったことから回帰曲線を算出できたが、土質試料に新門司粘土を用いた今回の場合は養生日数7日の結果しか得られてないことから、回帰曲線を算出することは出来なかった。

4.5.3 固化材添加率0%のブロックの含水比特性

Case1の実験条件では、脱水棒49本、固化材を添加せずに5MPaで圧密を行なった。固化材を添加することによって、粘土の透水性が増し、排水しやすい条件になるといわれている。したがって、固化材を添加していないCase1は、透水性が低く脱水に非常に時間がかかったため、圧密度100%まで圧密することが出来ず、ブロックを作製することが出来なかった。ブロックの取り出したときの写真を以下に示す。



写真-4.37 ブロック取り出し状況



写真-4.38 ブロック取り出し状況



写真-4.39 ブロック取り出し状況



写真-4.40 塊から取り出した粘土



写真-4.41 塊から取り出した粘土

写真で示したように、ブロックを取り出す際に崩れ落ちてしまい、塊となったのは写真-4.39に示すフリーピストン側の20cm程度のみであった。したがって、コアリング、一軸圧縮試験を行うことが出来なかった。そこで塊となった部分の中心部付近の含水比試験を行った。脱水棒4本を頂点とした1辺15cmの四角形を16等分し、含水比を測定した。取り出した四角形の塊を写真-4.40、写真-4.41に示し、16等分した際の概略図を図-4.114に示す。また、図-4.114に対応した場所の含水比試験の結果を図-4.115に示す。

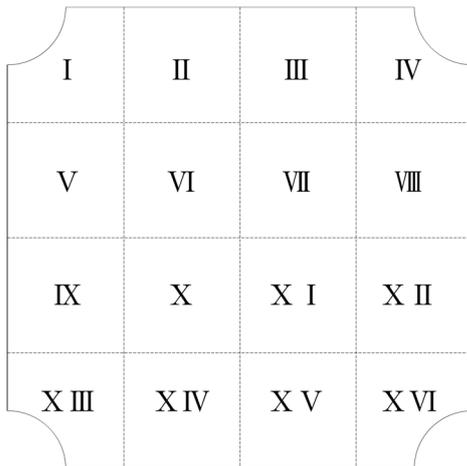


図-4.114 粘土の16等分概略図

74.01%	97.40%	100.36%	88.53%
100.33%	107.60%	114.55%	110.21%
99.75%	105.46%	109.43%	101.37%
80.28%	96.68%	102.64%	82.20%

図-4.115 含水比試験の結果

脱水棒に近いI、IV、XIII、XVIは、含水比は90%以下であったが、それ以外の場所に関しては、約100%を超える値となった。したがって、大型のブロックでは含水比が一律になっていないことが分かり、図-4.115に示した結果から含水比が異なることによって一軸圧縮強度にもばらつきが出ることも分かった。さらに、この結果より、脱水棒の本数の検討、排水の重要性が分かった。

4.5.4 まとめ

本章では、大型脱水固化装置を用いて作製した浚渫土砂ブロックの強度特性について評価考察を行なった。得られた結論について以下に示す。

- ・応力ひずみ曲線

1) Case3の脱水棒が16本のブロック、また加圧していない固化材添加率40%の粘土の塊に関しては、ピーク強度を迎えた後に徐々に強度が減少した。Case2の脱水棒が49本のブロックは、ピーク強度を迎

えた後、直ちに強度が減少した。

- 2) 破壊ひずみは、多少のばらつきはあるものの 0.6%~1.0%であり、コアリング位置、養生日数、加圧の有無、脱水棒の本数による違いはないと考えられる。

・一軸圧縮強度

- 1) 今回行なった実験において Case2 に関しては、養生日数の経過に伴い一軸圧縮強度は増加したが、それ以外の条件では養生日数が経過しても一軸圧縮強度は増加しなかった。このような結果となった主な要因に含水比が考えられた。
- 2) 大型脱水固化装置を用いて作製したブロックの水セメント重量比と一軸圧縮強度には強い相関が見られ、以下の 1 つの式で表すことが出来た。

$$q_u = 18.946(w/c)^{-1.7348} \quad (4.19)$$

相関係数は $R=0.81835$ と高い相関を示し、この式で精度良く表すことが出来ることが分かった。

- 3) Case1 は、大型脱水固化装置を用いて圧密しても非常に長い時間がかかりブロックを作製することが出来なかった。含水比試験を行った結果、大きいところで 30%の違いがあった。

4.6 大型高压脱水固化処理装置によるブロックの材料特性

4.6.1 はじめに

本節では、大型脱水固化処理装置を用いて作製したブロックに行った含水比試験と一軸圧縮試験の結果をまとめた。得られた結果を作製時期、養生条件、養生日数およびブロックの中の位置による違いに着目して評価、考察を行った。

大まかな内容は、以下のようになる。

4.6.2 圧密沈下特性

4.6.3 含水比試験

4.6.4 強度特性

4.6.5 ブロックの均一性

4.6.6 まとめ

4.6.2 圧密沈下特性

(1) 圧密沈下曲線

図-4.116 に新門司沖粘土を使用して H30 年 12 月に作製した 3 つのブロックの時間沈下曲線を示す。12 月 10 日作製ブロックは途中 7 分前後で変位計にトラブルがあったこと、12 月 13 日と 12 月 17 日作製

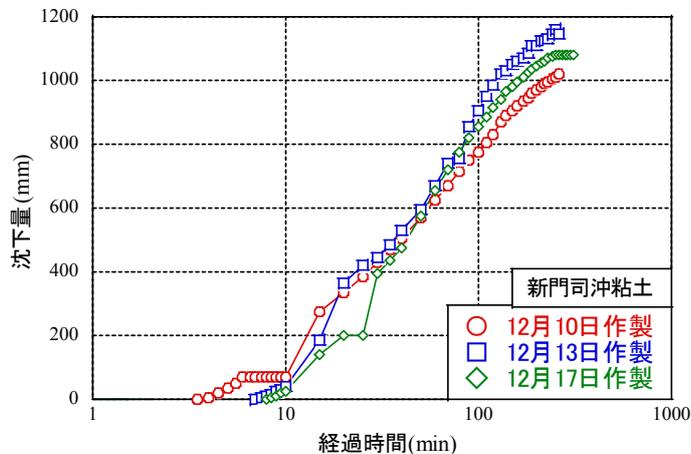


図-4.116 時間沈下曲線(H30年12月作製)

ブロックは圧力をかける過程で徐々に加圧していくために 1MPa、2MPa、(4MPa)、5MPa と順番に設定圧力を変えたため、経過時間 40 分までのそれぞれの時間沈下曲線が違う形となった。経過時間 40 分以降は 3 つのブロックのグラフはすべて同じような沈下曲線となり、経過時間 10 分から本格的に沈下が始まり、最終的には 12 月 10 日作製ブロックは 1018mm、12 月 13 日作製ブロックは 1144mm、12 月 17 日作製ブロックは 1081mm まで沈下した。この結果より、5MPa で 3~4 時間圧密を行うと最初に 2m あった混合土は約半分の 1m まで減容することができた。

図-4.117 に木須の既往の研究¹⁾として宇部粘土を用いて作製したブロックの時間沈下曲線を示す。表-4.20 に作製したときの実験条件を示す。

表-4.20 実験条件

Case	初期含水比	固化材添加率	脱水棒の本数
1	200%	0%	49本
2		40%	
3			16本

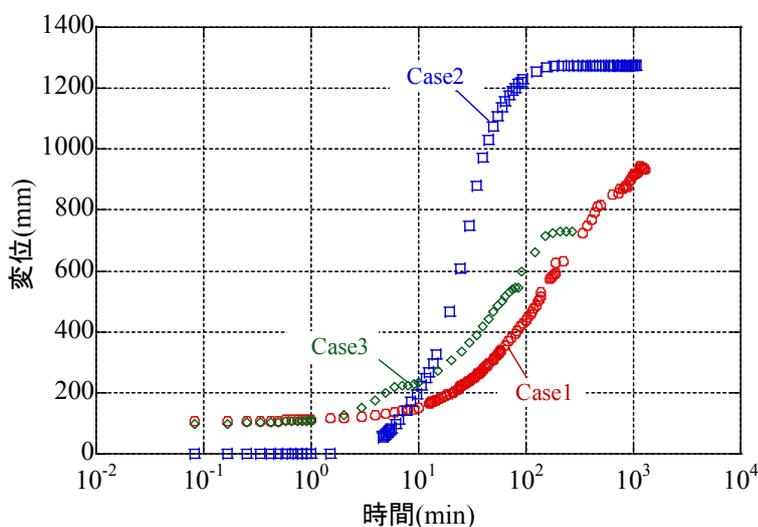


図-4.117 時間沈下曲線(夏期作製)

本実験では初期含水比 200%、固化材添加率 40%、脱水棒の本数は 49 本で行ったため、Case2 と本実験の結果を比較すると、2 つのグラフで変位が進み始める時間は 5~10 分でほぼ同じであったが、曲線の傾きは宇部粘土を用いて作製した既往の実験で大きくなった。また、今回の実験では圧密終了時まで加圧できなかったが、既往の実験ではある値に到達するとじりじりと変位が進むことなく止まり、より短い時間で圧密が終了していることがわかる。

(2) 圧密度

図-4.118 に新門司沖粘土を使用して H30 年 12 月に作製した 3 つのブロックの圧密度と時間の関係を示す。

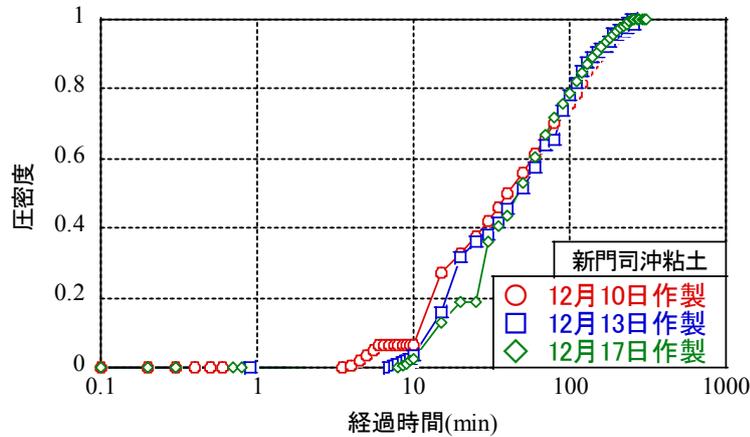


図-4.118 圧密度と時間の関係(新門司沖粘土、冬期作製)

圧密度は、ブロックを作製する際の圧力のかけ方が異なる経過時間 0~40 分までは、それぞれのブロックで圧密度の上昇の仕方に違いがみられたが、脱水圧力 5MPa になった後はどのブロックも圧密度 0.4 から同じような挙動をみせた。また、大型脱水固化処理装置は圧力がかかり始めるのに時間がかかるため、圧密度の上昇は 5~10 分からはじまる結果となった。

図-4.118 と図-4.119 に木須の研究より新門司沖粘土を用いて冬期(H30 年 2 月)に作製したブロックの圧密度と時間の関係を示す。

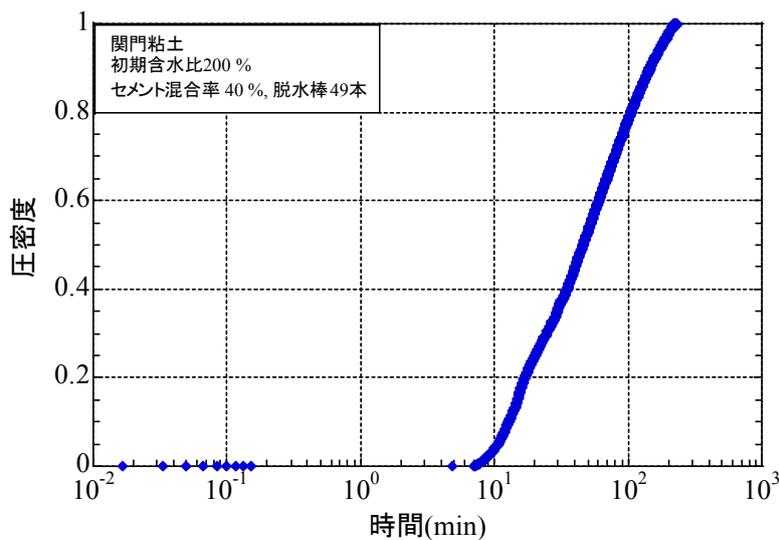


図-4.119 時間沈下曲線(新門司沖粘土、冬期作製、2回目)

図-4.117と比較すると、圧密開始時間は10分前後になり経過時間100分で圧密度0.8に達したことより、ほぼ同じ挙動をしていることがわかった。

図-4.120に木須の研究より宇部粘土を用いて作製したブロックの圧密度と経過時間の関係を示す。

冬期に作製したブロックと Case2 を比較すると、時間沈下曲線と同様に圧密度の経過時間に対する変

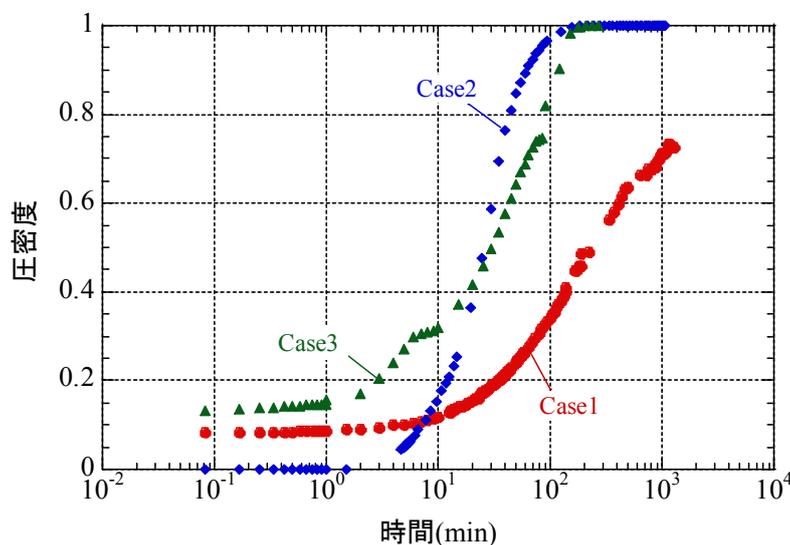


図-4.120 圧密度と時間の関係(宇部粘土、夏期作製)

化の割合が冬期作製したブロックの方が小さい結果となった。同じ経過時間100分では既往の実験では圧密度1に対して今回の実験では圧密度は0.8となった。既往の実験はブロックを夏期に、今回は冬期に作製したため、前節で温度の高い常温環境の圧密が速く進むという結果が得られたことより、室内実験装置より大きい大型高圧脱水固化処理装置での圧密ではより顕著にその傾向が現れたと考えられる。

(3) 減容化率

減容化率を式(4.20)で求めた。減容化率とは、圧密終了時の供試体高さを初期状態の供試体の高さで除した値を1から引いた値に100をかけた値とした。求めた減容化率を図-4.121に示す。

$$\text{減容化率} = \left(1 - \frac{\text{圧密終了時の供試体の高さ}}{\text{初期状態の供試体高さ}} \right) \times 100 \quad (4.20)$$

減容化率は常温環境、低温環境ともに57~64%の範囲の値をとる。脱水圧力5MPaで圧密することで約半分に減容できることがわかった。また、圧密沈下量と圧密度の結果からも確かめられたように養生環境によって最終圧密沈下量は変わらないことがわかった。

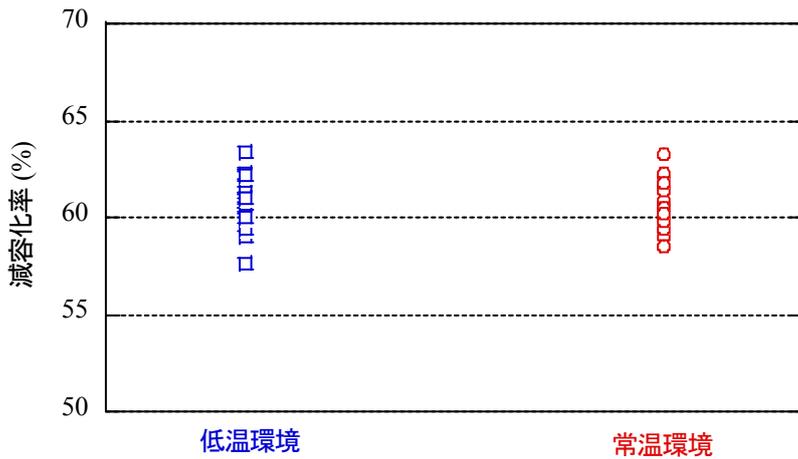


図-4.120 減容化率

4.6.3 含水比試験

本節では、大型脱水固化処理装置を用いて作製したブロックの含水比試験結果について述べる。図-4.121 に宇部粘土を用いて夏期に作製し、実験日まで水中で養生していたブロックの養生日数と含水比の

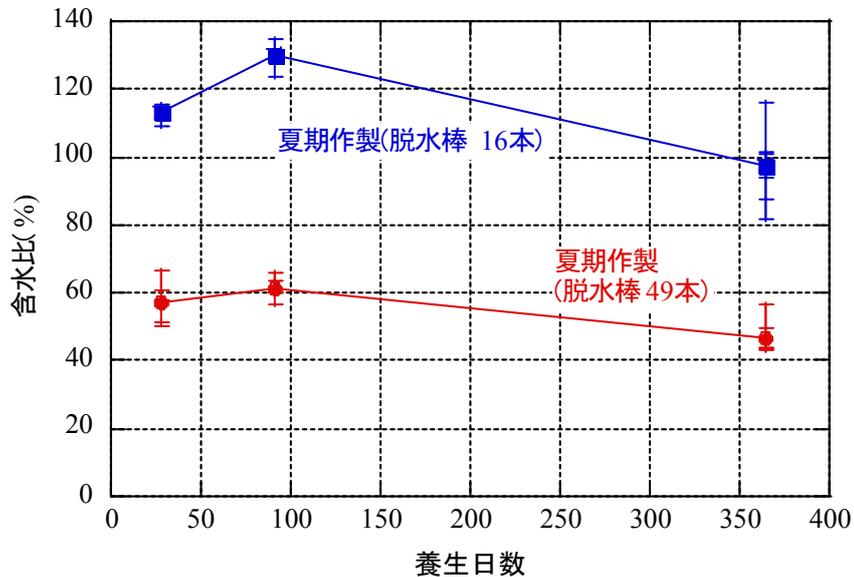


図-4.121 養生日数と含水比(宇部粘土, 夏期作製)

関係を示す。

脱水棒 16 本で作製したブロックは養生 28 日で 110%となり養生 91 日で 20%上昇したのち 100%程度まで減少する。脱水棒 16 本で作製したブロックは同様に 60%程度から 50%程度まで減少した。脱水棒の本数を 16 本から 49 本に増やすことで含水比は半分にすることができた。

図-4.122 に新門司沖粘土を用いて冬期（H30年2月）に作製したブロックの養生日数と含水比の関係を示す。

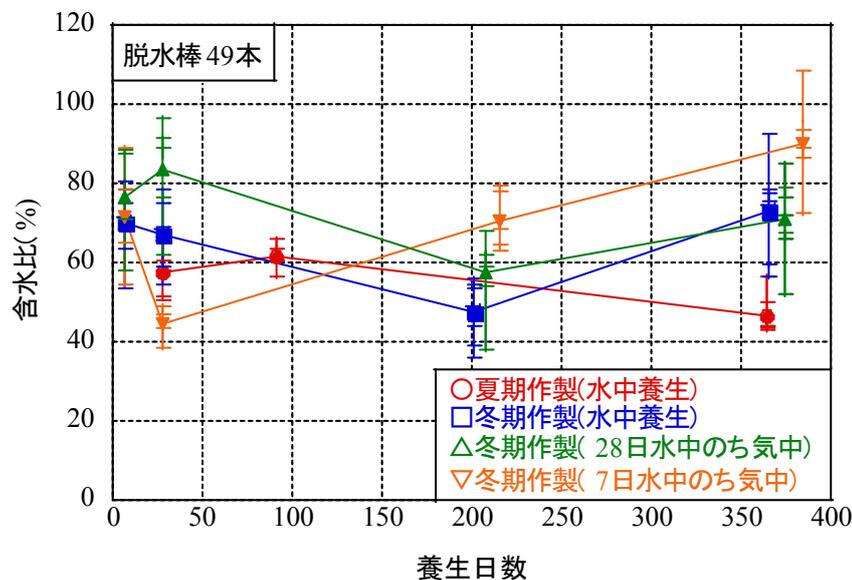


図-4.122 養生日数と含水比（新門司沖粘土，冬期作製）

まず、実験日まで水中養生していたブロックに着目する。冬期（H30年2月）に作製したブロックは養生7日の70%から養生200日には50%まで減少したのち、養生1年でもとの含水比70%まで上昇した。夏期に作製したブロックは養生28日に55%程度であったが養生1年で15%程度減少した。養生200日までは夏期作製、冬期作製ともに養生日数の経過に伴い含水比は減少し、作製時期に関わらず含水比は近い値を示していることがわかる。

次に夏期作製したブロックの養生条件による違いに着目する。全てのブロックで水中養生していた養生7日では約70%とほぼ同じ値となった。その後、7日水中養生したのち気中養生したブロックは養生28日で25%程度減少したのち養生1年で90%まで上昇し、28日水中養生したのち気中養生したブロックは養生28日で10%上昇したのち20%減少し養生1年で70%まで増加した。全ての養生条件において含水比の変動は一定ではない結果が得られた。実験日まで水中養生したブロックの結果より、養生日数の経過に伴いブロック内の含水比は減少する傾向があると予測されるが、養生方法を気中養生に変更することで含水比の変動にばらつきがみられた。これは気中でブロックが乾燥し、ひび割れが生じることでブロック内に隙間ができ、コアリングや養生に使用した水によって正確な含水比を測定できなかったことが原因の一つと考えられる。

また、冬期（H30年2月）に作製したブロックの全ての養生条件において養生200日から養生1年にかけて含水比は大きく増加した。このことも時間の経過によるブロックの乾燥と劣化が原因であると考えられる。

4.6.4 強度特性

本節では大型脱水固化処理ブロックの一軸圧縮試験の結果についてまとめる。

(1) 応力ひずみ曲線

図-4.123 と 4.124 に宇部粘土を用いて夏期作製した養生1年のブロックの応力ひずみ曲線を示す。

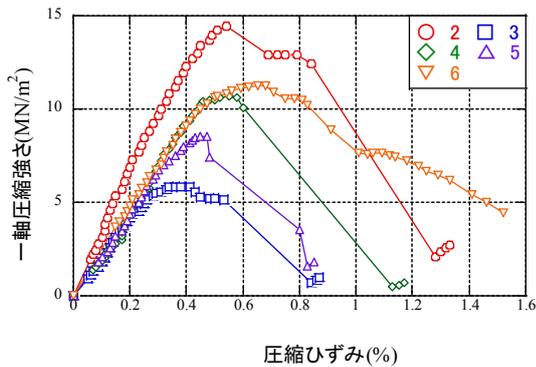


図-4.123 応力ひずみ曲線(脱水棒 49 本)

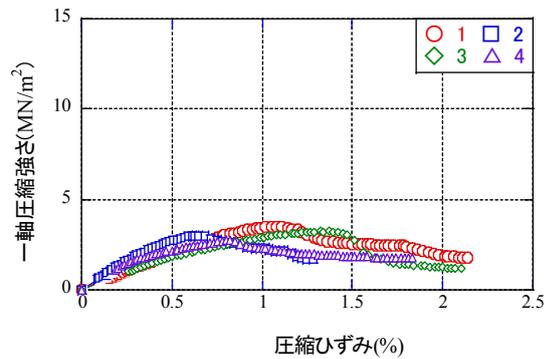


図-4.124 応力ひずみ曲線(脱水棒 16 本)

図-4.125~4.127 に新門司沖粘土を用いて冬期作製したブロックの 200 日養生したブロックの応力ひずみ曲線を示す。

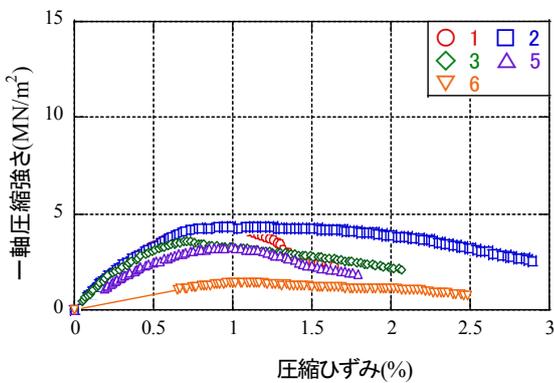


図-4.125 応力ひずみ曲線(水中 7 日のち気中)

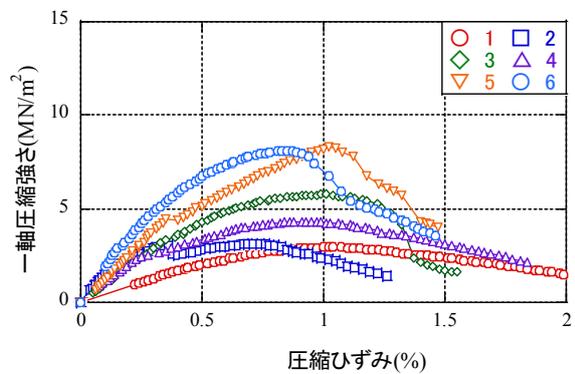


図-4.126 応力ひずみ曲線(水中 28 日のち気中)

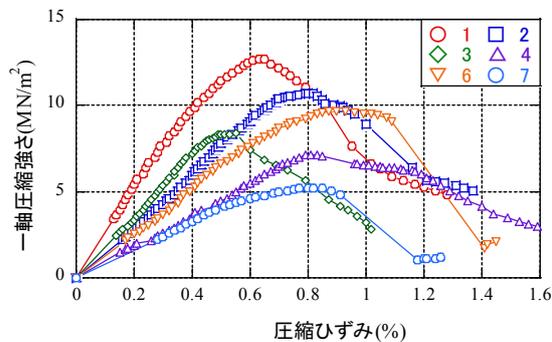


図-4.127 応力ひずみ曲線(水中)

(2) 一軸圧縮強度特性

図-4.128 に宇部粘土を用いて夏期作製したブロックの養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。

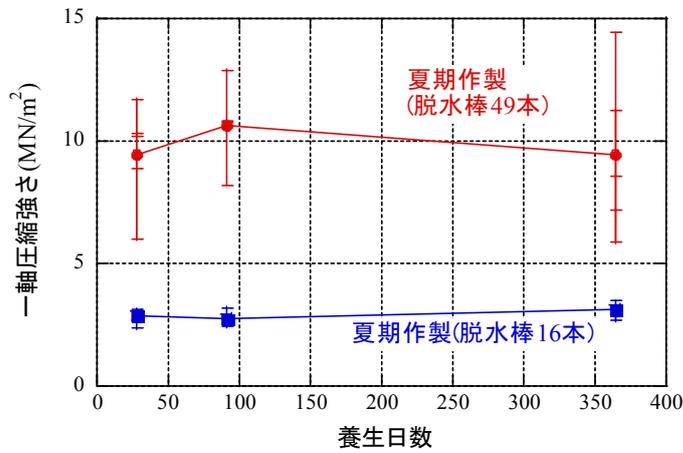


図-4.128 養生日数と一軸圧縮強さ(宇部粘土, 夏期作製)

脱水棒 16 本で作製したブロックの一軸圧縮強さは、養生日数の経過に関わらず 3MN/m² 程度で変化しない。脱水棒 49 本で作製したブロックの一軸圧縮強さは、平均値は 10MN/m² 程度から変化しないが、最大の一軸圧縮強さは増加傾向にあるため増加割合は小さいが、日数の経過の伴い強度が増加しているといえる。脱水棒 49 本で作製したブロックの 1 年養生した供試体の強度がばらついた原因として、ブロックからコアリングして整形をする過程で供試体にひびが入ったこと、供試体の端面が滑らかになっていなかったことがあると考えられる。

図-4.129 に新門司沖粘土を用いて冬期 (H30 年 2 月) に作製したブロックの養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。

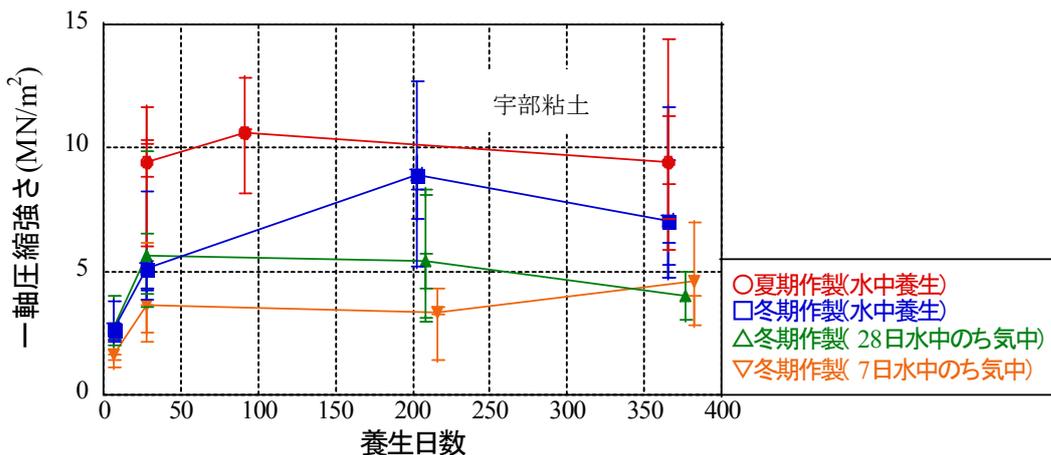


図-4.129 養生日数と一軸圧縮強さ(新門司沖粘土, 冬期作製)

冬期 (H30 年 2 月) 作製したブロックは養生 7 日ではすべての養生条件で 2.5MN/m² とほぼ同じ値となる。養生 28 日では、水中養生を続けたブロックは 5MN/m² 程度まで上昇するが、養生 7 日で水中養生を止めたブロックは強度増加割合が小さくなった。養生 200 日には、水中養生を止めた 7 日水中養生のち

気中養生したブロックと28日水中養生のち気中養生したブロックは強度増加が見られなかったのに対して、水中養生を続けたブロックの増加割合は小さくなったが8MN/m²程度までは上昇した。この結果は水中養生したブロックは強度増加し、気中に移したブロックは強度増加がみられないという養生条件の違いによる強度発現の違いをうまく表している。養生日数が1年経過すると、水中養生したブロックと28日水中で養生したのち気中養生したブロックの一軸圧縮強さは減少したが、7日水中養生したのち気中養生したブロックは1MN/m²増加した。気中で養生したブロックは表面から乾燥しブロックのコアリングが難しかったため、サンプル数が少なくなったこととブロックの劣化により供試体の強度にばらつきがみられる結果となった。

次に、作製時期に着目すると夏期作製は養生初期からほぼ最大の強度をもつものに対して、冬期作製ブロックでは養生日数の経過に伴い徐々に増加していく傾向がみられた。養生1年で夏期作製が冬期作製より平均値で2MN/m²程度高い値となるが、供試体個別では近い範囲に分布しており、養生日数の経過で作製時期による一軸圧縮強さの差はほとんどなくなるといえる。

図4.130に実験最終日まで水中で養生したブロックの一軸圧縮強さと水セメント重量比の関係を示した。水セメント重量比は含水比とブロック作製の固化材添加率を用いて算出した。

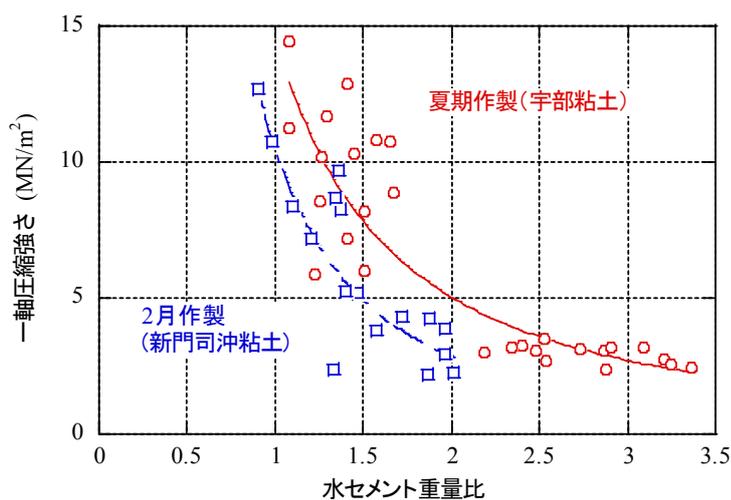


図-4.130 水セメント重量比と一軸圧縮強さ

全体的に水セメント重量比が大きいほど一軸圧縮強さは大きくなる傾向がみられる。脱水棒16本で作製したブロックは含水比が大きかったため水セメント重量比も2~3.5と大きくなった。脱水棒49本で作製したブロックは含水比が小さいため水セメント重量比は2以下の値をとり一軸圧縮強さも大きくなった。脱水棒16本で作製したブロックは脱水が十分に行われずブロック内に水が残ることで強度が低下し、脱水棒49本で作製したブロックは含水比が少ないほど間隙が小さくなったことと固化反応が進んだことで強度が増加したと考えられる。

式(4.20)に宇部粘土を用いて夏期作製したブロックの一軸圧縮強さと水セメント重量比の関係、式(4.21)に新門司沖粘土を用いて2月に作製したブロックの関係式を示す。

$$q_u = 14.566(W/C)^{-1.5316} \quad (4.20)$$

$$q_u = 10.457(W/C)^{-1.8673} \quad (4.21)$$

式(4.20)は $R=0.87058$ 、式(4.21)は $R=0.85764$ となり、ともに一軸圧縮強さと水セメント重量比の関係式に高い相関があることがわかった。式(4.22)に豊里²⁾が求めた宇部粘土を用いて作製したブロック一軸圧縮強さと水セメント重量比の関係式を示す。

$$q_u=18.946(W/C)^{-1.7348} \quad (4.22)$$

式(4.20)と式(4.22)を比較すると α と β の値ともに近い値をとり、精度のよい値を求めることができたといえる。

図-4.131 に新門司沖粘土を用いて冬期(H30年12月)に作製したブロックの水セメント重量比と一軸圧縮強さの関係を示す。また、同様に回帰式を式(4.23)に示す。

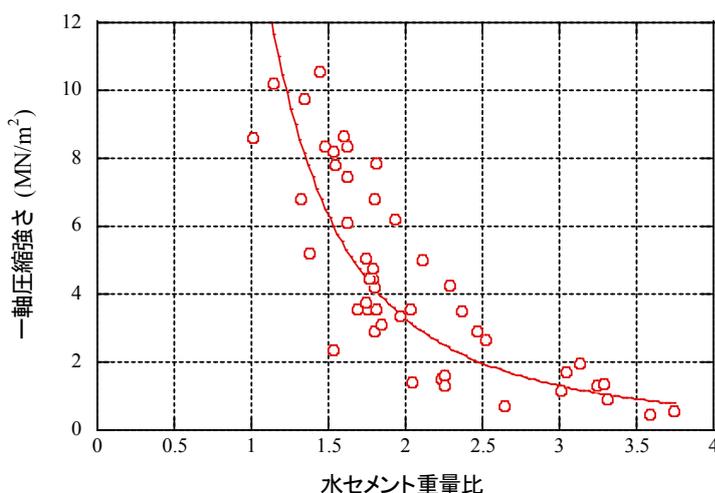


図-4.131 水セメント重量比と一軸圧縮強さ (H30/12)

$$q_u=19.95(W/C)^{-2.2838} \quad (4.23)$$

式(4.23)は $R=0.76685$ となり高い相関があることがわかった。また、式(4.21)、式(4.22)と比較すると水セメント重量比 1.0 の時の一軸圧縮強さを示す α の値が最も高くなり、強度増加率を示す β の値も高いことから作製したブロックの中では新門司沖粘土を用いて H30 年 12 月に作製したブロックが最も強度の高いブロックであるといえる。

4.6.5 ブロックの均一性

本節では大型脱水固化処理装置を用いて作製したブロック内の位置に対する含水比と強度の関係について記した。

(1) ブロックの位置と含水比特性

ブロックからコアリングをする際に、ブロックの端からコアリングをした位置を測り、ブロック内での含水比の変化を調べた。図-4.132 に示す大型脱水固化処理装置の蓋から右側への距離を横軸にとった。写真-4.42 にコアリングした後のブロックの写真を示す。

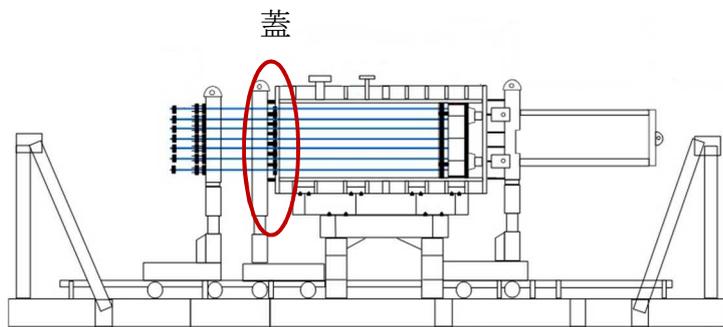


図-4.132 大型高圧脱水固化処理装置



写真-4.42 コアリング後のブロック

図-4.133~4.134 に新門司沖粘土を用いて H30 年 12 月に作製したブロックのコアリングした位置に対する含水比の変化の関係を示す。

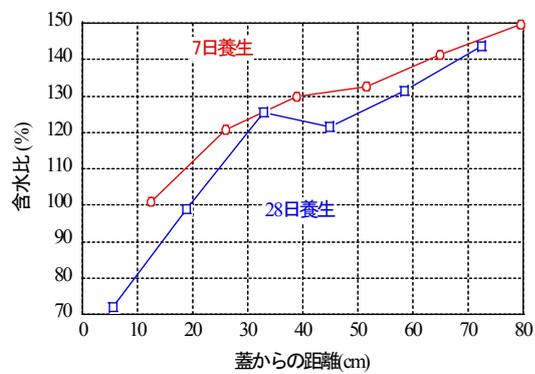


図-4.133 距離と含水比 (H30/11/29 作製)

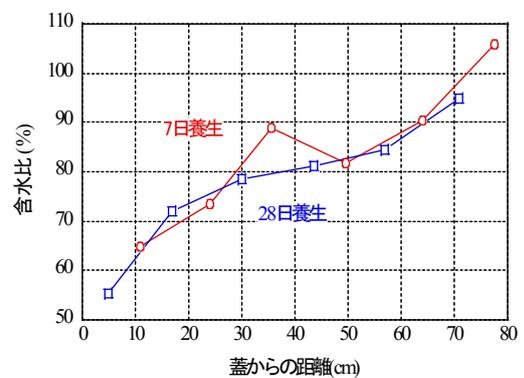


図-4.134 距離と含水比 (H30/12/10 作製)

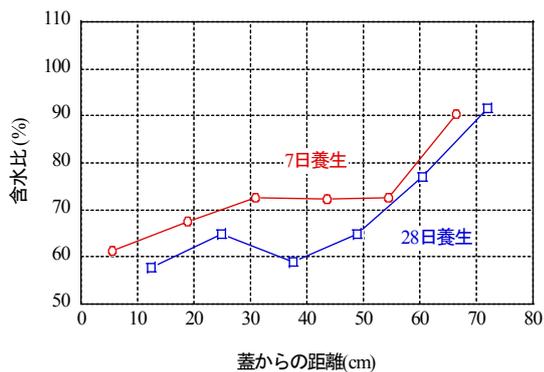


図-4.135 距離と含水比 (H30/12/13 作製)

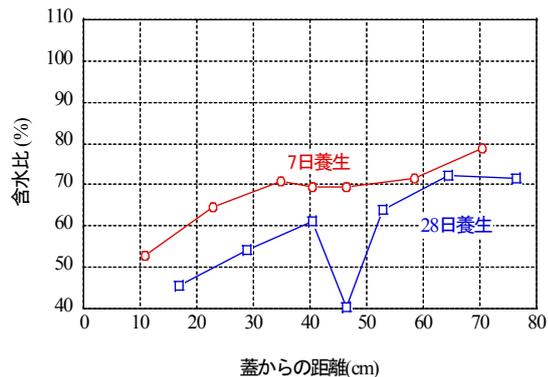


図-4.136 距離と含水比 (H30/12/17 作製)

図-4.133~4.136 よりすべてのブロックで蓋に近いほど含水比が小さくなった。図-4.133 の11月29日作製ブロックでは、ブロックの両端で70%と150%で約80%の差があり、図-4.136の12月17日作製ブロックでは両端で約30%の差となり、ブロックによって含水比が異なることがわかった。また、養生日数で比較すると、4つのブロック全てで7日養生が28日養生より大きな値を示しており、養生日数の経過により含水比の低下がみられた。

(2) ブロックの一軸圧縮強度特性

図-4.137~4.141 に(1)と同様にブロック内距離と一軸圧縮強さの関係を示す。

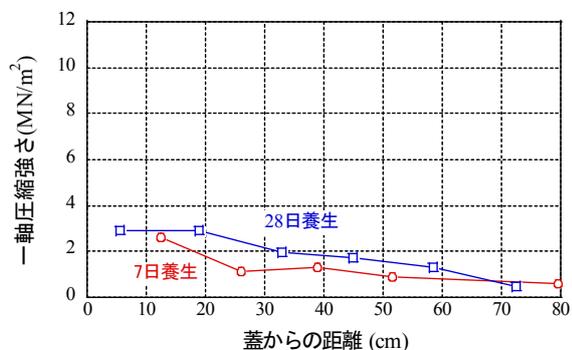


図-4.137 距離と一軸圧縮強さ (H30/11/29)

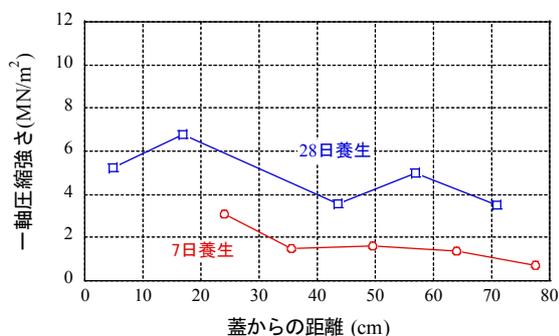


図-4.138 距離と一軸圧縮強さ (H30/12/10)

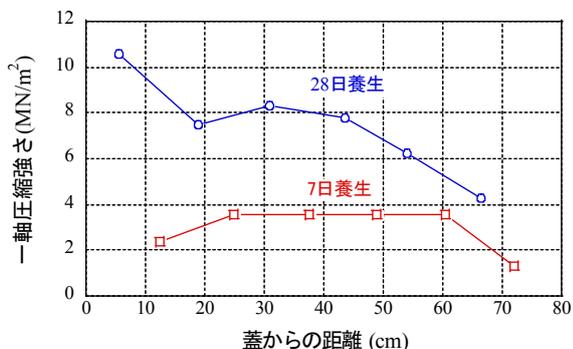


図-4.140 距離と一軸圧縮強さ (H30/12/13)

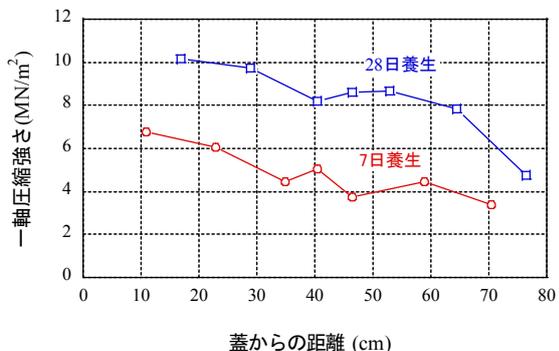


図-4.141 距離と一軸圧縮強さ (H30/12/17)

図-4.137~4.141より蓋に近い方がより強度がでることがわかる。ブロック内では両端で2~6MN/m²の強度差がある。含水比結果を用いるとブロック内では蓋に近い方の含水比が低くより強度がより大きくなることがわかる。また、含水比が大きい11月29日作製ブロックは強度が最大で3MN/m²となり、含水比が小さい12月13日製造ブロックや12月17日作製ブロックでは最大で10MN/m²程度まで増加し、これまでの考察で含水比が小さいほど強度が大きくなる傾向と一致している。

4.6.6 まとめ

本節では、大型脱水固化処理装置を用いて作製したブロックの含水比試験、一軸圧縮試験の結果について考察を行った。得られた結論を以下に示す。

圧密沈下特性

大型脱水固化処理装置を用いてブロックを作製した際の圧密は、夏期作製ブロックの方が冬期作製ブロックより同じ経過時間では圧密度で0.2ほど進みがはやくなる。

含水比試験

夏期作製ブロックの含水比は常温環境と低温環境ともに養生28日から養生1年までに10%程度と大きな変化はないが、2月作製ブロックでは養生日数の経過に伴い養生200日で20%減少する。また、7日気中のち水中養生したブロックの含水比は養生28日で20%減少したのちまた20%上昇し、変動に一定の傾向が見られなかった。

一軸圧縮試験

一軸圧縮強さは水中養生した冬期(H30年2月)作製ブロックはブロック内の反応に使用される水が保たれることで日数の経過に伴い2.5MN/m²から8MN/m²程度まで増加したが、気中養生したブロックは水が失われ4MN/m²程度で強度増加が止まった。また、夏期作製ブロックは養生初期から10MN/m²となり冬期作製ブロックの2倍以上の強さを持ち、その後は大きく変化しなかった。

ブロックの一軸圧縮強度特性

ブロックを作製したときの蓋に近い方が含水比は30~50%小さくなり、一軸圧縮強さは2~6MN/m²増加した。

4.7 強度推定式の提案

4.7.1 はじめに

本章では、室内試験、脱水固化装置、大型脱水固化装置の3種類を用いて作製した、浚渫土砂ブロックの一軸圧縮強度と水セメント重量比の関係から関係式を算出し、それぞれの比較、考察を行なった。また、大型脱水固化装置を用いて作製したブロックからコアリングした供試体の超音波伝搬速度を測定し、一軸圧縮強度との関係性について、既往の研究を用いて比較、考察を行なった。

4.7.2 水セメント重量比と一軸圧縮強度

(1) 式の比較

本研究において用いた水セメント重量比は、浚渫土砂ブロックの強度に強い相関性がある簡便な指標であり、供試体内の水分量と添加した固化材の割合を示す。この水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係は、以下の式で表すことが出来る。

$$q_u = \alpha(w/c)^\beta \quad (4.24)$$

α は水セメント重量比が 1.0 の時の一軸圧縮強さであり、 β は強度増加率を示す。 w は供試体の含水比、 c は固化材の添加率を示す。

式(4.24)より水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係はそれぞれ精度良い1つの式で表すことが出来た。それぞれの関係式を以下に示す。

$$\text{室内試験} : q_u = 11.071 (w/c)^{-1.2393} \quad (4.25)$$

$$\text{脱水固化装置} : q_u = 31.770 (w/c)^{-1.3397} \quad (4.26)$$

$$\text{大型脱水固化装置} : q_u = 18.946 (w/c)^{-1.7348} \quad (4.27)$$

水セメント重量比が1の時の一軸圧縮強度をあらわす α は、脱水固化装置を用いた式が31.770と一番大きく、室内試験の式が11.071と一番小さな値を示した。また、強度増加率を表す β は、室内試験、脱水固化装置を用いた式が1.2~1.3であり、大型脱水固化装置を用いた式は1.7であった。

β の値に関しては、大きな違いはなく強度増加率はあまり変わらないということが分かった。一方、 α の値に関しては、大きくことなり約20の違いがあった。これは、既往の研究より母材の物理特性によって決まるパラメータであると言われている。大型脱水固化装置の用いた実験に関しては、宇部粘土を使用した。また、室内試験、脱水固化装置を用いた実験に関しては、同じ関門粘土を用いたが、採取した時期や場所が違ったことからこのような違いが出たと考えられる。したがって、水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係から得られた関係式は、母材である浚渫粘土の物理特性によって大きく異なることが分かった。

(2) 含水比の低下

含水比と一軸圧縮強度の関係より、強度の増加に伴って含水比が低下するという傾向を示した。また、養生日数の経過に伴って一軸圧縮強度は増加するという事も分かった。したがって、養生日数の経過に伴って含水比も低下することが考えられた。そこで、**図-4.142**、**図-4.143** に室内試験、脱水固化装置を用いた試験の養生日数と含水比の結果を示す。大型脱水固化装置を用いた試験結果に関しては、Case1は圧密度100%まで圧密することが出来ず、Case3は脱水棒の本数が少なく排水に時間がかかったことから圧密中に固化材の固化作用が発揮したと考えられ養生日数と含水比の関係が上手に示されていないと考えられたためのグラフは掲載していない。

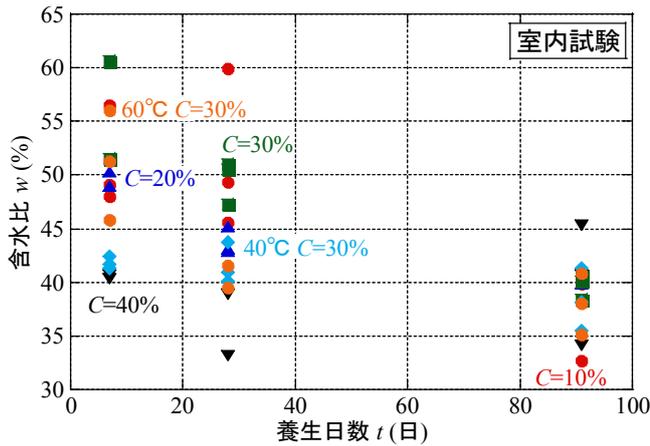


図-4.142 含水比と一軸圧縮強度の関係

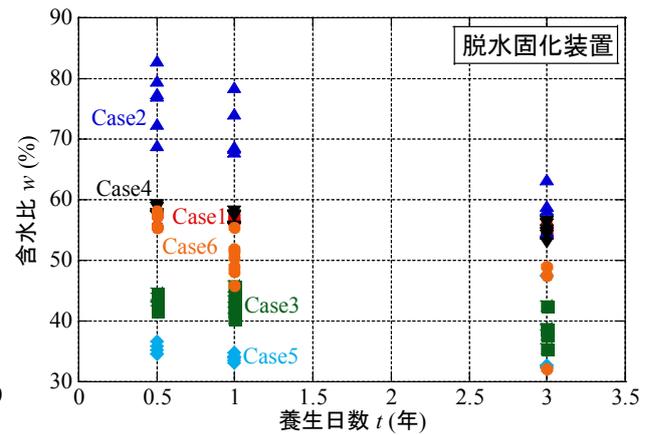


図-4.143 養生日数と含水比の関係

多少のばらつきはあるものの、ほぼ全ての条件において養生日数の経過に伴って含水比は低下した。その中でも、室内試験では養生日数が7日、脱水固化装置では養生日数が0.5年定を行なった初期の段階で、含水比が高いものほど養生日数の経過に伴う含水比の低下が大きくなった。さらに、養生温度が高いものは、含水比の低下が大きくなった。

養生日数、養生温度の影響による含水比の低下を把握するため、室内試験の結果を用いて評価考察を行なった。**図-4.144** に積算温度と含水比の関係を示す。

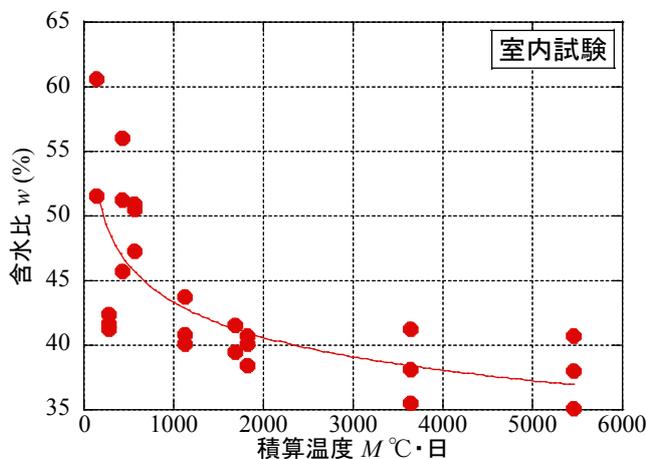


図-4.144 積算温度と含水比の関係

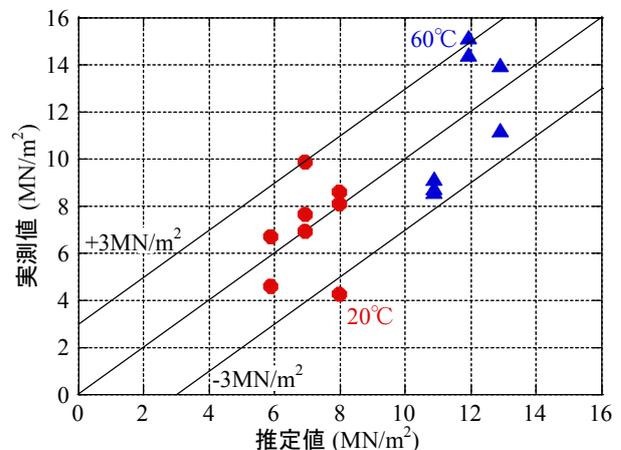


図-4.145 一軸圧縮強度の推定値と実測値の関係

ここで、積算温度とは、養生温度と養生日数の積で定義したものであり、通常はコンクリートの強度に及ぼす養生条件、特に養生温度の影響を定量的に表すために用いられている。図より含水比は、積算温度の増加に伴って減少する傾向を示した。また、積算温度と含水比の関係は、水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係を示す式(4.24)と同等の形で表すことができ、式(4.28)で表せた。

$$w = 82.702 \cdot M^{-0.093602} \tag{4.28}$$

この式の相関係数は、 $R=0.75154$ であり高い相関性を示した。したがって、積算温度と含水比の関係から求めた式(4.28)を、水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係から求めた式(4.24)の含水比 w に代入することによって、養生温度および養生日数の影響による含水比の低下を考慮した強度推定式を作成することが出来た。

推定式より得られた一軸圧縮強度の推定値と実測値の関係を図-4.147に示す。養生温度 20°C 、養生温度 60°C 、どちらも誤差は約 3MN/m^2 以内となった。このことから、一軸圧縮強度が大きい場合でも養生温度が高い場合でも精度良く推定することができ、養生日数、また養生日数の経過に伴う含水比の低下を考慮した強度推定式を提案することが出来た。

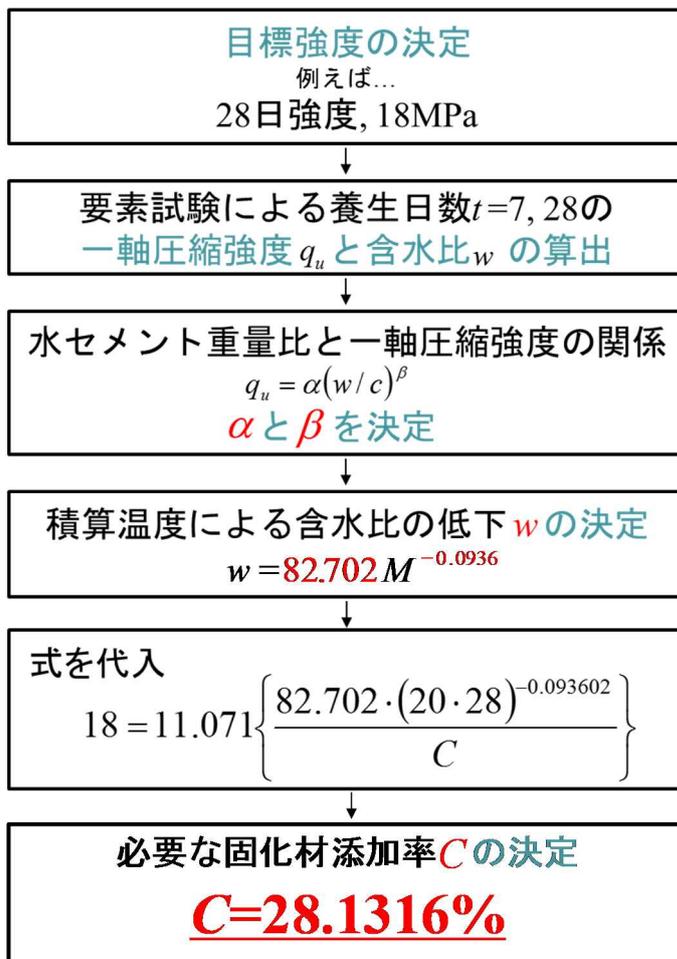


図-4.146 強度推定の流れ

図-4.146 に式(4.24)を式(4.28)に代入した強度推定式を用いた、強度推定の流れを示す。最初に、目標強度、養生温度、養生日数を決定する。要素試験、室内試験で得られた水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係より、式(4.25)の α 、 β を算出する。そして、積算温度と含水比の関係より、式(4.28)によって含水比の低下を算出する。ここで、積算温度 M は養生日数と養生温度の積で定義され、これを用いることによって含水比に対して養生日数、養生温度を考慮することが出来る。式(4.28)を、 α 、 β の決定した式(4.27)に代入することによって、目標強度を満たす固化材添加率 C が決定する。固化材添加率は、土質材料に用いた浚渫土砂の乾燥重量に対しての割合を示している。

水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係においては、養生温度の違いによって α の値が異なるため、温度ごとの式を算出する必要がある。

4.7.3 超音波速度による強度推定

(1) 測定方法

写真-4.43、写真-4.44 に本研究で用いた超音波測定装置を示す。また、装置の製品仕様を表-4.21 に示す。



写真-4.43 超音波速度測定装置



写真-4.44 超音波伝搬速度測定

表-4.21 装置の製品仕様

測定範囲	0.1~9999 μ s
分解能	0.1 μ s
パルス電圧	125V, 250V, 350V, 500V, AUTO
発信周波数レンジ	24kHz~500kHz
メモリー	最大500データ
ゲイン	1X, 10X, 100X

大型撒水固化装置を用いて作製したブロックの超音波測定は、コアリングし高さ約 100mm、直径約 50mm の供試体で行なった。トランジューサーの端面に専用グリスを塗り、写真-4.44 で示すように供試体を左右から挟んで超音波伝搬速度の測定を行なった。その際のパルス電圧は AUTO にして測定を行なった。

(2) 測定結果

超音波伝搬速度と移送時間の結果を表-4.22 に、また超音波伝搬速度と一軸圧縮強度の関係を図-4.147 に示す。

表-4.22 超音波伝搬速度と移送時間の結果

Case	固化材添加率 C (%)	養生日数 t (days)	加圧	一軸圧縮強さ q_u (MN/m ²)	超音波速度 (km/s)	移送時間 (μs)
1	0	-	あり	-	-	-
2	40	28	あり	10.21	2.450	40.4
				11.70	2.475	40.4
				8.85	2.335	42.4
				6.03	2.335	39.9
			10.30	2.466	36.9	
			1.37	1.687	56.9	
			1.21	1.695	58.4	
		なし	1.26	1.690	57.4	
			1.42	1.690	57.4	
			1.63	1.787	55.4	
		91	あり	8.17	2.471	42.9
				10.80	2.482	41.9
				10.77	2.476	42.4
				12.85	2.589	39.4
なし	1.56		1.844	56.4		
	1.54		1.777	57.4		
	1.63		1.787	55.4		
3	40	28	あり	3.05	1.943	49.4
				3.15	1.964	49.9
				2.35	1.925	50.4
				2.75	1.948	53.4
				2.55	1.947	52.4
		91	あり	2.43	1.912	54.4
				-	1.880	56.9
				3.18	1.930	54.4
				-	-	-
				-	-	-

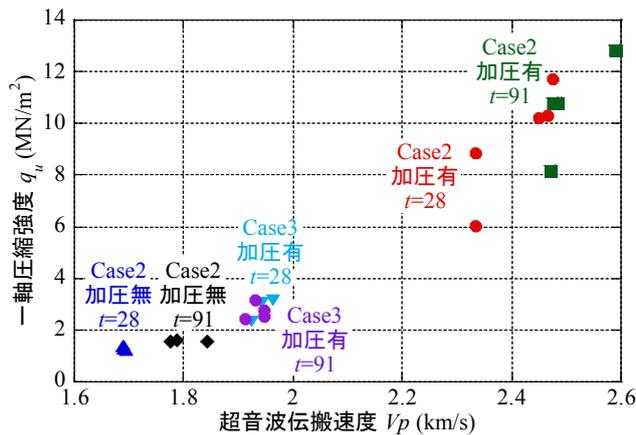


図-4.147 超音波伝搬速度と一軸圧縮強度の関係

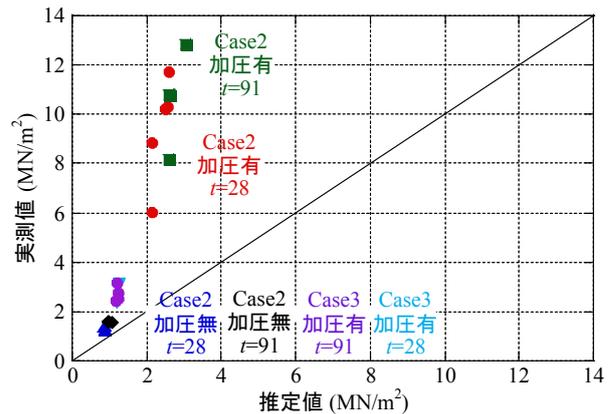


図-4.148 一軸圧縮強度の推定値と実測値の関係

超音波伝搬速度の増加に伴って一軸圧縮強度も増加し、また一軸圧縮強度が約 13MN/m² の Case2、加圧あり、養生 91 日では、超音波伝搬速度は約 2.6km/s であったのに対して、一軸圧縮強度が約 1MN/m² の Case2、加圧なし、養生 28 日では、超音波伝搬速度は約 1.7km/s であり、約 0.9km/s の違いがあった。このことから、より密で一軸圧縮強度が大きいものが、超音波を伝えやすく、速度も速くなったと考えられる。また、現在得られている結果より、超音波伝搬速度と一軸圧縮強度の関係式を表すと以下のような式となる。

$$\text{線形関数： } q_u = 12.487Vp - 20.781$$

$$\text{指数関数： } q_u = 0.069711 \cdot Vp^{5.5103}$$

$$\text{累乗関数： } q_u = 0.015847 \cdot e^{2.6223 Vp}$$

それぞれの相関係数は、 $R=0.97$ 、 $R=0.98447$ 、 $R=0.98273$ であり高い相関性を示した。しかし、データ数が少ないことありこの式では十分相関性があるとは断定することは難しい。そこで、日本建築学会による既往の研究¹⁾より、超音波伝搬速度と圧縮強度の関係による推定式が提案されており、以下に示す。

$$q_u = 215Vp - 620 \quad (4.29)$$

この式と本研究で得られた結果を比較すると、超音波伝搬速度が約 2.8km/s 以下になると一軸圧縮強度が負の値を示し、本研究の結果では多くの場合が負の値となってしまった。また、既往の研究結果から一軸圧縮強度が 40MN/m² を超える範囲でも式 (4.29) は実測値と大きく異なるといわれている。

したがって、木村ら²⁾によって求められた以下の式を用いて比較を行なった。

$$q_u = 0.0805 \cdot e^{1.404 Vp} \quad (4.30)$$

この式の相関係数は $R=0.89666$ であり、式 (4.30) を用いて得られた推定値と実験から得られた実測値の関係を図-4.148 に示す。実測値と推定式を比較すると、全ての条件において実測値が推定値を上回った。推定式を算出するにあたって、既往の研究では一軸圧縮強度が 10MN/m² 以上のデータを用いているため、本研究の実測値と大きな誤差が生じた要因の 1 つと考えられる。したがって、超音波伝搬速度と一軸圧縮強度の関係は浚渫土砂ブロック独自のものを推定する必要があると考えられる。今後は、コアリングをした供試体の超音波伝搬速度のデータを多く得ることによって、より信用性のある関係式を算出する必要がある。さらに、ブロックからコアリングをしない超音波伝搬速度を用いた非破壊試験の結果と比較して考察する必要がある。

4.7.4 まとめ

3 種類の装置を用いて作製した、浚渫土砂ブロックの一軸圧縮強度と水セメント重量比の関係から得ら

れた関係式の比較、考察を行なった。また、大型脱水固化装置を用いて作製したブロックの供試体の超音波伝搬速度を測定し、一軸圧縮強度との関係性について、既往の研究を用いて比較、考察を行なった。得られた結論について以下に示す。

・水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係式

- 1) 水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係式： $q_u = \alpha(w/c)^{-\beta}$ の β の値に関しては、大きな違いはなく強度増加率はあまり変わらないということが分かった。一方、 α の値に関しては、大きくことなり約20の違いがあった。この結果は、母材である浚渫粘土の物理特性によって大きく異なることが分かった。
- 2) 積算温度と含水比の関係より養生中のブロック内の含水比の低下を関係式に表すことが出来た。この関係式を、水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係の w に代入することによって養生中のブロック内の含水比の低下を考慮した強度推定式を提案することが出来た。さらに、この強度推定式は、誤差が $\pm 3\text{MN/m}^2$ 以内で表すことが出来た。

・超音波伝搬速度による強度推定

- 1) 本研究で得られた結果を用いて、超音波伝搬速度と一軸圧縮強度の関係を相関の良い関係式で表すことが出来た。しかし、データ数が少ないことありこの式では十分相関性があるとは断定することは難しい。
- 1) 木村らによって求められた超音波伝搬速度と一軸圧縮強度の関係式と本研究で得られた結果比較すると、大きな誤差が生じた。したがって、浚渫土砂ブロック独自の推定式を算出する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会:コンクリート強度推定のためのひはかい試験方法マニュアル, 丸善, pp.28~75, 1983.2.
- 2) 木村芳幹, 谷川恭雄:超音波速度法による高強度コンクリート構造体の品質の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, 2001.

4.8 固化材の水和反応率に着目した高強度固化処理土の強度推定

4.8.1 はじめに

本節では、2通りの方法によって求めた水和反応率について評価し、求めた水和反応率と一軸圧縮強さの関係について考察を行った。

大まかな内容は、以下のようになる。

4.8.2 水和反応率の評価

4.8.3 水和反応率と強度特性

4.8.4 強度推定

4.8.5 まとめ

4.8.2 水和反応率の評価

水和反応率を求めるための計算方法および求めた水和反応率の養生日数との関係性を評価した。

(1) 水和反応率の計算方法

本研究では、室内試験で測定した強熱減量から水和反応率を求める実験値と、玄らの水和反応速度の式を用いて水和反応率を求める理論値の2種類の水和反応率を設定した。以下にそれぞれの水和反応率の求め方を述べる。

1. 水和反応率の実験値

森本ら¹⁾により水和反応率は強熱減量から求められる結合水量を用いて式(4.31)により算出される。

結合水量とは水とセメントなどの固化材との水和反応により生成される水和物の量を示す。強熱減量

$$\text{見かけの水和率(\%)} = \frac{\text{結合水量}}{100\% \text{水和した時の理論結合水量}} \times 100 \quad (4.31)$$

から含水比試験後の試料を約750℃の高温で加熱することで、110℃で炉乾燥しても失われない結合水や結晶水の水分量、つまり結合水量を求めることができる。

ここで、式(4.31)を応用して今回の実験に適応させると式(4.32)のようになる。

$$((\text{強熱減量} - \text{母材の強熱減量}) / 0.227 / 0.4) \times 100 \quad (4.32)$$

結合水量は実験で求めた強熱減量の値から母材がもともと持っている強熱減量の値を引くことで求め、100%水和した時の理論結合水量は0.227を用いた。作製した供試体は固化材添加率が40%なので見かけの水和反応率を0.4で割ることで求めた。

2. 水和反応率の理論値

式(4.33)により水和反応率は水和反応速度を示す式(4.33)で求めることができる。

$$-\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{3C_w}{\nu\sigma r_0} \frac{1}{\frac{1}{k_d r_0 \alpha^{2/3}} + \frac{\alpha^{1/3} - (2-\alpha)^{-1/3}}{D} + \frac{1}{k_d r_0 \alpha^{2/3}}} \quad (4.33)$$

α : 未反応率、 α^* : 反応率 (=1- α)、 σ : セメント密度、 C_w : 水和生成物の外側の水の濃度、
 r_0 : 水和開始時の未反応セメントの粒子径、
 ν : 水とセメントの反応の化学量論比を質量基準で定めたもの、
 k_r : セメントの化学反応速度、 k_d : 外部被膜内の拡散係数 ($k_d=B/\alpha^{1.5}+C \cdot \alpha^3$)

ここで、 $\rho=3.15$ 、 $\nu=0.25$ 、 $r_0=0.002$ としてセメントの反応率を求めた。

(2) 水和反応率の養生日数による変化

以下に、求めた水和反応率と養生日数の関係について述べる。図-4.149 に室内試験で脱水なし条件で作製した供試体の養生日数と水和反応率の関係を示す。

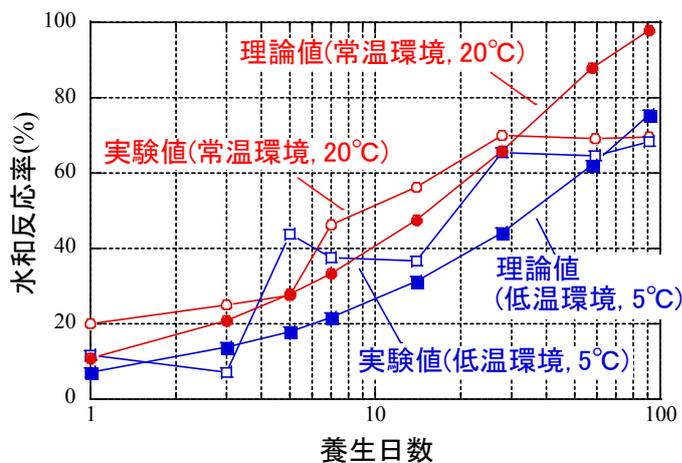


図-4.149 養生日数-水和反応率(脱水なし)

水和反応率は養生日数の経過に伴い増加し、実験値は養生28日で約70%に到達した後ほぼ変化しない結果となった。一方、理論値は養生1日には常温環境、低温環境ともに10%程度から養生91日まで上昇し続け、最終的には常温環境は約100%、低温環境は75%まで増加した。また、養生環境で比較すると低温環境の方が理論値、実験値ともに低くなり、実験値では養生7日に低温環境が10%ほど大きくなるが、それ以外の日では常温環境と比較して10~20%下回る値となった。

図-4.150 に室内試験で脱水圧力 5MPa で作製した供試体の養生日数と水和反応率の関係を示す。

脱水圧力 5MPa で作製した供試体は、常温環境では養生 3 日で 18%程度の値をとり、養生日数の経過

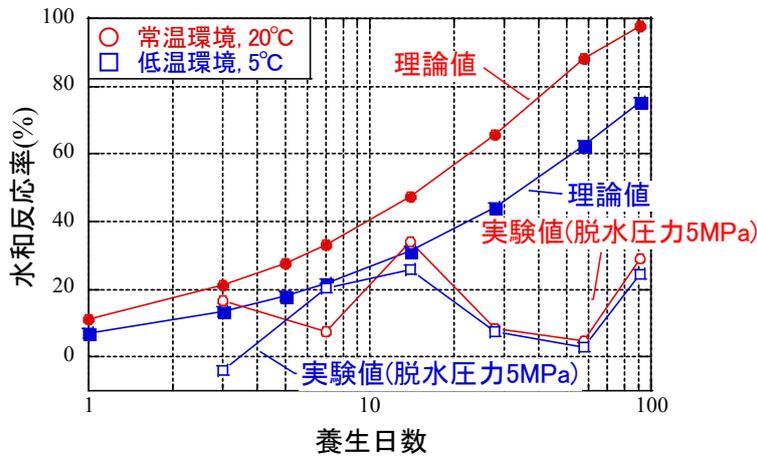


図-4.150 養生日数-水和反応率(脱水なし圧力 5MPa)

によらず 20%前後を推移した。低温環境で作製した供試体も同様に、養生日数の経過と水和反応率の変化には関連性はみられず 0~20%の間を推移した。また、養生環境によっても大きな違いはみられず、養生 28 日以降は常温環境も低温環境もほぼ同じ値をとった。前節の結果より、脱水圧力 5MPa で作製した供試体の強熱減量は日数の経過によらずあまり変化しなかったため、強熱減量の値を用いて算出した水和反応率の実験値も大きな変化はみられなかった。

4.8.3 水和反応率と強度特性

本節では、前節で求めた水和反応率と一軸圧縮強さの関係について検討する。図-4.151 に脱水なし条

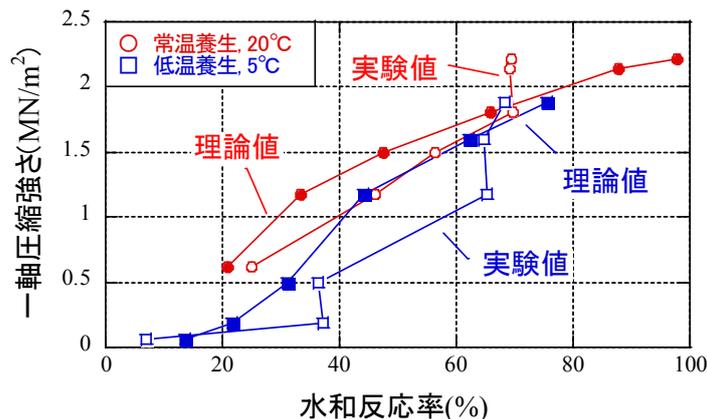


図-4.151 水和反応率と一軸圧縮強さ(脱水なし)

件で作製した供試体の水和反応率と一軸圧縮強さの関係を示す。

実験値から求めた水和反応率の上昇に伴い一軸圧縮強さも増加する。特に常温環境の供試体では実験値の水和反応率の 10%上昇に伴い約 0.2MN/m² 増加し、一軸圧縮強さの増加の割合は一定となった。実験値の水和反応率は 60%以降上昇しなかったため、水和反応率が上昇せず一軸圧縮強さが増加する結

果となった。また、同じ水和反応率でも常温環境の方が低温環境より強度発現は大きくなり、 0.5MN/m^2 程度の差が見られた。理論値から求めた水和反応率は強度発現の様子をうまく表しており、実験値による水和反応率と一軸圧縮強さの関係も水和反応率 60%までは動向をうまく表現できたといえる。

図-4.152 に脱水圧力 5MPa で作製した供試体の水和反応率と一軸圧縮強さの関係を示す

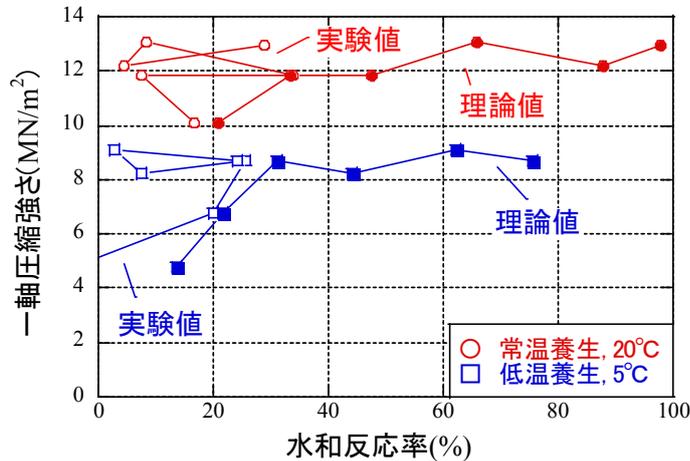


図-4.152 水和反応率と一軸圧縮強さ(脱水圧力 5MPa)

実験値から求めた水和反応率は上昇と低下を繰り返すため一軸圧縮強さの関係には相関がみられず、理論値と大きく異なるグラフとなった。また、水和反応率の理論値も水和反応率が 30%までは一軸圧縮強さの増加がみられるが、その後は水和反応率が上昇しても一軸圧縮強さは増加しなかった。

水和反応率の理論値、実験値ともに脱水しないの条件で作製する供試体の強度評価には有効であるといえる。一方で、高压脱水した供試体に対して理論値は有効であるともいえるが、強熱減量を用いた水和反応率の実験値は有効ではないことがわかった。また、本研究で使用した水和反応率の理論値は、セメントの水和反応の反応率を使用した。実際求める水和反応率はセメントと粘土を混ぜた混合土の水和反応率だったため、理論値と実験値に差異が生じたと考えられる。今後、高压脱水したセメント固化処理土にも適応可能な水和反応率について再考する必要がある。

4.8.4 強度推定

本節では、水和反応率から推定された強度と実験で求めた強度の比較をする。

(1) 強度推定の方法

本研究で使用した水和反応率から強度を推定する方法に玄ら²⁾の強度推定式(4.34)～(4.35)を用いた。この式は、圧縮強さをコンクリートの強度発現をセメントの反応率の関数で表している。

$$f = AX^n \tag{4.34}$$

$$X = \frac{(\text{gel volume})}{(\text{gel volume} + \text{capillary space})} = \frac{2(1-\alpha)}{1/C_v - \alpha} \tag{4.35}$$

f : 圧縮強さ(MPa)、 A, n : 定数、 X : ゲルスペース比、 α : セメント未反応率、 ρ : セメントの比重、 W/C : 水セメント比

$$C_v=1/\{1+\rho(W/C)\}$$

(4.36)

今回、水セメント比は各供試体の含水比から求めたものを使用した。また、セメント未反応率は、(2)節で求めた水和反応率の理論値を使用した。また、定数として $A=206$ 、 $n=3.2$ 、 $\rho=3.04$ 、 W/C は前節の室内試験によって求められた各養生日数の水セメント比を用いた。

(2) 一軸圧縮強さの理論値と実験値の比較

図-4.153 に脱水なしで作製した供試体の養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。

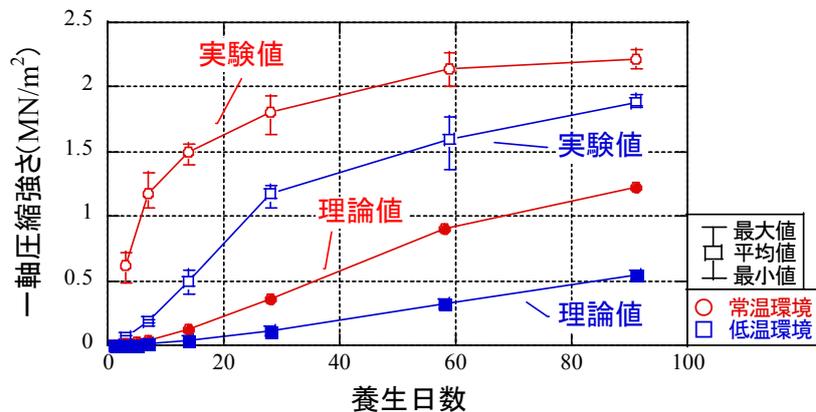


図-4.153 養生日数と一軸圧縮強さ(脱水なし)

水和反応率から推定した一軸圧縮強さの理論値は、養生日数0日の0MN/m²から養生日数91日には常温環境では約1.2MN/m²まで、低温環境では約0.9MN/m²まで養生日数に伴い増加した。一軸圧縮強さの増加は1日に常温環境は約0.6MN/m²、低温環境は約0.005MN/m²となり一定の割合となった。次に一軸圧縮強さの理論値と実験値を比較する。常温環境では、養生3日では理論値はほとんど強度が出ていないため0.5MN/m²の差があり、養生日数の経過に伴い広がり養生91日では1MN/m²になった。低温環境では、養生3日ではほとんど差がないが、養生91日には1MN/m²以上に広がった。

図-4. 154 に脱水圧力 5MPa で作製した供試体の養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。

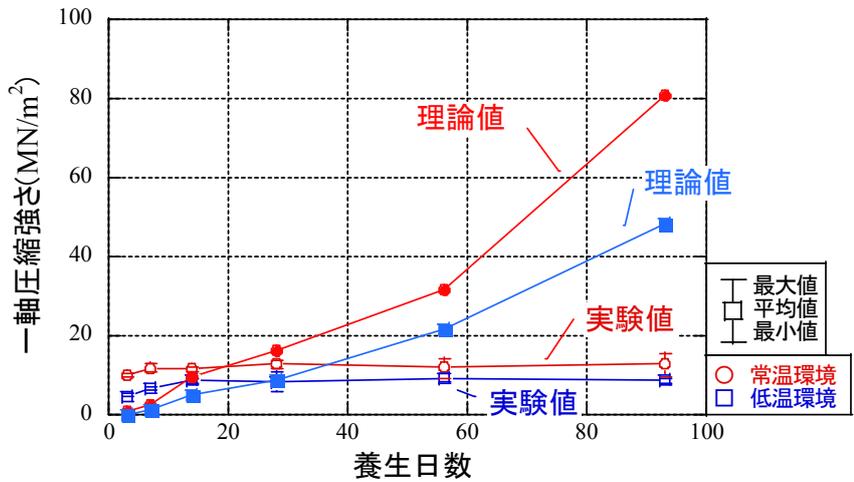


図-4. 154 養生日数と一軸圧縮強さ(脱水圧力 5MPa)

水和反応率から推定した一軸圧縮強さの理論値は、養生 3 日に 1MN/m^2 程度だった一軸圧縮強さは養生日数の経過に伴い養生 91 日まで増加し続け常温環境では 80MN/m^2 、低温環境では 50MN/m^2 まで到達した。実験値と比較すると、脱水なし条件で作製した供試体とは異なり、理論値が実験値より最大で 70MN/m^2 程度大きい値と結果になった。

今回推定した強度推定に使用した式はコンクリートの強度推定式であり、本研究で使用した混合土とは異なる配合や成分であることも理論値が実験値と大きくかけ離れた結果となった原因の一つと考えられる。また、実験値では養生日数 28 日付近で強度増加は止まっているので、常に上昇し続ける理論値は現実的ではない。水和反応率から求める強度推定式の関しても水和反応率の計算と共に高压脱水固化処理土に適応可能な式を検討する必要がある。

4. 8. 5 まとめ

本節では、水和反応率を実験値と理論値の 2 種類の方法で求め、それぞれの水和反応率と養生日数および一軸圧縮試験の関係について評価した。得られた結論を以下に示す。

- 1) 脱水なしの条件では水和反応率は養生日数の経過に伴い増加し、実験値は養生 28 日で約 70%に到達した後ほぼ変化せず、理論値は養生 91 日まで上昇し続け常温環境は約 100%、低温環境は 75%まで増加した。また、一軸圧縮強さは水和反応率 70%までは実験値と理論値ともに水和反応率の上昇に伴い増加した。
- 2) 脱水圧力 5MPa で作製した供試体の水和反応率の実験値は養生日数の経過に関わらず 0~30%を推移した。また、水和反応率の実験値と一軸圧縮強さには相関がみられなかった。
- 3) 一軸圧縮強さの理論値は、脱水なし供試体では実験値の半分以下の値となり、脱水圧力 5MPa で作製した供試体は実験値の最大で $5\sim 7\text{MN/m}^2$ 大きな値をとる結果となった。

参考文献

- 1) 森本ら：初期高温養生したポルトランドセメントの水和に関する研究、コンクリート工学高年次論文報告集 Vol.17, No.1, pp651-654, 1995.
- 2) 玄ら：高炉セメントの水和反応モデルの開発及び温度ひび割れ発生予測への適応、コンクリート工学高年次論文報告集 Vol.1, pp.1269-1274, 1996.

4.9 総括

4.9.1 結論

本研究では、室内試験、脱水固化装置、大型脱水固化装置の3種類の実験装置を用いて大きさの異なるブロックを作製し、それぞれの脱水特性の評価を行なうのと同時に、一軸圧縮試験を行い強度特性の評価も行なった。また、一軸圧縮試験から得られた強度と水セメント重量比を用いて強度推定式を提案した。さらに、超音波伝搬速度を測定し一軸圧縮強度との関係性について考察を行なった。本研究によって得られた結論を以下に示す。

(1) 室内試験における浚渫土砂の脱水特性および強度特性

- 1) 最終圧密沈下量に関しては、固化材添加量の違いによって変化することはなかったが、圧密終了時間に関しては、固化材添加量の増加に伴って短くなった。これは、添加した固化材によって小さな団粒ができ透水性が増したためと考えられる。
- 2) 5MPaの圧力で圧密を行なうことによって減容化率40%を上回り、圧密することによって体積を半分近くまで減少させることができることが分かった。
- 3) 固化材添加率の増加、養生温度の上昇に伴って、一軸圧縮強度は増加する傾向を示した。これらの要因として含水比、間隙比が影響していると考えられる。
- 4) 本研究で行なった室内試験では、水セメント重量比と一軸圧縮強度には強い相関が見られ、以下の式で表すことが出来た。

$$q_u = 11.071 (w/c)^{-1.2393}$$

(2) 脱水固化装置を用いて作製したブロックの強度特性

- 1) 一軸圧縮強度は、全て等しい固化材添加率20%であったが、Caseごとに大きな強度の違いがあった。これは、圧密終了時のブロックの高さの違いによるものと考えられる。
- 2) 多少のばらつきはあるものの、養生日数の経過に伴い、一軸圧縮強度は増加し、含水比は低下した。また、一軸圧縮強度の増加に伴って湿潤密度は増加し、間隙比は減少する傾向を示した。
- 3) 脱水固化装置を用いて作製したブロックの水セメント重量比と一軸圧縮強度には強い相関が見られ、養生日数7日、28日、91日の結果をまとめて、以下の1つの式で精度良く表すことが出来た。

$$q_u = 31.770 (w/c)^{-1.3397}$$

(3) 大型脱水固化装置を用いて作製したブロックの強度特性

- 1) Case3 の脱水棒が 16 本のブロック、また加圧していない固化材添加率 40%の粘土の塊に関しては、ピーク強度を迎えた後に徐々に強度が減少した。Case2 の脱水棒が 49 本のブロックは、ピーク強度を迎えた後、直ちに強度が減少した。
- 2) 今回行なった実験において Case2 に関しては、養生日数の経過に伴い一軸圧縮強度は増加したが、それ以外の条件では養生日数が経過しても一軸圧縮強度は増加しなかった。このような結果となった主な要因に含水比が考えられた。
- 3) 大型脱水固化装置を用いて作製したブロックの水セメント重量比と一軸圧縮強度には強い相関が見られ、以下の 1 つの式で表すことが出来た。

$$q_u = 18.946(w/c)^{-1.7348}$$

- 4) Case1 は、大型脱水固化装置を用いて圧密しても非常に長い時間がかかりブロックを作製することが出来なかった。含水比試験を行った結果、大きいところで 30%の違いがあった。
- 5) 大型脱水固化処理装置を用いてブロックを作製した際の圧密は、夏期作製ブロックの方が冬期作製ブロックより同じ経過時間では圧密度で 0.2 ほど進みがはやくなる。
- 6) 夏期作製ブロックの含水比は常温環境と低温環境ともに養生 28 日から養生 1 年までに 10%程度と大きな変化はないが、2 月作製ブロックでは養生日数の経過に伴い養生 200 日で 20%減少する。また、7 日気中のち水中養生したブロックの含水比は養生 28 日で 20%減少したのちまた 20%上昇し、変動に一定の傾向が見られなかった。
- 7) 一軸圧縮強さは水中養生した冬期(H30 年 2 月)作製ブロックはブロック内の反応に使用される水が保たれることで日数の経過に伴い 2.5MN/m² から 8MN/m² 程度まで増加したが、気中養生したブロックは水が失われ 4MN/m² 程度で強度増加が止まった。また、夏期作製ブロックは養生初期から 10MN/m² となり冬期作製ブロックの 2 倍以上の強さを持ち、その後は大きく変化しなかった。
- 8) ブロックを作製したときの蓋に近い方が含水比は 30~50%小さくなり、一軸圧縮強さは 2~6MN/m² 増加した。

(4) 強度推定式の提案

- 1) 水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係式： $q_u = \alpha(w/c)^{-\beta}$ の β の値に関しては、大きな違いはなく強度増加率はあまり変わらないということが分かった。一方、 α の値に関しては、大きくことなり約 20 の違いがあった。この結果は、母材である浚渫粘土の物理特性によって大きく異なることが分かった。
- 2) 積算温度と含水比の関係より養生中のブロック内の含水比の低下を関係式に表すことが出来た。この関係式を、水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係の w に代入することによって養生中のブロック内の含水比の低下を考慮した強度推定式を提案することが出来た。さらに、この強度推定式は、誤差が $\pm 3\text{MN/m}^2$ 以内で表すことが出来た。
- 3) 本研究で得られた結果を用いて、超音波伝搬速度と一軸圧縮強度の関係を相関の良い関係式で表すことが出来た。しかし、データ数が少ないこともありこの式では十分相関性があるとは断定することは難しい。さらにデータ数を増やす必要がある。

- 4) 脱水なしの条件では水和反応率は養生日数の経過に伴い増加し、実験値は養生 28 日で約 70%に到達した後ほぼ変化せず、理論値は養生 91 日まで上昇し続け常温環境は約 100%、低温環境は 75%まで増加した。また、一軸圧縮強さは水和反応率 70%までは実験値と理論値ともに水和反応率の上昇に伴い増加した。
- 5) 脱水圧力 5MPa で作製した供試体の水和反応率の実験値は養生日数の経過に関わらず 0~30%を推移した。また、水和反応率の実験値と一軸圧縮強さには相関がみられなかった。
- 6) 一軸圧縮強さの理論値は、脱水なし供試体では実験値の半分以下の値となり、脱水圧力 5MPa で作製した供試体は実験値の最大で 5~7MN/m² 大きな値をとる結果となった。

4.9.2 今後の課題

本研究では、新たな知見が得られた一方で、今後の問題点が明らかになった。以下に示す問題点の整理を行い、今後の研究課題とする。

(1) 室内試験

- ・同じ土質試料、同じ固化材添加率、同じ圧力で圧密を行なっても、一軸圧縮強度にはばらつきが生じた。この要因として、強度が大きいため縦割れ、引っ張り破壊が大きな要因と考えられる。しかし、密度にも若干ではあるが違いがあった。したがって、試料をモールドに充填する際に間隙等によって違いが出たと考えられる。したがって、一軸圧縮強度のばらつきを少しでも抑えるためには、試料の充填方法を今後見直す必要がある。

(2) 大型脱水固化装置

- ・大型脱水固化装置を用いて作製したブロックをコアリングし、一軸圧縮試験を行い強度特性について評価考察を行なった。しかし、養生 28 日、養生 91 日のデータしかなく、長期強度の評価を今後し、強度推定式の元となるデータを増やす必要がある。
- ・大型脱水固化装置を用いた実験の土質試料は、宇部粘土を用いて行なった。今後は、関門粘土を用いて同様の実験を行い、土質試料の違いによる影響等を考察する必要がある。
- ・ブロックを養生する際は、屋外で水中養生させ、温度は 20℃一定と仮定した上で本研究は考察を行なったが、夏と冬では水温の変化が大きいとされる。したがって、時期による温度の変化も考慮した考察、強度推定が必要である。
- ・ブロックからコアリングを行なったものの超音波伝搬速度を測定し考察を行なった。今後は、非破壊試験として大型のブロックのまま超音波速度の測定を行い、コアリングしたものとの比較を行なうのと同時に、非破壊試験の精度について考察する必要がある。ブロックのまま超音波伝搬速度を測定する際は、内部の空隙や表面の凹凸があつては測定が出来ない。したがって、ブロックを作製する際にも空隙等が出来ない品質の良いブロックを作製する必要がある。

5. 浚渫土砂ブロックの長期耐久性・環境安全性の検証

本章では、浚渫土砂を大型の構造体として実用化することを目的として浚渫土砂ブロックを作製し、実海域における暴露試験ならびに動植物の生息状況調査を行い、長期強度の評価および海洋環境への適応性を評価した。

5.1 実験概要

5.1.1 浚渫土砂ブロック作製方法

本研究では、10MPa 以上の圧縮強さを有する準硬石および硬石に相当する浚渫土砂ブロックの開発を目標とした。浚渫土砂ブロックには、母材として博多港で浚渫された土砂（博多港土砂）を用い、固化材として高炉セメント B 種を使用した。母材の粒径加積曲線と物理特性を図-5.1 と表-5.1 に示す。初期含水比を 60%に調整した体積約 0.2m³ の浚渫土砂に、乾燥添加率 11、22 および 33%の固化材を加え、十分に攪拌混合を行った。固化材添加率が 11、22、33%と半端な数値となったのは、製造工程の簡略化のために、1 袋 25kg の高炉スラグセメント B 種を 1、2 および 3 袋といった具合に混合したためである。攪拌混合した試料を図-5.2 に示す大型脱水固化装置に、コンクリート用高周波振動機を試料の投入口に差し込み振動を与えながら密実に充填した。試料充填部の内径は 53.4cm、高さは 100cm の円柱型であり、試料充填部の両端にはポーラスストーンが取付けてあり、両端からの排水が可能である。図-5.2 の右側の赤色で示す最大載荷力 2MN の油圧シリンダーを用いて、脱水圧力 2MPa で 30 分間載荷した後、5MPa の定圧で載荷を行った。排水条件は、両面排水とし、3 τ 法により求められた圧密終了時間で脱水を終了し、浚渫土砂ブロックの作製を行った。ここで、脱水過程における供試体からの排水について成分分析を行い、混合したセメントの成分が排出していないことを確認している。浚渫土砂ブロックは、固化材添加率および暴露条件ごとに 2 体ずつ作製し、計 18 体作製した。作製した浚渫土砂ブロックは、実験室で 28 日間以上、湿潤状態で養生を行った後、実海洋環境に移動させ暴露試験を行った。浚渫土砂ブロックの作製条件と暴露条件を表-5.2 に示す。

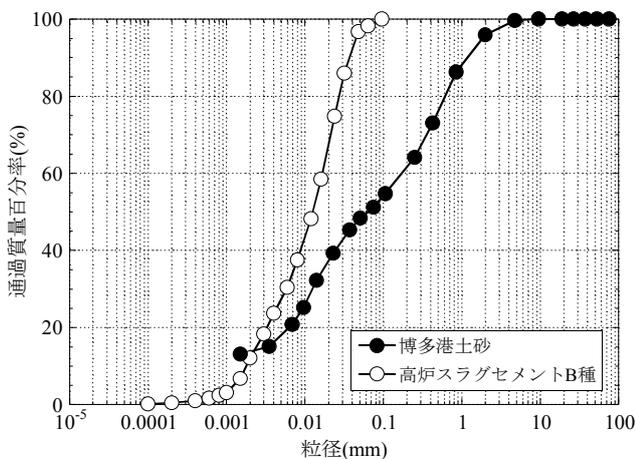


図-5.1 粒径加積曲線

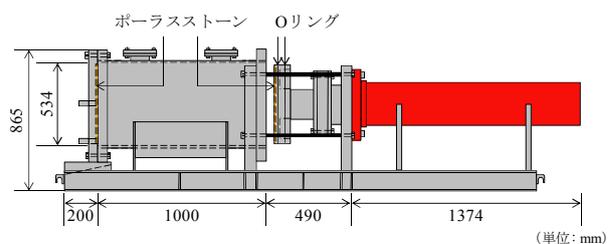


図-5.2 大型脱水固化装置概略図

表-5.1 物理特性

母材	博多港土砂
土粒子密度 ρ_s	2.686 g/cm ³
液性限界 w_L	68.1 %
塑性指数 I_p	32.5
粘土分含有率 P_c	15.6 %

表-5.2 実験条件

母材	博多港土砂
初期含水比	60%
固化材	高炉セメント B 種
固化材添加率	11%, 22%, 33%
荷重条件	2MPa で 30min、その後 5MPa で 300min あるいは脱水終了まで
排水条件	両面排水
暴露条件	気中、乾湿（潮の干満帯）、海中
暴露期間	1, 3, 12, 41 ヶ月



(a) 気中暴露



(b) 乾湿暴露(干潮時)



(c) 乾湿暴露(満潮時)

写真-5.1 暴露試験中のブロックの写真

表-5.3 浚渫土砂ブロックの形状、重量および湿潤密度

a) 固化材添加率 11%							
No.	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	平均
直径(mm)	534	535	535	533	535	535	534.5
高さ(mm)	494	417.5	461.5	494.5	505	499	478.6
重量(N)	23.0	19.9	21.9	24.0	25.0	25.0	23.1
湿潤密度 (g/cm ³)	2.08	2.12	2.11	2.17	2.20	2.23	2.152

b) 固化材添加率 22%							
No.	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	平均
直径(mm)	535	535	530	535	534	535	534
高さ(mm)	491.5	550	565.5	560	556	611	555.7
重量(N)	23.5	26.5	27.6	26.5	27.0	28.6	26.6
湿潤密度 (g/cm ³)	2.12	2.15	2.21	2.11	2.17	2.08	2.140

c) 固化材添加率 33%							
No.	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	平均
直径(mm)	535	535	535	535	535	535	535
高さ(mm)	617.5	644	521	536	546	573.5	573
重量(N)	28.1	30.1	21.9	25.5	27.0	27.0	26.6
湿潤密度 (g/cm ³)	2.02	2.08	1.87	2.12	2.20	2.10	2.065

5.1.2 暴露条件と一軸軸圧縮試験

浚渫土砂ブロックの暴露は、福岡県福岡市東区の博多湾和白沖に建設された人工島である福岡アイランドシティの一面において、岸壁付近の気中、乾湿（潮の干満帯）および海中に1、3、12ヶ月および41ヶ月間行った。気中、乾湿（干潮時）および乾湿（満潮時）の暴露状況を写真-5.1に示す。所定期間暴露したブロックの上面に、コンクリート用の直径5cmの湿式ダイヤモンドコア抜きドリルを垂直に設置して、鉛直下向きに15cm～20cmの試料をくり抜いた。コアリングの位置は、平均的な材料特性が測定できるように、ブロック上面において一樣になるように決定した。くり抜いた試料の上下面は、コンクリート供試体用の供試体端面研磨機を用いて、平面度を確認しながら供試体高さが10cmになるまで整形した。最終的には、一軸圧縮試験用供試体を6本ずつコアリングし、一軸圧縮試験を行った。

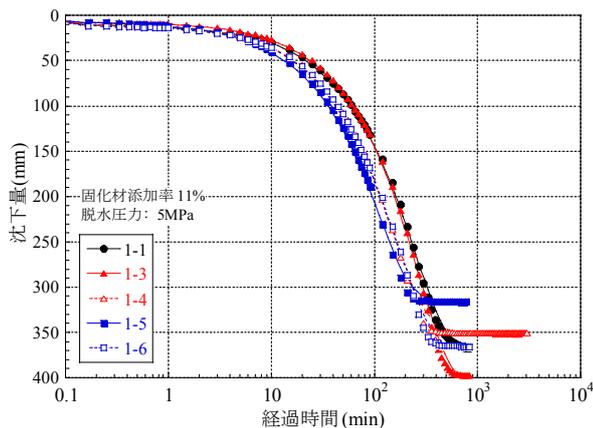
5.1.3 動植物の付着状況調査

浚渫土砂ブロックの海洋環境への適応性を評価するため、ブロックの表面に生息した動植物の出現種数と生息面積の調査を行った。調査の調査時期は、平成22年3月に暴露試験を開始後、新規加入の付着動物が観察可能となる平成23年10月（暴露期間19ヶ月、2年目秋期）平成24年4月（暴露期間25ヶ月、3年目春期）、平成24年11月（暴露期間32ヶ月、3年目秋期）、平成25年8月（暴露期間41ヶ月、4年目夏期）、平成26年1月（暴露期間46ヶ月、4年目冬期）および平成26年11月（暴露期間56ヶ月、5年目秋期）とし、動植物の活動が活発となる春期と秋期に行った。また、暴露後4年目については、これまでの春期・秋期の観察時期を変更して、夏期と冬期に調査を行った。調査対象は、乾湿（潮の干満帯）および海中暴露した浚渫土砂ブロック6体と各暴露方法の対照区2箇所とした。対照区とは、暴露した浚渫土砂ブロックの生物付着状況と比較するために選出した比較対照区域であり、乾湿暴露では近傍の

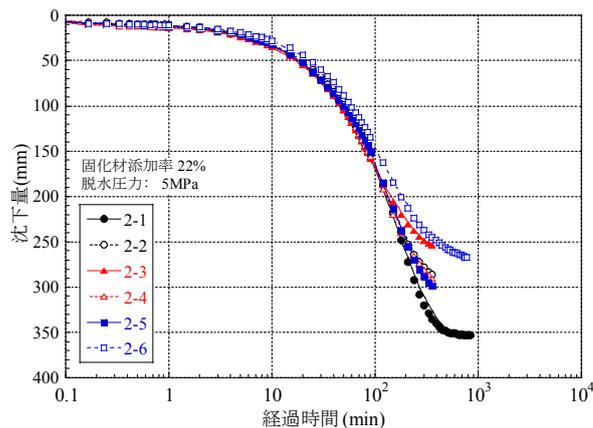
コンクリート製の垂直護岸を、海中暴露では近傍の護岸を対照区とした。

5.2 脱水特性

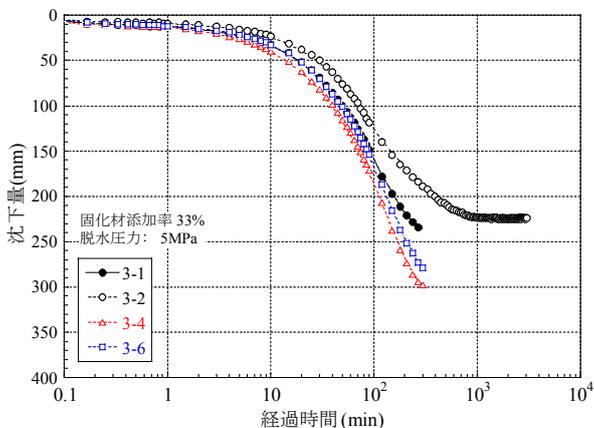
図-5.3(a)、(b)および(c)に脱水圧力 5MPa における固化材添加率 11%、22%および 33%の時間沈下曲線を示す。母材および固化材添加率が同じであっても、時間沈下曲線や最終沈下量にばらつきが見られた。これは、供試体の初期体積が約 0.2m^3 と大きいため、使用した浚渫土砂の品質のばらつき、固化材の混合の不均一性および脱水装置への浚渫土砂の充填度の差などが影響したため、同じ配合条件でもこれらのばらつきが発生したものと考えられる。基本的には、圧密終了は $3t$ 法により決定したが、ブロックの作業効率を考慮して、300 分で取り出したものもある。ここで、300 分で脱水を終了した浚渫土ブロックの推定圧密度は、どのケースも 90%を超過していたことを確認している。 \sqrt{t} 法を用いて 5MPa 載荷時における圧密係数を求めると、固化材添加率 11%、22%および 33%の平均値は、それぞれ $335\text{cm}^2/\text{min}$ 、 $492\text{cm}^2/\text{min}$ および $610\text{cm}^2/\text{min}$ となり、未処理時の $5.68\text{cm}^2/\text{min}$ に比べて大きくなった。セメントなどの固化材には硫酸バンド（硫酸アルミニウム）や PAC（ポリ塩化アルミニウム）などの凝集剤と同様に粘土粒子を凝集させフロックを形成する効果があり、フロック形成により擬似的に土中の間隙が大きくなり透水係数が大きくなること報告されている。したがって、浚渫土砂に固化材を混合することで、脱水速度が増加していることがわかる。



(a) 固化材添加率 11%



(b) 固化材添加率 22%



(c) 固化材添加率 33%

図-5.3 浚渫土ブロック作製時の圧密沈下曲線

表-5.3 に浚渫土ブロックの形状、重量および湿潤密度を示す。固化材添加率が増加するほど、ブロック 1 個当たりの重量は増加するが、湿潤密度は減少する傾向にある。また、作製したブロックについては、直径方向と鉛直方向の含水比分布を計することで、十分な均質性があることを確認している。

5.3 長期強度特性

図-5.4(a)、(b)、(c)および(d)に1ヶ月、3ヶ月、12ヶ月および41ヶ月間暴露した浚渫土ブロックの固化材添加率と一軸圧縮強さの関係を示す。どの暴露条件においても固化材添加率の増加に伴って一軸圧縮強さも増加した。また、一軸圧縮強さが最大となった暴露条件は、固化材添加率が11%と低い場合は気中暴露であった。1ヶ月、3ヶ月および12ヶ月間暴露した浚渫土ブロックでは固化材添加率が22%から33%に増加した際の一軸圧縮強さの増加率は、海中暴露が最大であった。一方、41ヶ月暴露した浚渫土ブロックでは増加率は乾湿暴露条件が最大であった。これまでの研究において、固化材添加率60%のカオリン粘土を対象に同様な载荷条件で作製したブロックの養生3ヵ月後の一軸圧縮強さが約30MPaであったのに対して、博多港土砂を用いて作製した浚渫土砂ブロックでは、一軸圧縮強さが50MPaに達するものもあった。これは、今回使用した博多港土砂が、砂分と礫分を50%程度含んでいるため、これらの粒子が骨材のような役割をしたため強度増加に大きく貢献したためだと考えられる。

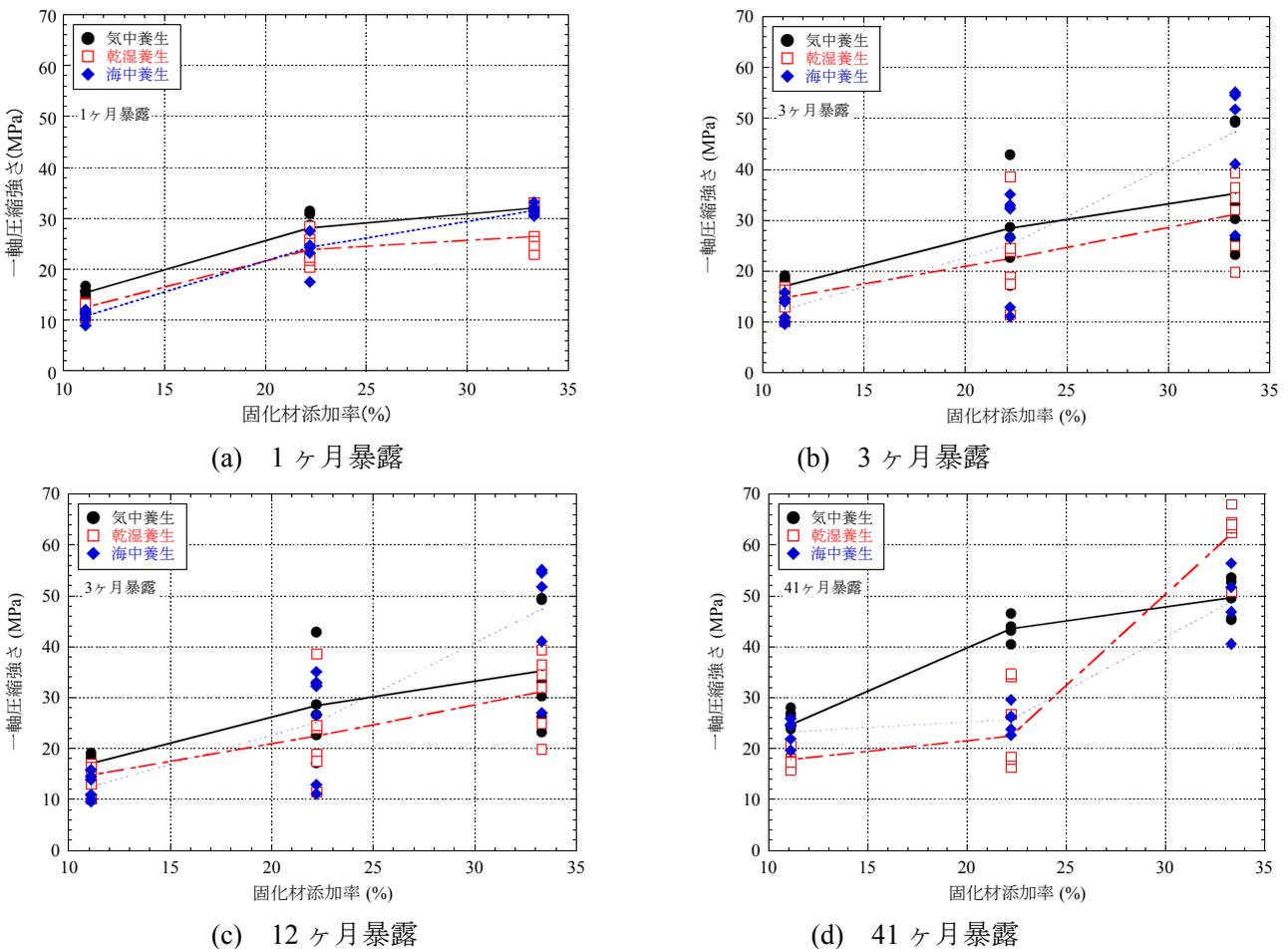


図-5.4 固化材添加率と一軸圧縮強さ

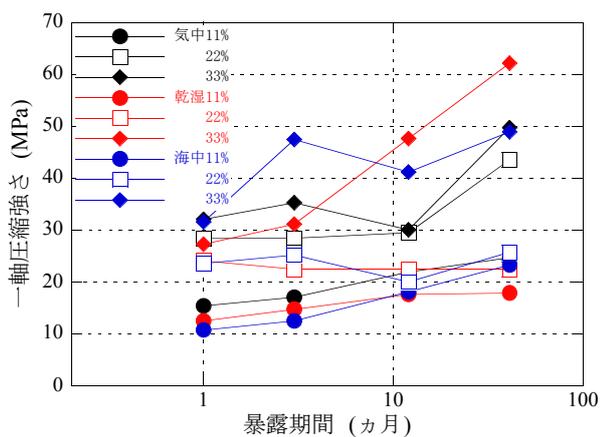


図-5.5 暴露期間と一軸圧縮強さ

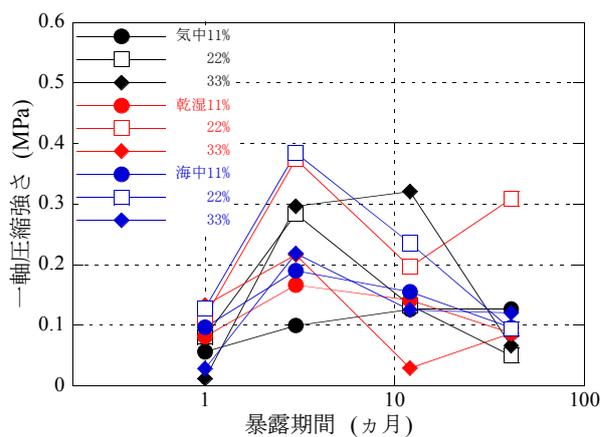


図-5.6 暴露期間と一軸圧縮強さの変動係数

図-5.5 に暴露期間と平均一軸圧縮強さの関係を示す。暴露期間3ヶ月までは、暴露期間の増加に伴って一軸圧縮強さも増加した。暴露期間が3ヶ月を過ぎると、主に固化材添加率33%において一軸圧縮強さが減少するケースも確認できた。これは、暴露期間が長くなるにつれ、暴露した浚渫土ブロックの微小クラックが増加し、一軸圧縮強さの増大を阻害するためと推察できる。しかしながら、暴露試験を行った41ヶ月間においては、固化材添加率22%以上における一軸圧縮強さは、暴露条件によらず20MPaを超えており、作製した浚渫土砂ブロックは、41ヶ月間どの環境に暴露しても、コンクリートに匹敵する強度を維持できるといえる。近年、固化処理土の劣化に関する研究が盛んに行われているが、固化材添加率の増加により固化処理土の強度が増加することで、基本的には劣化の度合いも低減する傾向にある。本研究で暴露試験を行った浚渫土砂ブロックについては、一軸圧縮強度が通常の固化処理土に比べて非常に大きいため、観察を行った41ヶ月の間においてはブロック表面の劣化は観察されなかった。

図-5.6 に暴露期間と一軸圧縮強度の変動係数の関係を示す。暴露期間1ヶ月での変動係数は、0.1前後であり、強度のばらつきはコンクリートと同程度である。しかしながら、暴露期間が3ヶ月になると、変動係数はすべての条件で増加し、大きいもので0.4の値を示し、一般的な土質試料の強度のばらつきと同程度になった。これは、表-5.3で示したように同じ固化材添加率にも関わらず脱水過程の沈下量の違いにより湿潤密度が異なること、浚渫土砂ブロックの強度が10MPa~30MPaと硬化コンクリート並みに非常に大きいためであると考えられる。さらに、暴露期間が12ヶ月や41ヶ月になると変動係数は減少する傾向にあり、乾湿条件で41ヶ月間暴露した固化材添加率22%のブロックを除いて、変動係数は0.1程度に減少した。

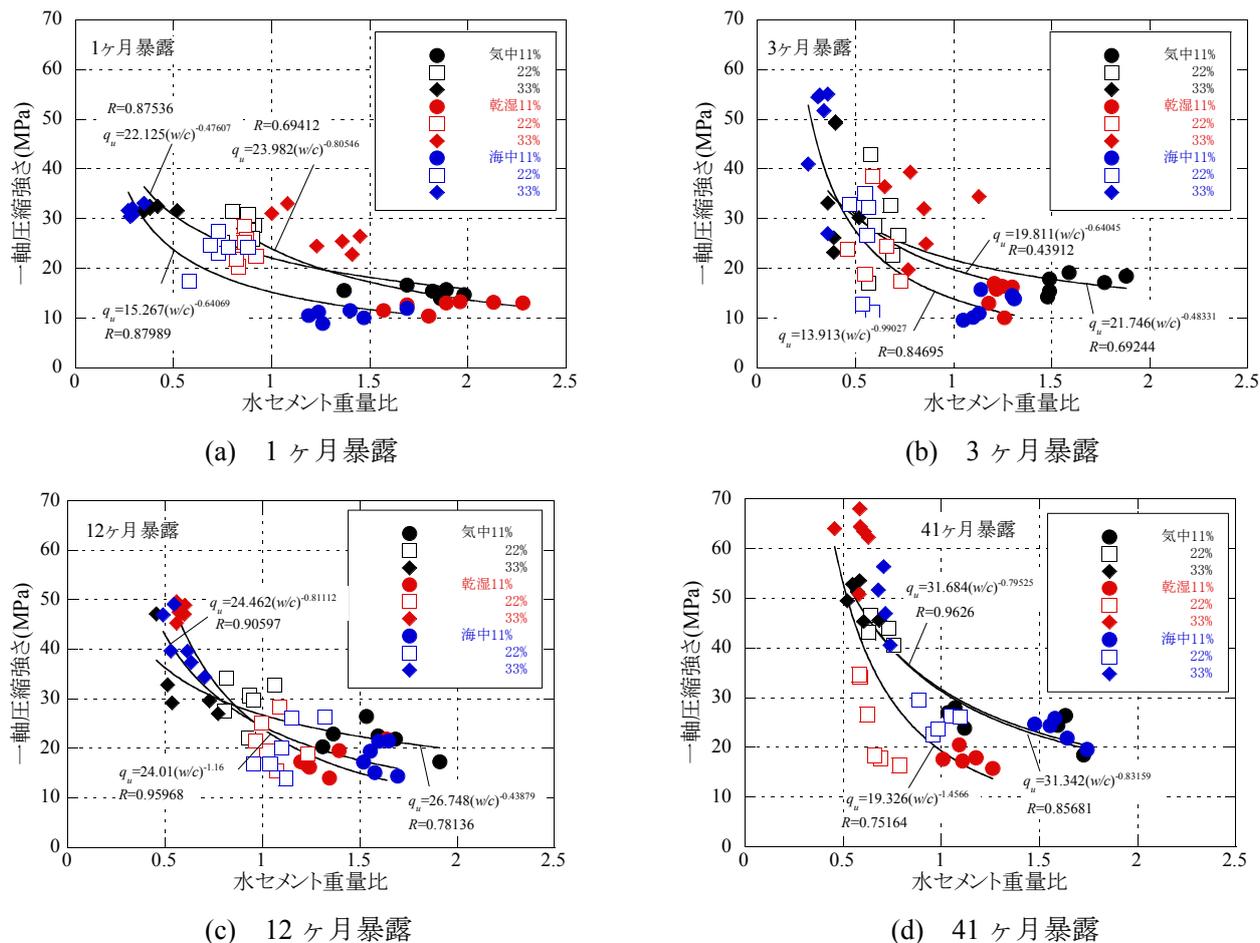


図-5.7 水セメント重量比と一軸圧縮強さ

図-5.7(a)、(b)、(c)および(d)に1ヶ月、3ヶ月、12ヶ月および41ヶ月間暴露した浚渫土砂ブロックの水セメント重量比と一軸圧縮強さの関係を示す。本文では、浚渫土砂ブロックの強度に強い相関性がある簡便な指標として、供試体内の水と固化材の重量比である水セメント重量比を用いた。供試体内の固化材重量は、初期の固化材添加率(浚渫土の乾燥重量に対する比率)をもとに計算でき、供試体内の水分は、供試体の含水比(同じく浚渫土の乾燥重量に対する比率)から計算が可能であることから、具体的には供試体の含水比と固化材添加率の比を計算することで水セメント重量比を計算できる。加えて、浚渫土砂ブロックのような固化処理土は、養生が進むと固化材の水和反応の進行とともに、含水比が減少しつつ、強度が増加することが知られている。このように養生が進行し、含水比が低下していく場合でも、一軸圧縮試験時に計測する含水比を用いて水セメント重量比を計算でき、強度評価に反映させることが可能となる。しかしながら、硬化コンクリートの強度評価に用いられる水セメント比は、配合時の水とセメント量の比であり、本論文の脱水過程後の水分量の変化を考慮している点で定義が異なっている。水セメント重量比は、地盤工学において固化処理土の強度評価に用いられる指標であり、最近では、固化材が空隙に占める体積固体分率を用いた検討もなされ、より高精度での強度推定が可能となっている。図-5.7の水セメント重量比の値に着目すると、固化材添加率が同じであれば海中暴露したブロックの水セメント重量比の値が、乾湿暴露や気中暴露条件に比べて小さい傾向にある。これは、固化材の水和反応により、土中の水分が使用され、相対的に土中の自由水が減少するためであると考えられる。

どの暴露条件および固化材添加率においても、水セメント重量比の減少に伴って、一軸圧縮強さが急激に増加し、一軸圧縮強さと水セメント重量比の間には、強い相関が見られた。したがって、一軸圧縮強さは、材料密度や固化材添加率によらず、水セメント重量比に支配されると考えられ、固化処理土の高強度化は、水セメント重量比を小さくすることが重要といえる。また、5.1 で示した脱水後のブロックの形状や重量などのばらつきにも関わらず、水セメント重量比による強度評価が有効であり、暴露期間の経過に伴って、図中に示す式(5.1)を用いた強度推定式の相関係数が大きくなり、式(5.1)の適合性がよくなることを意味する。このことは、ブロックの内部と外周部で、周辺の暴露環境から受ける養生条件の違いがあるものの、養生が進むにつれて最終的に発現する強度に収束していくことで、ブロック内部の強度が均一化していき、強度のばらつきが減少していくことがわかる。このように、非常に高強度な浚渫土砂ブロックにおいても水セメント重量比は、強度を推定するための簡便な指標であるといえる。加えて、著者らは高压脱水過程による脱水の有無に関わらず水セメント重量比と強度の関係は一義的であり、通常の $e\text{-log}\sigma_v$ 関係を用いて脱水圧力から間隙比（含水比）を計算し、高压脱水後の含水比の変化を考慮した強度予測が可能であることを示している。

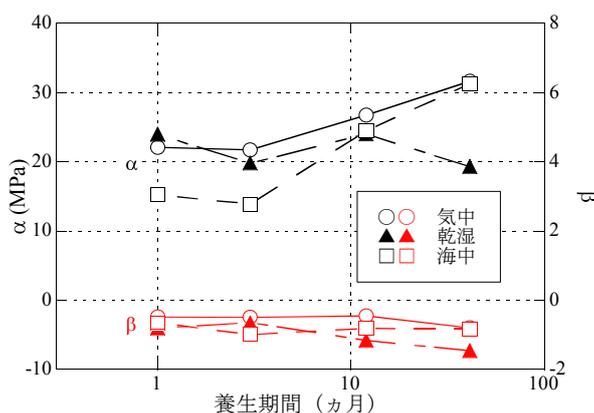


図-5.8 暴露期間と α 、 β

図-5.7 に示した水セメント重量比と一軸圧縮強さの関係について以下の式の適合性を検討し、各暴露条件と養生期間における α と β の関係を調べた結果を図-5.8 に示す。

$$q_u = \alpha(w/c)^\beta \quad (5.1)$$

ここで、 α は水セメント重量比 w/c が 1.0 の時の一軸圧縮強さのことであり、 β は強度増加率である。 α は、養生が進むと乾湿暴露条件以外は、増加する傾向にある。 β は気中暴露条件で -0.44 ~ -0.78、乾湿暴露条件で -0.64 ~ -1.46、海中暴露条件で -0.64 ~ -0.99 となり、強度増加率が大きいのは乾湿暴露、海中暴露、気中暴露の順番になった。このような結果となったのは、気中条件ではブロックは徐々に乾燥が進行していくため、固化材の反応に必要な水分が減少するためであると考えられる。一方、海中条件では水の供給は十分であるが、ブロックを海底面に設置しているため、周辺の温度が気中に比べて低いことが考えられる。乾湿暴露条件では、断続的ではあるものの水分の供給があり、かつ周辺の気温が海底面より高いため

固化材の化学反応が促進することから、最も強度増加率が高くなったと考えられる。以上より、浚渫土砂ブロックは、長期の強度増加を期待する場合には、乾湿条件や海中条件に設置すべきことが示唆された。

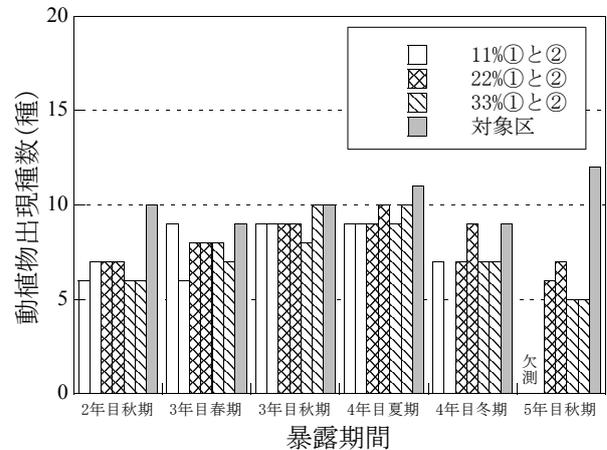
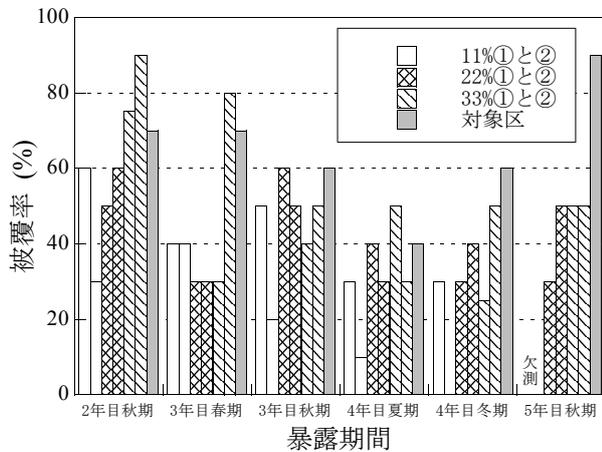


図-5.9 被覆率の経年変化（乾湿暴露） 図-5.10 動物の出現種数の経年変化（乾湿暴露）

5.4 海洋環境への適応性評価

乾湿暴露した浚渫土ブロックと対象区の被覆率を図-5.9、動植物の出現種数を図-5.10に示した。ここで、乾湿暴露条件における被覆率とは、ブロック側面に生息する動植物の生息面積をブロックの側面積で割った値である。全体的な傾向として被覆率は季節による変動が大きく、固化材添加率によらず、ブロックでは10～90%、対照区では40～90%であった。出現種数は、ブロックでは動物が5～10種、植物が0～1種、対照区では動物が9～12種、植物が0種であった。動物の主な出現種は、ブロックでは軟体動物のアオガイ属、イシダタミ、アマガイ、タマキビ、アラレタマキビ、タマキビガイ科、マガキ、節足動物のシロスジフジツボ、タテジマフジツボ、対照区では軟体動物のシロガイ属、アマガイ、タマキビ、アラレタマキビ、タマキビガイ科、マガキ、節足動物のシロスジフジツボ、タテジマフジツボであった。ここで、主な出現種とは、各調査点において、被覆率が5%以上、個体数が10個体/0.25m²以上出現したものを記載した。

海中暴露した浚渫土ブロックと対象区の被覆率を図-5.11、動植物の出現種数を図-5.12に示した。ここで、海中暴露条件における被覆率とは、ブロック上面に生息する動植物の生息面積をブロックの上面の面積で割った値である。海中暴露条件における被覆率も季節により大きく変動するが、固化材添加率によらず、ブロックでは5～60%、対照区では5～60%であった。出現種数は、ブロックは動物が4～9種、植物が0～5種、対照区では動物が4～7種、植物が0～3種であった。動物の主な出現種は、ブロックでは海綿動物の海綿動物門、軟体動物のナミマガシワ科、マガキ、イタボガキ科、環形動物のカンザシゴカイ科、節足動物のタテジマフジツボ、アメリカフジツボ、ヤドカリ亜目、原索動物のユウレイボヤ科、シロボヤ、対照区では軟体動物のナミマガシワ科、マガキ、原索動物のホヤ綱（単体）であった。植物の主な出現種は、ブロックでは該当する種がみられず、対照区では緑藻植物のアオノリ属であった。

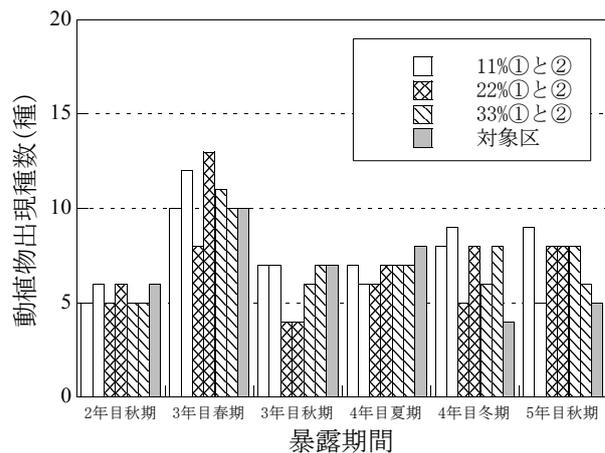
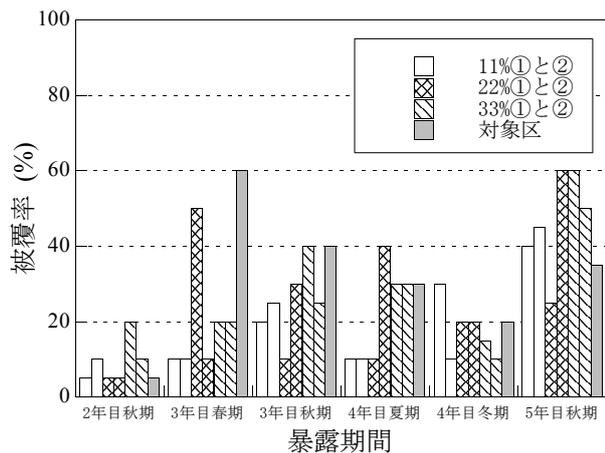


図-5.11 全体の被覆率の経年変化（海中暴露） 図-5.12 動植物の出現種数の経年変化（海中暴露）

乾湿暴露と海中暴露の違いにより、出現する生物種や生物種数が異なるのは、干満周期、海の透明度および日照条件などの周辺環境条件が異なるためである。しかしながら、乾湿暴露と海中暴露において、ブロックと対照区との動植物の被覆率や出現種数に大きな差異はないと推察でき、浚渫土砂ブロックは海洋環境においてコンクリートと同様の適応性があるといえる。

5.5 まとめ

本論文では、大型脱水固化装置を用いて作製した浚渫土砂ブロックを対象に、実海域における暴露試験と動植物の生息状況調査を行い、長期強度の評価ならびに海洋環境への適応性を評価した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 固化材混合と脱水処理を併用した脱水固化処理を施すことで、10MPa 以上の一軸圧縮強さを有する浚渫土砂ブロックが作製できる。
- (2) 浚渫土砂ブロックの一軸圧縮強さは、材料密度や固化材添加率によらず、水セメント重量比による強度評価が簡便であり有効である。
- (3) 本論文で作製した浚渫土砂ブロックは、設置から41ヶ月の間、気中、乾湿（潮の干満帯）および海中に暴露しても、一軸圧縮強さが低下することなく強度増加傾向を示し、十分な耐久性を有することが明らかとなった。
- (4) 乾湿および海中暴露した浚渫土砂ブロックに生息する動植物の被覆率や出現種数は、観測する季節により大きく変動するが、比較対照としたコンクリート壁面とほぼ同様であり海洋環境への適応性があるといえる。

6. 全体システムの最適化検討と浚渫土砂ブロック製造フローの構築

新門司沖土砂処分場において新門司沖粘土を対象に浚渫土砂ブロックを製造した工程時間を用いて、浚渫土砂ブロックを製造するための土量収支、前処理・後処理に必要となる時間、高圧脱水固化処理の作業工程、及び前年度のコスト検討結果を基に分析を行い、新門司沖土砂処分場で高圧脱水固化処理工法を適応するための最適な全体システムを提案する。

6.1 土量収支

新門司粘土を用いたブロック化実験では、200%の初期含水比に調整した浚渫土砂に対して、固化材添加率 40%の固化材を混合した。2m³ の体積を有するモールドを充填するのに使用した浚渫土砂とセメントミルクの体積をそれぞれ、1.43m³と 0.57m³となった。これらの指標は、全体システムの構築にあたって重要な指標となる。

6.2 前処理・後処理に必要となる時間と高圧脱水固化処理の作業工程

高圧脱水固化処理装置を用いて、浚渫土砂ブロックを製造する行程として、以下の行程が必要である。高圧脱水固化処理装置を使用する前処理として、以下の「装置の準備」、

「浚渫土砂の含水比調整とセメント混合」および「装置への試料の投入」がある。

装置の準備：①脱水棒の取付、②フィルターの取付、③フリーピストンの移動、④蓋の取付
浚渫土砂の含水比調整およびセメント混合：①浚渫土砂の混練、②含水比の測定、③含水比の調整、④含水比の確認、⑤セメント混合（計量・投入・混練）、⑥セメントスラリーの混合、⑦スラリーの含水比の測定
装置への試料の投入：①投入口の開放、②スクイーズポンプオン、③スクイーズポンプオフ、④投入口の締付

次の行程として、高圧脱水固化処理装置を使用する「脱水過程」がある。

脱水過程：①測定開始（ロガーオン）、②高圧ポンプオン、③載荷圧到達、④高圧ポンプオフ

後処理として、「装置からのブロックの取り出し」、「ブロックの運搬」、「養生ヤードへの運搬」および「次の実験準備」がある。

装置からの取出し：①脱水棒の抜取、②蓋の撤去、③受取台の設置、④高圧ポンプオン（取出し開始）、⑤固化体（ブロック）取出し完了

固化体の運搬：①フォークリフト移動開始、②固化体（ブロック）を下す、③受取台の撤去開始、④受取台の撤去完了

養生ヤードへの運搬：①固化体移動開始、②固化体質量計測、③固化体移動終了（養生完了）、④フリーピストンの移動

次の実験準備：①フリーピストンを戻す、②脱水棒の洗浄、③モールドの内壁洗浄、④モールドへのグリース塗布

以下の表-6.1～6.4 に新門司沖粘土を用いて 4 つのブロックを製造した際の各工程の作業時間をまとめている。

表-6.1 新門司沖粘土ブロックの製造工程（ケース 1）

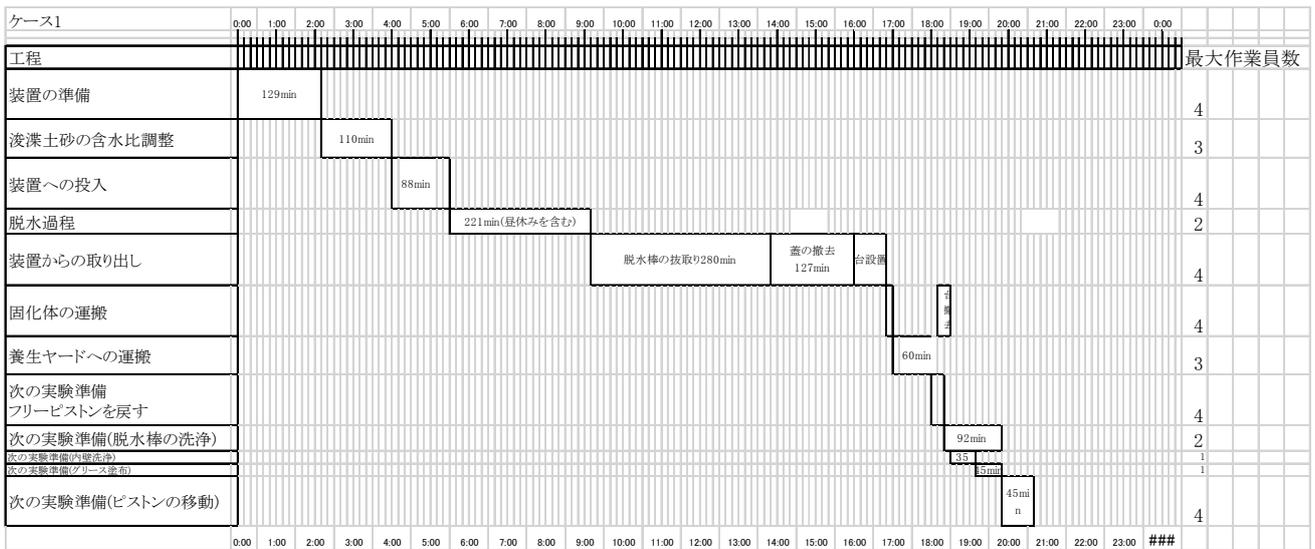
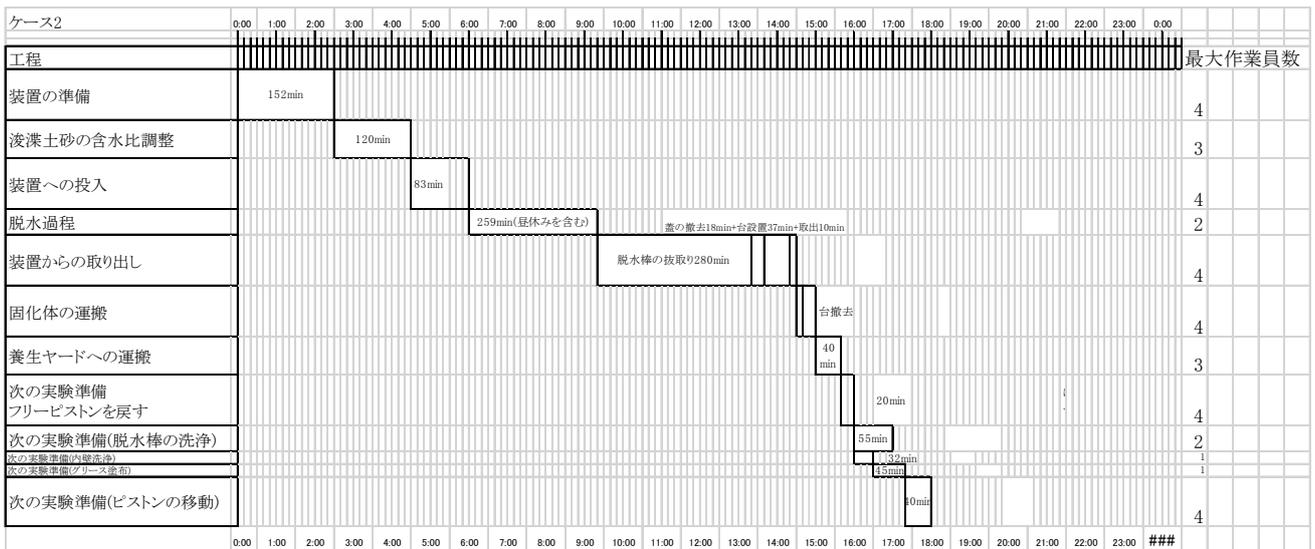


表-6.2 新門司沖粘土ブロックの製造工程（ケース 2）



ケース 1 では、最初の実験ということもあり、前処理および後処理に必要な以上の時間が発生し、1 個のブロックを製造するのに約 20 時間を要した。特に、「装置からの取出し」作業に約 8 時間が使用されている。また、脱水時間についても、お昼休みを挟むなどの理由から 200 分を超えた時間を要している。

ケース 2 では、ケース 1 に比べて、「装置からの取出し」にかかる時間が短縮化されたため、トータル時間が 18 時間と短縮化した。

表-6.3 新門司沖粘土ブロックの製造工程（ケース 3）

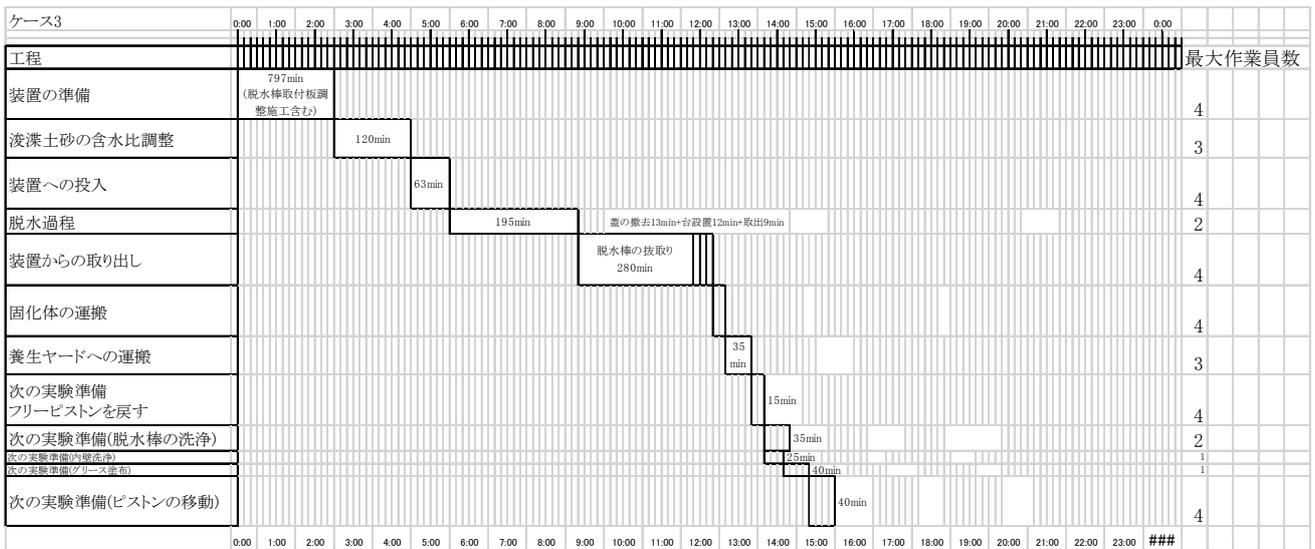
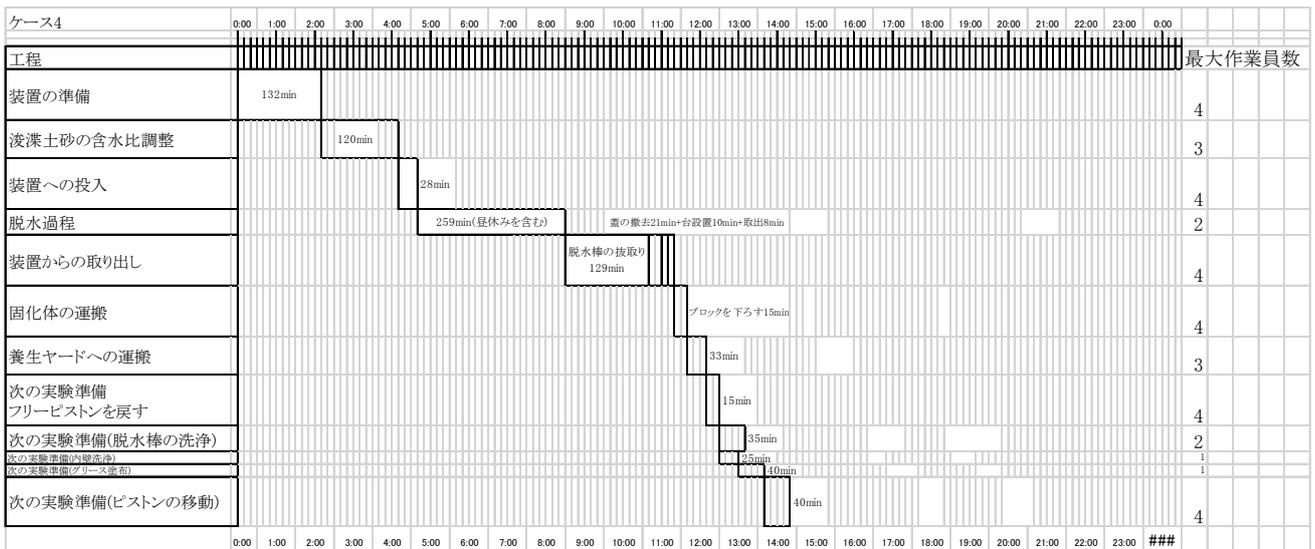


表-6.4 新門司沖粘土ブロックの製造工程（ケース 4）



ケース 3 においては、「装置の準備」の行程に脱水棒を取付ける板の調整が入ったため、長時間の作業を要しているが、その点を除けば、脱水過程においてはお昼休み前に脱水を終了したこと、「装置からの取出し」工程のうち、「②蓋の撤去、③受取台の設置、④高圧ポンプオン（取出し開始）」が 30 分程度で終了している。また、それ以外の行程についても時間短縮が図れている。

最後に行ったケース 4 では、トータルの作業時間は、約 14 時間程度となった。各工程について、作業時間の短縮化が図られているが以下の課題がある。

- ・装置の準備に約 120 分の時間がかかっている。特に「脱水棒へ取付」と「フィルター取付」がほとんどの作業時間である。
- ・浚渫土砂の含水比調整に約 120 分の時間がかかっている。
- ・セメント混合した浚渫土砂をモールドに充填するのに 30 分程度の時間がかかっている。

7. 高圧脱水固化処理工法によるブロック製造費用の評価

新門司沖土砂処分場の第二期の拡張工事において、現在浚渫工事が行われている土砂を用いて、ブロックを製造する場合を想定する。以下のような利用シナリオを想定して、コスト分析を実施する。

- ① 2m³の浚渫土砂をそのまま、土砂処分場で処分して、2tクラスの被覆石を購入する場合
- ② 2m³の浚渫土砂をそのまま、土砂処分場で処分して、2tクラスのコンクリート製の根固めブロックを購入する場合
- ③ 2m³の浚渫土砂を用いて、1m³のブロックを製造し、2tクラスの被覆石やコンクリート製の根固めブロックとして利用する場合

ただし、以下の仮定のもとでコスト分析を行った。表-7.1に費用分析に使用した値を示す。

表-7.1 仮定した費用

高圧脱水固化処理装置	25,000,000	[円]
瀬取り・陸揚げ費用	0	[円]
前処理・後処理	300,000	[円/日]
浚渫費用	3,000	[円/m ³]
土砂処分費用	5,000	[円/m ³]
被覆石	5,000	[円/m ³]
根固めブロック	10,000	[円/m ³]
ブロックの製造効率	20	[個/日]

- ・浚渫土砂の瀬取りや陸揚げ費用は、含まれていない。
 - ・関門航路における浚渫費は、約 3000 円/m³程度である。
 - ・周辺の土砂処分場の処分費は、約 5000 円/m³である。
 - ・高圧脱水固化処理装置の開発コストは、初年度の製造費などをもとに 2500 万円とした。
 - ・高圧脱水固化装置以外に必要な浚渫土砂の解泥・含水比調整・固化材混合などの前処理や排水処理などの後処理の費用は、平成 29 年度と平成 30 年度に行ったブロック化実証試験をもとに 30 万円/日と仮定した。
 - ・浚渫土砂ブロックの製造効率は、理想的な前処理・後処理の最適化ならびに作業の並列化が行われたと仮定し、20 個/日と仮定した。
 - ・2tクラスの被覆石は、現地渡し単価で 5000 円/m³×2m³=10000 円とした。
 - ・2tクラスのコンクリート製の根固めブロックは、現地渡し単価で 10000 円/m³×2m³=20000 円とした。
- ※被覆石とコンクリート製の根固めブロックの費用は「土木工事実施設計公表単価（北九州技術管理局、H30.4）」の資材単価を参考に算出している。

上記の仮定をもとに行った浚渫土砂ブロックの製造費用に関する分析結果を表-7.2に示す。

表-7.2 分析結果

ブロックの個数	必要な浚渫土量 [m ³]	浚渫費用	処分費	被覆石購入費	根固めブロック 購入費	合計①	合計②	装置費用	前処理後処理費	合計③	1個当たりの費用
500	1,000	3,000,000	5,000,000	5,000,000	10,000,000	13,000,000	18,000,000	25,000,000	7,500,000	35,500,000	71,000
750	1,500	4,500,000	7,500,000	7,500,000	15,000,000	19,500,000	27,000,000	25,000,000	11,250,000	40,750,000	54,333
1,000	2,000	6,000,000	10,000,000	10,000,000	20,000,000	26,000,000	36,000,000	25,000,000	15,000,000	46,000,000	46,000
2,000	4,000	12,000,000	20,000,000	20,000,000	40,000,000	52,000,000	72,000,000	25,000,000	30,000,000	67,000,000	33,500
3,000	6,000	18,000,000	30,000,000	30,000,000	60,000,000	78,000,000	108,000,000	25,000,000	45,000,000	88,000,000	29,333

① の場合

2m³の土砂を浚渫して、土砂処分場に処分する場合には、3000円/m³×2m³+5000円/m³×2m³=16000円の費用が発生する。さらに、浚渫土砂と同じ体積である2m³の2tクラスの被覆石を購入すると、10000円の費用が発生する。したがって、1,000m³、1,500m³、2,000m³、4,000m³および6,000m³の浚渫土砂を処分して、同じ量の被覆石を購入するの費用は、それぞれ13,000,000円、19,500,000円、26,000,000円、52,000,000円および78,000,000円となる。

② の場合

2m³の土砂を浚渫して、土砂処分場に処分する場合には、3000円/m³×2m³+5000円/m³×2m³=16000円の費用が発生する。さらに、浚渫土砂と同じ体積である2m³の2tクラスのコンクリート製の根固めブロックを購入すると、20000円の費用が発生する。したがって、1,000m³、1,500m³、2,000m³、4,000m³および6,000m³の浚渫土砂を処分して、同じ量のコンクリート製の根固めブロックを購入する費用は、それぞれ18,000,000円、27,000,000円、36,000,000円、72,000,000円および108,000,000円となる。

③ の場合

現在製作中の高圧脱水固化処理装置では、1m³の浚渫土砂ブロックを製造するのに2m³の浚渫土砂が必要になる。例えば、浚渫土砂ブロックを1000個、2000個および3000個製造する場合には、46,000,000円、67,000,000円および88,000,000円が必要となる。①と②と比較すると、②の場合よりも発生する費用について、優位性がある。

また、浚渫土砂ブロックをx個製造すると仮定すると、浚渫土砂ブロック1個当たりの製造費は、浚渫費6000円+（高圧脱水固化処理装置の製造費2500万円+前処理・後処理費30万円×製造日数）/xとなる。1000個、2000個および3000個製造する場合には、1個当たりの製造費は、それぞれ46,000円、33,500円および29,333円となる。

しかしながら、ブロック1個当たりの製造費用は、1日の前処理・後処理の費用と1日に製造できるブロック数の設定によって大きく変化する。また、新規土砂処分場の建設費、土砂処分費の削減効果および土砂処分場を延命化できる経済効果などを考慮することで大きく変化する事が予想される。

8. 開発工法の適応現場の明確化・実用化の評価検証と実証フィールドの提案

図-8.1は、国土交通省港湾局が行った「平成21年度土壌環境に配慮した浚渫土砂活用方策に関する検討」を参考に作成した浚渫土砂の発生量を日本の地域別で示したものである。全体の浚渫土砂量は1,896.4万m³であり、このうち航路浚渫が54%を占め、泊地浚渫が34%程度であった。地方別の浚渫土砂量は、関東地方が441.5万m³と最も多く、九州地方が310.8万m³、中部地方が292.6万m³である。また、国土交通省直轄工事が約70%を占めていた。

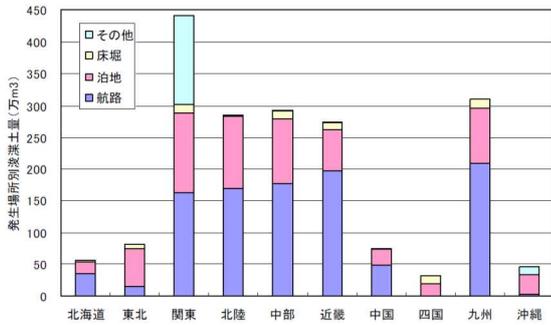


図-8.1 浚渫土砂の発生量 (平成21年)

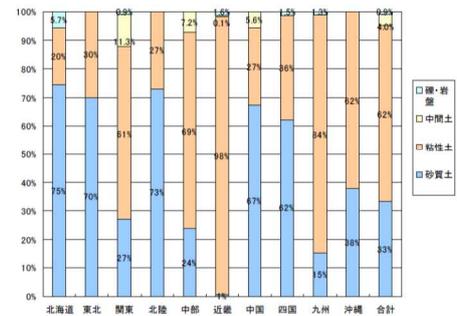
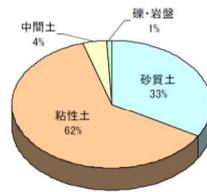


図-8.2 浚渫土砂の物理特性 (平成21年)

図-8.2に浚渫土砂を土質に着目して礫・岩盤、砂質土、中間土および粘性土に分けたものである。浚渫土砂の土質は、粘性土が全体の62%、砂質土が33%、中間土が4%、礫・岩盤が1%の発生割合であった。地方別では、北海道、東北、北陸、中国、四国地方では砂質土が多く、関東、中部、近畿、九州、沖縄地方では粘性土が多い。本研究で開発を目指す高圧脱水固化処理工法は、含水比の高い粘性土を対象とした工法であるので、粘性土系の土質で構成され、かつ浚渫土砂の発生量が多い地域でのニーズが高いと考えられる。したがって、本開発工法の適応現場としては、九州地方、関東地方、近畿地方および中部地方が挙げられる。また、本工法で実際に脱水固化を行った実績から考えると、宇部港、新門司沖土砂処分場、熊本港および博多港が具体的な実証フィールドとして挙げられる。今後は、開発工法の適応可能性を調査するために、関東、近畿および中部地方の浚渫土砂を入手して基礎データを収集する必要がある。

9. 結論

9.1 高圧脱水処理装置の設計と製造

熊本港での浚渫土砂の物理特性や圧密特性をもとに、脱水棒の複数配置を想定した圧密解析を実施し、現位置適応型の高圧脱水固化処理装置として、1)装置サイズ：幅 4.5m×高さ 3.7m×長さ 15m、2)浚渫土砂ブロックの形状：1辺 1m の立方体ブロック、3)強度：18MPa の高強度、4)減容化率：50% (2m³→1m³)、5)脱水棒による製造効率：1個 60分 (脱水棒の直径 3cm、間隔 14cm、長さ 2m)、6)応用：連結構造による組合せブロック活用などの特徴を有する装置の設計および製造を行った。

9.2 高圧脱水処理装置を用いた浚渫土砂ブロックの製造

本研究では、浚渫土砂の効率的な減容化と再資源化を目的として、高圧脱水固化処理工法の実用化に必要な浚渫土砂の基礎的脱水特性の把握および放射状排水理論による脱水挙動の推定を行った。まず、セメント混合率を変化させ、載荷圧力を 5 MPa とした定ひずみ速度圧密試験を行い、浚渫土砂の脱水挙動を調べた。更に、定ひずみ速度圧密試験結果と放射状排水理論を用いて宇部粘土ブロックの脱水時間、減容化率および均質性の評価を行った。本研究によって得られた結論を以下に示す。

(1) 結論

(a) 定ひずみ速度圧密試験

1. セメントを混合することで、間隙水圧の上昇を 500 kPa 程度に抑えることができる。ただし、間隙水圧の上昇の仕方は母材によって異なり、関門粘土の方が宇部粘土に比べて間隙水圧の上昇する速さが速い。
2. $e\text{-log } p$ 曲線はセメントを混合することで右側へシフトする。宇部粘土においては、100 kPa 以降、関門粘土においては 1000 kPa 以降の圧密圧力で比較した場合に 1.0 程度間隙比が大きくなる。
3. 透水係数の値はセメントを混合することで大きくなり、セメント未混合の場合と比べて最大で 10 倍程度となる。この理由として、供試体からの排水の成分分析から、マグネシウム系の浚渫土がセメント混合によりカルシウム系の粘土に変化する過程で間隙の構造が変化したためだと考えられる。
4. 体積圧縮係数の値はセメントを混合した場合と未混合の場合で大きな差は見られない。よって、セメントを混合することによる母材の圧縮性の変化は少ないと考えられる。
5. 圧密係数の値は圧密圧力が増加するとともに若干増加する傾向にある。また、圧密係数の値はセメントを混合することで大きくなり、宇部粘土で 16 倍程度、関門粘土で 10 倍程度増加する。

(b) 放射状排水理論による脱水分析

1. 定ひずみ速度圧密試験結果と放射状排水理論を用いて、高圧脱水固化処理装置で浚渫土砂ブロックを作製するのに必要な脱水時間、減容化率およびブロックの均質性を評価する手法を提案した。
2. セメント未混合、脱水棒 49 本を使用した実験条件では、脱水終了まで実験を行うことができなかった。脱水棒のみを用いてセメント未混合の条件で実験を行うのは、多くの時間を要するためブロック製造において実用的ではないと言える。脱水棒を用いることに加えてセメントを混合することにより脱水を促進する必要がある。

3. セメント混合率 40%、脱水棒 49 本を使用した実験条件では、圧密度、減容化率および脱水棒の有効排水径における圧密度の推定値と実測値の誤差はそれぞれ-5.0%~+10%、-10.95%、-0.11%となった。セメント混合率 40%で脱水棒 49 本を使用した実験条件においては、圧密度、減容化率およびブロックの均質性に関してそれぞれ十分な精度で推定することが可能である。
4. セメント混合率を 40%とし、脱水棒の間隔を大きくし、16 本を使用した実験条件では、脱水中に生じるセメントの固結効果により、圧密度については推定値よりも実測値の方が約 30~40%程度大きくなり、減容化率については 18.84%小さい値となった。今後は、脱水中のセメントの固結効果を考慮した検討が必要になると考えられる。

9.3 浚渫土砂ブロックの材料特性と最適な製造条件

本研究では、室内試験、脱水固化装置、大型脱水固化装置の 3 種類の実験装置を用いて大きさの異なるブロックを作製し、それぞれの脱水特性の評価を行なうのと同時に、一軸圧縮試験を行い強度特性の評価も行なった。また、一軸圧縮試験から得られた強度と水セメント重量比を用いて強度推定式を提案した。さらに、超音波伝搬速度を測定し一軸圧縮強度との関係性について考察を行なった。本研究によって得られた結論を以下に示す。

(1) 室内試験における浚渫土砂の脱水特性および強度特性

- 1) 最終圧密沈下量に関しては、固化材添加量の違いによって変化することはなかったが、圧密終了時間に関しては、固化材添加量の増加に伴って短くなった。これは、添加した固化材によって小さな団粒ができ透水性が増したためと考えられる。
- 2) 5MPa の圧力で圧密を行なうことによって減容化率 40%を上回り、圧密することによって体積を半分近くまで減少させることができることが分かった。
- 3) 固化材添加率の増加、養生温度の上昇に伴って、一軸圧縮強度は増加する傾向を示した。これらの要因として含水比、間隙比が影響していると考えられる。
- 4) 本研究で行なった室内試験では、水セメント重量比と一軸圧縮強度には強い相関が見られ、以下の式で表すことが出来た。

$$q_u = 11.071 (w/c)^{-1.2393}$$

(2) 脱水固化装置を用いて作製したブロックの強度特性

- 1) 一軸圧縮強度は、全て等しい固化材添加率 20%であったが、Case ごとに大きな強度の違いがあった。これは、圧密終了時のブロックの高さの違いによるものと考えられる。
- 2) 多少のばらつきはあるものの、養生日数の経過に伴い、一軸圧縮強度は増加し、含水比は低下した。また、一軸圧縮強度の増加に伴って湿潤密度は増加し、間隙比は減少する傾向を示した。
- 3) 脱水固化装置を用いて作製したブロックの水セメント重量比と一軸圧縮強度には強い相関が見られ、養生日数 7 日、28 日、91 日の結果をまとめて、以下の 1 つの式で精度良く表すことが出来た。

$$q_u = 31.770 (w/c)^{-1.3397}$$

(3) 大型脱水固化装置を用いて作製したブロックの強度特性

- 1) Case3 の脱水棒が 16 本のブロック、また加圧していない固化材添加率 40%の粘土の塊に関しては、ピーク強度を迎えた後に徐々に強度が減少した。Case2 の脱水棒が 49 本のブロックは、ピーク強度を迎えた後、直ちに強度が減少した。
- 2) 今回行なった実験において Case2 に関しては、養生日数の経過に伴い一軸圧縮強度は増加したが、それ以外の条件では養生日数が経過しても一軸圧縮強度は増加しなかった。このような結果となった主な要因に含水比が考えられた。
- 3) 大型脱水固化装置を用いて作製したブロックの水セメント重量比と一軸圧縮強度には強い相関が見られ、以下の 1 つの式で表すことが出来た。

$$q_u = 18.946(w/c)^{-1.7348}$$

- 4) Case1 は、大型脱水固化装置を用いて圧密しても非常に長い時間がかかりブロックを作製することが出来なかった。含水比試験を行った結果、大きいところで 30%の違いがあった。
- 5) 大型脱水固化処理装置を用いてブロックを作製した際の圧密は、夏期作製ブロックの方が冬期作製ブロックより同じ経過時間では圧密度で 0.2 ほど進みがはやくなる。
- 6) 夏期作製ブロックの含水比は常温環境と低温環境ともに養生 28 日から養生 1 年までに 10%程度と大きな変化はないが、2 月作製ブロックでは養生日数の経過に伴い養生 200 日で 20%減少する。また、7 日気中のち水中養生したブロックの含水比は養生 28 日で 20%減少したのちまた 20%上昇し、変動に一定の傾向が見られなかった。
- 7) 一軸圧縮強さは水中養生した冬期(H30 年 2 月)作製ブロックはブロック内の反応に使用される水が保たれることで日数の経過に伴い 2.5MN/m² から 8MN/m² 程度まで増加したが、気中養生したブロックは水が失われ 4MN/m² 程度で強度増加が止まった。また、夏期作製ブロックは養生初期から 10MN/m² となり冬期作製ブロックの 2 倍以上の強さを持ち、その後は大きく変化しなかった。
- 8) ブロックを作製したときの蓋に近い方が含水比は 30~50%小さくなり、一軸圧縮強さは 2~6MN/m² 増加した。

(4) 強度推定式の提案

- 1) 水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係式： $q_u = \alpha(w/c)^{-\beta}$ の β の値に関しては、大きな違いはなく強度増加率はあまり変わらないということが分かった。一方、 α の値に関しては、大きくことなり約 20 の違いがあった。この結果は、母材である浚渫粘土の物理特性によって大きく異なることが分かった。
- 2) 積算温度と含水比の関係より養生中のブロック内の含水比の低下を関係式に表すことが出来た。この関係式を、水セメント重量比と一軸圧縮強度の関係の w に代入することによって養生中のブロック内の含水比の低下を考慮した強度推定式を提案することが出来た。さらに、この強度推定式は、誤差が $\pm 3\text{MN/m}^2$ 以内で表すことが出来た。
- 3) 本研究で得られた結果を用いて、超音波伝搬速度と一軸圧縮強度の関係を相関の良い関係式で表すことが出来た。しかし、データ数が少ないこともありこの式では十分相関性があるとは断定することは難しい。さらにデータ数を増やす必要がある。

9.4 浚渫土砂ブロックの長期耐久性・環境安全性の検証

大型脱水固化装置を用いて作製した浚渫土砂ブロックを対象に、実海域における暴露試験と動植物の生息状況調査を行い、長期強度の評価ならびに海洋環境への適応性を評価した。得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 固化材混合と脱水処理を併用した脱水固化処理を施すことで、10MPa 以上の一軸圧縮強さを有する浚渫土砂ブロックが作製できる。
- 2) 浚渫土砂ブロックの一軸圧縮強さは、材料密度や固化材添加率によらず、水セメント重量比による強度評価が簡便であり有効である。
- 3) 本論文で作製した浚渫土砂ブロックは、設置から 41 ヶ月の間、気中、乾湿（潮の干満帯）および海中に暴露しても、一軸圧縮強さが低下することなく強度増加傾向を示し、十分な耐久性を有することが明らかとなった。
- 4) 乾湿および海中暴露した浚渫土砂ブロックに生息する動植物の被覆率や出現種数は、観測する季節により大きく変動するが、比較対照としたコンクリート壁面とほぼ同様であり海洋環境への適応性があるといえる。

9.5 全体システムの最適化検討と浚渫土砂ブロックの製造フローの構築

全体システムの最適化を検討し、浚渫土砂ブロックの製造フローを構築した。浚渫土砂ブロックの 1 個の製造時間が 5 時間程度となり、1 日 1 個～3 日 2 個程度の製造が可能となる。1 日 2 個以上製造するには、前処理と後処理をさらに短縮化するかあるいは高圧脱水固化処理装置を 2 機以上準備して、行程をうまくずらして効率的に前処理と後処理を行っていくことが必要となる。例えば、2 機の装置を用いて 1 日 2 個～4 個のブロックを 1 ヶ月間製造すると 50 個～100 個のブロックが製造できる。

9.6 高圧脱水固化処理工法によるブロック製造費用の評価

現地適応型の高圧脱水固化処理装置による浚渫土砂ブロックの製作工程をもとにブロック製作費用の試算を行った結果、ブロック 1 個当たりの製造コストは、ブロックの総量、土砂処分費や根固め石の購入費の削減効果などによって影響を受けるが、1000 個～3000 個製造する場合には、46000 円/個～29333 円/個程度となった。

9.7 開発工法の適応現場の明確化・実用化の評価検証と実証フィールドの提案

浚渫土砂の発生量および土質の調査をもとに、本開発工法の適応現場としては、九州地方、関東地方、近畿地方および中部地方があげられる。また、本工法で実際に脱水固化を行った実績から考えると、宇部港、新門司沖土砂処分場、熊本港および博多港が具体的な実証フィールドとして挙げられる。

10. 知的財産権取得状況

特許出願 0 件

11. 研究成果発表実績

1) 論文発表

国内 8 件、海外 1 件

- [1] 堂本 佳世, 笠間 清伸, 平澤 充成, 善 功企, 古川 全太郎, 八尋 裕一, 中道 正人, 山口 誠, 梅山 崇, 片桐 雅明, 脱水固化処理した関門航路浚渫粘土の一軸圧縮強度特性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 72, No. 2, p. I_426-I_430, 2016.09.
- [2] 堂本 佳世, 笠間 清伸, 平澤 充成, 善 功企, 古川 全太郎, 八尋 裕一, 中道 正人, 山口 誠, 久賀 圭介, 片桐 雅明, 川原 修, 長野 敏之, 浚渫土砂インターロッキングブロックの有害物質溶出特性, 第 12 回地盤改良シンポジウム論文集, 273-276, 2016.10.
- [3] Kayo Doumoto, Kiyonobu KASAMA, Mitunari Hirasawa, Kouki Zen, Zentarou Furukawa, Yuichi Yahiro, Masato Nakamichi, Makoto Yamaguchi, Takashi Umeyama, Masaaki Katagiri, Osamu Kawahara, Toshiyuki Nagano, Long Term Mechanical and Load Transmission Properties of Soil-Concrete Block, Sixth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment (Geomate 2016), pp. 205-209, 2016.10.
- [4] 堂本 佳世, 笠間 清伸, 平澤 充成, 善 功企, 古川 全太郎, 八尋 裕一, 中道 正人, 山口 誠, 久賀 圭介, 片桐 雅明, 川原 修, 長野 敏之, 浚渫土砂を用いて築造した道路の荷重伝搬・沈下特性, 第 60 回地盤工学シンポジウム論文集, 137-140, 2016.12.
- [5] 笠間 清伸・善 功企・平澤 充成・古川 全太郎・八尋 裕一・中道 正人・山口 誠・久賀 圭介・片桐 雅明・長野 敏之: 浚渫土砂ブロックの材料特性と道路構造設計, 環境地盤工学シンポジウム論文集, 107, 2017.
- [6] 豊里 亮喜・笠間 清伸・古川 全太郎・八尋 裕一: 高圧脱水固化処理した関門粘土の脱水特性および強度特性, 第 12 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 511-514, 2017.
- [7] 笠間 清伸, 堂本佳世, 平澤 充成, 善 功企, 古川全太郎, 脱水固化処理して作製した浚渫土砂ブロックの長期強度特性と海洋環境適応性, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 73, No. 2, pp. 186-194, 2017.
- [8] 古川全太郎, 笠間清伸, 八尋裕一, 木須瞳, 豊里亮喜. 高圧脱水固化処理土の水溶性・交換性陽イオンと圧密・透水特性, 第 13 回地盤改良シンポジウム, pp. 513-518, Oct. 2018.
- [9] 笠間清伸, 中川康之, 善 功企, 古川全太郎, 八尋裕一. 高圧脱水固化処理した浚渫土砂ブロックの強度推定, 第 13 回地盤改良シンポジウム, pp. 509-512, Oct. 2018.

2) 口頭発表

国内 11 件、海外 1 件

- [1] Ryoki TOYOSATO, Zentarou Furukawa, Kiyonobu KASAMA, Yuichi YAHIRO, An Attempt for Producing Cement-mixed and Hydraulically-consolidated clay, Proceedings of The 8th

Asian Joint Symposium on Geotechnical and Geoenvironmental Engineering JS-Tainan
2016, 98-99, 2016. 11.

- [2] 豊里亮喜, 笠間清伸, 古川全太郎, 八尋裕一, 善功企, 平澤充成: 大型脱水固化装置を用いた浚渫土砂ブロックの長期強度と環境適応性の評価, 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会.
- [3] 堂本佳世, 笠間清伸, 平澤充成, 善功企, 古川全太郎, 八尋裕一, 中道正人, 山口誠, 久賀圭介, 片桐雅明, 川原修, 長野敏之: 浚渫土砂を用いて築造した道路における荷重伝搬解析, 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会.
- [4] 笠間 清伸・善 功企・平澤 充成・古川 全太郎・八尋 裕一・中道 正人・山口 誠・久賀 圭介・片桐 雅明・長野 敏之: 浚渫土砂ブロックの材料特性と道路構造設計, 環境地盤工学シンポジウム論文集, 107, 2017.
- [5] 豊里亮喜・笠間清伸・古川全太郎・八尋裕一・片桐雅明, 高圧脱水固化処理した浚渫土の脱水特性, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2018. 07.
- [6] 豊里亮喜・古川全太郎・笠間清伸・八尋裕一: 高圧脱水固化処理した関門航路浚渫土の強度特性, 土木学会平成 29 年度全国大会第 72 回年次学術講演会, 2018. 09.
- [7] 豊里 亮喜・笠間 清伸・古川 全太郎・八尋 裕一: 高圧脱水固化処理した関門粘土の脱水特性および強度特性, 第 12 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 511-514, 2017.
- [8] 豊里亮喜・笠間清伸・八尋裕一・中川康之・善功企・古川全太郎: 高圧脱水固化処理して作製した浚渫土砂ブロックの長期一軸圧縮特性, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会
- [9] 木須瞳・豊里亮喜・笠間清伸・中川康之・善功企・八尋裕一: 高圧脱水固化処理装置による浚渫土砂の脱水特性, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会
- [10] 古川全太郎, 笠間清伸, 八尋裕一, 木須瞳, 豊里亮喜. 高圧脱水固化処理土の水溶性・交換性陽イオンと圧密・透水特性, 第 13 回地盤改良シンポジウム, pp. 513-518, Oct. 2018.
- [11] 笠間清伸, 中川康之, 善 功企, 古川全太郎, 八尋裕一. 高圧脱水固化処理した浚渫土砂ブロックの強度推定, 第 13 回地盤改良シンポジウム, pp. 509-512, Oct. 2018.
- [12] 上野和敬, 笠間清伸, 古川全太郎, 八尋裕一: 作製・養生温度に着目した固化処理土の一軸圧縮強度特性, 平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会

3) その他 (研究内容報告書、機関誌発表、プレス発表等)

- ・日刊海事プレス (8-9 面), 2016 年 6 月 21 日: 「浚渫土砂を高強度顕在に利用」
- ・九州大学プレスリリース, 2017 年 8 月 24 日: 「浚渫土砂のブロック化に成功 - 船舶の大型化やゼロエミッション港湾の構築に期待 -」
- ・笠間 清伸, 平澤 充成, 善 功企, 古川 全太郎. 浚渫土砂ブロックの長期強度特性と海洋環境適応性 (特集 人工地盤材料), 地盤工学会誌, 地盤工学会, Vol. 65, No. 9, pp. 12-15, Sep. 2017.
- ・笠間 清伸, 平澤 充成, 善 功企, 古川 全太郎. セメント添加した高強度脱水固化体の海中環境調査 (特集 最近の地盤材料改良技術), 基礎工, 総合土木研究所, Vol. 45, No. 9, pp. 87-90, Sep. 2017.