

(別紙 2)

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 研究課題名 動的貫入試験による経済的で高精度な液状化調査法の研究開発
2. 研究期間 平成 24 年度～平成 25 年度
3. 代表者及び研究代表者、共同研究者

代表者	規矩 大義	関東学院大学 理工学部土木学系 教授
研究代表者	規矩 大義	関東学院大学 理工学部土木学系 教授
共同研究者	東畑 郁生	東京大学大学院 工学系研究科 教授
共同研究者	澤田 俊一	応用地質株式会社 エンジニアリング本部 副部長
共同研究者	藤井 紀之	応用地質株式会社 エンジニアリング本部 主任
共同研究者	吉澤 大造	応用地質株式会社 エンジニアリング本部 主任
共同研究者	三上 武子	応用地質株式会社 エンジニアリング本部 専門職

4. 補助金交付総額 18,800,000 円

5. 研究・技術開発の目的

(1) 液状化評価に必要な地盤物性の取得

液状化調査システム、液状化評価手法の開発に資するため、原位置試験、室内土質試験及び室内土槽実験を実施し、液状化評価に必要な基礎的な地盤物性データを取得する。

(2) 動的貫入試験による液状化調査システムの開発

動的貫入試験から、地下水位、細粒分含有率、液状化強度を簡易に推定するシステムを開発する。

(3) 液状化評価手法の開発

液状化調査システムを用いて、現行の各種指針による液状化評価結果と比較・検討を行い、本システムの妥当性を検証し、ピエゾドライブコーンによる液状化手法を確立する。

6. 研究・技術開発の内容と成果

別冊として報告

7. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名（雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名）	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
滋賀県守山市における地盤調査一斉試験（その 5 PDC）	平成 25 年 7 月 23 日	第 48 回地盤工学研究発表会（富山大会）	山口 恵美
ピエゾドライブコーンによる細粒分含有率の推定に関する現場実験	平成 25 年 7 月 23 日	第 48 回地盤工学研究発表会（富山大会）	馬場香奈江
ピエゾドライブコーンによる N 値の推定精度に関する現場実験	平成 25 年 7 月 23 日	第 48 回地盤工学研究発表会（富山大会）	西山 備
間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その 16 過剰間隙水圧に着目した Fc の推定-	平成 25 年 7 月 23 日	第 48 回地盤工学研究発表会（富山大会）	藤井 紀之
小型動的貫入試験（ミニラム）のエ	平成 25 年 7 月	第 48 回地盤工学研究発表	北野 真司

エネルギー効率測定	23日	会（富山大会）	
打撃エネルギーの計測によるミニラムのNd値推定についての一考察	平成25年7月23日	第48回地盤工学研究発表会（富山大会）	吉澤 大造
ピエゾドライブコーンから得られる地盤物性が液状化予測に与える影響	平成26年7月16日（予定）	第49回地盤工学研究発表会（北九州）	馬場香奈江
間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その17 iPDCによる打撃エネルギーと間隙水圧の計測-	平成26年7月16日（予定）	第49回地盤工学研究発表会（北九州）	植村 一瑛
間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その18 iPDCによる打撃エネルギー補正-	平成26年7月16日（予定）	第49回地盤工学研究発表会（北九州）	吉澤 大造

8. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類、番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
該当なし				

9. 成果の実用化の見通し

液状化予測法としては実用化されている。

10. その他

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

動的貫入試験による経済的で高精度な液状化調査法の研究開発

平成 26 年 5 月

研究代表者 関東学院大学 規矩 大義

目 次

1. 研究概要	3
1.1. 研究開発の概要	3
1.2. 個別研究項目の概要	6
2. 液状化評価に必要な地盤物性の取得	9
2.1. 実験現場の地盤特性	11
2.2. ピエゾドライブコーン貫入試験	23
2.2.1. 試験方法	23
2.2.2. 試験結果 ³⁾⁴⁾⁵⁾	28
2.3. 小型動的貫入試験装置の荷重計測	32
2.3.1. 試験方法	32
2.3.2. 試験結果	33
2.4. 標準貫入試験の荷重計測	39
2.5. 室内土槽実験	41
3. ピエゾドライブコーンによる液状化調査システムの開発	42
3.1. 細粒分含有率の推定	42
3.1.1. 物性データ取得による細粒分含有率推定式の精査	42
3.1.2. 静水圧を考慮した細粒分含有率推定式の提案	43
3.1.3. ハンマー打撃間隔の細粒分含有率推定へ及ぼす影響検討	47
3.1.4. 1打撃で生ずる過剰間隙水圧による細粒分含有率の推定	48
3.2. N 値の推定	51
3.2.1. 動的貫入試験のエネルギーと効率の定義	51
3.2.2. エネルギー効率による地盤の動的貫入抵抗の補正	51
3.3. 地下水位の推定	56
3.3.1. 地下水位の推定方法	56
3.3.2. 地下水位の推定結果	56
3.4. 液状化強度の推定	60
3.4.1. 液状化強度の推定方法	60
3.4.2. 液状化強度の推定結果	62
3.5. 液状化調査システムの開発	65
4. ピエゾドライブコーン試験による液状化調査システムの検証	80
4.1. ピエゾドライブコーン試験による液状化調査判定（道路橋示方書・同解説）	83
4.2. ピエゾドライブコーン試験による液状化調査判定（建築基礎構造設計指針）	88
5. まとめ	92

1. 研究概要

1.1. 研究開発の概要

(1)研究課題名 動的貫入試験による経済的で高精度な液状化調査法の研究開発

(2)研究期間 平成 24 年度～平成 25 年度

(3)代表者及び研究代表者、共同研究者

代表者	規 矩 大 義	関東学院大学 理工学部土木学科 教授
共同研究者	東 畑 郁 生	東京大学 大学院工学研究科 教授
共同研究者	澤 田 俊 一	応用地質株式会社エンジニアリング本部地盤解析部 副部長
共同研究者	藤 井 紀 之	応用地質株式会社エンジニアリング本部地盤解析部 主任
共同研究者	吉 澤 大 造	応用地質株式会社エンジニアリング本部地盤解析部 主任
共同研究者	三 上 武 子	応用地質株式会社エンジニアリング本部コアラボ試験センター 専門職

(4)補助金交付総額 18,800,000 円

(5)研究の目的

東日本大震災では、太平洋沿岸部や東京湾臨海部を中心に、地盤の液状化現象によって甚大な被害が発生した。特に、戸建住宅や河川堤防で液状化による被害が多く発生した。このような地盤の液状化現象を防ぐためには、液状化の発生予測を行い、十分な対策を講じる必要がある。

これまで、液状化の検討は主として社会基盤施設や公共建築物が対象で、液状化の発生が懸念される場合には十分な対策が講じることが多かった。しかし、今回のように対象が個人の宅地や河川堤防の場合、液状化の検討を行う箇所数や費用、時間が相当な負担となることは明らかである。さらには、民地の液状化対策を検討する場合には、調査費用が安価であるだけでなく適切な対策仕様を決めるために精度の高い調査が要求されるであろう。また、社会基盤施設の設計においても、その後の地盤変状を予測して対策を検討することを勘案すると、より精緻な調査と正確な液状化判定が必要とされることは想像に難くない。これまでの液状化検討（調査、試験、予測）では、ボーリング孔を利用した標準貫入試験による N 値と室内試験による土の粒度特性を各種技術基準に適用して液状化強度を推定してきた。そのため、1 地点の液状化評価を行うにも費用と時間を要し、結果的に調査地点数が限定されるような事態にもなっている。

そこで本研究は、動的コーン貫入試験から液状化強度の推定に必要とされる N 値と細粒分含有率 F_c を評価できるピエゾドライブコーン¹⁾の技術を用いて、動的貫入試験のみで液状化強度を推定する調査システムを構築することで液状化の調査に要する時間と費用の軽減を第一の目的とす

る。そして、この液状化調査結果が各種技術基準に準拠した液状化判定と「同等」の評価を可能とすることを検証し、オーソライズされた液状化評価手法を確立することを最終目的とする。

(6)研究の概要

地盤の間隙水圧を動的貫入試験で測定することで、液状化強度を動的貫入試験のみで評価することができる試験法に「ピエゾドライブコーン (NETIS 登録 No.TH-100032-A)」がある。ピエゾドライブコーン (PDC) は、地盤の動的貫入抵抗 N_d 値 (推定 N 値) とともに貫入時の間隙水圧応答から細粒分含有率 F_c の評価が可能であることから、地下水位 GWL を設定することにより液状化強度を推定することができる。しかしながら、間隙水圧応答と細粒分含有率 F_c の定式化に用いたデータには限りがあることから、現状では必ずしも十分な実用性を有するまでには至っていない。一方、PDC が標準仕様としている小型動的貫入試験装置 (MRS) は、深度が 10m より深くなると地盤の動的貫入抵抗 N_d 値が標準貫入試験の N 値よりも大きめに評価されることが指摘されている。MRS は、35 cm の高さから自由落下させた 30kg のハンマーとアンビル (ロッド頭部) の衝突による打撃エネルギーで先端コーンを地盤に貫入している。当然、深度が深くなるとロッドの周面摩擦が大きくなり、ロッドも長尺となり撓みやすくなる。地盤の動的貫入抵抗 N_d 値の過大評価は、このロッドの周面摩擦やロッドの撓みによるエネルギー損失量の増加が原因として考えられる。また、地下水位については、圧力センサの打撃後 0.18 ~ 0.19 秒の応答値を地下水位の指標値としているが、砂分を多く含む地盤や粘土地盤への適用性は低い。

本研究では、堆積環境の異なる複数の地盤で現場実験と室内試験を行い、動的貫入時の間隙水圧応答と細粒分含有率 F_c の関係式を精査して液状化強度の推定精度を向上させるとともに、地下水位の推定方法を提案し、精度の高い動的貫入試験のみによる液状化調査システムを開発する。また、MRS の打撃貫入時の荷重計測を行い、10m 以深での地盤の動的貫入抵抗 N_d 値の過大評価の原因を明らかにするとともに、エネルギー効率を踏まえた地盤の動的貫入抵抗 N_d 値の新たな補正方法を提案する。

1.2. 個別研究項目の概要

本研究の個別研究内容と研究の手順を図 1-1 に示す。

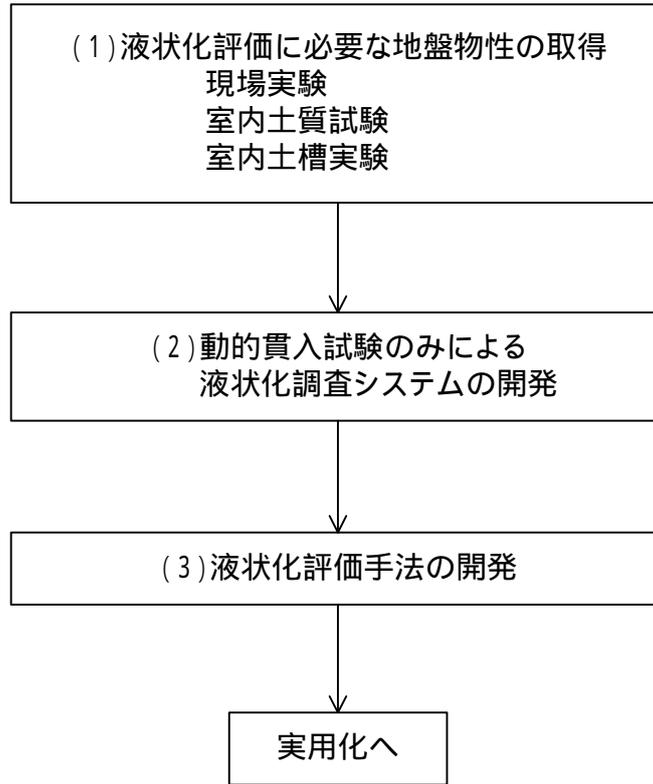


図 1-1 研究開発の流れ

(1)液状化評価に必要な地盤物性の取得

1)研究の目的

本研究は、ピエゾドライブコーン(PDC)による液状化調査システムの開発に資するために、現場実験および室内試験より地盤物性データを収集することを目的とする。

2)研究の内容

現場実験

現場実験の試験内容を表 1-1 に示す。

表 1-1 現場実験の試験内容

ボーリング	標準貫入試験
	乱れの少ないサンプリング
	標準貫入試験の荷重計測
動的コーン貫入試験	ピエゾドライブコーン
	ミニラムの荷重計測

室内土質試験

室内土質試験の試験内容を表 1-2 に示す。

表 1-2 室内土質試験の試験内容

採取方法	試験内容
力学試験	繰返し非排水三軸試験
物理試験	粒度試験
	液性限界試験、塑性限界試験
	土粒子の密度試験

室内土槽実験

室内土槽実験については、土槽の設計と製作を行う。

(2)動的貫入試験のみによる液状化調査システムの開発

1)研究の目的

本研究は、現場実験および室内土質試験で収集したデータを用いてこれまで用いてきた各種推定式を精査して液状化強度の推定精度を向上させるとともに、精度の高い動的貫入試験のみによる液状化調査システムを開発する。

2)研究の内容

細粒分含有率 F_c の推定手法の確立

堆積環境の異なる地盤で実施した現場実験および室内土質試験で得たデータを用いて、動的貫入試験の間隙水圧応答と細粒分含有率 F_c の関係を精査する。また、細粒分含有率 F_c の推定に用いる間隙水圧応答の与え方を変更し、精度向上を図る。

N 値の推定精度の向上

現場実験で実施した小型動的貫入試験装置 (MRS) の荷重計測から打撃貫入時のエネルギーを算出し、10m 以深において MRS の地盤の動的貫入抵抗 N_d 値が標準貫入試験の N 値よりも大きめに評価される原因を明らかにする。また、エネルギー効率を踏まえた N_d 値の新たな補正方法を提案する。

地下水位の推定手法の確立

地下水位は、砂地盤に対しては打撃後 0.18sec ~ 0.19sec の圧力センサの応答値について深度分布図を作成し、圧力センサの応答値が負から正に転ずる深度を地下水位と判定しているが、砂分を多く含む地盤や粘土地盤への適用性は低い。そこで、圧力センサの応答値の最大値に着目する等、視点を変えて砂分を多く含む地盤や粘土地盤にも適用可能な地下水位の指標値を抽出する。

液状化強度の推定手法の確立

PDC から得られる地盤の動的貫入抵抗 N_d 値と細粒分含有率 F_c を用いて道路橋示方書・同解説耐震設計編 (平成 24 年) より液状化強度 (R_L) を算定し、液状化試験 (繰返し非排水三軸試験) の液状化強度 (R_{L20}) と比較検討により、液状化強度の推定手法を確立する。

上記 ~ をプログラム化し、液状化調査システムを構築する。

(3)液状化評価法の開発

1)研究の目的

本研究は、ピエゾドライブコーンの液状化調査システムによる液状化判定結果の妥当性を検証し、オーソライズされた液状化評価を確立する。

2)研究の内容

本研究で構築したピエゾドライブコーンによる液状化調査システムを用いて、各種技術基準による液状化判定を行い、従来のボーリングおよび室内土質試験による液状化判定結果の比較により妥当性を検証し、オーソライズされた液状化評価手法を確立する。妥当性の検証には、以下の技術基準を用いる。

道路橋示方書・同解説 V.耐震設計編、社団法人日本道路協会、平成 24 年
建築基礎構造設計指針、日本建築学会、平成 13 年

2. 液状化評価に必要な地盤物性の取得

本研究は、ピエゾドライブコーン（PDC）による液状化システムの開発に資するため、堆積環境の異なる地盤においてボーリング孔を利用した標準貫入試験や乱れの少ないサンプリングを実施し、室内では液状化判定に必要とされる物理試験や繰返し非排水三軸試験を実施した。また、PDCによる地盤の動的貫入抵抗 N_d 値と間隙水圧 u の計測を始め、地盤の動的貫入抵抗 N_d 値の新たな補正法の開発を目的とした小型動的貫入試験装置（MRS）の打撃荷重の計測を実施した。表 2-1 に実験現場と実験の内容を示す。写真 2-1 に茨城県神栖市堀割と千葉県香取市佐原口で実施したボーリング状況写真を示す。

表 2-1 実験現場および実験内容

	場所【地形】	BOR	SPT	LABO	PDC	MRS-L	SPT-L
1	茨城県神栖市堀割 【外浪逆浦、三角州、干拓地】						-
2	千葉県香取市佐原口（利根川河川敷） 【利根川低地、中洲、耕作地】						-
3	新潟県北蒲原聖籠町東港（新潟東港） 【新潟海岸平野、砂丘】						
4	滋賀県守山市水保 【旧野洲川河口、三角州】						-
5	千葉県浦安市舞浜（浦安市運動公園） 【東京湾岸、海面埋立地】						-
6	埼玉県久喜市南栗橋 【中川低地、氾濫原、浚渫盛土】	○	○	○			-

BOR：ボーリング調査、SPT：標準貫入試験、LABO：室内土質試験、

PDC：ピエゾドライブコーン貫入試験、MRS-L：小型動的貫入試験装置の荷重計測、

SPT-L：標準貫入試験の荷重計測

○：本助成研究で実施、□：他の助成研究で実施、△：本助成研究以前に実施



(a)茨城県神栖市堀割



(b)千葉県香取市佐原口

写真 2-1 ボーリング実施状況

ボーリングおよび室内土質試験結果として、図 2.1-3 に実験現場の土質構成および土質特性値の深度分布図を示す。本実験現場は、深度 4m までは細砂を主体とする埋土、深度 8.4m まで沖積層の粘性土、以深は沖積層の砂質土が分布する。

埋土は、深度 3m までは細粒分含有率 F_C が 10% 程度と少なく、 N 値は一部を除いて 6 以下と締りが悪くルーズである。深度 3m ~ 4m は細粒分含有率 F_C が 30% 程度に増加し、 N 値は逆に 2 ~ 3 と非常に小さくなる。

沖積層の粘性土は、 N 値が 0 (ハンマー自沈) と極めて軟質である。砂分を 20% 程度含有するが塑性指数 I_p はいずれも 20 以上であり、液状化の危険性のない土に区分される。

沖積層の砂質土は、深度 14m までは細粒分含有率が 30% 程度で N 値が 15 前後と中位の締り具合を示す。14m 以深は細粒分含有率 F_C が 15% 程度に減少し、 N 値は 20 以上と密実になる。

繰返し非排水三軸試験 (液状化試験) による液状化強度 RL_{20} は、埋土が 0.15 ~ 0.26、沖積の砂質土が 0.26 ~ 0.40 となり、 N 値の傾向に整合する結果となった。

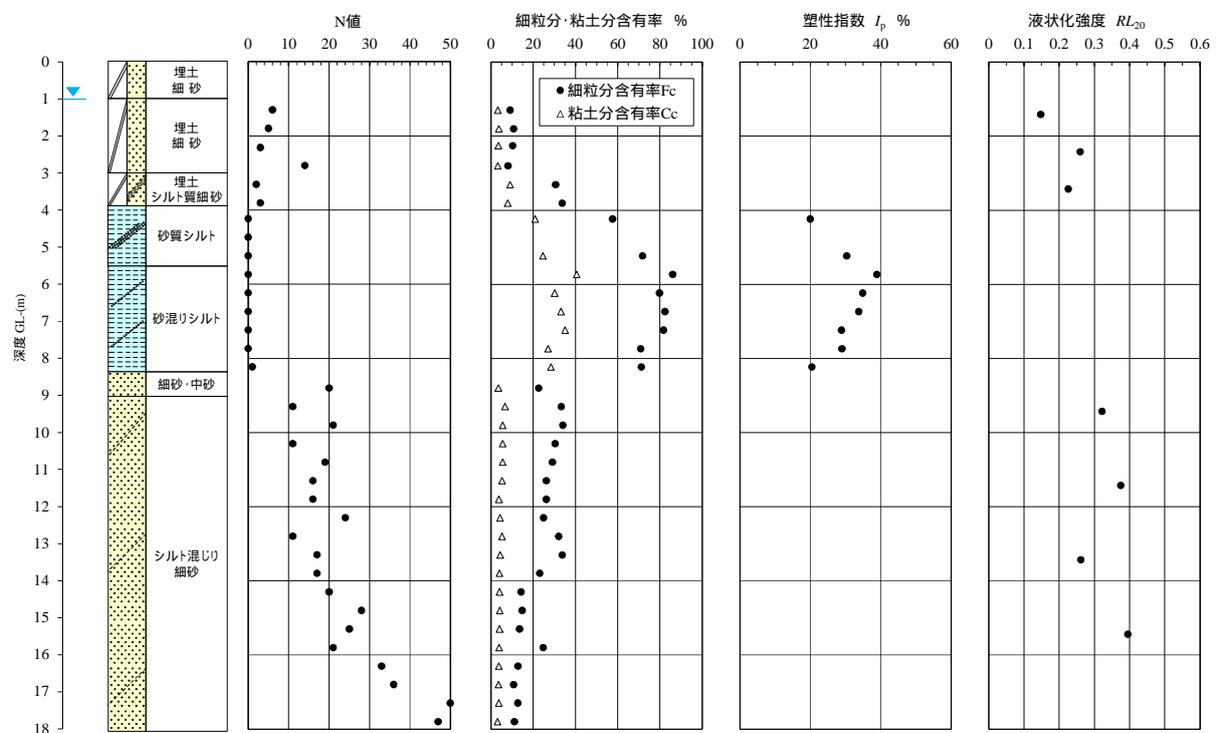


図 2.1-3 ボーリングおよび室内土質試験 (茨城県神栖市堀割)

(2) 千葉県香取市佐原口

図 2.1-4 に茨城県神栖市堀割の現場位置図を示す。香取市佐原口は利根川下流の河川敷に位置し、明治期から河道と旧河道に挟まれた陸地（耕作地）であった。2011 年東北地方太平洋沖地震では、地盤の液状化現象が発生している。

図 2.1-5 にボーリングおよび各種サウンディング試験の位置図を示す。



図 2.1-4 現場位置図（千葉県香取市佐原口）

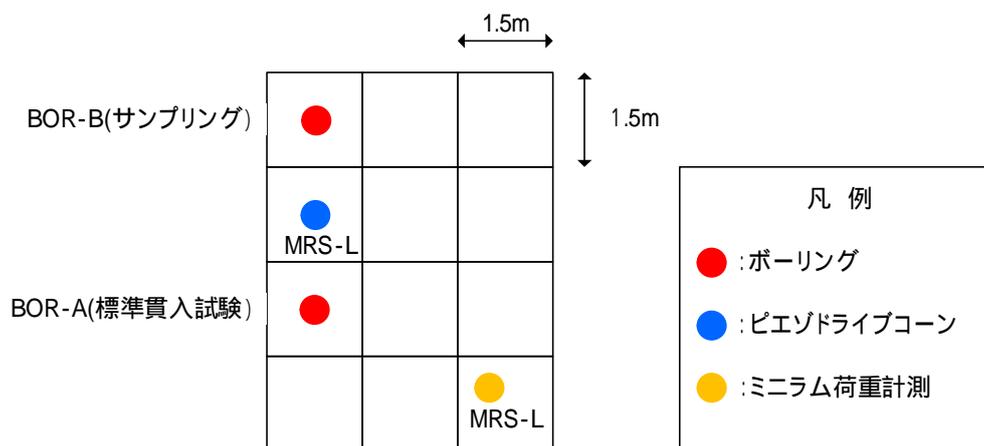


図 2.1-5 試験位置図（千葉県香取市佐原口）

ボーリングおよび室内土質試験結果として、図 2.1-6 に実験現場の土質構成および土質特性値の深度分布図を示す。本実験現場は、深度 3m までは有機質土を混じるシルト、以深は沖積層の砂質土が分布し、途中 7m~8m ではシルトを挟在する。また、14m から貝殻片を混入する。3m 以深は N 値が 10 前後の砂質土を主体とし、深度 7m~8m はシルトを細かく挟在する。14m からは貝殻を混入する。

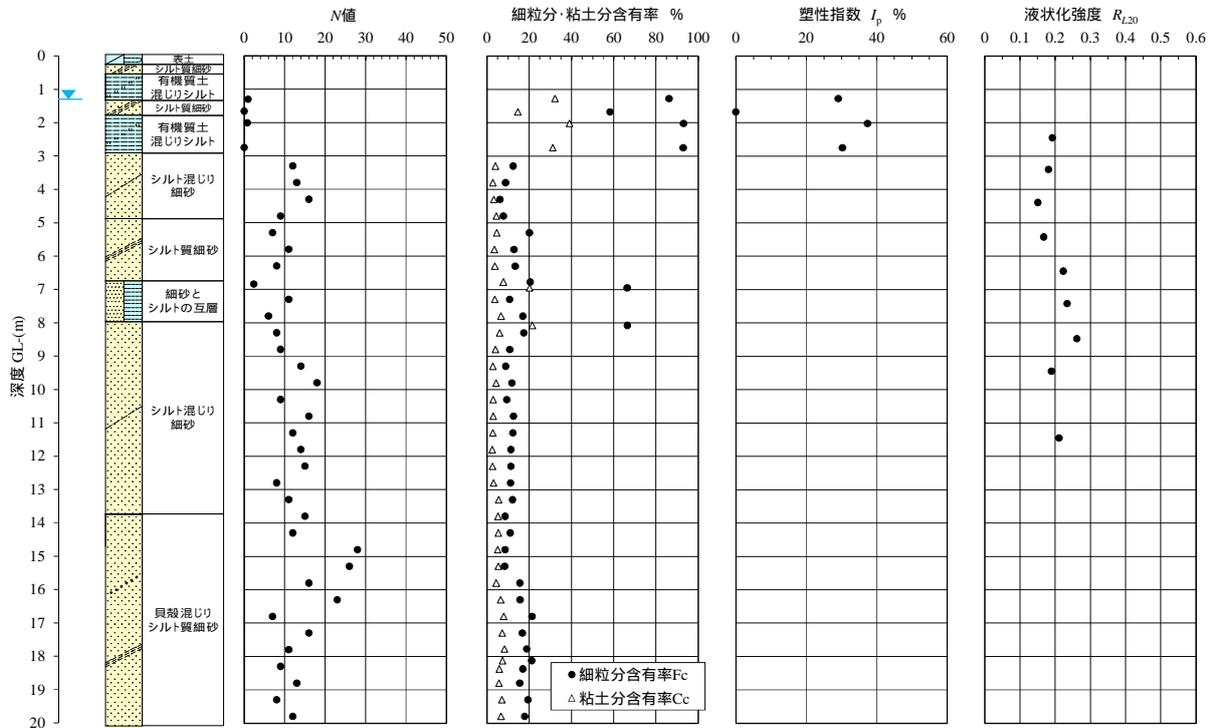


図 2.1-6 ボーリングおよび室内土質試験（千葉県香取市佐原口）

(3) 新潟県蒲原聖籠町東港（新潟東港）

図 2.1-7 に新潟東港の現場位置図を示す。実験現場は、新潟平野の沿岸部に位置する。新潟東港は、沿岸部の砂丘を開削した堀込港であり、自然地盤から成る。

図 2.1-8 にボーリングおよび各種サウンディング試験の位置図を示す。

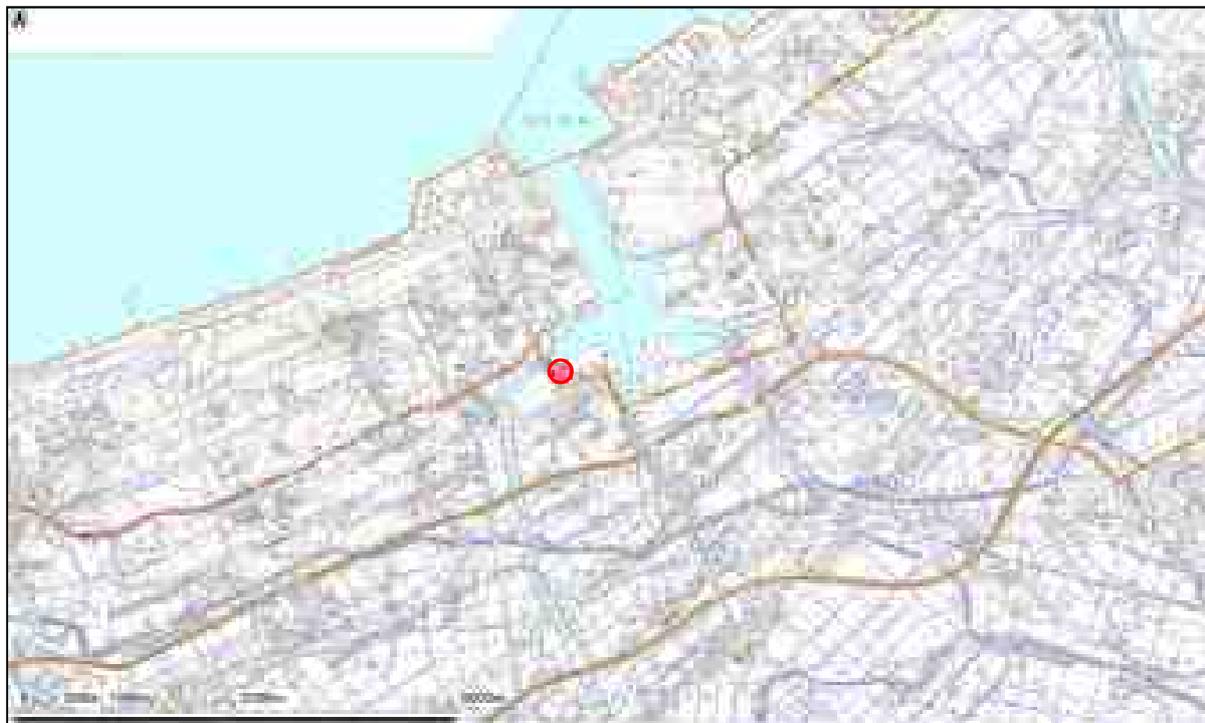


図 2.1-7 現場位置図（新潟県蒲原聖籠町東港）

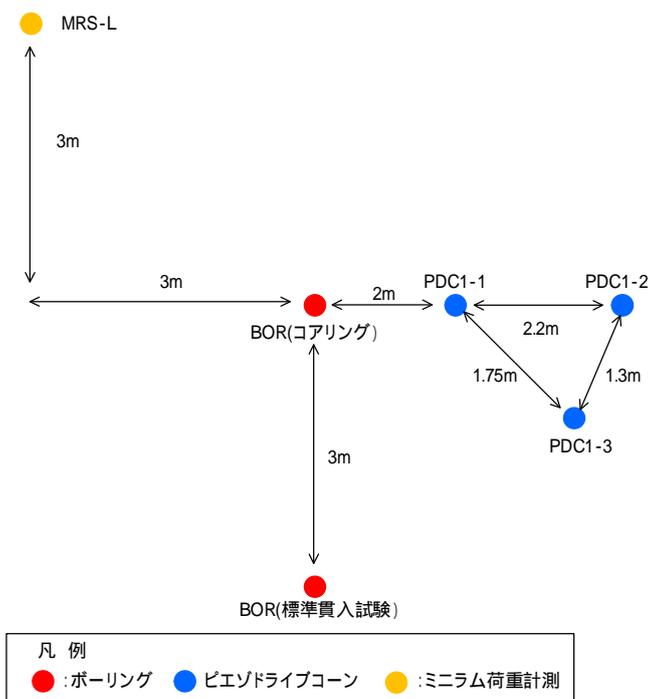


図 2.1-8 試験位置図（新潟県蒲原聖籠町東港）

ボーリングおよび室内土質試験結果として、図 2.1-9 に実験現場の土質構成および土質特性値の深度分布図を示す。本実験現場は、深度 0.5m 以深は自然地盤であり、細粒分含有率 F_c が 10% 以下で粒径の均一な細砂および中砂で構成される。 N 値は 20~40 と中位~密実で深度方向に増加傾向が見られる。

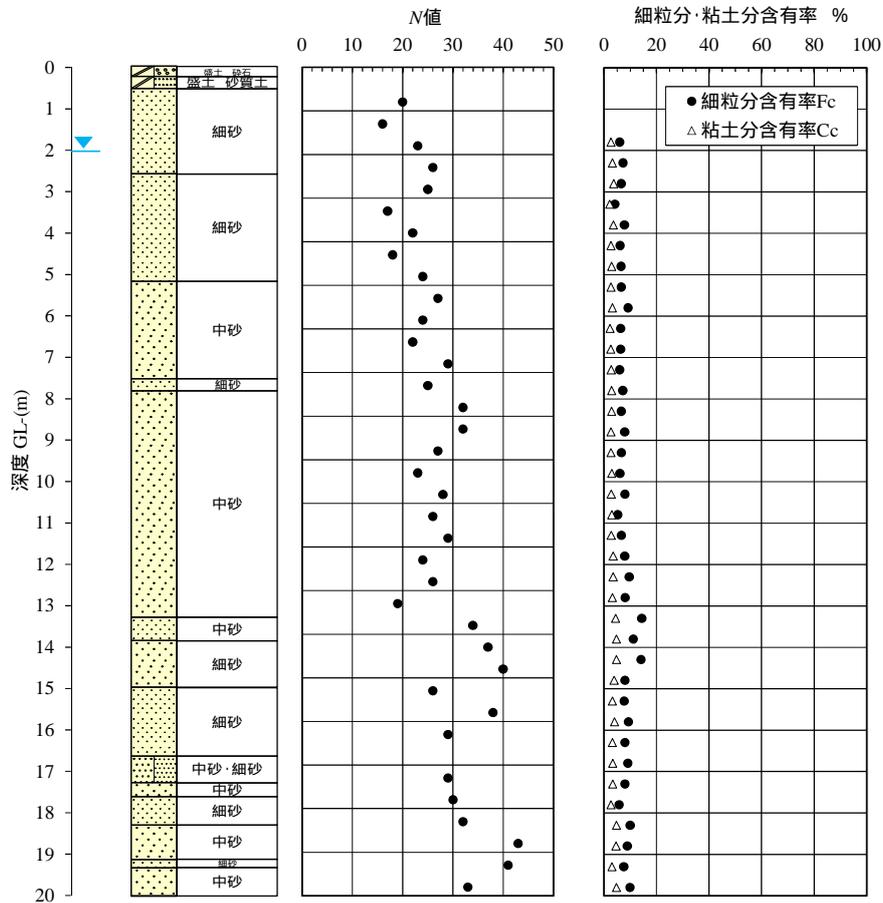


図 2.1-9 ボーリングおよび室内土質試験 (新潟県蒲原聖籠町東港)

(4) 滋賀県守山市水保

図 2.1-10 に滋賀県守山市水保の現場位置図を示す。実験現場は琵琶湖沿岸部で旧野洲川が形成した三角州に位置する。

図 2.1-11 にボーリングおよび各種サウンディング試験の位置図を示す。



図 2.1-10 現場位置図（滋賀県守山市水保）

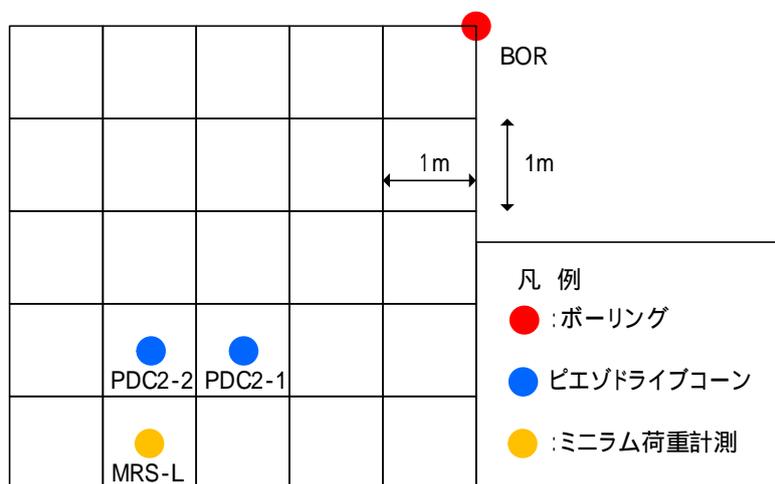


図 2.1-11 試験位置図（滋賀県守山市水保）

ボーリングおよび室内土質試験結果として、図 2.1-12 に実験現場の土質構成および土質特性値の深度分布図を示す。実験現場は、表層の 1.2m が礫質土の盛土、以深は 17m 付近まで沖積層の砂質土と粘性土が分布し、深度方向に粒度分布の変化に富むのが特徴である。12m 付近までは砂質土の N 値は 10 以下と締り悪く、粘性土の N 値は 1~2 と軟質である。12m 以深は砂質土が N 値 10~35 程度、粘性土が 3~5 程度となる。粘性土はシルトを主体として砂分を多く含み、塑性指数 I_p が 15 以下（低塑性）となる所が多く見られる。塑性指数 I_p が 15 以下の土層は、粘性土であっても液状化判定の対象となる。17m 付近からは腐植土を挟む。

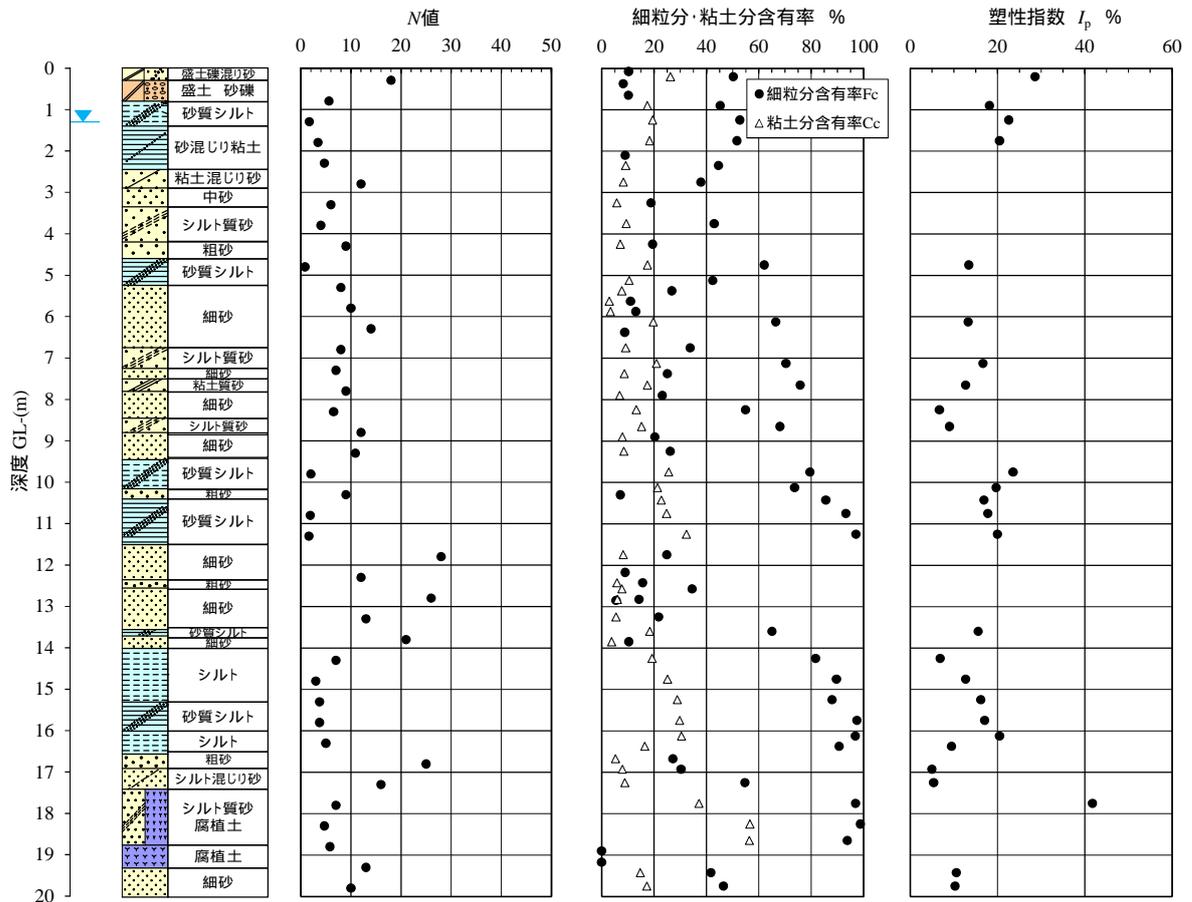


図 2.1-12 ボーリングおよび室内土質試験（滋賀県守山市水保）

(5) 千葉県浦安市舞浜（浦安運動公園）

図 2.1-13 に千葉県浦安市舞浜の現場位置図を示す。実験現場は、東京湾岸の埋立地に位置する。昭和 39 年から第 1 期海面埋立事業が始まり、昭和 44 年に埋め立てが完成した。

図 2.1-14 にボーリングおよび各種サウンディング試験の位置図を示す。



図 2.1-13 現場位置図（千葉県浦安市舞浜）

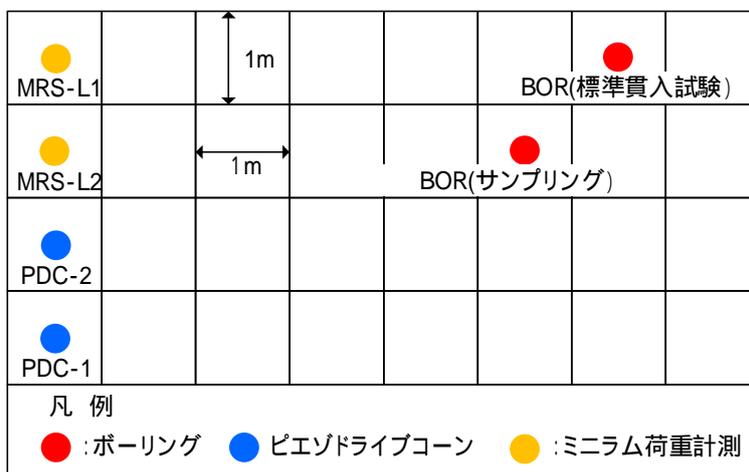


図 2.1-14 試験位置図（千葉県浦安市舞浜）

ボーリングおよび室内土質試験結果として、図 2.1-15 に実験現場の土質構成および土質特性値の深度分布図を示す。実験現場は、表層の 0.8m はロームから成る盛土、以深は 7m 付近まで浚渫の埋土が分布し、細粒分含有率 F_c が 30% 程度のシルト質細砂と粘性土で構成される。 N 値は、地下水位以深では砂質土は 10 未満の締りが悪く、粘性土は 0~1 と極めて軟質である。8m 以深は沖積層となり、13m まで N 値が 10 未満の締りの悪い砂質土、以深は N 値 1~4 と軟質なシルトが分布する。砂質シルトや砂混りシルトは、砂質土との層境付近において、塑性指数 I_p が 15 以下（低塑性）となる所が見られる。塑性指数 I_p が 15 以下の土層は、粘性土であっても液状化判定の対象となる。

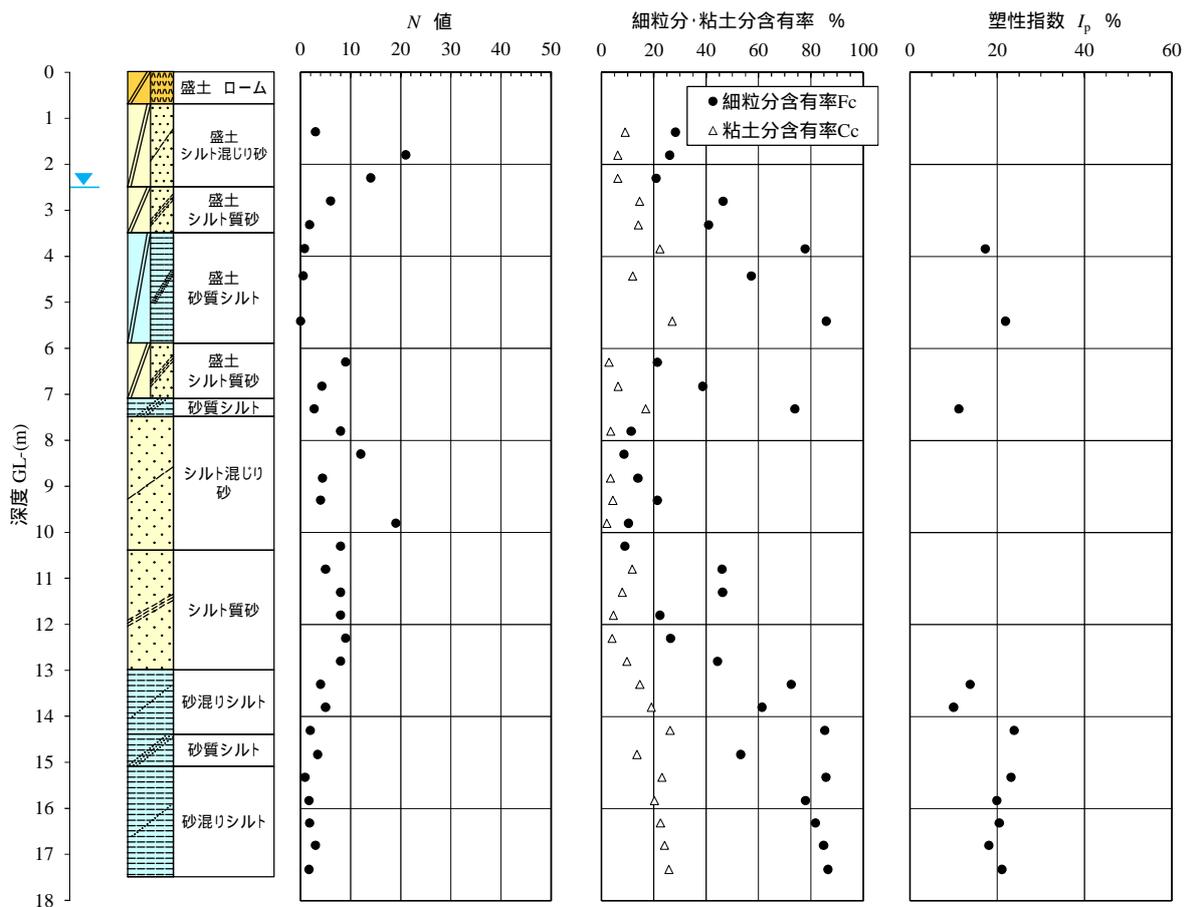


図 2.1-15 ボーリングおよび室内土質試験（千葉県浦安市舞浜）

(6) 埼玉県久喜市南栗橋

図 2.1-16 に埼玉県久喜市南栗橋の現場位置図を示す。実験現場は、利根川と中川の氾濫原に位置する。かつては水田地帯であったが、昭和 58 年より土地区画整理事業における造成工事が始められ、平成 11 年に完了した。埋め立てには旧江戸川の権現堂川の浚渫土が使用された。2011 年東北地方太平洋沖地震では、地盤の液状化現象が発生している。

図 2.1-17 にボーリングおよび各種サウンディング試験の位置図を示す。



図 2.1-16 現場位置図（埼玉県久喜市南栗橋）

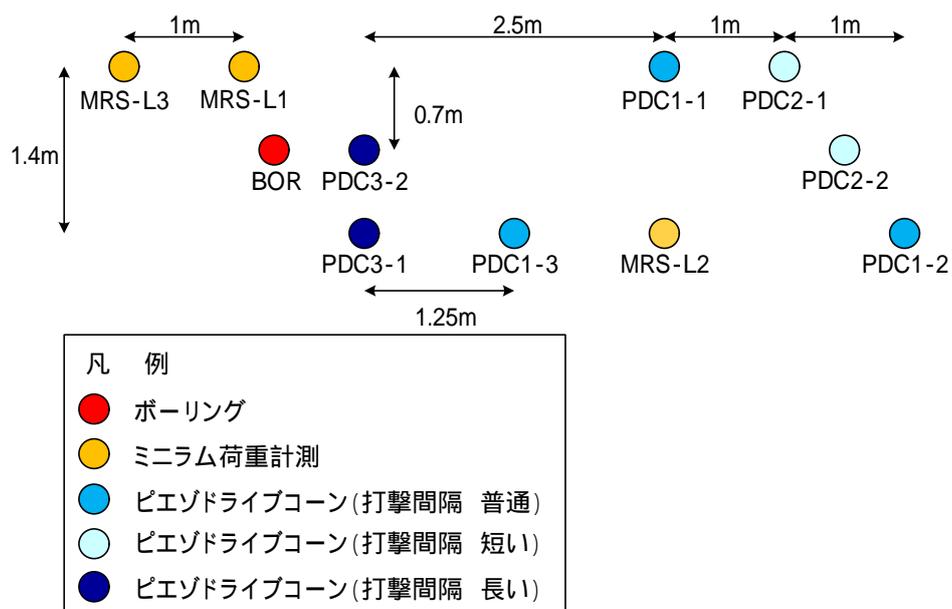


図 2.1-17 試験位置図（埼玉県久喜市南栗橋）

ボーリングおよび室内土質試験結果として、図 2.1-18 に実験現場の土質構成および土質特性値の深度分布図を示す。実験現場は、表層の 0.5m は粘性土の盛土、深度 2m まで浚渫の細砂から成る埋土が分布する。2m 以深は沖積層となり、8m 付近までシルト、8m 以深は砂質土が分布する。浚渫の細砂は、細粒分含有率 F_C が 20% 程度、 N 値が 5 未満と締りが悪い。沖積層のシルトは、砂分の混入が少なく均質で、 N 値は 1~2 と軟質である。塑性指数 I_p は 40~50 程度と塑性が高い。沖積層の細砂は、細粒分含有率 F_C が 15% 程度と比較的均質であり、 N 値は 15 と中位の締り具合を示す。

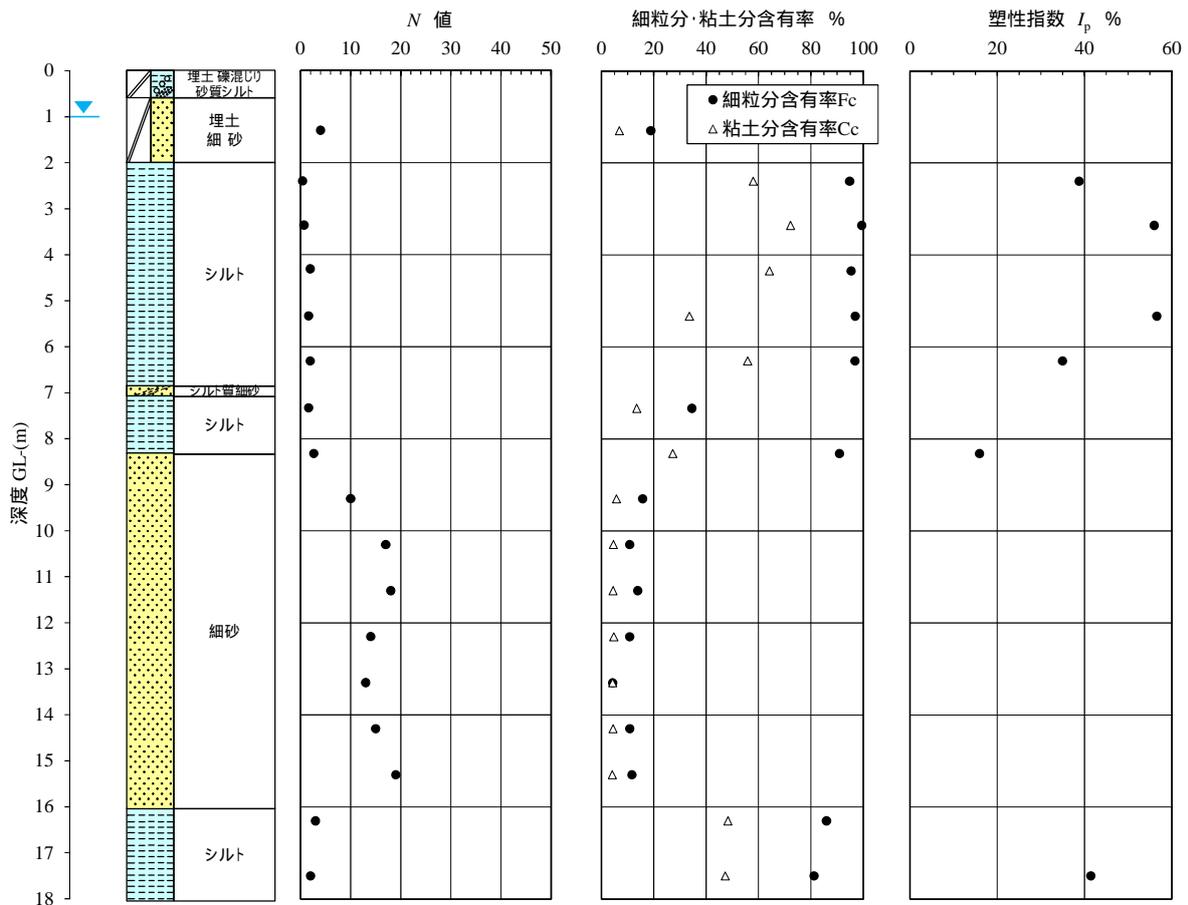


図 2.1-18 ボーリングおよび室内土質試験 (埼玉県久喜市南栗橋)

2.2. ピエゾドライブコーン貫入試験

2.2.1. 試験方法

(1) 試験方法

1) 試験概要

ピエゾドライブコーン(PDC)は、先端コーン位置に間隙水圧計、地上部には変位計を設置し、1打撃毎の貫入量とともに地盤中に発生する過剰間隙水圧の測定を行う動的コーン貫入試験装置である。試験装置の概要図を図 2.2-1 に示す。PDC は、1 打撃毎の貫入量から地盤の動的貫入抵抗 N_d 値 (推定 N 値)、過剰間隙水圧応答から細粒分含有率 F_C を推定する。

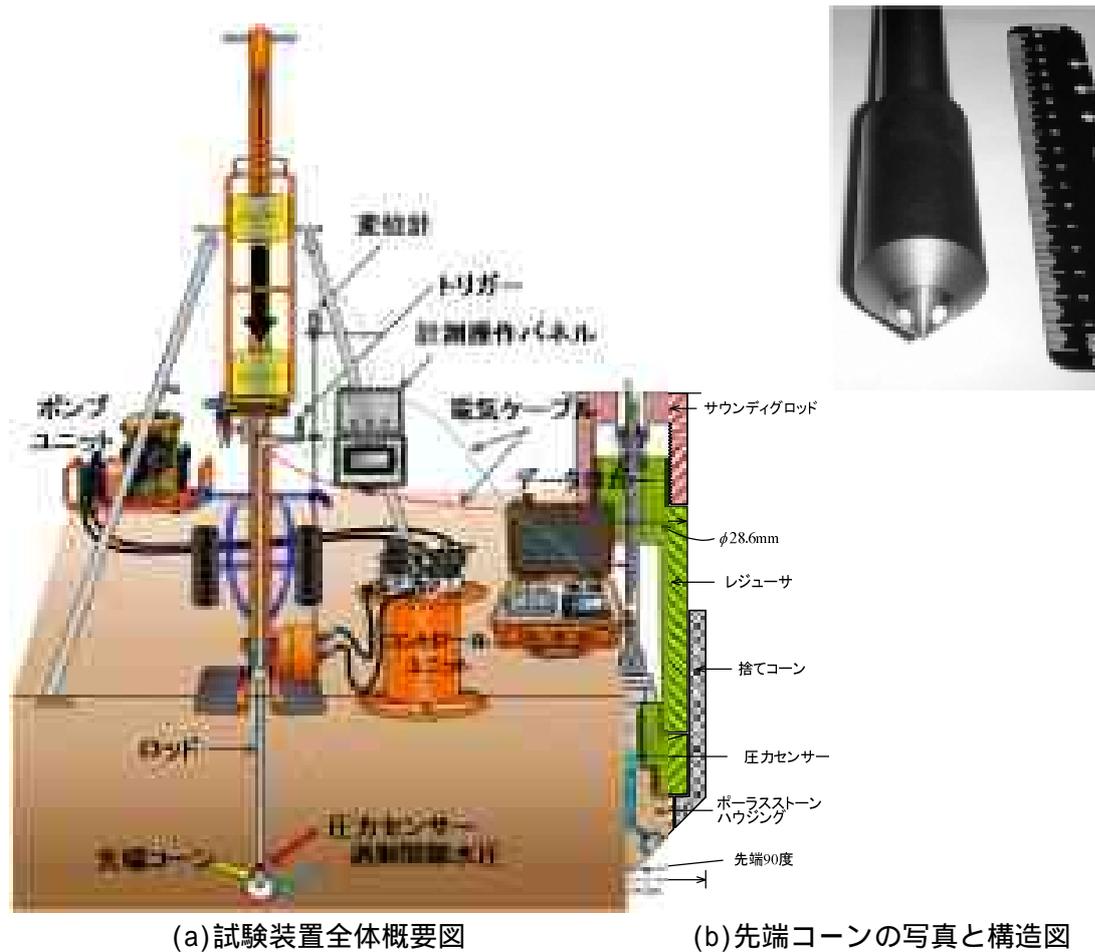


図 2.2-1 PDC試験装置の概要図

2) 貫入装置

PDCは、貫入装置に小型動的貫入試験装置(MRS)とスウェーデン式ラムサウンディング試験装置(SRS)に装着可能である。今回の現場実験では、MRSを使用した。なお、貫入ロッドはMRSの中実ロッド(28.0mm)ではなく、PDC専用の中空ロッド(28.6mm)を使用した。

3)PDC 計測装置

貫入装置に付加する PDC の試験装置は、間隙水圧計、変位計、トリガーおよびデータ収録装置である。

間隙水圧計

間隙水圧計の圧力センサは、先端コーンに内蔵されている。なお、先端コーンの外形および寸法は、MRS と同一である。圧力センサには、米国の MEGGITT 社製（旧 Endevco 社）の半導体ゲージ型圧力トランスデューサ（8530B）を用いている。圧力センサの測定レンジは、0～3450 kPa（測定感度 0.087 ± 0.029 mV/kPa）である。また、 9800 m/s^2 （1000 G）の耐振動性能と 196000 m/s^2 （20000G）の耐衝撃性能を有する小型で堅牢・高感度なセンサである。

変位計

変位計には、磁歪リニア変位センサを用いている。磁歪リニア変位センサは、Wiedemann 効果による磁歪現象を応用したセンサである。図 2.2-2 に磁歪リニア変位センサの測定原理の概念図を示す。剛なセンサブロープ（磁歪線）に非接触で移動するマグネットを配置することにより磁歪線上にねじり歪を発生させて、そのねじり歪の伝播時間でマグネットの位置を計測する方式である。高速となる打撃貫入速度に対し、高精度・高応答を可能としたセンサである。

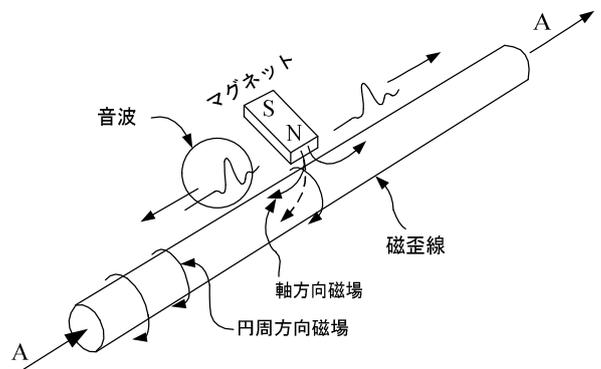


図 2.2-2 磁歪リニアセンサの概念図

トリガー

ハンマーがアンビルを当るタイミング（貫入開始）をデータ収録装置に知らせるためのトリガーには、近接センサを用いている。図 2.2-3 に近接センサによるトリガーの概念図、写真 2.3-1 に近接センサの設置状況を示す。

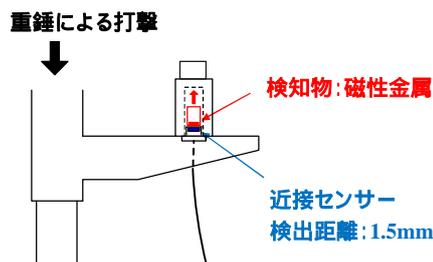


図 2.2-3 トリガーの概念図



写真 2.2-1 トリガーの設置状況

データ収録装置

データ収録装置は、圧力センサの応答電圧と磁歪リニア変位センサの応答電圧値のアナログ値を A/D 変換した後、校正値を用いて換算した圧力値と変位量を 1 打撃毎に収録する。1 回の打撃で収録されるデータは、サンプリング周期 $100 \mu\text{sec}$ （10 kHz）、プレトリガー 10 msec（100 データ/ch）を含む 0.2sec 間（2000 データ/ch）である。

4) 試験の作業手順

PDC は、以下の手順で試験を行う。

調査地点にMRSの貫入装置を垂直に立て、サポートで固定する。

貫入装置とコントロールユニットを油圧ホースで接続する。

変位計とトリガーを貫入装置にセットし、それぞれをデータ収録装置と接続する。

先端コーンを専用ロッドに取り付けるとともに、所定貫入深度+1m分のロッド内に信号ケーブルをとおし、データ収録装置に接続する。

先端コーン部内を脱気した後、間隙水圧計の作動状況を確認する。

専用脱気コーン+捨てコーンを取り付け、先端コーン部を仕上げる。

データ収録装置に記録媒体（SDカード）を挿入する。

間隙水圧計の検定値をデータ収録装置に入力する（検定値の入力）。

先端コーンを取り付けた1本目のロッドを貫入装置にセットし、コーン先端の深度をデータ収録装置に入力する（初期深度の入力）。

データ収録装置のカウント数に「1」を、トルク値に「0」を入力する。

貫入装置の打撃回数カウンターを「0」にする。

コントロールユニットを操作し、ハンマー（30kg）落下高（35cm）による打撃を開始する。このとき1打撃毎の貫入量と過剰間隙水圧は、データロガーに自動収録される（写真 2.2-2）。

20cm貫入毎の打撃回数をデータシートに記録する。

1mの貫入後（1本目は80cm）コントロールユニットを操作して打撃を中断させ、トルクレンチを用いてロッドのトルクを測定する（写真 2.2-3）。トルクを計測後、ロッドを1回転させる。

ロッドを1m分継ぎ足し、～を所定の深度に達するまで繰り返し行う。

所定貫入深度までの試験が終了したら、貫入装置を移動し、引抜装置とコントロールユニットを用いてロッドの引抜きを行う。

試験孔の水位を水位計で計測する。



写真 2.2-2 間隙水圧測定状況



写真 2.2-3 トルク測定状況

5) データ整理

地盤の動的貫入抵抗 N_d 値（推定 N 値）

動的貫入試験における単位面積・単位貫入量あたりの貫入抵抗 R_d は、一般に式 (2.2-1) で定義される。MRSは、単位面積・単位貫入量あたりの貫入抵抗 R_d がSRSと等しくなるように設計されており、式 (2.2-2) に示すように20cmの貫入に要する打撃回数に0.5を乗じて地盤の動的貫入抵抗 N_d 値を算出する。また、ロッド周面摩擦の影響を受けやすい粘性土地盤については、周面摩擦相当の打撃回数をロッドのトルク M_r を用いて式 (2.2-3) より算出する。なお、式 (2.2-3) におけるトルクによる周面摩擦補正の係数0.16は、現場実験による経験的な値である²⁾。

一方、PDCは1打撃毎の貫入量 d を測定していることから、式 (2.2-4) を用いて式 (2.2-5) より1打撃に地盤の動的貫入抵抗 N_d 値を算出する。また、土質に依らずトルクによる周面摩擦補正を行う。

$$R_d = \frac{MgH}{A} \times \frac{N}{D} \quad \text{式 (2.2-1)}$$

ここで、 R_d : 単位面積・単位貫入量あたりの貫入抵抗
 M : ハンマー重量
 H : 落下高さ
 A : 先端コーンの断面積
 g : 重力加速度
 D : 所定の貫入深度間隔
 N : 所定の D に達する打撃回数

$$\text{砂質土地盤の場合} \quad N_d = \frac{1}{2} N_{dm} \quad \text{式 (2.2-2)}$$

$$\text{粘性土地盤の場合} \quad N_d = \frac{1}{2} N_{dm} - N_{mantle} = \frac{1}{2} N_{dm} - 0.16M_r$$

式 (2.2-3)

ここで、 N_d : MRS による地盤の動的貫入抵抗 N_d 値
 N_{dm} : 20cm 貫入に要する打撃回数
 N_{mantle} : 周面摩擦相当の打撃回数
 M_r : ロッドのトルク (N・m)

$$N_{dm} = \frac{20}{d} \quad \text{式 (2.2-4)}$$

ここで、 d : 1 打撃あたりの貫入量 (cm)

$$N_d = \frac{1}{2} \cdot \frac{20}{d} - 0.16M_r = \frac{10}{d} - 0.16M_r \quad \text{式 (2.2-5)}$$

なお、 $N_d = 0$ の場合は、 $N_d = 0$ とする。

細粒分含有率 F_C

打撃貫入時に発生する過剰間隙水圧は、地盤の透水係数 k に依存する。砂質土と粘性土で測定された過剰間隙水圧 Δu と貫入量 D の時刻歴波形の一例を図 2.2-4 に示す。細粒分を主体とする粘性土は、砂質土に比べて過剰間隙水圧 Δu が消散し難く、水圧が残留する。

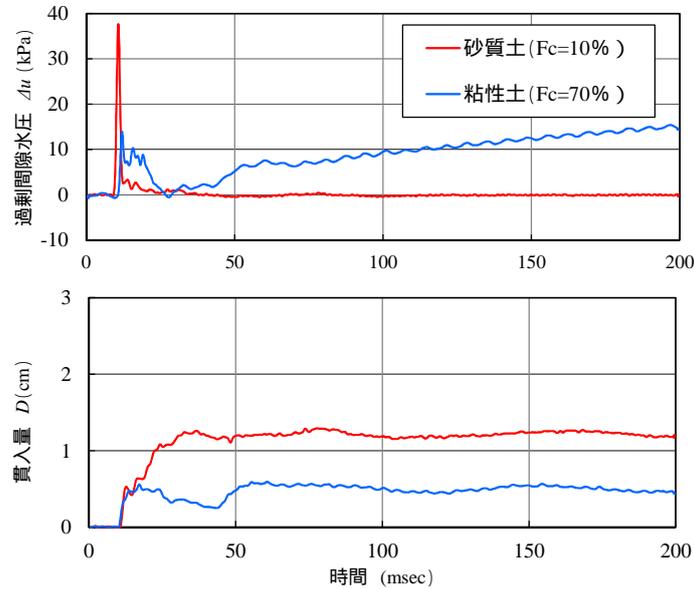


図 2.2-4 過剰間隙水圧 u の貫入量 D の時刻歴波形記録の一例

PDC で得られた間隙水圧 u_R を有効上載圧 σ'_v で除した間隙水圧比 u_R/σ'_v と、室内土質試験（粒度試験）による細粒分含有率 F_C の関係図を図 2.2-5 に示す。この間隙水圧 u は、貫入が概ね終了する 0.19sec ~ 0.20sec の平均値である。また、大気圧を基準とする値であり、静水圧も含む水圧である。図 2.2-5 に示すとおり間隙水圧比 u_R/σ'_v と細粒分含有率 F_C の相関性は良く、式 (2.2-6) で近似式されることが確認されている。PDC では、式 (2.2-6) を用いて間隙水圧比 u_R/σ'_v より細粒分含有率 F_C を推定する。

$$F_C = 18 \cdot u_R / \sigma'_v \quad \text{式 (2.2-6)}$$

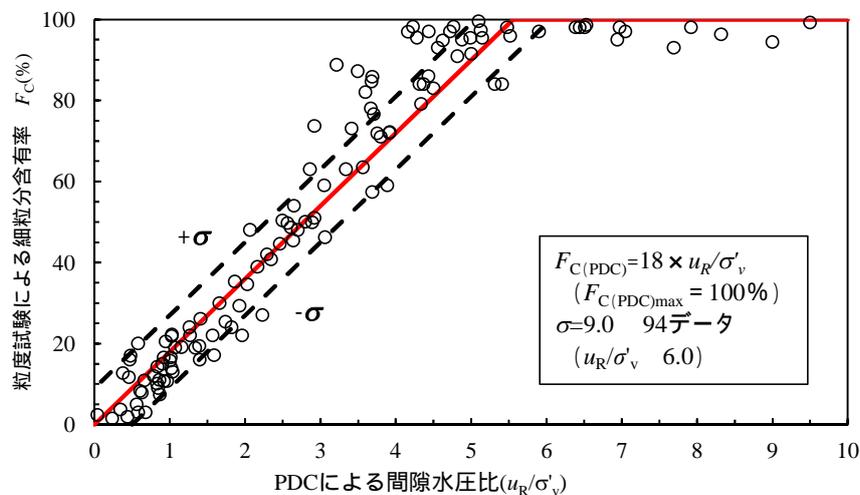


図 2.2-5 間隙水圧比 (u_R/σ'_v) と細粒分含有率 F_C の関係

2.2.2. 試験結果

PDCの試験結果は、トルク補正前の動的貫入抵抗 N_{dm} およびロッドのトルク M_v 、トルク補正後の動的貫入抵抗 N_d 値、細粒分含有率 F_C について、深度分布図で整理した。貫入抵抗 N_d 値と細粒分含有率 F_C の深度分布図については、標準貫入試験と粒度試験の結果を併記した。

(1) 茨城県神栖市堀割³⁾⁴⁾

図 2.2-6 に神栖市堀割の試験結果を示す。PDCの動的貫入抵抗 N_d 値は、深度 11m 付近までは標準貫入試験の N 値と一致しているが、11m 以深は N 値より大きめの値を示す。なお、深度 11m のトルク M_v は $30N \cdot m$ である。細粒分含有率 F_C は、粒度試験と概ね一致している。8.4m 以深において、細粒分含有率 F_C がスパイク状に大きくなる所が見られるが、砂層中にシーム状に挟在するシルトによるものと考えている。

(2) 千葉県香取市佐原口

図 2.2-7 に香取市佐原口の試験結果を示す。PDCの動的貫入抵抗 N_d 値は、深度 11m 付近までは標準貫入試験の N 値と一致しているが、11m 以深は N 値より大きめの値を示す。なお、深度 10m のトルク M_v は $27N \cdot m$ である。細粒分含有率 F_C は、全体の傾向は粒度試験と一致している。ただし、3m 以深の均質な砂層の細粒分含有率 F_C は、粒度試験よりやや大きめの値を示した。

(3) 新潟県北蒲原聖籠町東港（新潟東港）

図 2.2-8 に新潟東港試験結果を示す。PDCの動的貫入抵抗 N_d 値は、概ね N 値一致している。なお、深度 10m のトルク M_v は $20N \cdot m$ である。細粒分含有率 F_C は、PDC では深度方向に増加傾向が見られ、深度方向に一様である粒度試験と傾向が異なる。ただし、両者の差は 10% 以下と少ない。

(4) 滋賀県守山市水保³⁾⁴⁾⁵⁾

図 2.2-9 に守山市水保の試験結果を示す。PDCの動的貫入抵抗 N_d 値は、深度 9m 付近までは標準貫入試験の N 値と概ね一致しているが、9m 以深は N 値より大きな値を示す。なお、深度 10m のトルク M_v は $18N \cdot m$ である。細粒分含有率 F_C は、粒度試験と概ね一致した。なお、深度 1~2m に分布する砂質シルトの細粒分含有率 F_C は、粒度試験より小さめの値を示した。

(5) 千葉県浦安市舞浜（浦安運動公園）³⁾⁴⁾

図 2.2-10 に浦安市運動公園の試験結果を示す。PDCの貫入抵抗 N_d 値は、深度 11m 付近までは標準貫入試験の N 値と一致しているが、11m 以深は N 値より大きな値を示す。なお、深度 11m のトルク M_v は $18N \cdot m$ である。細粒分含有率 F_C は、粒度試験と概ね一致した。なお、深度 4m~5m に分布する砂質シルトの細粒分含有率 F_C は、粒度試験より小さくなった。

(6) 埼玉県久喜市南栗橋

図 2.2-11 に久喜市南栗橋の試験結果を示す。PDCの動的貫入抵抗 N_d 値は、深度 5m 付近までは標準貫入試験の N 値と一致しているが、4m 以深は N 値より徐々に大きくなる。なお、深度 4m のトルク M_v は $5N \cdot m$ である。細粒分含有率 F_C は、粒度試験と概ね一致している。

PDCの細粒分含有率 F_C は、粒度試験概ね一致した。PDCの動的貫入抵抗 N_d 値は、深度 10m 付近までは標準貫入試験の N 値と概ね一致している。10m 以深は N 値よりも大きめの傾向を示す。

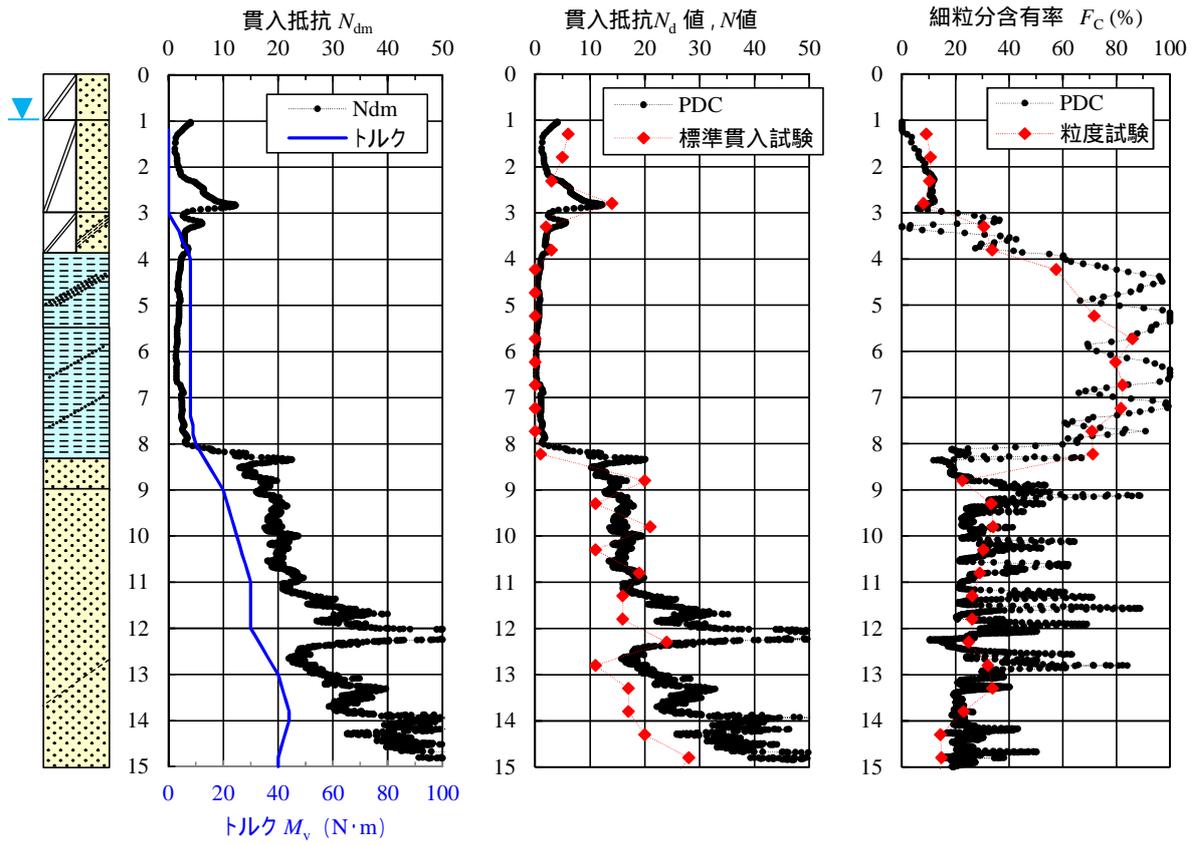


図 2.2-6 PDC 試験結果 (茨城県神栖市堀割)

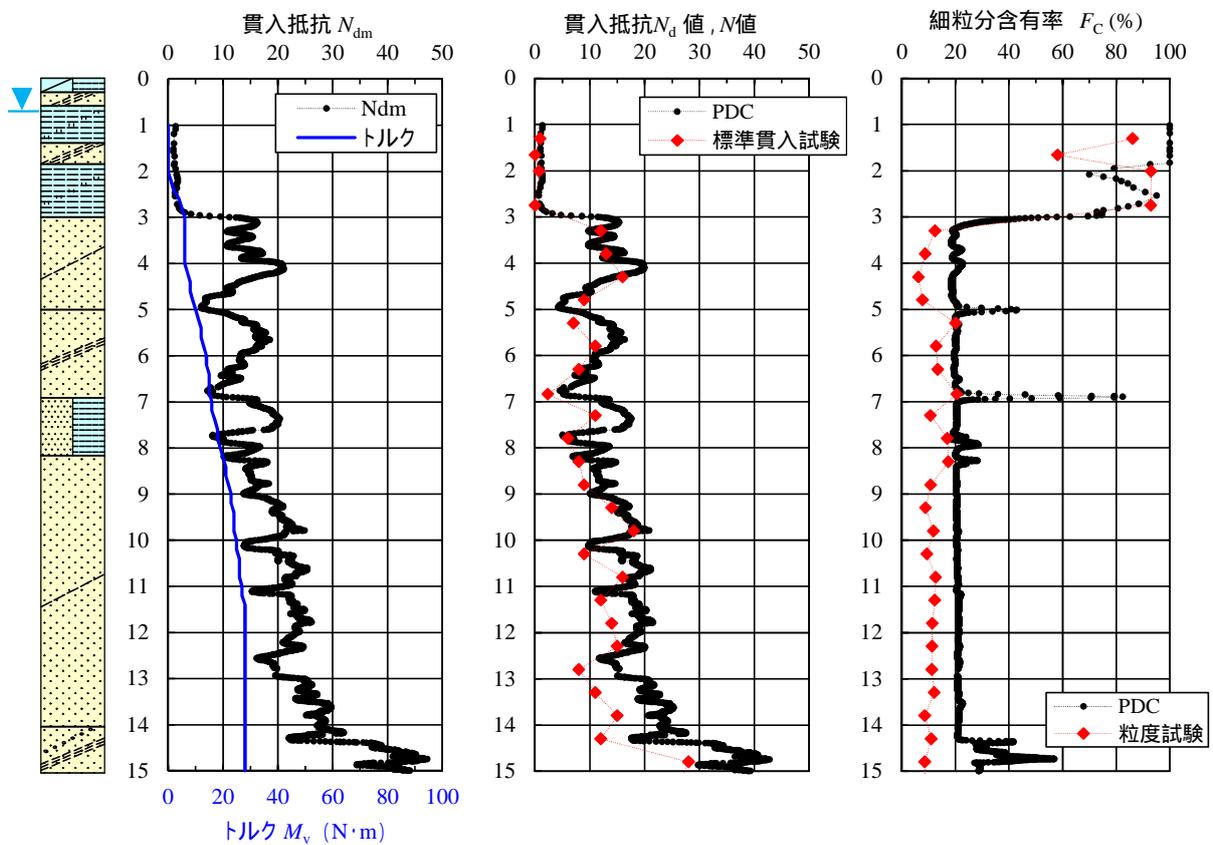


図 2.2-7 PDC 試験結果 (千葉県香取市佐原口)

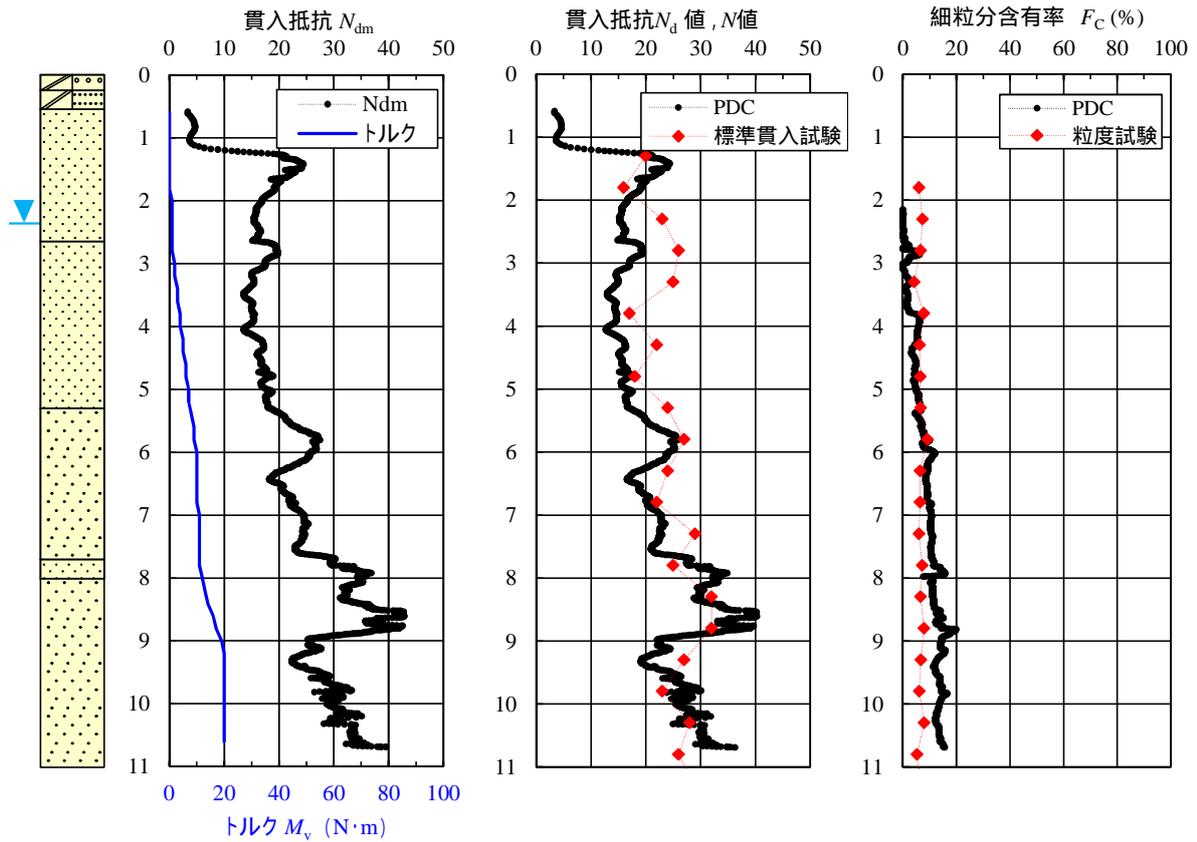


図 2.2-8 PDC 試験結果 (新潟県北蒲原聖籠町東港)

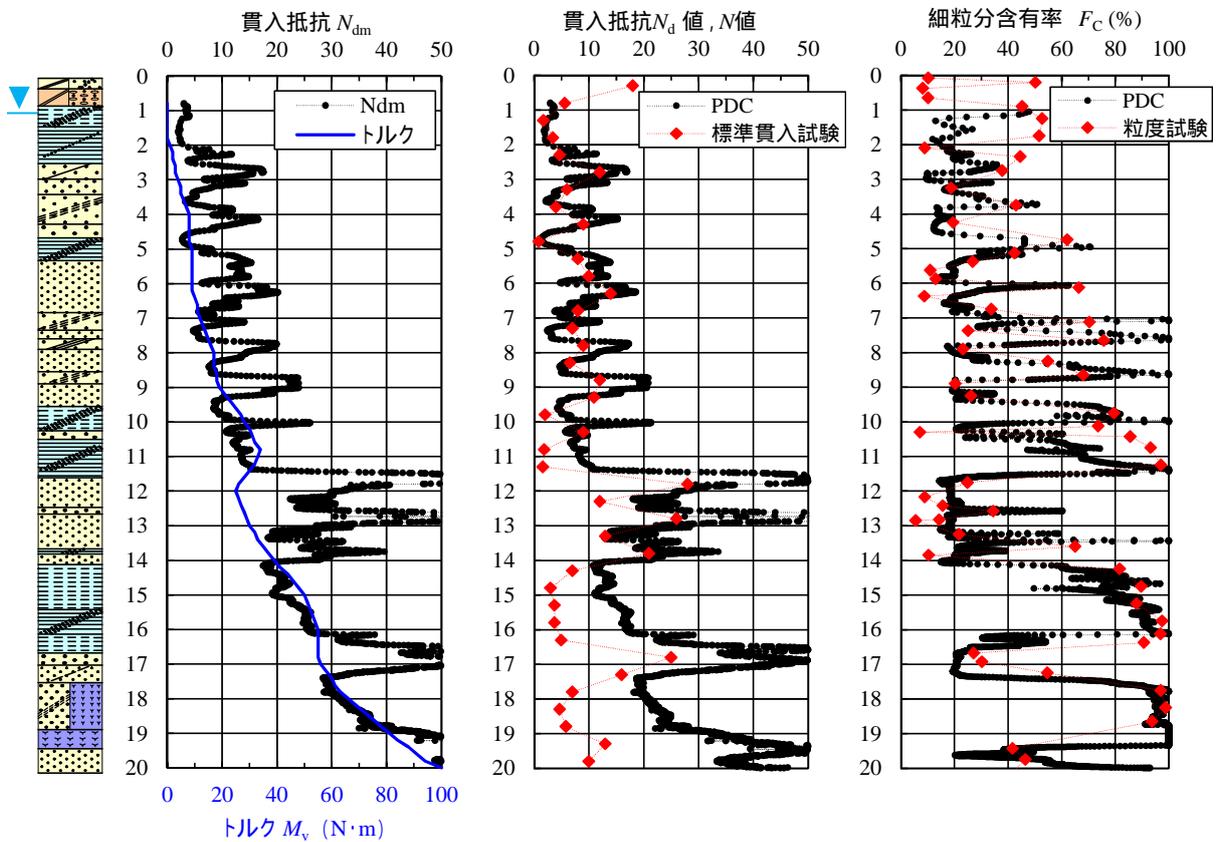


図 2.2-9 PDC 試験結果 (滋賀県守山市水保)

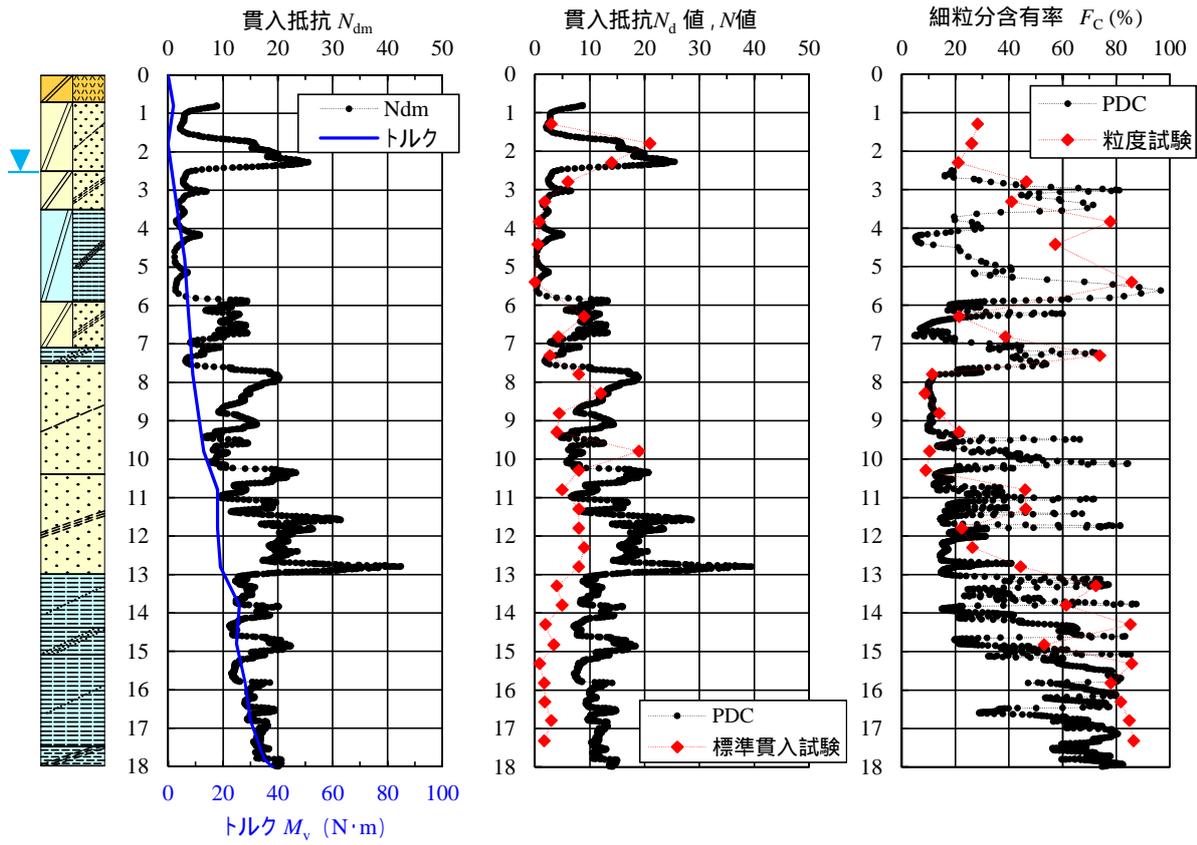


図 2.2-10 PDC 試験結果 (千葉県浦安市舞浜)

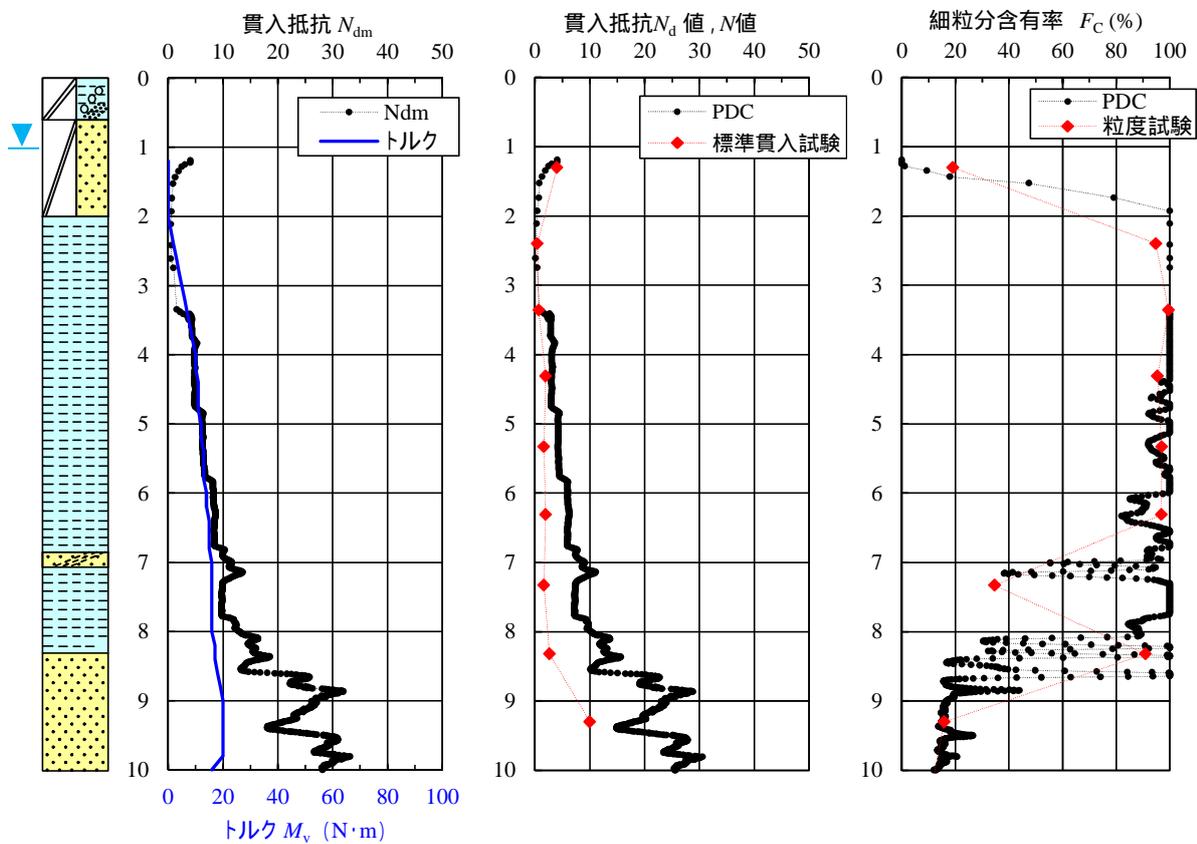


図 2.2-11 PDC 試験結果 (埼玉県久喜市南栗橋)

2.3. 小型動的貫入試験装置の荷重計測

ピエゾドライブコーン（PDC）の現場実験では、深度 10m より深くなると地盤の動的貫入抵抗 N_d 値が N 値よりも大きめに評価される傾向が見られた。原因としては、深度が深くなることによるハンマーの落下エネルギーの損失が考えられる。そこで、PDC が標準仕様としている小型動的貫入装置（MRS）の打撃時の荷重と貫入量の計測を行い、エネルギーの伝達状況を評価した。

2.3.1. 試験方法

試験装置の概要図と荷重計の設置状況写真を図 2.3-1 に示す。荷重計をアンビル部（ロッド頭部）と先端コーン部、地上部に PDC の磁歪式変位計とトリガーを設置し、打撃貫入時の荷重および搬入量の時刻歴データをデータロガーに自動収録するシステムである。荷重と貫入量の計測を深度方向に連続的に行えるという特長を有する。データ収録には PDC のデータロガーを使用し、アンビル部および先端コーン部の荷重計と変位計の出力電圧（3 チャンネル）をサンプリング間隔 100 μ sec(10 kHz)、プレートリガー 10msec(100 データ)を含む 0.2sec 間(2000 データ/ch)を 1 打撃毎記録した。

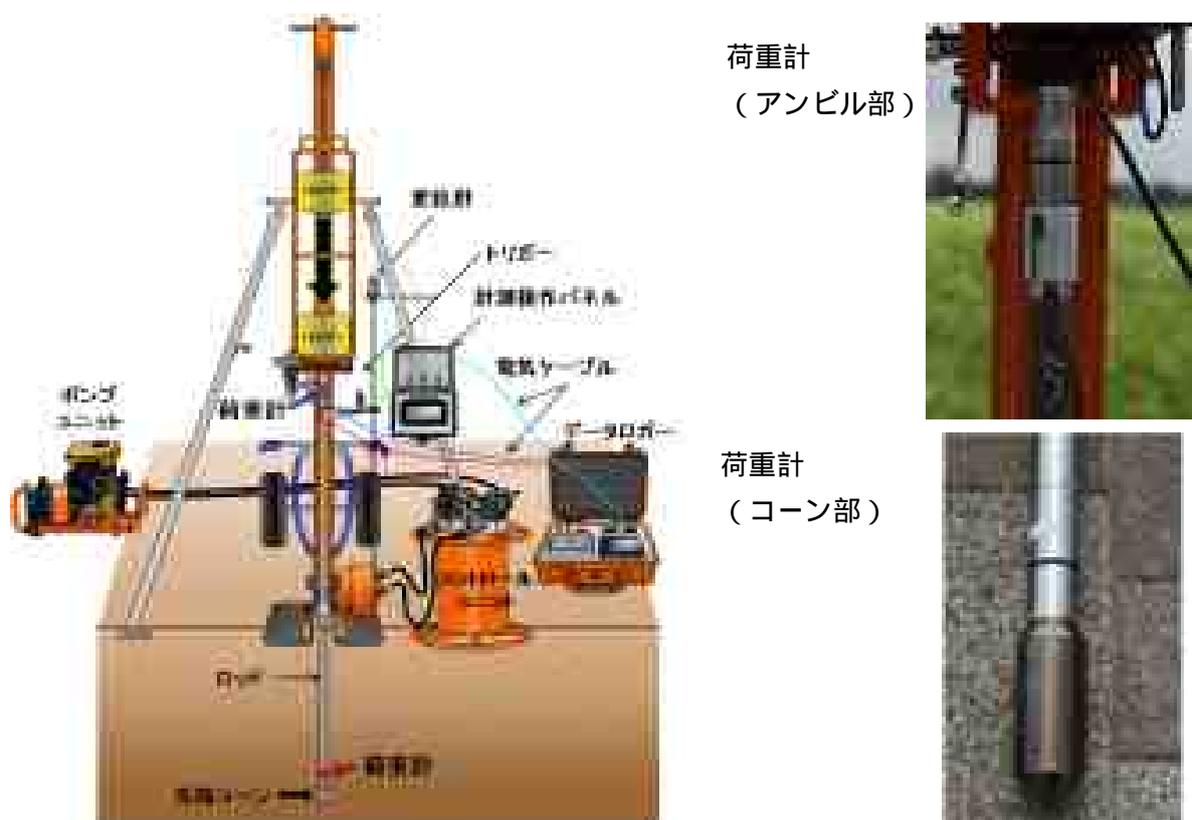


図 2.3-1 MRS 荷重計測の試験装置概要図

2.3.2. 試験結果

荷重と変位の計測データの一例を示す。なお、計測は0.2秒間行っているが、ここでは最初の0.06秒間を示した。荷重に着目すると、アンビル部の荷重は土質に係らず同程度の荷重値が得られているのに対し、先端コーン部の荷重は砂質土に比べて粘性土の荷重値が小さな値を示す。エネルギーは、荷重と貫入速度変位の時刻歴を用いて式(2.3-1)と式(2.3-2)より算出した。なお、速度は変位計測データを微分して求めた。

$$E = \int_0^t F(t) \cdot v(t) dt \quad \text{式 (2.3-1)}$$

$$v(t) = \frac{dP(t)}{dt} \quad \text{式 (2.3-2)}$$

ここで、 E ：ロッド頭部 (E_A)、先端コーン部 (E_C) のエネルギー(J)

$F(t)$ ：ロッド頭部 (F_A)、先端コーン部 (F_C) の打撃荷重(N)

$v(t)$ ：貫入速度(m/sec)、 $P(t)$ ：貫入量(m)

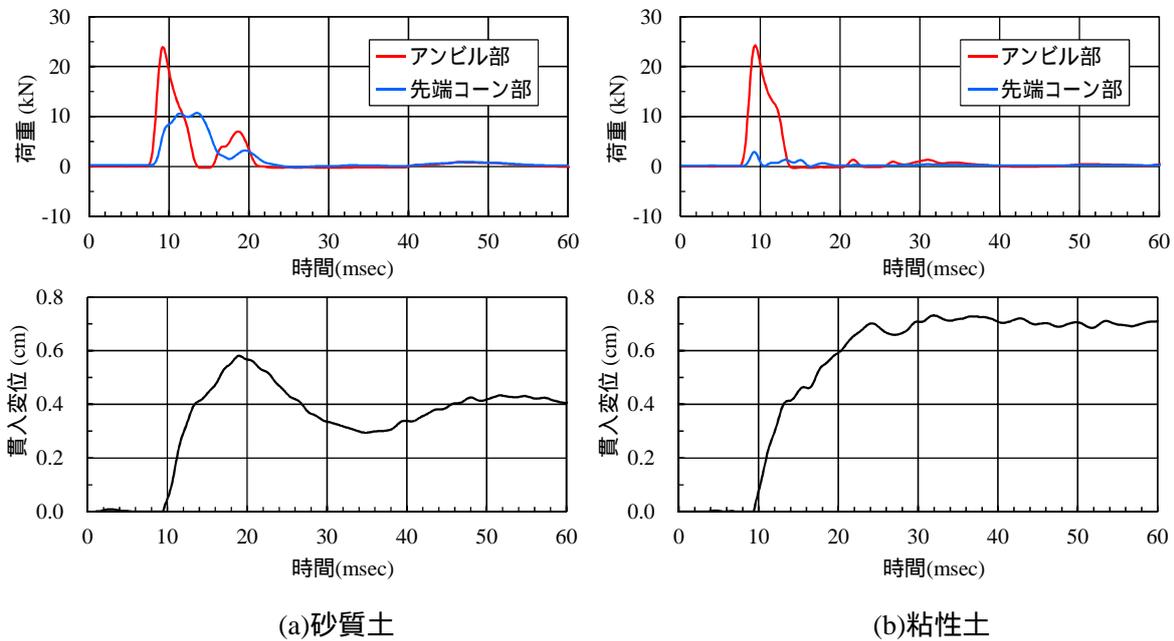


図 2.3-2 MRS 荷重計測の試験装置概要図



写真 2.3-1 MRS の荷重計測状況

MRS の荷重計測結果は、アンビル部および先端コーン部の荷重とエネルギーについて、深度分布図で整理した。また、トルク補正前の動的貫入抵抗 N_d 値と N 値の深度分布図も併記した。なお、ハンマーの落下エネルギー Mgh は 102.9J である。

(1) 茨城県神栖市堀割

図 2.3-3 に神栖市堀割の計測結果を示す。荷重計の最大荷重 F_{Amax} は、アンビル部は 3m まで深度とともに増加し、以深は概ね一定値 25kN を示した。一方、先端コーン部の最大荷重 F_{Cmax} は、 N 値と調和的な傾向を示した。

アンビル部のエネルギー E_A は、全体的には深度方向に概ね一定の値 75J を示した。また、1m 間隔でエネルギーの周期的な変動が見られる。エネルギー E_A はロッド継ぎ足し後に低下し、貫入が進むにつれて効率が回復している。この現象は、ロッドの突出長による影響と考えられる。つまり、ロッド継ぎ足し時は地上部の突出長が長いためロッドの撓み（横振動）によるエネルギー損失量が多く、貫入が進み、突出長が短くなるにつれてロッドの撓みが減少し、エネルギーが大きくなると考えられる。先端コーン部のエネルギー E_C は、 N 値の傾向に深度方向の低減を加えた傾向を示した。

(2) 千葉県香取市佐原口

図 2.3-4 に千葉県香取市佐原の計測結果を示す。荷重計の最大荷重 F_{Amax} は、アンビル部は 3m まで深度とともに増加し、以深は概ね一定値 20kN を示した。一方、先端コーン部の最大荷重 (F_{Cmax}) は、 N 値と調和的な傾向を示した。

アンビル部のエネルギー E_A は、全体的には深度方向に概ね一定の値 60J を示した。また、1m 間隔でエネルギーの周期的な変動が見られる。先端コーン部のエネルギー E_C は、 N 値の傾向に深度方向の低減を加えた傾向を示した。

(3) 新潟県北蒲原聖籠町東港（新潟東港）

図 2.3-5 に新潟東港の計測結果を示す。荷重計の最大荷重 F_{Amax} は、アンビル部は 2m まで深度とともに増加し、以深は概ね一定値 25kN を示した。一方、先端コーン部の最大荷重 F_{Cmax} は、 N 値と調和的な傾向を示した。

アンビル部のエネルギー E_A は、全体的には深度方向に減少する傾向を示した。ただし、90 ~ 70J と比較的大きな値を示した。また、1m 間隔でエネルギーの周期的な変動が見られる。先端コーン部のエネルギー E_C は、 N 値の傾向に深度方向の低減を加えた傾向を示した。

(4) 滋賀県守山市水保

図 2.3-6 に守山市水保の計測結果を示す。荷重計の最大荷重 F_{Amax} は、アンビル部は 3m まで深度とともに増加し、以深は概ね一定値 25kN を示した。一方、先端コーン部の最大荷重 F_{Cmax} は、 N 値と調和的な傾向を示した。

アンビル部のエネルギー E_A は、全体的には深度方向に概ね一定の値 75J を示した。また、1m 間隔でエネルギーの周期的な変動が見られる。先端コーン部のエネルギー E_C は、 N 値の傾向に深度方向の低減を加えた傾向を示した。

(5)千葉県浦安市舞浜（浦安運動公園）

図 2.3-7 に浦安市運動公園の計測結果を示す。荷重計の最大荷重 F_{Amax} は、アンビル部は 2m まで深度とともに増加し、以深は概ね一定値 25kN を示した。一方、先端コーン部の最大荷重 F_{Cmax} は、 N 値と調和的な傾向を示した。

アンビル部のエネルギー E_A は、全体的には深度方向に概ね一定の値 70J を示した。また、1m 間隔でエネルギーの周期的な変動が見られる。先端コーン部のエネルギー E_C は、 N 値の傾向に深度方向の低減を加えた傾向を示した。

(6) 埼玉県久喜市南栗橋⁶⁾

図 2.3-8 に久喜市南栗橋の計測結果を示す。荷重計の最大荷重 F_{Amax} は、アンビル部は 3.5m まで深度とともに増加し、以深は概ね一定値 30kN を示した。一方、先端コーン部の最大荷重 F_{Cmax} は、 N 値と調和的な傾向を示した。

アンビル部のエネルギー E_A は、全体的には深度方向に概ね一定の値 80J を示した。また、1m 間隔でエネルギーの周期的な変動が見られる。先端コーン部のエネルギー E_C は、 N 値の傾向に深度方向の低減を加えた傾向を示した。

アンビル部の最大荷重 F_{Amax} は、深度 3m 付近までは深度とともに増加し、3.m 以深は概ね一定値を示した。一方、先端コーン部の最大荷重 F_{Cmax} は、 N 値と調和的な傾向を示した。

アンビル部のエネルギー E_A は、1m 間隔でエネルギーの周期的な変動が見られるが全体的には深度方向に概ね一定の値（60J～90J）を示した。先端コーン部のエネルギー E_C は、 N 値の傾向に深度方向の低減を加えた傾向を示した。

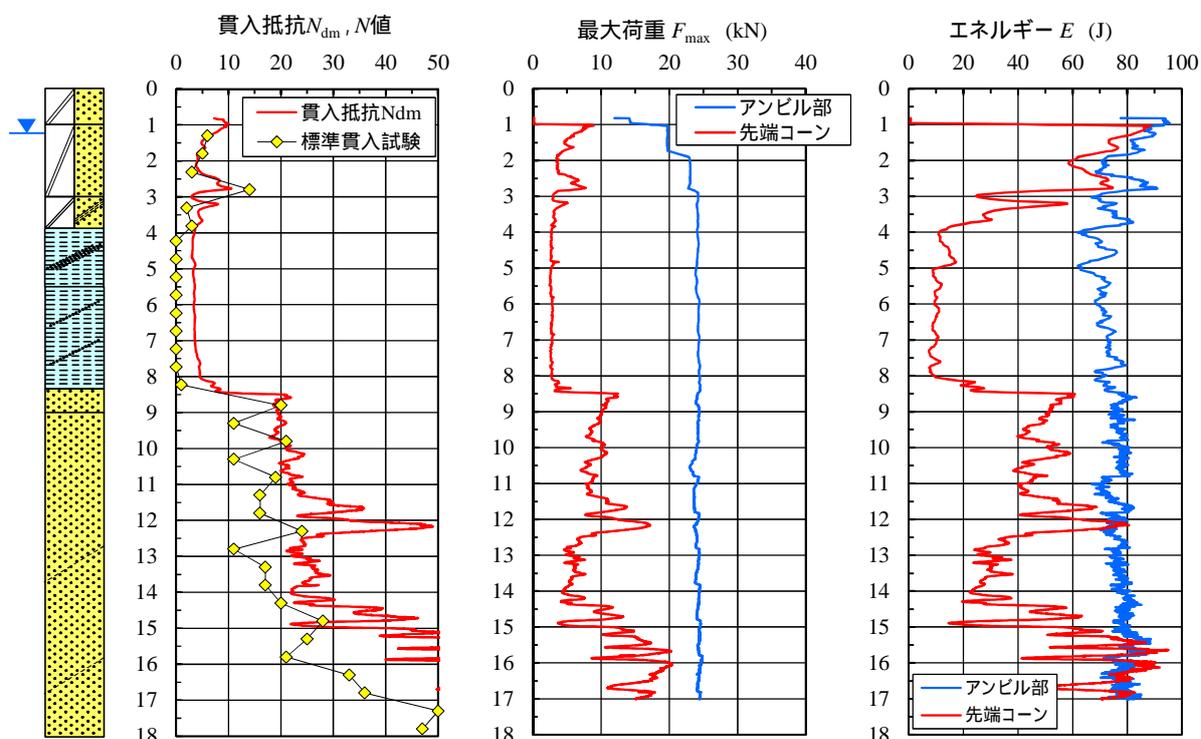


図 2.3-3 荷重計測結果（茨城県神栖市堀割）

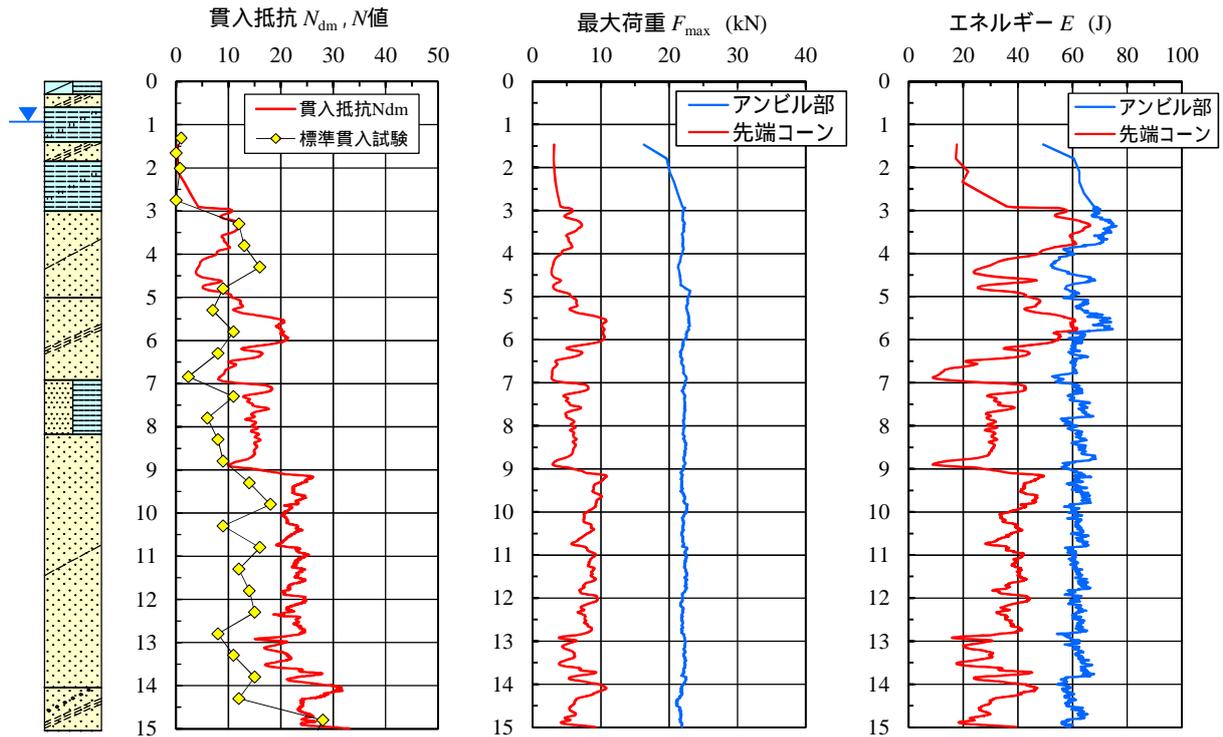


図 2.3-4 荷重計測結果 (千葉県香取市佐原口)

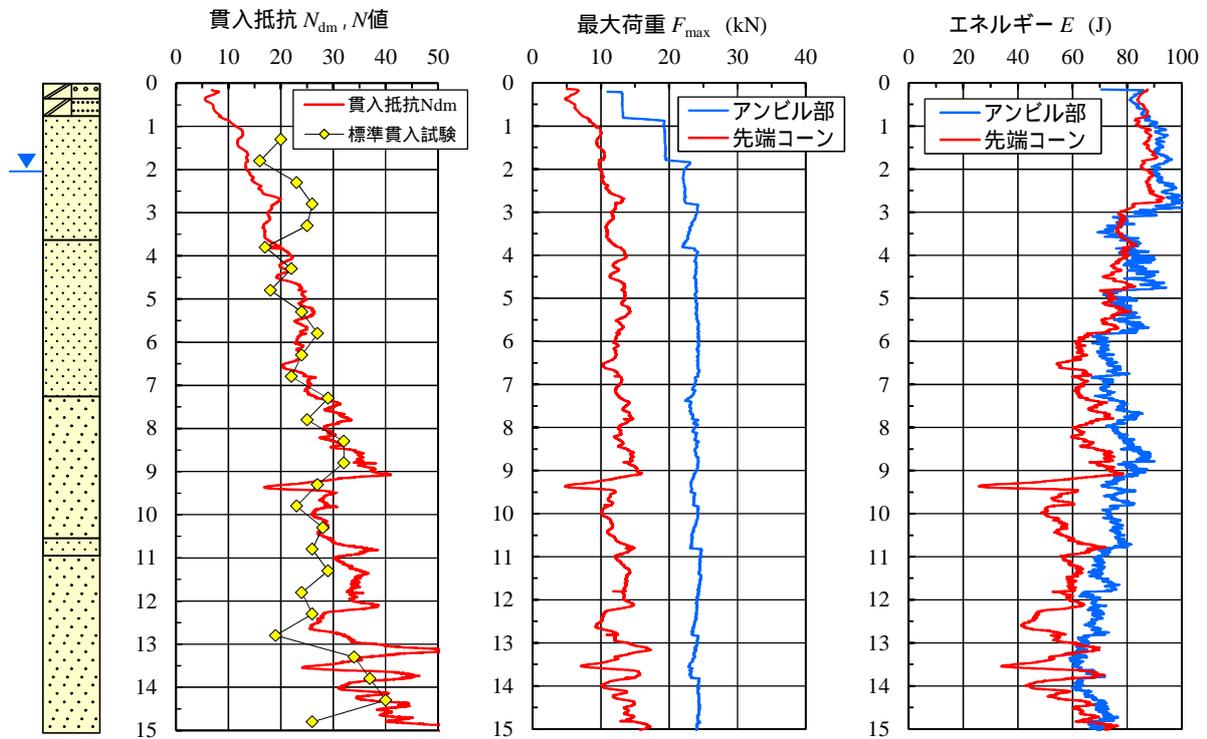


図 2.3-5 荷重計測結果 (新潟県北蒲原聖籠町東港)

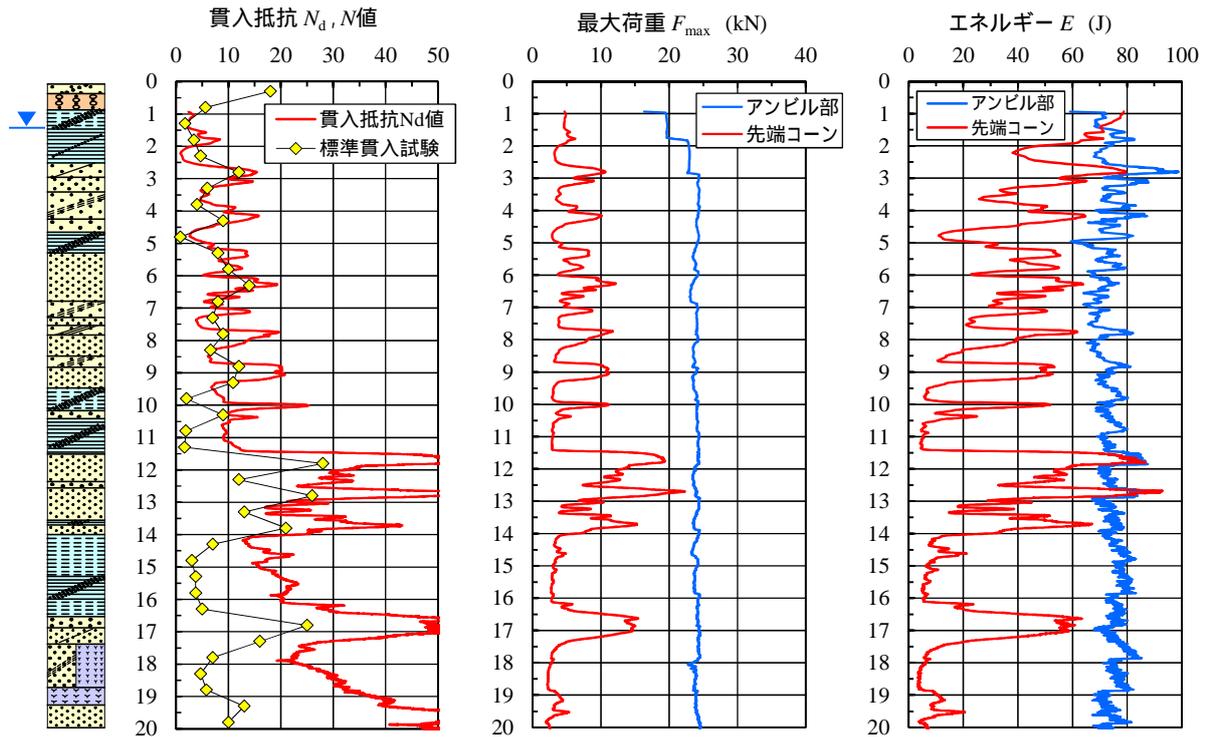


図 2.3-6 荷重計測結果（滋賀県守山市水保）

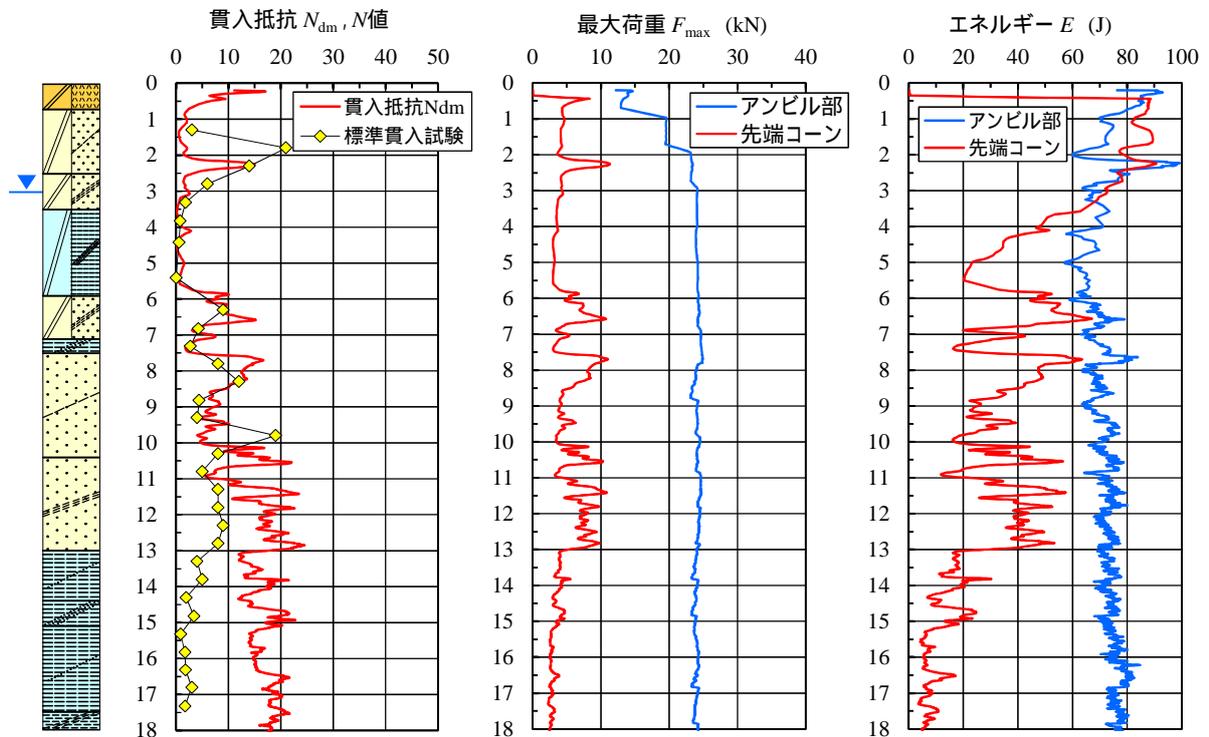


図 2.3-7 荷重計測結果（千葉県浦安市舞浜）

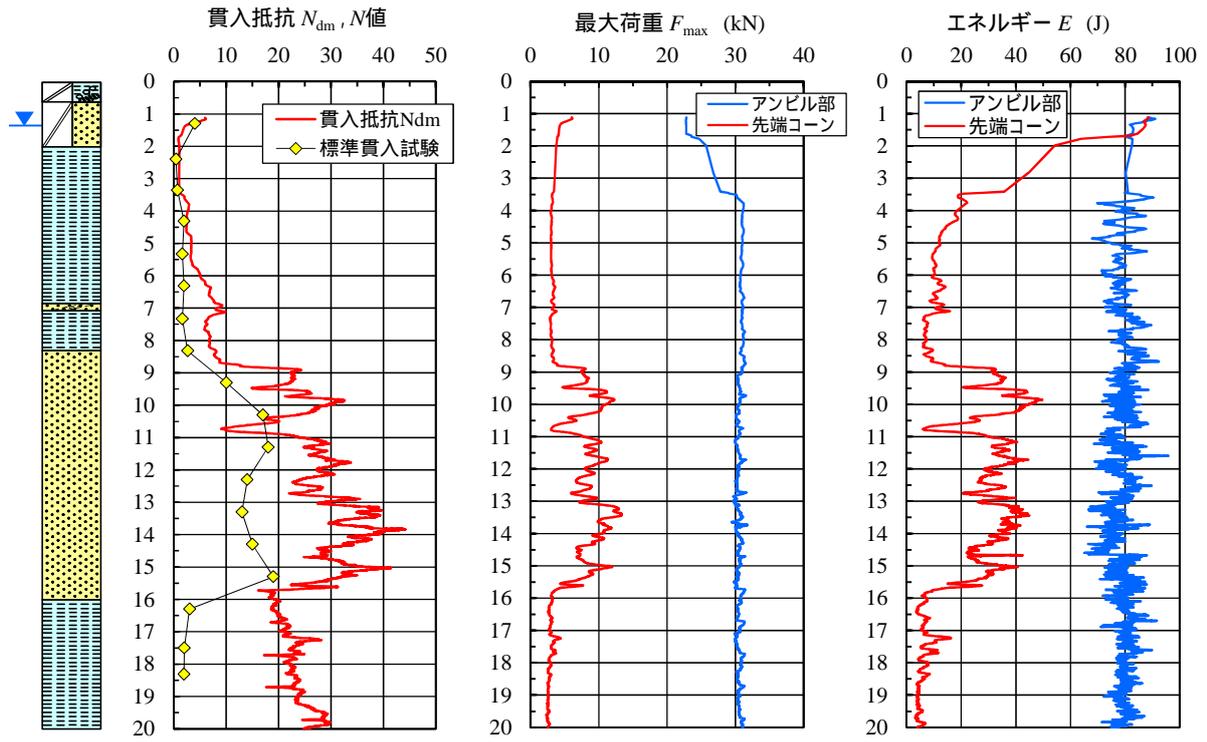


図 2.3-8 荷重計測結果 (埼玉県久喜市南栗橋)

2.4. 標準貫入試験の荷重計測

N 値の推定にあたっては、小型動的貫入試験装置（MRS）と同様に標準貫入試験のエネルギーを知る必要がある。そこで、標準貫入試験のアンビル部とレイモンドサンプラー部に荷重計、地上部にピエゾドライブコーン（PDC）の磁歪式変位計を設置し、打撃時の荷重と貫入量を計測した。

（1）試験方法

図 2.4-1 に試験装置の概要図を示す。データ収録には PDC のデータロガーを使用し、アンビル部および先端コーン部の荷重計と変位計の出力電圧（3 チャンネル）をサンプリング間隔 $100\mu\text{sec}$ (10 kHz)、プレトリガー 10 msec (100 データ)を含む 0.2 sec (2000 データ/ch)を 1 打撃毎記録した。

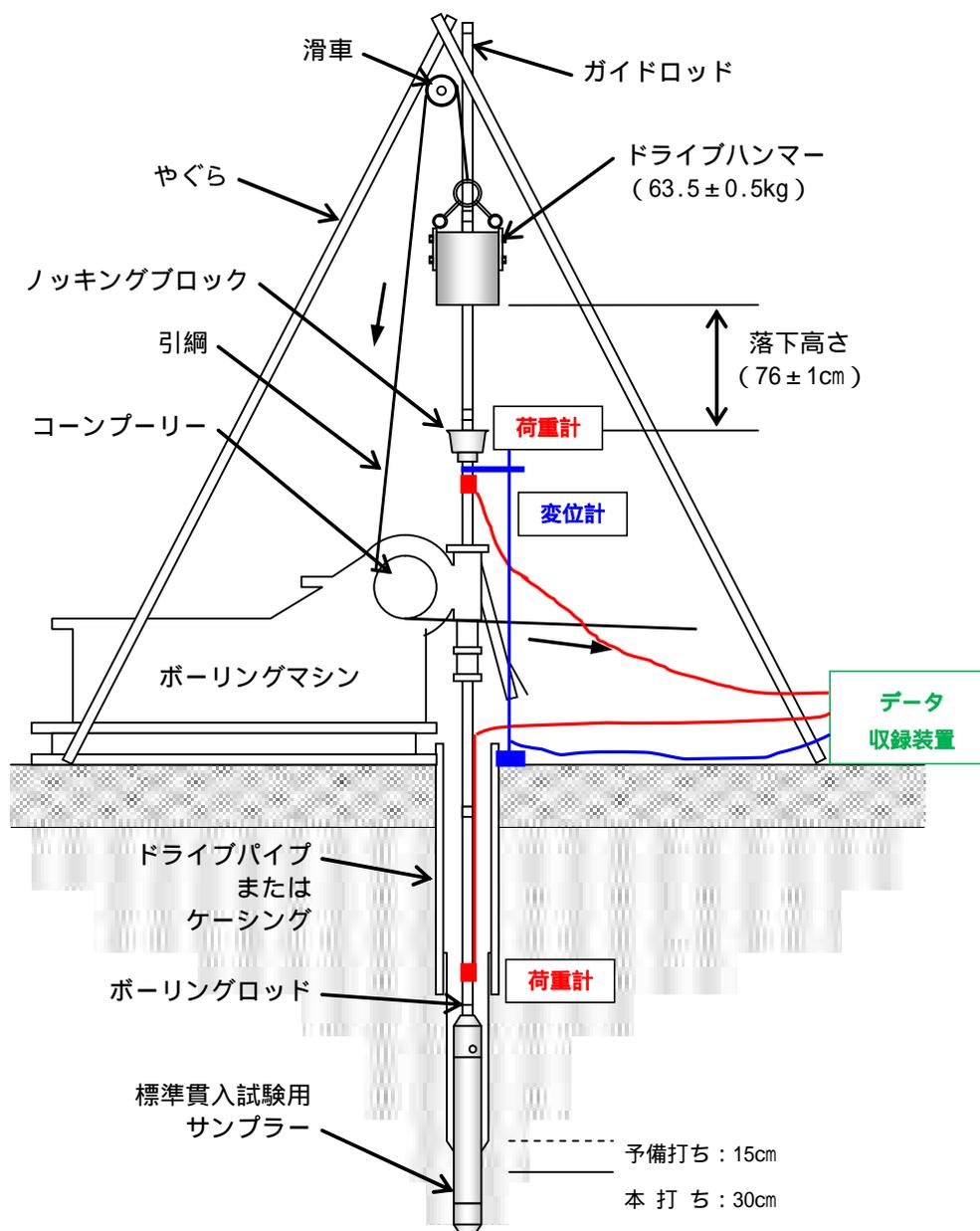


図 2.4-1 標準貫入試験の荷重計測の試験装置概要図

(2) 試験結果

写真 2.4-1 に計測装置と計測状況を示す。また、図 2.4-2 に計測データの一部を示す。同図に示すように、今回の計測では打撃直後の貫入量を計測することができなかった。原因としては、変位計をボーリングマシンより高い位置に設置したことから貫入時の軸ぶれが大きくなったこと、変位計をボーリングマシンに接触しないように離隔を長めにとって設置したため、貫入と変位計の追従とにズレが生じたこと等が考えられる。今回の計測結果を踏まえて、今後はボーリングマシンの下で再度計測を行う予定である。



(a) 計測装置



(b) 計測状況

写真 2.4-1 標準貫入試験の荷重計測装置と実施状況

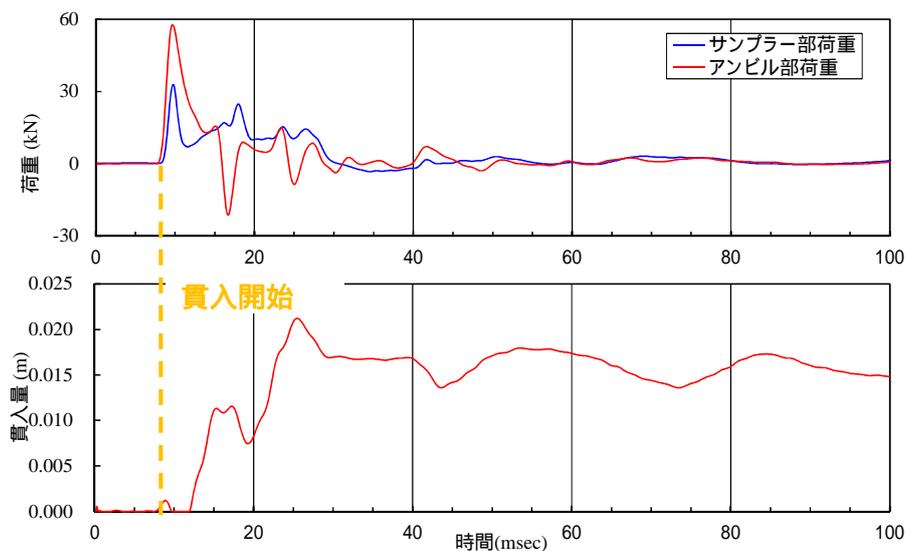


図 2.4-2 荷重と貫入量の計測データの一部

2.5. 室内土槽実験

加筆をお願いします。

3. ピエゾドライブコーンによる液状化調査システムの開発

3.1. 細粒分含有率の推定

3.1.1. 物性データ取得による細粒分含有率推定式の精査

ピエゾドライブコーン（PDC）は、動的貫入時の間隙水圧応答 u_R を有効上載圧 σ'_v で正規化した間隙水圧比 u_R/σ'_v を用いてより細粒分含有率 F_C を推定しているが、両者の関係の定式化に用いたデータには限りがあることから、現状では十分な実用性を有するまでには至っていない。そこで、本研究において堆積環境の異なる地盤でデータを取得し、両者の相関を精査した。

$$F_{C(PDC)} = 18(u_R / \sigma'_v) \quad \text{式 (3.1-1)}$$

本研究では6現場で実験を行い、160個のデータを取得した。実験で得られた間隙水圧比 u_R/σ'_v と細粒分含有率 $F_{C(PDC)}$ の関係を図 3.1-1 に示す。なお、本研究の以前に得たデータは白抜き黒丸で示した。最小二乗法による原点を通る一次近似式の傾きは18.8となり、開発当時よりも少し傾きが大きくなった。信頼度の指標値である決定係数 R^2 は、0.92と高い値を示している。

図 3.1-2 は、粒度試験に対するPDCの F_C 推定誤差を標準偏差 σ で定量的に示したものである。同図より、PDCの細粒分含有率 $F_{C(PDC)}$ は粒度試験に対して $\pm 9.1\%$ 程度の推定誤差を有している。

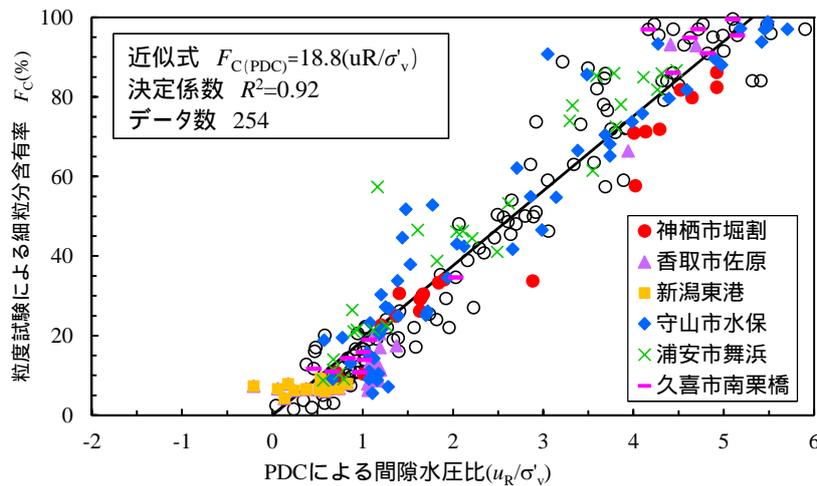


図 3.1-1 PDC の間隙水圧比 u_R/σ'_v と細粒分含有率 F_C の関係

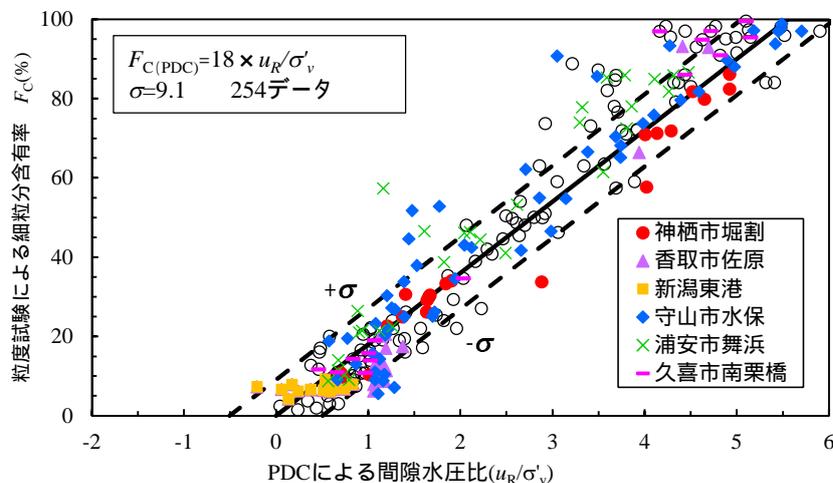


図 3.1-2 PDC の細粒分含有率 F_C 推定誤差

3.1.2. 静水圧を考慮した細粒分含有率推定式の提案

(1) 検討内容

PDC が細粒分含有率 F_C の推定に用いている間隙水圧の概念図を図 3.1-3 に示す。この間隙水圧 u_R は大気圧を基準とした計測値であり、各打撃後 0.18sec ~ 0.19sec 間の平均値である。間隙水圧 u_R は静水圧 u_0 を含む水圧であることから、細粒分含有率 $F_{C(PDC)}$ は静水圧の深度依存性が多少なりとも影響している。図 3.1-4 に間隙水圧 u_R と細粒分含有率 $F_{C(PDC)}$ の深度分布図の一例を示す。細粒分含有率 $F_{C(PDC)}$ は、深度の増加に伴い緩やかであるが増加傾向が認められる。そこで、静水圧 u_0 を差し引いた過剰間隙水圧 $\Delta u (=u_R-u_0)$ を用いて、粒度試験との関係を検討した。

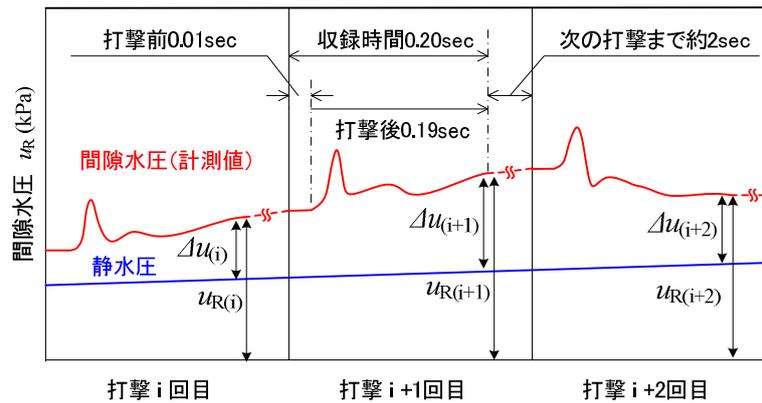


図 3.1-3 PDC の間隙水圧の概念図

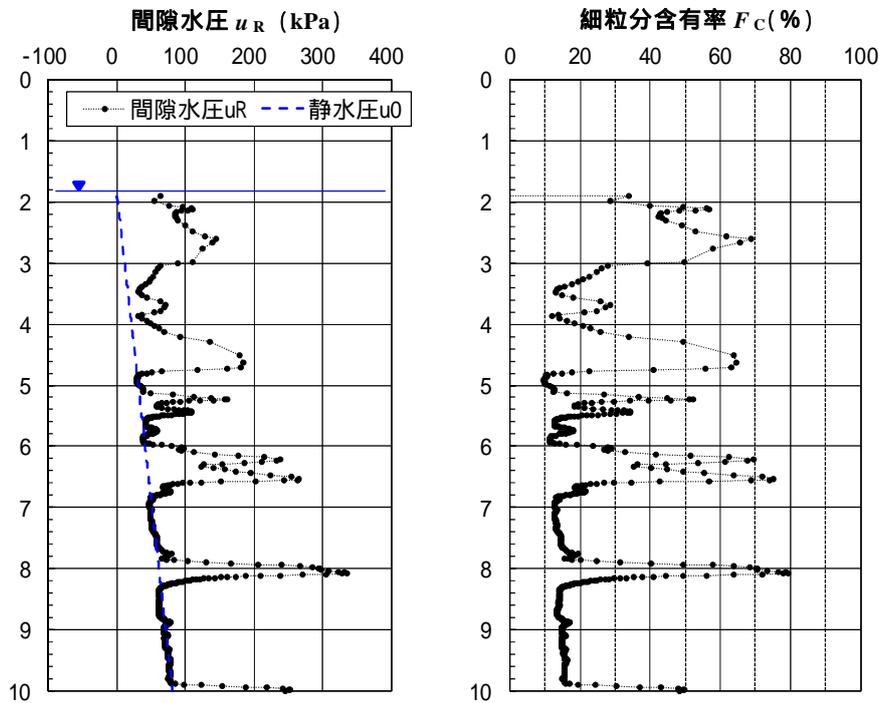


図 3.1-4 PDC の間隙水圧 u_R と推定 $F_{C(PDC)}$ の深度分布図の一例

(2) 検討結果

図 3.1-5 に PDC の過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_v$ と細粒分含有率 F_C の関係を示す。両者は式 (3.1-2) に示す一次式で近似された (以降“新推定式”という) 信頼度の指標値である決定係数 R^2 は、0.92 と高い値を示している。

$$F_{C(PDC)} = 20(\Delta u / \sigma'_v) + 15 \quad \text{式 (3.1-2)}$$

ここで、 $F_{C(PDC)}$: PDC による細粒分含有率の新推定値

Δu : 過剰間隙水圧 (kPa) ($\Delta u = u_R - u_0$)

u_R : 間隙水圧 (kPa) u_0 : 静水圧 (kPa) σ'_v : 有効上載圧 (kPa)

図 3.1-6 は、粒度試験に対する PDC の F_C 推定誤差を標準偏差 σ で定量的に示したものである。新推定式の F_C 推定誤差は $\pm 8.2\%$ 程度となり、旧推定式より精度を向上させることができた。

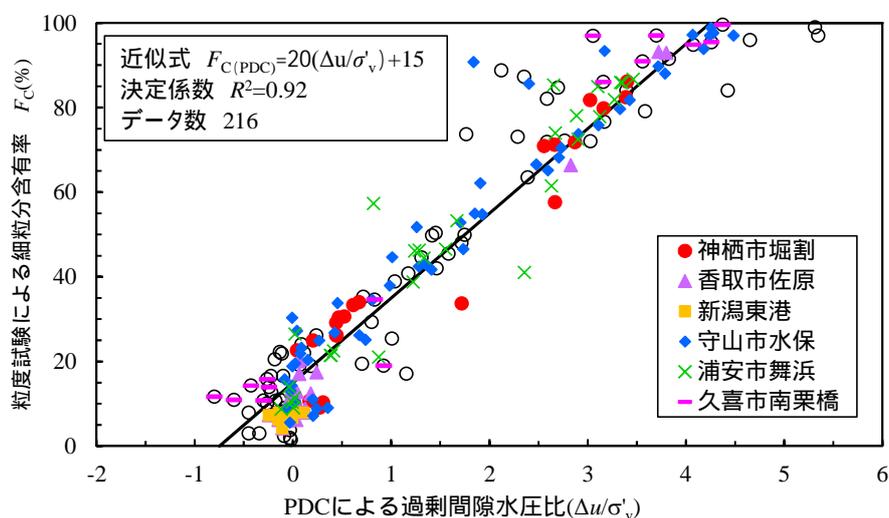


図 3.1-5 PDC の過剰間隙水圧 $\Delta u/\sigma'_v$ と細粒分含有率 F_C の関係

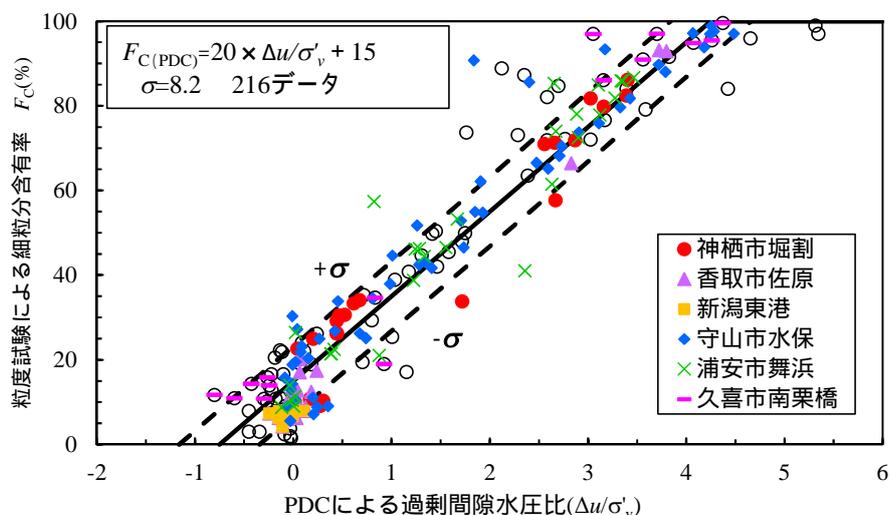
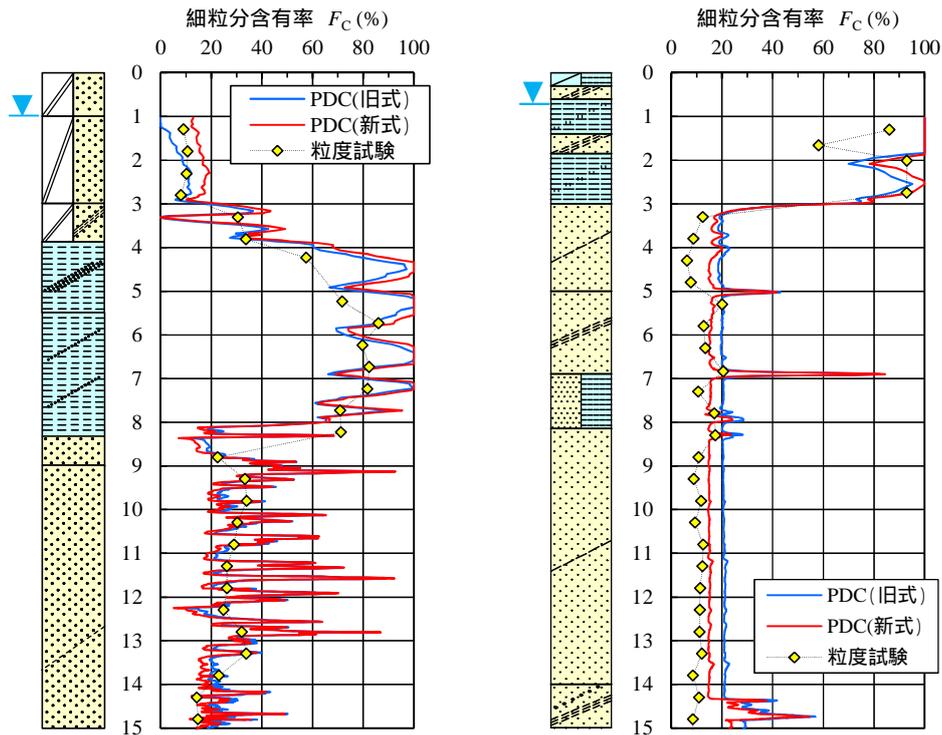


図 3.1-6 新推定式の細粒分含有率 F_C 推定誤差

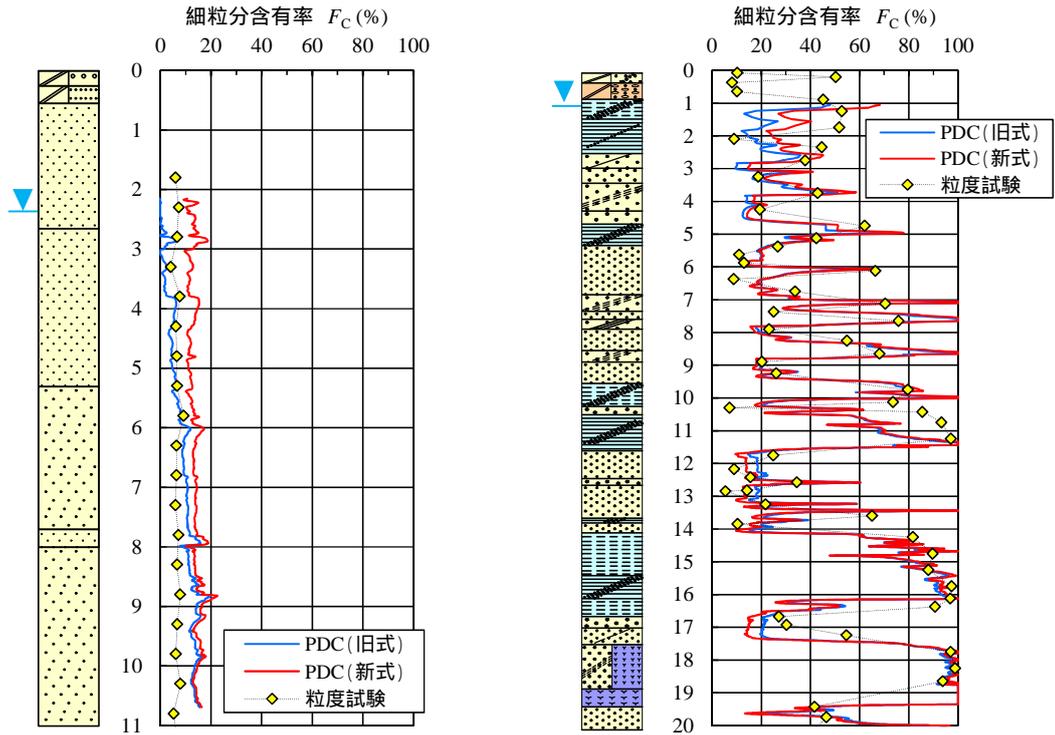
次に、現場実験のデータを用いて旧推定式と新推定式の細粒分含有率 F_C の比較を行った。図 3.1-7 ~ 図 3.1-9 に細粒分含有率の深度分布図を示す。過剰間隙水圧の消散が早い砂地盤において旧式を用いた場合、これまでは図 3.1-8(a)新潟東港の結果に見られるように細粒分含有率が静水圧分布を反映した結果となっていたが、静水圧を差し引いた間隙水圧を用いることで、粒度試験の分布傾向と良く整合する結果が得られた。なお、新推定式は砂地盤の浅部の細粒分含有率を従来よりも多めに評価（液状化判定に対して危険側の評価）する必要がある。



(a) 茨城県神栖市堀割

(b) 千葉県香取市佐原口

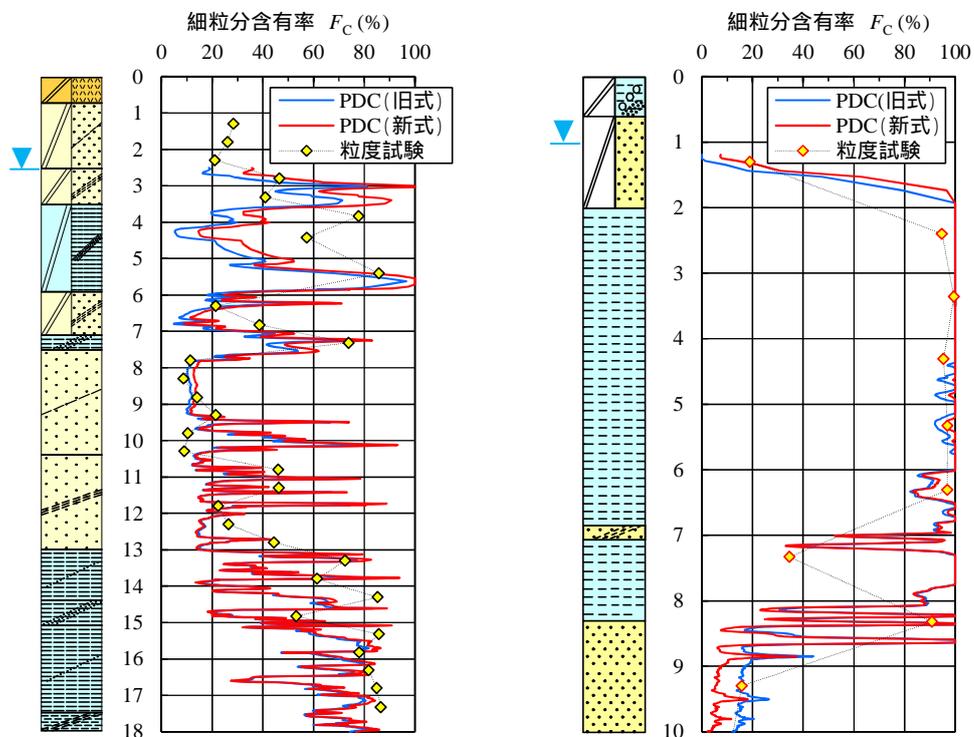
図 3.1-7 細粒分含有率の新推定式と旧推定式の比較



(a) 新潟県北蒲原聖籠町東港

(b) 滋賀県守山市水保

図 3.1-8 細粒分含有率の新推定式と旧推定式の比較



(a) 千葉県浦安市舞浜

(b) 埼玉県久喜市南栗橋

図 3.1-9 細粒分含有率の新推定式と旧推定式の比較

3.1.3. ハンマー打撃間隔の細粒分含有率推定へ及ぼす影響検討

(1) 実験内容

PDCの間隙水圧は、図 3.1-3 に示すようにハンマーの連続打撃で生ずる水圧であり、ハンマー打撃間隔(標準 2.4sec/回)によって過剰間隙水圧の発生傾向が変わることが懸念された。そこで、打撃間隔を変えた PDC の現場実験を行い、打撃間隔が細粒分含有率 $F_{C(PDC)}$ に及ぼす影響を考察した。ハンマーの打撃間隔(標準 2.4sec/回)は、高速(1.6sec/回)、中速(2.0sec/回)、低速(3.0sec/回前後)の3ケースとし、各ケースをそれぞれ2地点実施した。

(2) 実験結果

実験場所は、埼玉県久喜市南栗橋である。実験現場は、深度2mまで盛土および埋土、以深は沖積層の粘性土(Ac層)と砂質土(As層)が分布している。実験結果として、図 3.1-10に細粒分含有率 F_C の深度分布図を示す。1地点目は、3ケースとも粒度試験に概ね一致する値を示し、打撃間隔による顕著な差は見られない。2地点目は、Ac層の細粒分含有率 $F_{C(PDC)}$ が1地点目よりもやや少なめで、最も打撃間隔の長い3.3sec/回が最も少なくなった。As層では打撃間隔による顕著な差は見られず、粒度試験と概ね一致する値を示した。

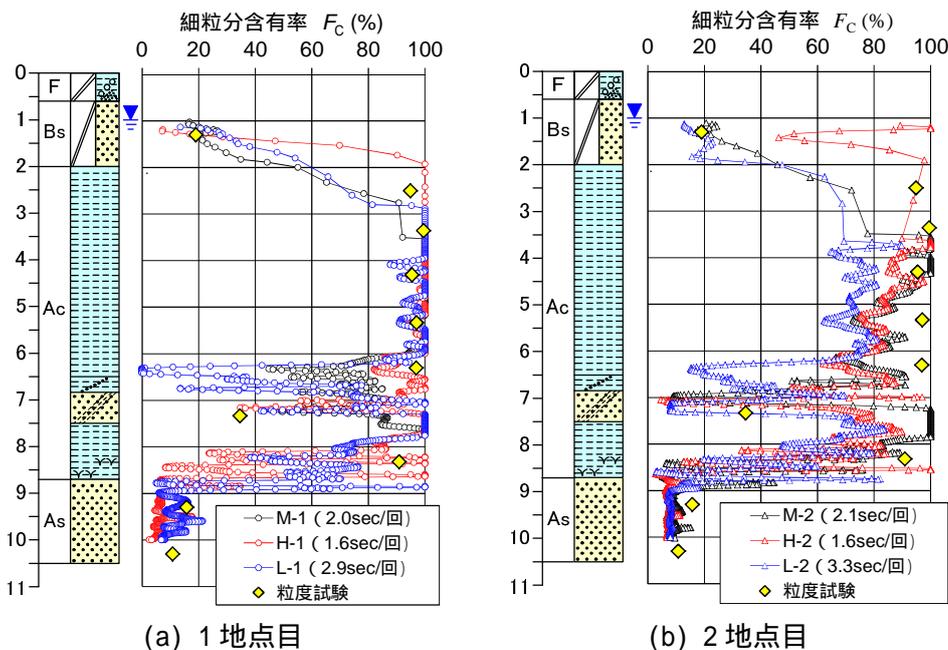


図 3.1-10 細粒分含有率 F_C の深度分布

打撃間隔と細粒分含有率 $F_{C(PDC)}$ の関係を図 3.1-11を示す。同図に示す細粒分含有率 $F_{C(PDC)}$ は、Ac層およびAs層がそれぞれ比較的均質に分布する深度区間(Ac層:GL-4~6m、As層:GL-9~10m)の最大値、最小値、平均値である。As層の細粒分含有率 $F_{C(PDC)}$ は、打撃間隔によらず概ね一致する値を示し、Ac層の細粒分含有率 $F_{C(PDC)}$ は、1.6~2.9sec/回の打撃間隔では概ね一致する値を示すが、最も打撃間隔の長い3.3sec/回では少なめの値を示した。

ハンマーの打撃間隔は2.5sec/回を標準とし、通常は打撃間隔を短くすることはあっても長くすることは少ない。今回の実験結果を踏まえると、打撃間隔が細粒分含有率 F_C の推定精度に与える影響は小さいと考えられる。

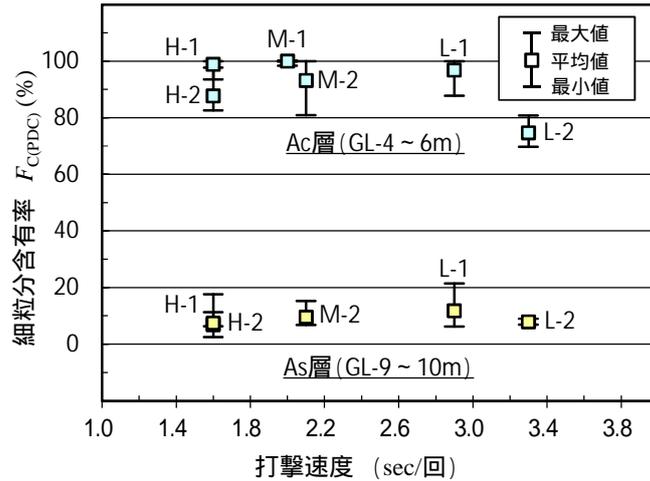


図 3.1-11 ハンマーの打撃間隔と細粒分含有率 $F_C(PDC)$ の関係

3.1.4. 1打撃で生ずる過剰間隙水圧による細粒分含有率の推定

(1) 検討目的と内容

PDCは、図 3.1-12 に示すように地上から連続的に計測した間隙水圧 (u_R 、 Δu) を用いて 1 打撃毎に細粒分含有率 F_C を推定している。この間隙水圧は大気圧を基準とした間隙水圧であり、数回前の打撃の影響を含んでいることが考えられる。本来、1 打撃毎に細粒分含有率を推定する場合は、1 打撃で発生する間隙水圧を用いるのが望ましい。そこで、1 打撃で発生する間隙水圧と細粒分含有率 F_C の関係を検討した。

図 3.1-13 に検討に用いた間隙水圧の定義を示す。1 打撃で生じる過剰間隙水圧は、打撃後 0.19sec 後の間隙水圧 u_R と打撃前の間隙水圧 u_S の差として求めた。また、1 打撃での過剰間隙水圧 $u_R - u_S$ を打撃前の間隙水圧 u_S 、間隙水圧の最大値 u_{max} 、有効上載圧 σ'_v 、地盤の動的貫入抵抗 N_d 値等で補正した値についても検討を行った。

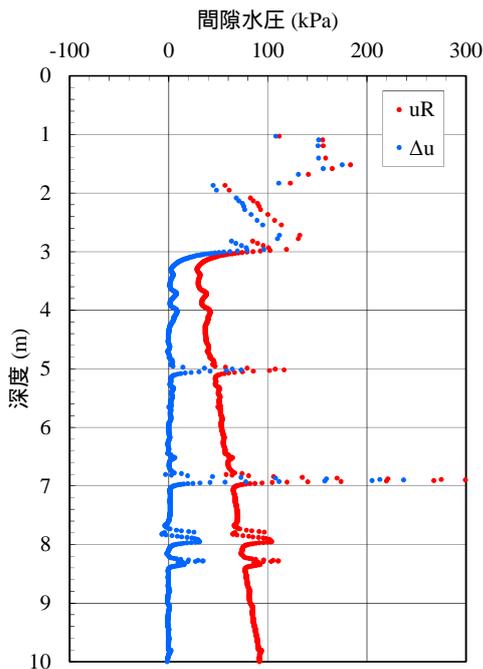


図 3.1-12 PDC による間隙水圧の深度分布図

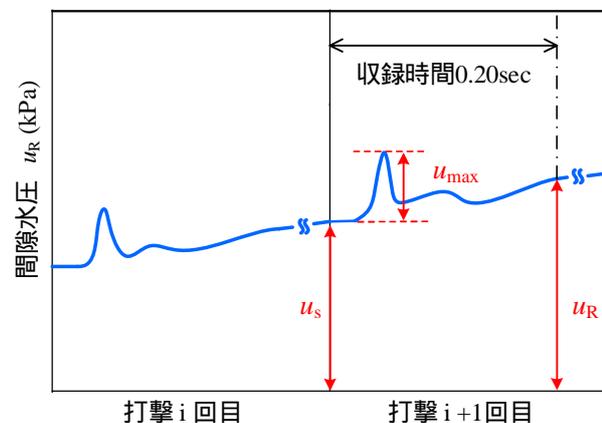


図 3.1-13 検討に用いた間隙水圧の定義

(2) 検討結果

1 打撃の過剰間隙水圧 $u_R - u_s$ および打撃前の間隙水圧 u_s 、間隙水圧の最大値 u_{max} 、有効上載圧 σ'_v 、地盤の動的貫入抵抗 N_d 値等で補正した値と粒度試験の細粒分含有率 F_C の関係を図 3.1-14 に示す。いずれも粒度試験の細粒分含有率 F_C と良い相関は見られない。

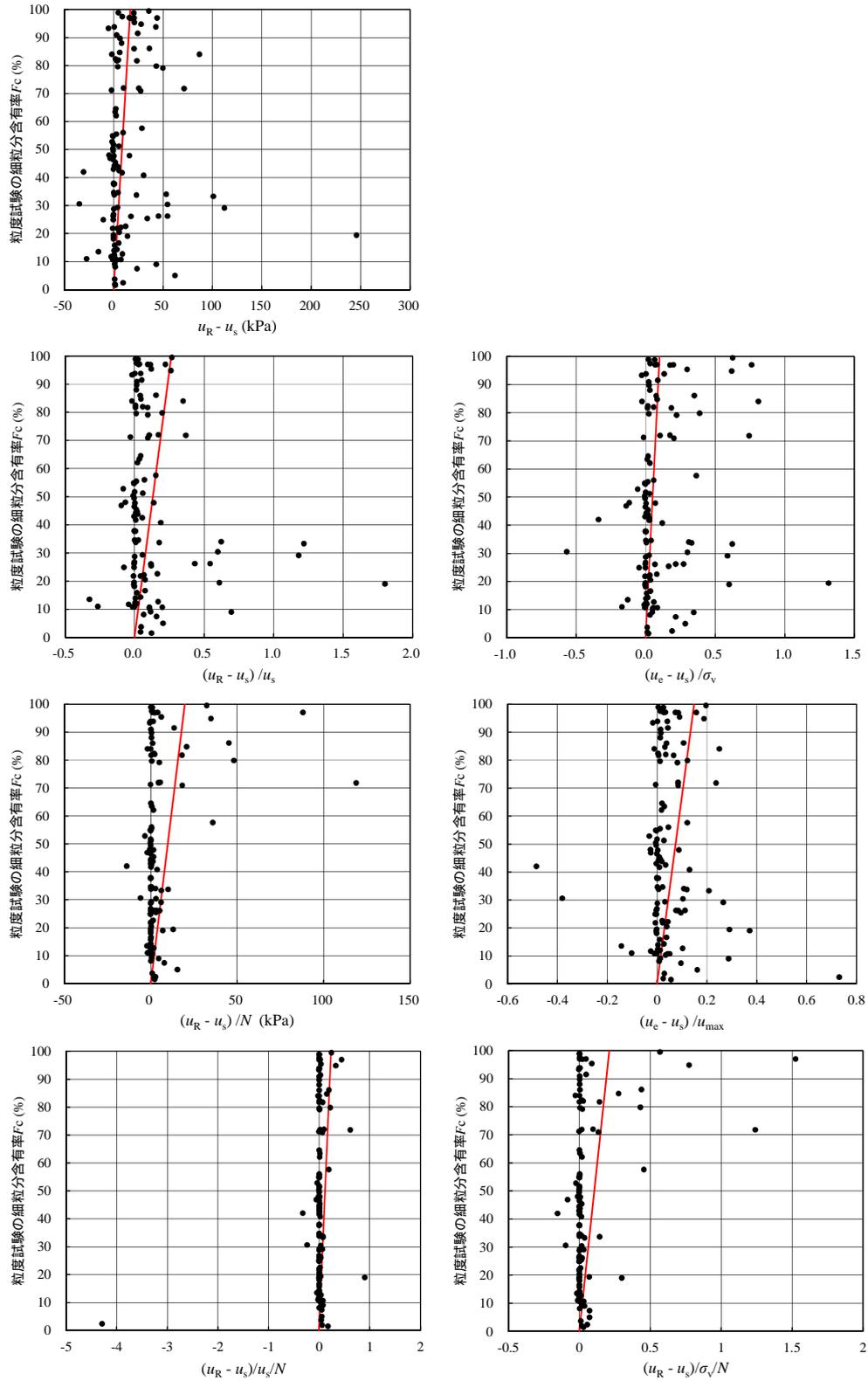


図 3.1-14 1 打撃の過剰間隙水圧 $u_R - u_s$ と細粒分含有率 F_C の関係

図 3.1-15 の上段は、滋賀県守山市水保と埼玉県久喜市南栗橋のデータを用いて、1 打撃での過剰間隙水圧 u_{R-U_S} と従来用いてきた大気圧を基準とした間隙水圧 u_R から静水圧 u_0 を差し引いた過剰間隙水圧 Δu の関係を示す。なお、作図にあたって、土層境界付近のデータは棄却した。 u_{R-U_S} と Δu には正の相関が見られる。その傾向は粘性土 (As 層) よりも粘性土 (Ac 層) で明瞭となる。

図 3.1-15 の下段は、横軸を、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_v$ を用いて新推定式より算出した細粒分含有率 $F_{C(PDC)}$ で示した図である。 u_{R-U_S} は、細粒分含有率 $F_{C(PDC)}$ が 60% 以下では発生量が非常に少なく、60% を超えると増加の傾向を示す。ただし、細粒分含有率 $F_{C(PDC)}$ が 90% 程度までは u_{R-U_S} の発生量は 20kPa 以下であり、さほど大きくない。

以上の結果を踏まると、1 打撃で生ずる間隙水圧から細粒分含有率を推定するのは厳しいと判断した。この原因としては、1 打撃で発生する過剰間隙水圧は一部 ($F_C > 90\%$) を除いて比較的少なく、細粒分含有率の差違を評価できるまでの精度がない点があげられる。従来の推定法が細粒分含有率を精度良く評価できている理由としては、1 打撃で過剰間隙水圧の発生量ではなく、連続打撃で水圧の上昇が飽和状態に至った時の過剰間隙水圧と細粒分含有率の相関が良い点が考えられる。

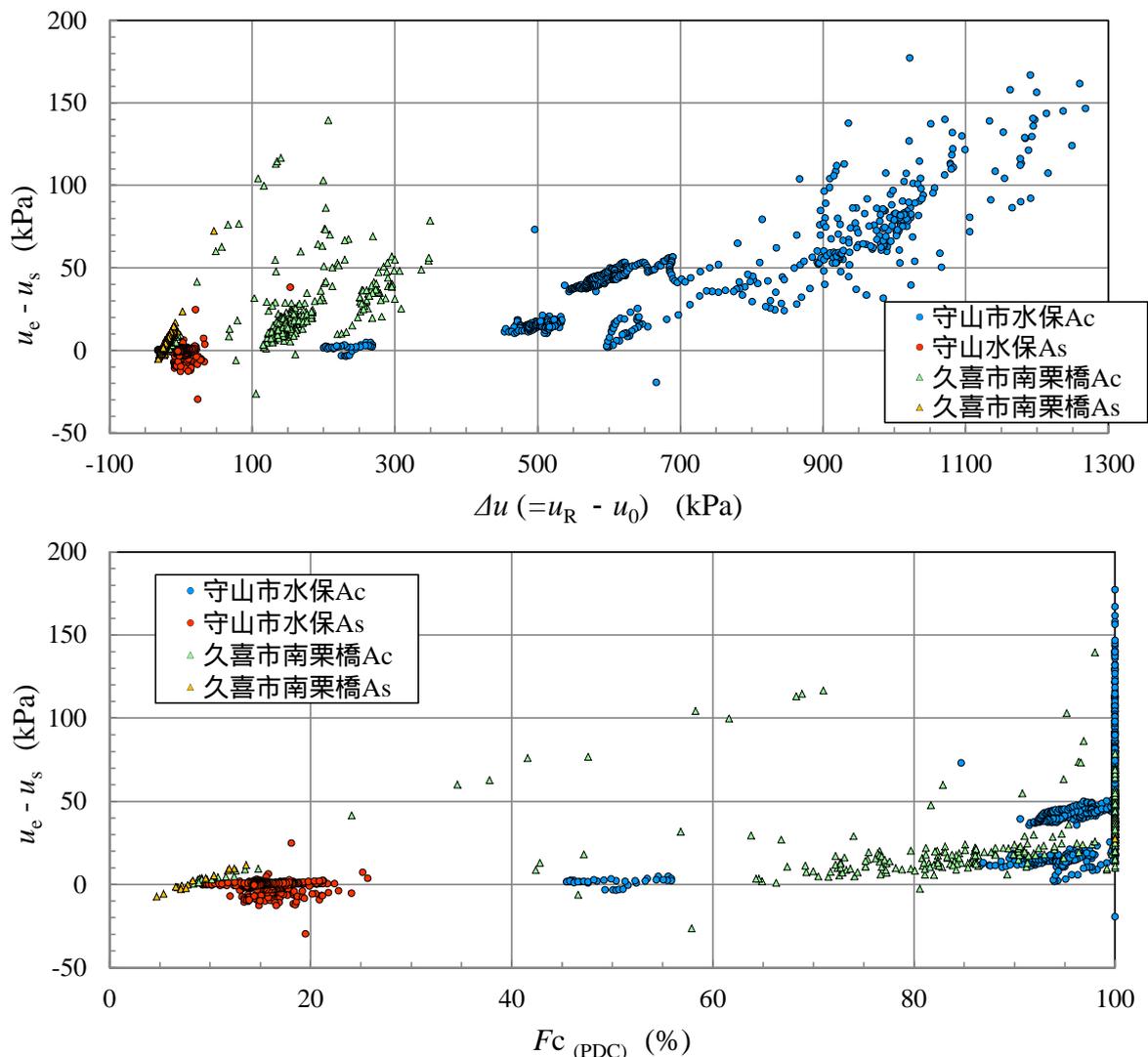


図 3.1-15 u_{R-U_S} と Δu および細粒分含有率 F_C の関係

3.2. N 値の推定

現場実験では、ピエゾドライブコーン（PDC）の動的貫入抵抗 N_d 値は深度 10m までは N 値と良く一致した。一方、10m 以深ではトルクによるロッド周面摩擦補正を行っても N 値よりも大きめの値を示す結果となった。この原因としては、ロッドの長尺化に伴うや横振動（撓み）等によるエネルギー損失が考えられる。そこで、現場実験では、PDC が標準仕様としている小型動的貫入試験装置（MRS）の荷重計測を追加して行った。この計測結果を用いて、10m 以深において動的貫入抵抗 N_d 値が過大評価される原因を明らかにするとともに、エネルギー効率を踏まえた動的貫入抵抗 N_d 値の新たな補正方法を提案する。

3.2.1. 動的貫入試験のエネルギーと効率の定義

ハンマーの落下エネルギーが先端コーンに伝達される過程でのエネルギー損失の概念図を図 3.2-1 に示すとともに、本研究で用いたエネルギーに関する用語の定義を以下に示す。ハンマーの落下エネルギー E_h は、アンビルに衝突する際にハンマーの横振動やロッドの撓み等で消費され、 $E_A (= e_1 \cdot E_h)$ に減少する。その後、ロッドに伝達されたエネルギー E_A は、ロッドを伝播し先端コーンに伝達される過程でロッドの撓みやロッド周面摩擦等で消費され、 $E_C (= e_2 \cdot E_A)$ に減少する。本研究では、衝突効率 e_1 と伝播効率 e_2 を乗じた値をエネルギー効率 $e (= e_1 \cdot e_2)$ と定義した。

(1)ハンマーの落下エネルギー E_h (ミニラム 102.9J)

$$E_h = Mgh \quad \text{式 (3.2-1)}$$

M : ハンマーの質量(ミニラム 30kg)

g : 重力加速度(9.8m/sec²)

h : ハンマーの落下高さ(ミニラム 0.35m)

(2)エネルギー効率

$$\text{衝突効率 } e_1 = E_A / E_h \quad \text{式 (3.2-2)}$$

$$\text{伝播効率 } e_2 = E_C / E_A \quad \text{式 (3.2-3)}$$

$$\text{エネルギー効率 } e = e_1 \cdot e_2 \quad \text{式 (3.2-4)}$$

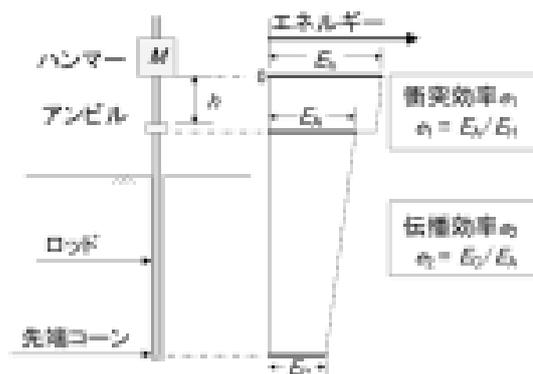


図 3.2-1 エネルギー損失の概念図

E_A : ロッドに伝達されるエネルギー E_C : 先端コーンに伝達されるエネルギー

3.2.2. エネルギー効率による地盤の動的貫入抵抗の補正

地盤の動的貫入抵抗 N_d 値のエネルギー補正方法は、標準貫入試験の方法を参考にした。標準貫入試験では、 N 値はエネルギー効率 e に比例するという考え方⁷⁾と \sqrt{e} に比例するという考え方⁸⁾がある。本研究では、エネルギー効率 e に比例する考え方をういて、動的貫入抵抗 N_d 値の補正を行った。また、標準貫入試験のエネルギー効率 e_{SPT} を踏まえて N 値を推定した。それぞれの補正式を式 (3.2-5)および式 (3.2-6)に示す。

$$\text{エネルギー補正 } N_d \text{ 値} = \left(\frac{1}{2} N_{dm} \right) \cdot e_{PDC} \quad \text{式 (3.2-5)}$$

e_{PDC} : PDC のエネルギー効率、
 e_{SPT} : 標準貫入試験のエネルギー効率

$$\text{推定 } N \text{ 値} = \left(\frac{1}{2} N_{dm} \right) \cdot e_{PDC} \cdot e_{SPT} \quad \text{式 (3.2-6)}$$

N_{dm} : 20 cm 貫入に要する打撃回数

PDC のエネルギー効率 e_{PDC} は、MRS の荷重計測結果を用いた。標準貫入試験のエネルギー効率 e_{SPT} については、衝突効率 e_{1_SPT} は一昨年に滋賀県守山市地盤調査一斉試験⁹⁾で計測された値（平均値 0.59）を用いた。伝播効率 e_{2_SPT} については、ロッドと孔壁に 13mm の間隔があり周面摩擦の影響は少ないと考えられる。また、牧原ら¹⁰⁾によると深度 25m までは標準貫入試験の打撃応力は減衰がほとんどないことから、伝播効率 e_{2_SPT} についてはエネルギー損失がない（ $e_{2_SPT}=1.0$ ）と仮定した。エネルギー効率を用いた動的貫入抵抗 N_d 値の補正および N 値の推定結果を以下に示す。

(1) 茨城県神栖市堀割

図 3.2-2 に神栖市堀割のエネルギー効率を用いた補正の結果を示す。補正 N_d 値は、粘性土では N 値に一致する値を示した。一方、 N 値が 20 以下の砂質土ではやや小さめの値を示した。エネルギー効率による推定 N 値は、 N 値が 20 以上となる砂質土では大きめの値を示すが、 N 値が 20 以下の砂質土では N 値と一致する値を示した。また、粘性土では N 値と一致する値を示した。

(2) 千葉県香取市佐原口

図 3.2-3 に千葉県香取市佐原のエネルギー効率を用いた補正の結果を示す。補正 N_d 値は、砂質土では全体的に N 値よりもやや小さめの値を示した。エネルギー効率による推定 N 値は、概ね N 値に一致する値を示した。

(3) 新潟県北蒲原聖籠町東港（新潟東港）

図 3.2-4 に新潟東港のエネルギー効率を用いた補正の結果を示す。補正 N_d 値は、全体的に N 値よりもやや小さめの値を示した。エネルギー効率による推定 N 値は、9m 以深でスパイク状に大きく値が変動し N 値との差が大きくなる所が見られるが、全体的には N 値と整合している。

(4) 滋賀県守山市水保

図 3.2-5 に守山市水保のエネルギー効率を用いた補正の結果を示す。補正 N_d 値は、全体的に粘性土では N 値よりもやや小さめ、砂質土ではやや大きめの値を示した。エネルギー効率による推定 N 値は、粘性土では深度に関わらず N 値と一致する値を示した。一方、砂質土については N 値が 20 以上となる土層で大きめの値を示した。

(5) 千葉県浦安市舞浜（浦安運動公園）

図 3.2-6 に浦安市運動公園のエネルギー効率を用いた補正の結果を示す。補正 N_d 値は、概ね N 値に一致する値を示した。粘性土では N 値よりもやや小さくなる所が見られる。エネルギー効率による推定 N 値は、部分的に N 値よりも大きくなるが、全体的には N 値と整合している。粘性土では N 値と一致する値を示した。

(6) 埼玉県久喜市南栗橋

図 3.2-7 に久喜市南栗橋のエネルギー効率を用いた補正の結果を示す。補正 N_d 値は、砂質土では全体的に N 値よりもやや小さめの値を示した。エネルギー効率による推定 N 値は、砂質土で変動が大きいが全体的な傾向は N 値と概ね整合している。また、粘性土では N 値と一致する値を示した。

先端コーンに内蔵した荷重計で先端コーンに伝達されるエネルギー E_C を直接算出し、ハンマーの落下エネルギー Mgh に対するエネルギー比（エネルギー効率 $e_{PDC}=E_C/Mgh$ ）を用いて地盤の動的貫入抵抗 N_d 値を補正することで、10m 以深においても N 値に概ね一致する結果が得られることを現場実験により明らかにした。

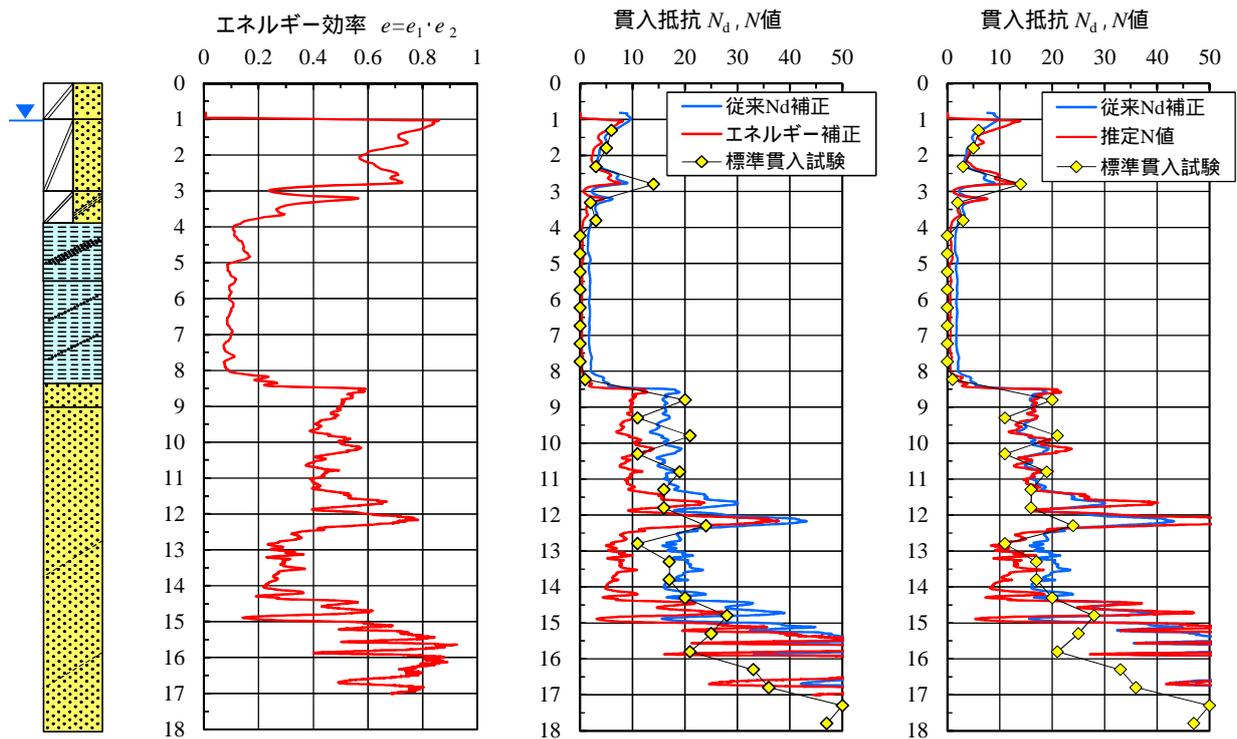


図 3.2-2 エネルギー効率による N_d 値の補正と N 値の推定結果 (茨城県神栖市堀割)

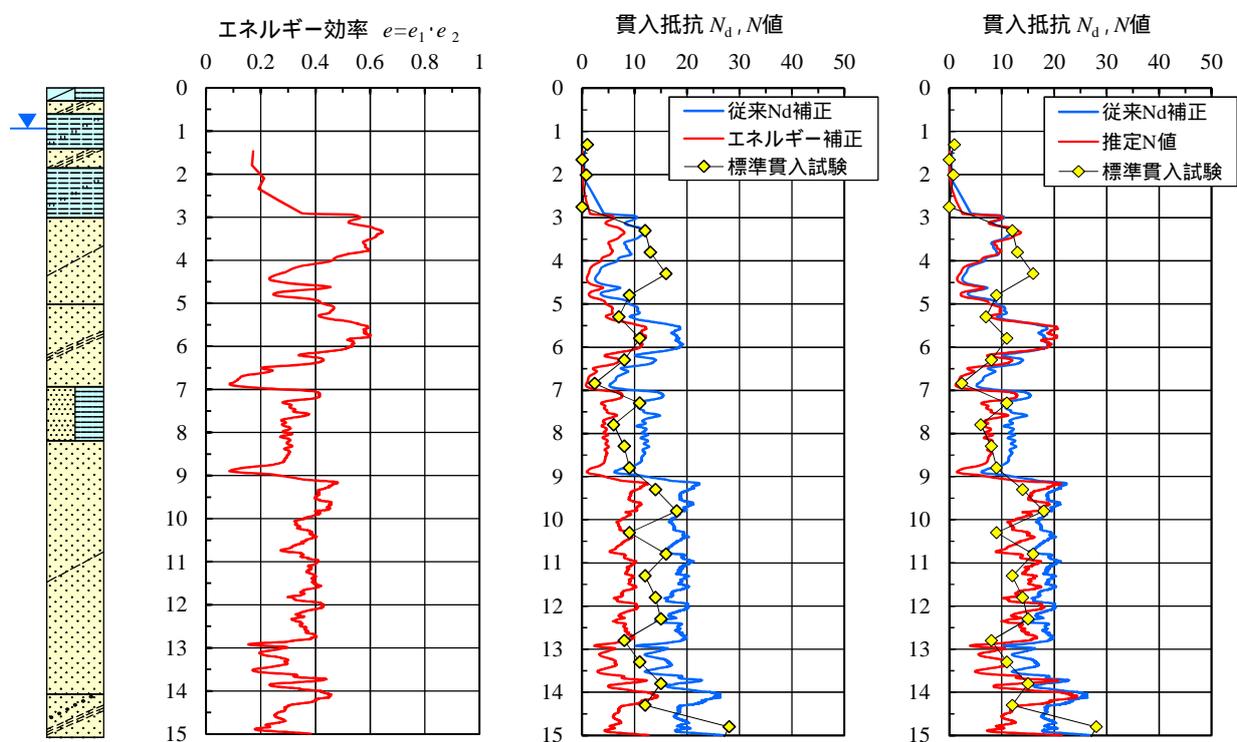


図 3.2-3 エネルギー効率による N_d 値の補正と N 値の推定結果 (千葉県香取市佐原口)

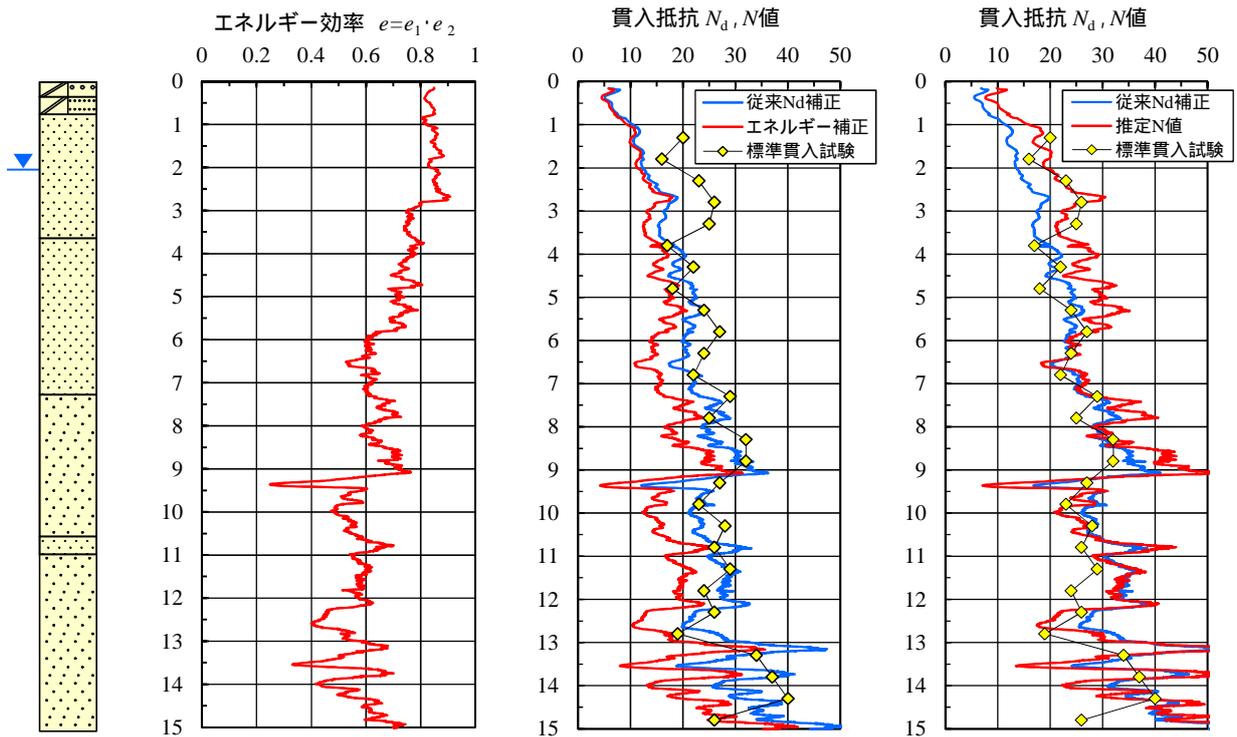


図 3.2-4 エネルギー効率による N_d 値の補正と N 値の推定結果（新潟県北蒲原聖籠町東港）

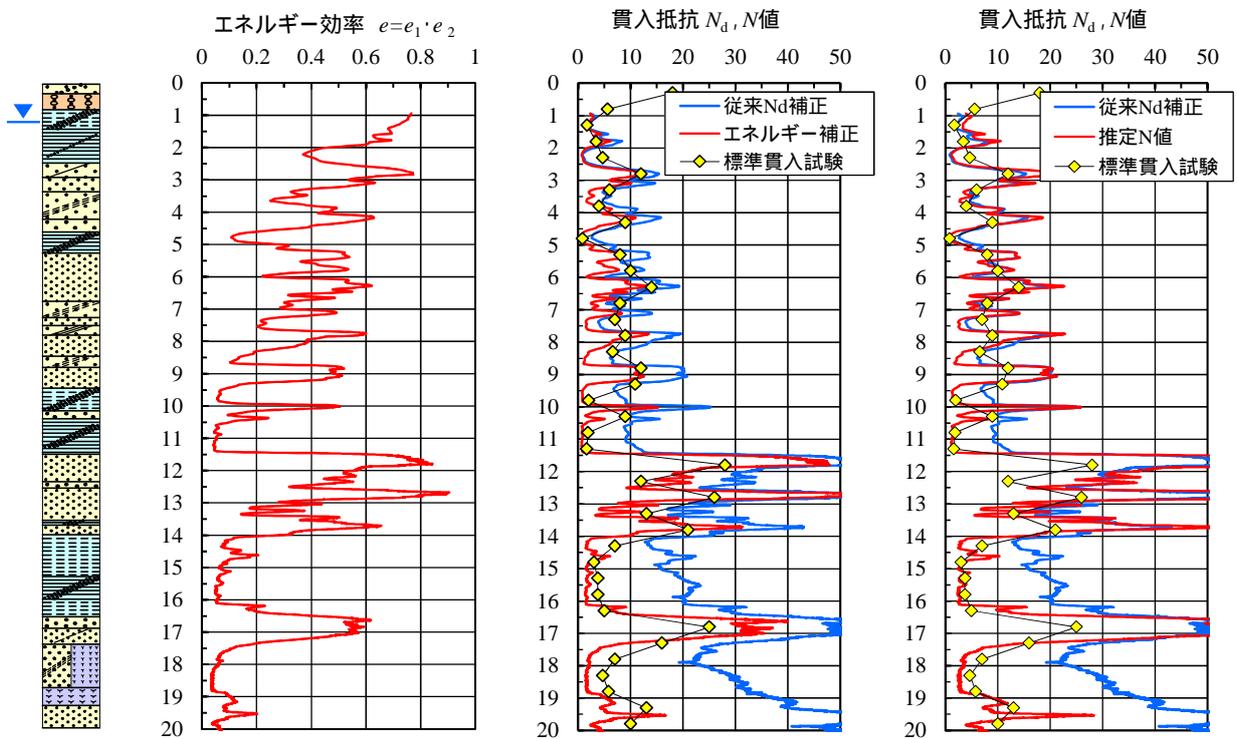


図 3.2-5 エネルギー効率による N_d 値の補正と N 値の推定結果（滋賀県守山市水保）

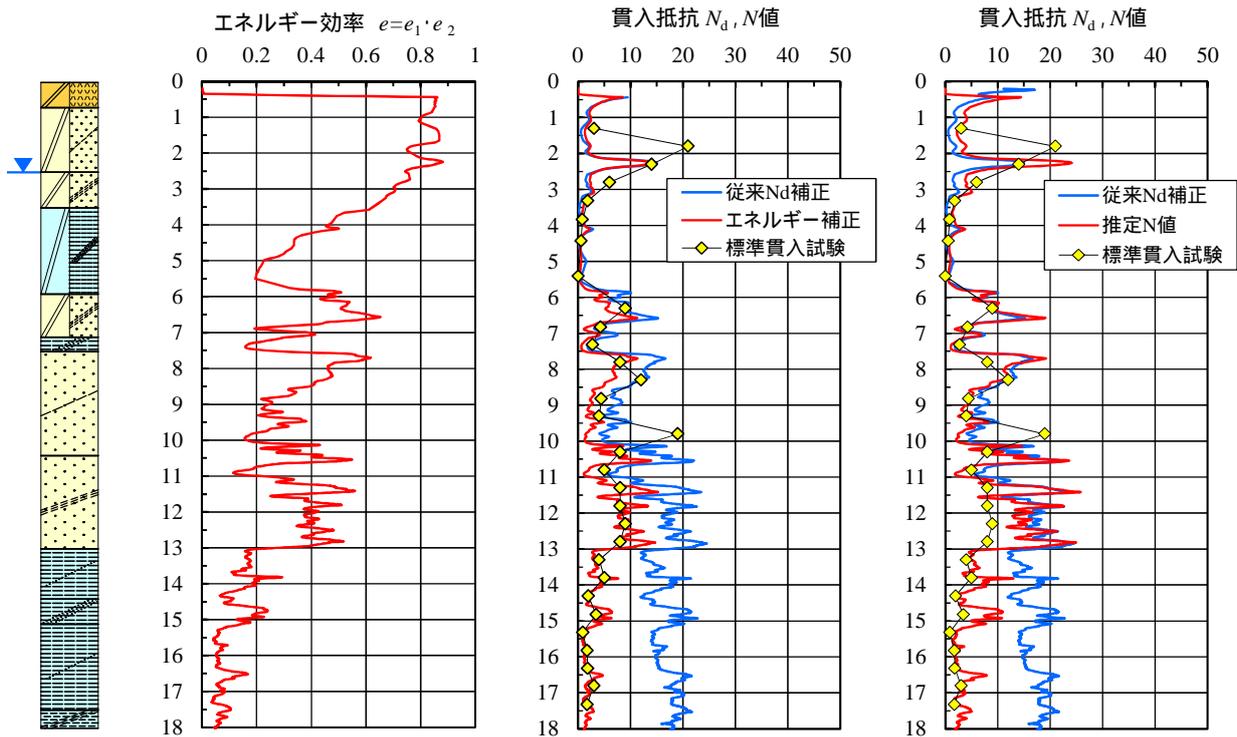


図 3.2-6 エネルギー効率による N_d 値の補正と N 値の推定結果 (千葉県浦安市舞浜)

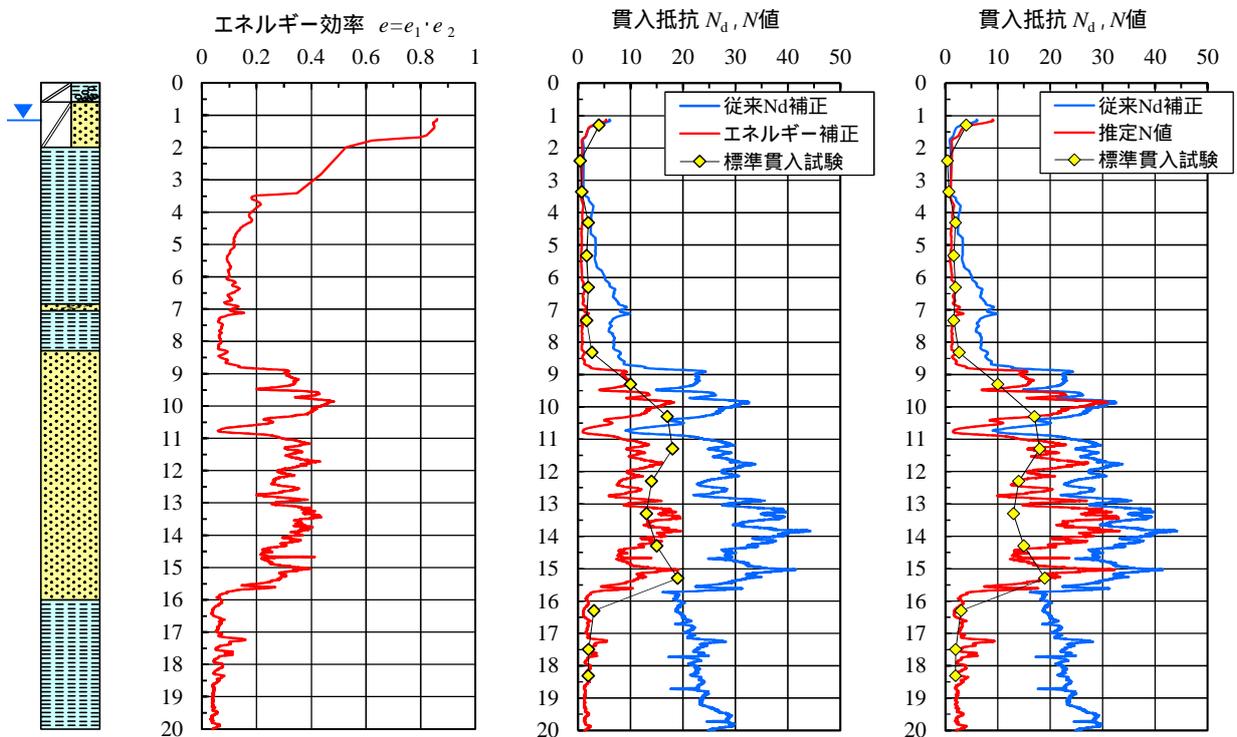


図 3.2-7 エネルギー効率による N_d 値の補正と N 値の推定結果 (埼玉県久喜市南栗橋)

3.3. 地下水位の推定

液状化判定にあたっては、地下水位を設定する必要がある。ピエゾドライブコーン(PDC)は、打撃後 0.18sec ~ 0.19sec の圧力センサの応答値 u_R を地下水位の指標として用いており、均質な砂地盤では地下水位と概ね一致することを確認している。しかしながら、細粒分を比較的多く含む地盤や粘土地盤では適用性が低い。そこで、打撃直後の圧力だけではなく、打撃前直前の圧力や圧力の最大値にも着目し、地下水位の指標としての適用性を検討した。

3.3.1. 地下水位の推定方法

地下水位との相関を検討した圧力センサの応答値を図 3.3-1 に示す。各応答値の深度分布図を作成し、地下水位の指標値となる応答値を抽出した。

その他、打撃前後の圧力差 ($u_R - u_S$)、最大圧力 (u_{max}) を全上載圧 (σ_v) で正規化した最大圧力比 (u_{max}/σ_v)、打撃前の圧力を基準とした最大圧力 (Δu_{max}) を全上載圧 (σ_v) で正規化した最大圧力比 ($\Delta u_{max}/\sigma_v$) についても地下水位との関係を検討した。

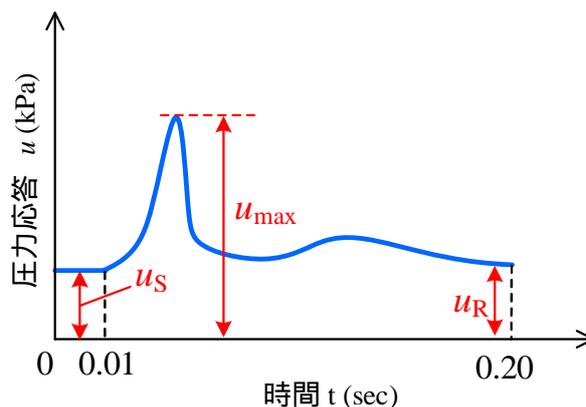


図 3.3-1 検討に用いた圧力センサの応答値

3.3.2. 地下水位の推定結果

検討を行った現場は、新潟県北蒲原聖籠町東港と千葉県浦安市舞浜である。その他の現場では、地下埋設破損の防止を目的とした試掘 (1m) で地下水位が確認されたため、PDC による地下水位の推定の検討を実施できなかった。

(1) 新潟県北蒲原聖籠町東港

図 3.3-2 に新潟県北蒲原聖籠町東港の検討結果を示す。新潟東港は砂丘に位置し、細粒分含有率の 10% 未満で均質な砂が分布する自然地盤である。図 3.3-2 の上段は、打撃前後の圧力応答値 (u_S 、 u_R 、 $u_R - u_S$) の深度分布図であるが、打撃前の圧力 u_S および打撃直後の圧力 u_R がマイナスからプラスに転じる深度が地下水位と概ね一致している。図 3.3-2 の下段は、最大圧力 (u_{max} 、 u_{max}/σ_v 、 $\Delta u_{max}/\sigma_v$) に関する深度分布図である。最大圧力比 (u_{max}/σ_v 、 $\Delta u_{max}/\sigma_v$) は、深度 1.2m 付近までは大きな値を示し、1.2m 以深は 1/3 程度に小さくなる。この変化点は地下水位よりも約 1m 浅い深度に位置する。

(2) 千葉県浦安市舞浜

図 3.3-3 に千葉県浦安市舞浜 (浦安運動公園) の検討結果を示す。浦安運動公園は東京湾岸の海面埋立地に位置し、浚渫による埋土は粘性土と砂質から成り、ともに不均質な層相を示す。図 3.3-3 の上段は、打撃前後の圧力応答値 (u_S 、 u_R 、 $u_R - u_S$) の深度分布図であるが、打撃前後の圧力差 $u_R - u_S$ がマイナスからプラスに転じる深度が地下水位と概ね一致している。一方、打撃前の圧力 u_S および打撃直後の圧力 u_R は地下水位との関係は見られない。図 3.3-3 の下段は、最大圧力 (u_{max} 、 u_{max}/σ_v 、 $\Delta u_{max}/\sigma_v$) に関する深度分布図である。最大圧力比 (u_{max}/σ_v 、 $\Delta u_{max}/\sigma_v$) は、地下水位以浅では大きな値を示し、地下水位に近づくにつれて小さくなり、地下水位以深ではやや減少傾向を示すものの概ね一定となる。この変曲点が地下水位と概ね一致している。

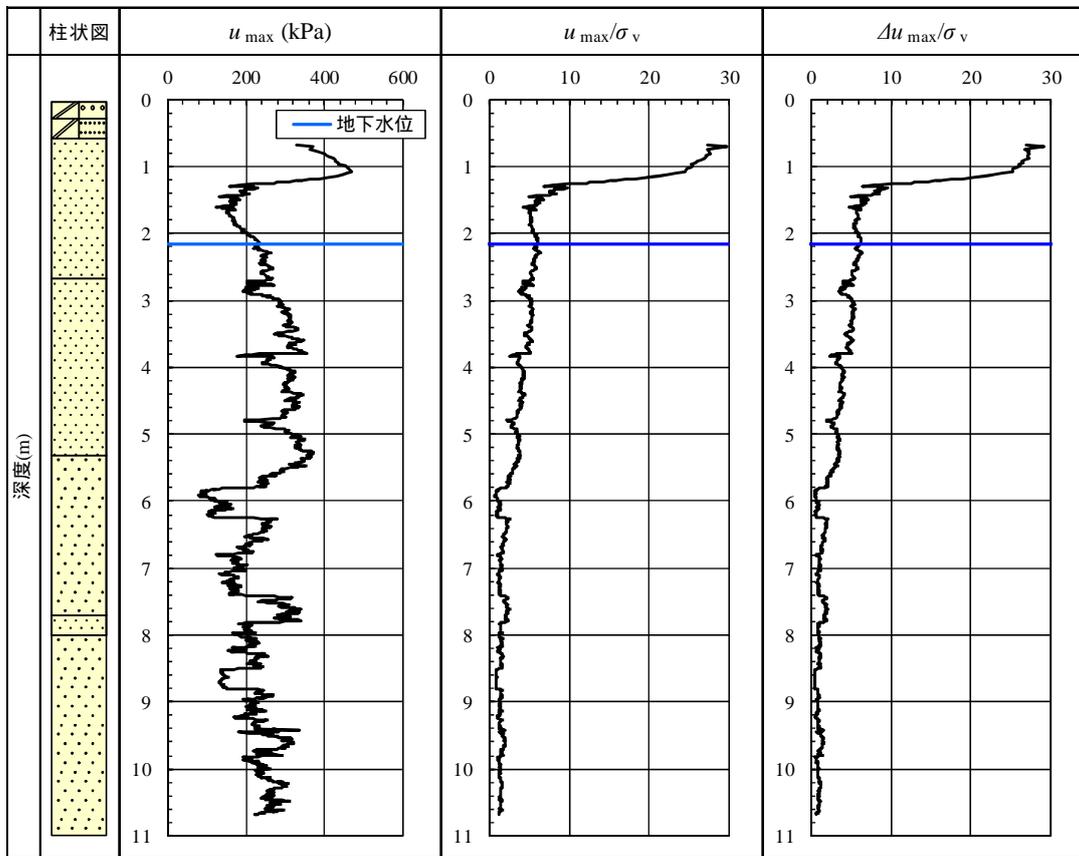
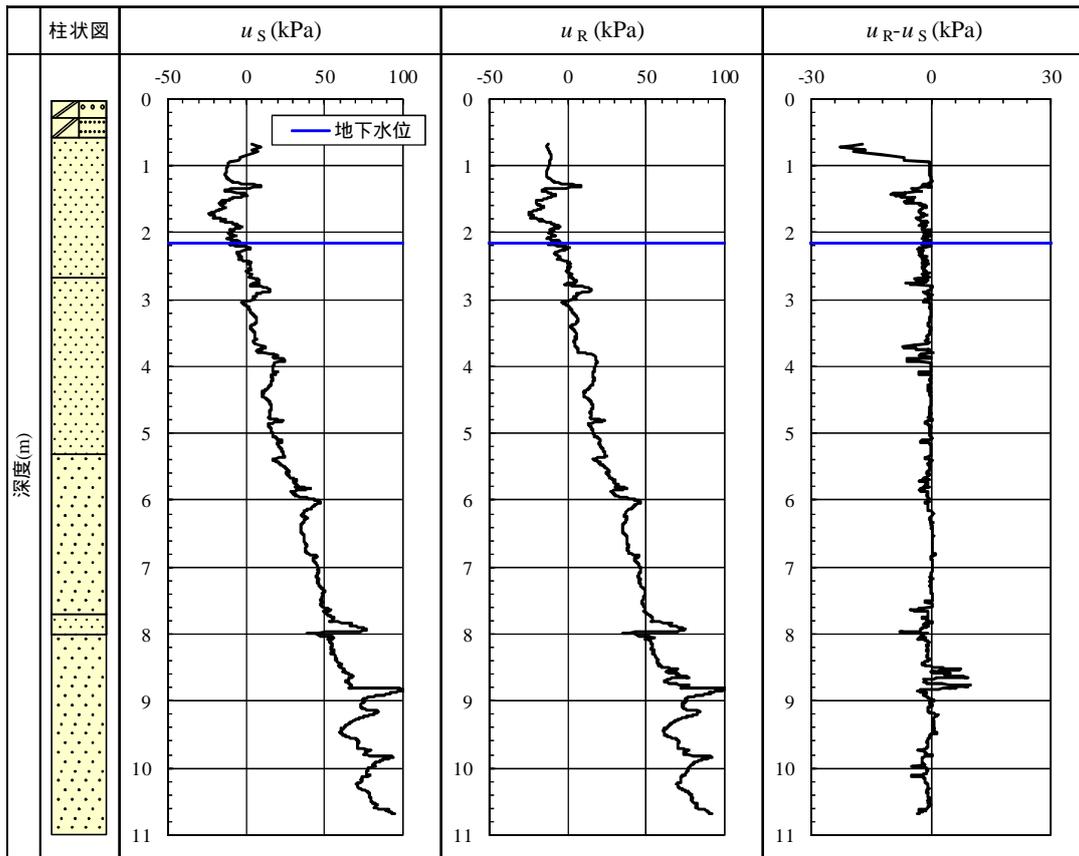


図 3.3-2 圧力応答値 u_s 、 u_R 、 u_{max} の深度分布 (新潟県北蒲原聖籠町東港)

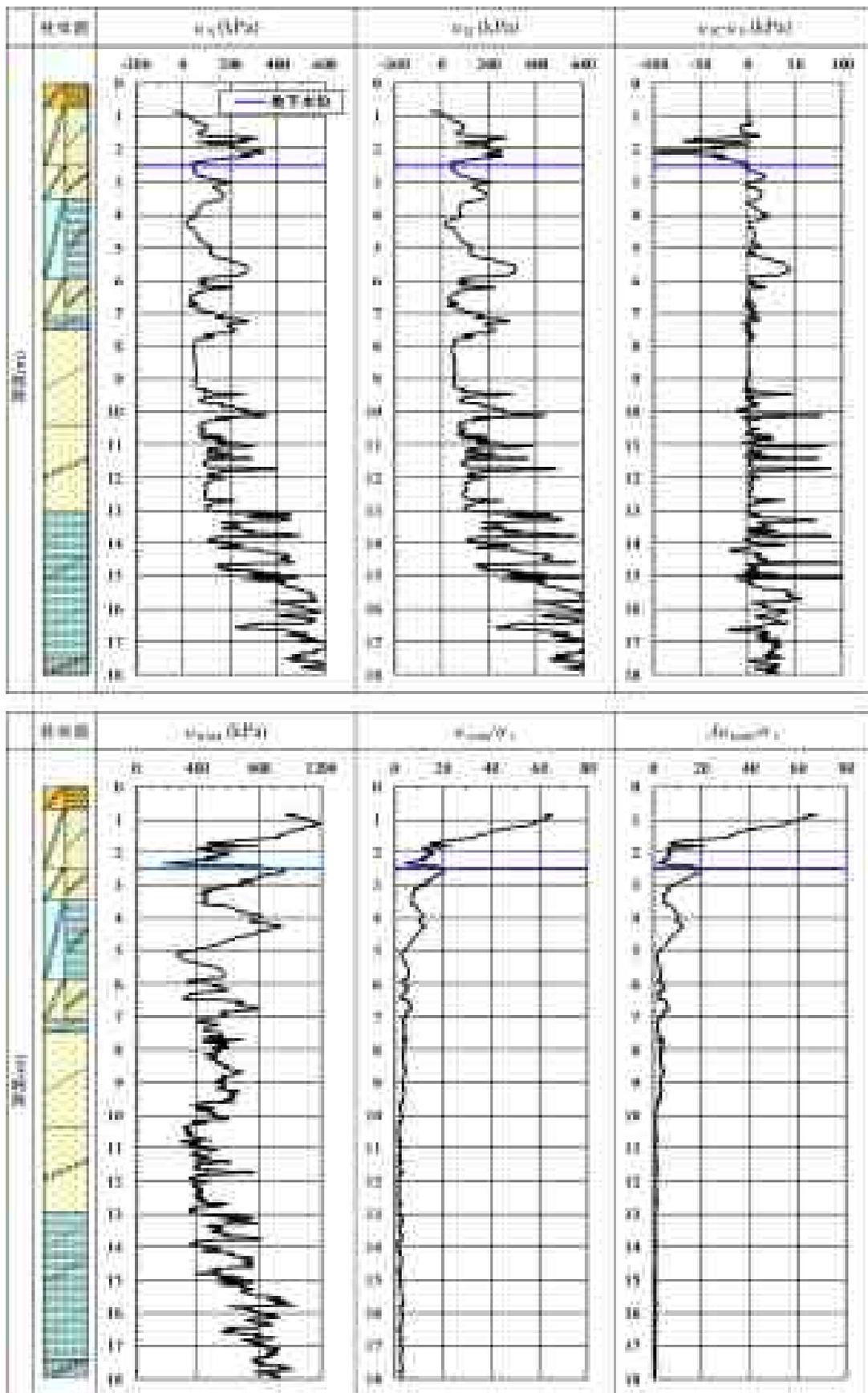


図 3.3-3 圧力応答値 u_s 、 u_R 、 u_{max} の深度分布 (千葉県浦安市舞浜)

圧力センサの応答値と地下水位の関係を検討した結果、細粒分含有率が少なく均質な砂が分布する自然地盤（新潟東港）では、打撃前の圧力 u_S および打撃後の圧力 u_R がマイナスからプラスに転じる深度が地下水位と概ね一致した。一方、細粒分を不均質に混入する埋立地盤（浦安運動公園）では、最大圧力比（ u_{max}/σ_v 、 $\Delta u_{max}/\sigma_v$ ）が減少傾向から一定値に転ずる変曲点が地下水位と概ね一致した。このように、現場毎で地下水位推定の指標値は異なることから、今後も更なるデータの蓄積が必要である。

なお、液状化の検討が必要となる地盤は、比較的浅い深度に地下水位が分布している。今回の現場実験においても、6現場の内4現場で試掘時に1m以深浅で地下水位を確認した。地下水位が比較的浅い場合は、試験後に試験孔を用いた手測り水位計による孔内水位測定が可能である。現状では地下水位をPDCの圧力応答値による単独の評価は難しいことから、試験孔の孔内水位測定を併用する方法を別途提案する。

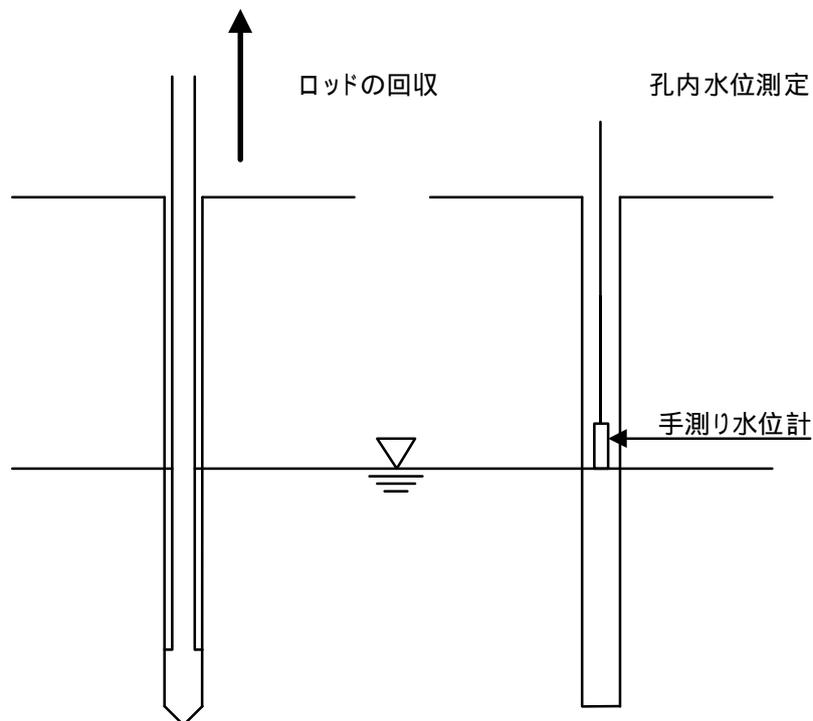


図 3.3-4 試験後の試験孔を用いた孔内水位計測

3.4. 液状化強度の推定

茨城県神栖市堀割と千葉県香取市佐原口では、ボーリングによる乱れの少ないサンプリングを行い、非排水繰返し三軸試験（液状化試験）を実施している。ここでは、ピエゾドライブコーン（PDC）の動的貫入抵抗 N_d 値、細粒分含有率 F_C 、地下水位 GWL より推定した液状化強度 R_L と液状化試験により直接求めた液状化強度 R_{L20} の比較検討を行い、PDC による液状化強度 R_L の推定法を確立する。

3.4.1. 液状化強度の推定方法

PDC では、液状化強度 R_L を N 値と細粒分含有率 F_C による方法を用いて各種技術基準の計算式より算出している。ここでは、道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編（平成 24 年 3 月）の方法を用いた。以下に道路橋示方書における液状化の判定を行う必要のある土層の定義と繰返し三軸強度比 R_L （液状化強度）の計算方法を示す。

(1)液状化の判定を行う必要のある土層

沖積層の土層で次の 3 つの条件全てに該当する場合において、液状化の判定を行う必要がある。

- 1) 地下水位が地表面から 10m 以内にあり、
かつ、地表面から 20m 以内の深さに存在する飽和土層
- 2) 細粒分含有率 F_C が 35% 以下の土層、
又は、細粒分含有率 F_C が 35% を超えても塑性指数 I_p が 15 以下の土層
- 3) 50% 粒径 D_{50} が 10mm 以下で、かつ、10% 粒径 D_{10} が 1mm 以下である土層

(2)繰返し三軸強度比 R_L （液状化強度）の計算方法

$$\begin{cases} R_L = 0.0882\sqrt{Na/1.7} & (Na < 14) \\ R_L = 0.0882\sqrt{Na/1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (Na - 14)^{4.5} & (Na \geq 14) \end{cases} \quad \text{式 (3.4-1)}$$

<砂質土>

$$Na = c_1 \cdot N_1 + c_2 \quad \text{式 (3.4-2)}$$

$$N_1 = 170 \cdot N / (\sigma_v' + 70) \quad \text{式 (3.4-3)}$$

$$\begin{cases} c_1 = 1 & (0\% \leq F_C < 10\%) \\ c_1 = (F_C + 40) / 50 & (10\% \leq F_C < 60\%) \end{cases} \quad \text{式 (3.4-4)}$$

$$c_1 = F_C / 20 - 1 \quad (60\% \leq F_C) \quad \text{式 (3.4-5)}$$

$$\begin{cases} c_2 = 0 & (0\% \leq F_C < 10\%) \\ c_2 = (F_C - 10) / 18 & (10\% \leq F_C) \end{cases} \quad \text{式 (3.4-5)}$$

<礫質土>

$$Na = [1 - 0.36 \cdot \log_{10}(D_{50} / 2)] \cdot N_1 \quad \text{式 (3.4-6)}$$

PDC は、塑性指数 I_p と 50% 粒径 D_{50} を評価できないことから、細粒分含有率 F_C が 50% 未満の土層、いわゆる砂質土を液状化の判定を行う必要のある土層とした。また、礫質土では補正 N

値の算出に 50% 粒径 D_{50} と 10% 粒径 D_{10} が必要となるが、PDC では評価できないことから、砂質土の計算式のみを用いた。図 3.4-1 に PDC による液状化強度 R_L 算定の手順を示す。

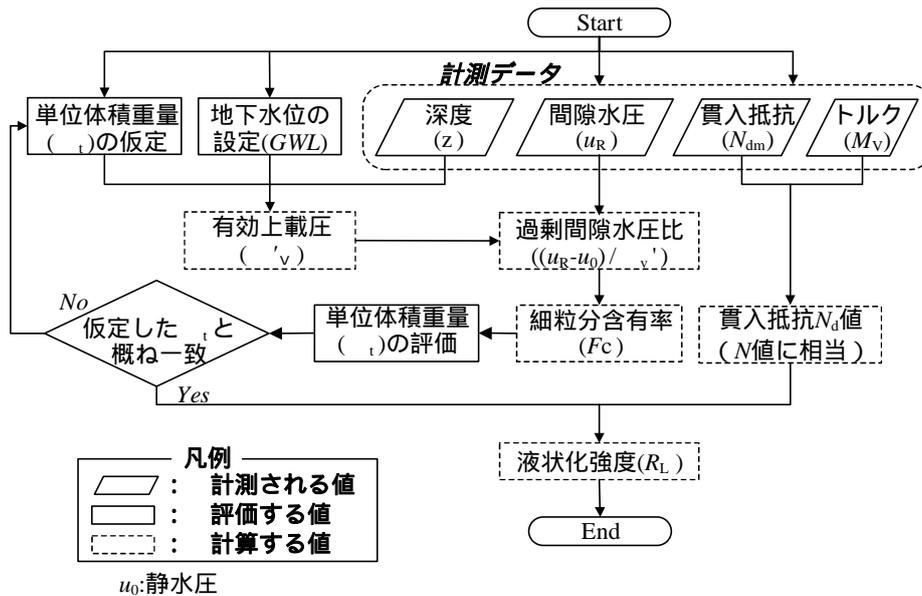


図 3.4-1 PDC による液状化強度 R_L 算定の手順

単位体積重量 γ_t については、今回はボーリングでサンプリングを行っていることから、室内試験結果より設定した。また、地下水位は 1m の試掘で確認した孔内水位を用いた。

3.4.2. 液状化強度の推定結果

液状化強度の推定条件として、地下水位と単位体積重量を表 3.4-1 に示す。茨城県神栖市堀割と千葉県香取市佐原口での液状化強度の推定結果をそれぞれ図 3.4-2 と図 3.4-3 に示す。結果図には、地盤の動的貫入抵抗 N_d 値と細粒分含有率 F_c 、非排水繰返し三軸試験（液状化試験）の液状化強度 R_{L20} を併記した。

表 3.4-1 地下水位および単位体積重量

地下水位	GL-0.95m	地下水位	GL-0.68m
地層	単位体積重量(kN/m ³)	地層	単位体積重量(kN/m ³)
埋土（砂質土）	18.0	沖積粘性土	16.0
沖積粘性土	16.0	沖積砂質土	18.0
沖積砂質土	19.0		

神栖市堀割については、PDC による液状化強度の推定値は液状化試験と概ね整合する値を示した。なお、深度 13m～14m の液状化強度が液状化試験よりも大きめの値を示したが、原因としては N 値の評価が大きめであることが考えられる。

香取市佐原口については、深度 5m～10m の PDC による液状化強度は液状化試験と概ね整合する液状化強度を示した。深度 3m～5m と深度 11m～14m の PDC による液状化強度は液状化試験よりも小さめの値を示した。深度 3m～5m 間については細粒分含有率の評価が多めであることや液状化試験に用いた試料の乱れが原因として考えられる。深度 11～14m 間については N 値の評価が

大きめであることが原因として考えられる。

PDCによる液状化強度 R_L の推定値は、動的貫入抵抗 N_d 値と細粒分含有率 F_C を適正に評価することで液状化試験の液状化強度 R_{L20} と概ね整合する結果となり、PDCによる液状化強度 R_L の推定法の適用性を確認した。

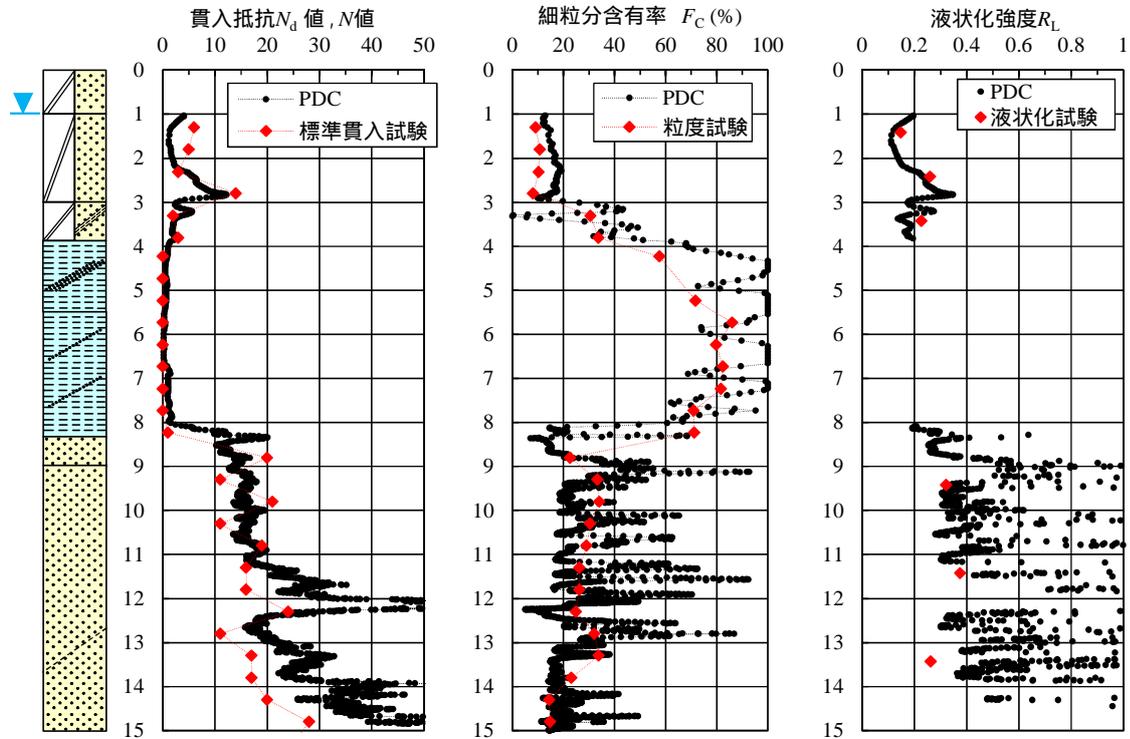


図 3.4-2 液状化強度の推定結果（茨城県神栖市堀割）

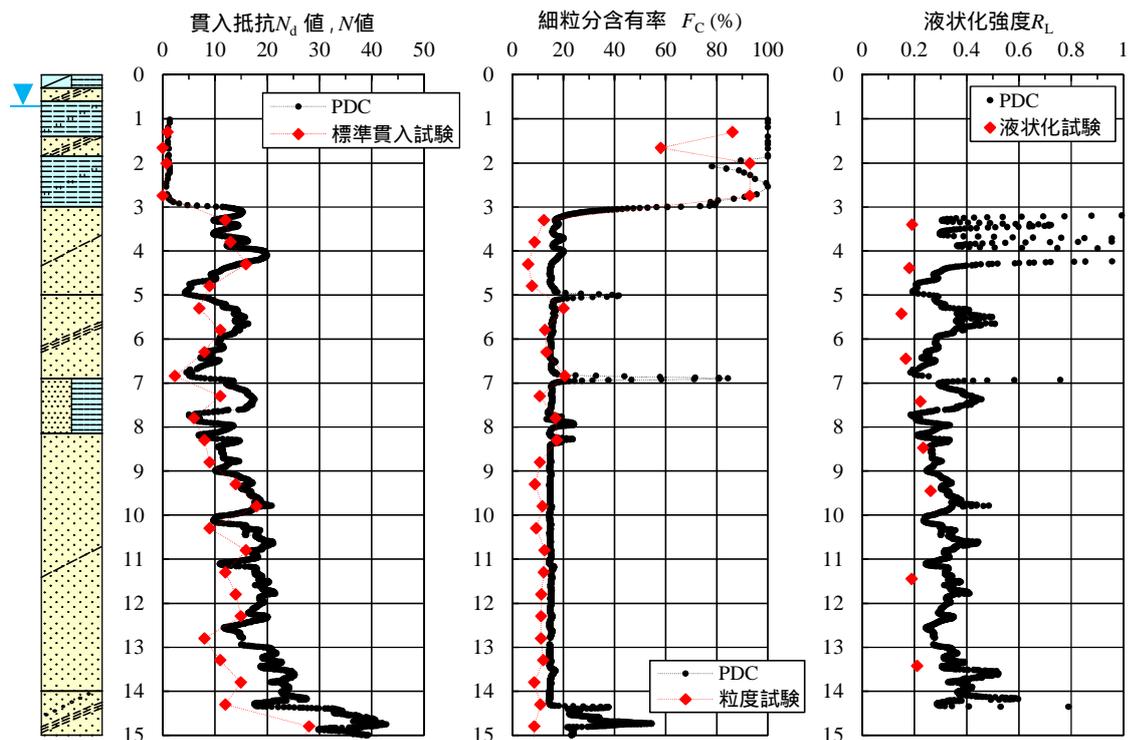


図 3.4-3 液状化強度の推定結果（千葉県香取市佐原口）

3.5. 液状化調査システムの開発

ピエゾドライブコーン(PDC)の液状化判定の手順を図 3.5-1 に示す。この一連のデータ解析をプログラム化し、液状化調査システムを構築した。

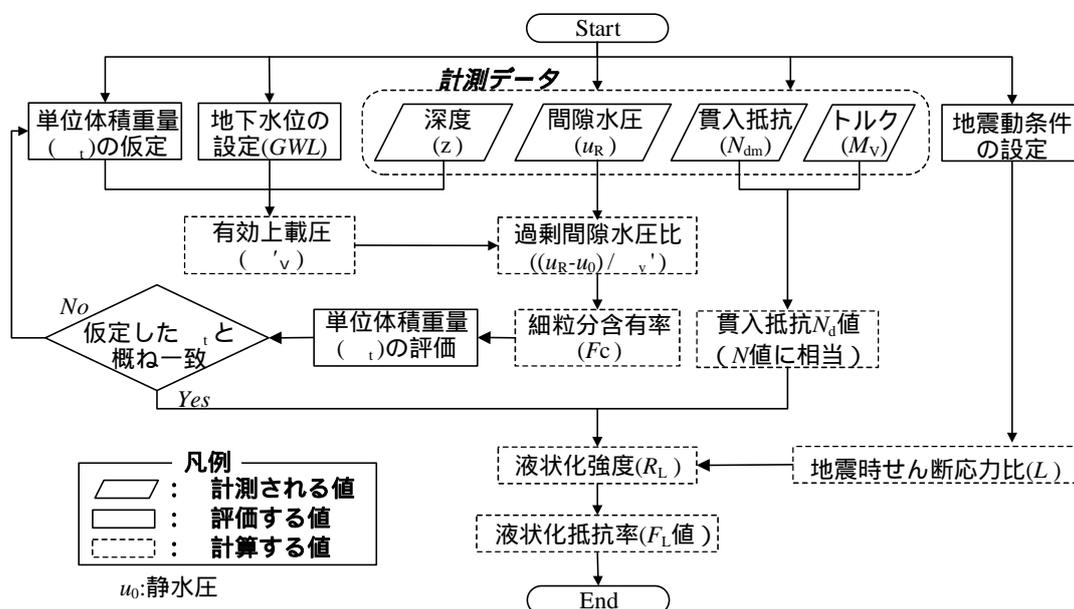


図 3.5-1 PDC の液状化判定の手順

実際の作業手順を以下に示す。

- 1)PDC の試験を実施し、貫入深度 z 、間隙水圧 u_R 、トルク M_v を計測する。
- 2)データ解析条件の設定を行う(図 3.5-1 を参照)
 - 地下水位 GWL
 - 単位体積重量 γ_t
 - 地震動条件
 - ・道路橋示法仕様書・同解説：地盤種別および地域区分である。
 - ・建築基礎構造設計指針：地表面最大加速度、マグニチュードである。
- 2)データ解析プログラムを実行する。
 - 地盤の動的貫入抵抗 N_d 値、細粒分含有率 F_C 、動的せん断強度比 R 、地震時せん断応力比 L 、液状化抵抗率 F_L 値が計算される。
- 3)データ解析結果を図化する(図 3.5-3 を参照)
- 4)最初に仮定した単位体積重量 γ_t と解析結果の細粒分含有率 F_C を対比し、妥当性を確認する。
 - 両者の関係に矛盾がある場合は、単位体積重量 γ_t を見直し、再度解析を実行する。
 - 両者の関係が妥当性になった時点でデータ解析は終了となる。

図 3.5-4 ~ 図 3.5-15 に液状化調査システムの道路橋示方書・同解説(耐震設計編(平成 24 年))対応のデータ解析プログラムを示す。



図 3.5-2 PDC のデータ解析条件の設定

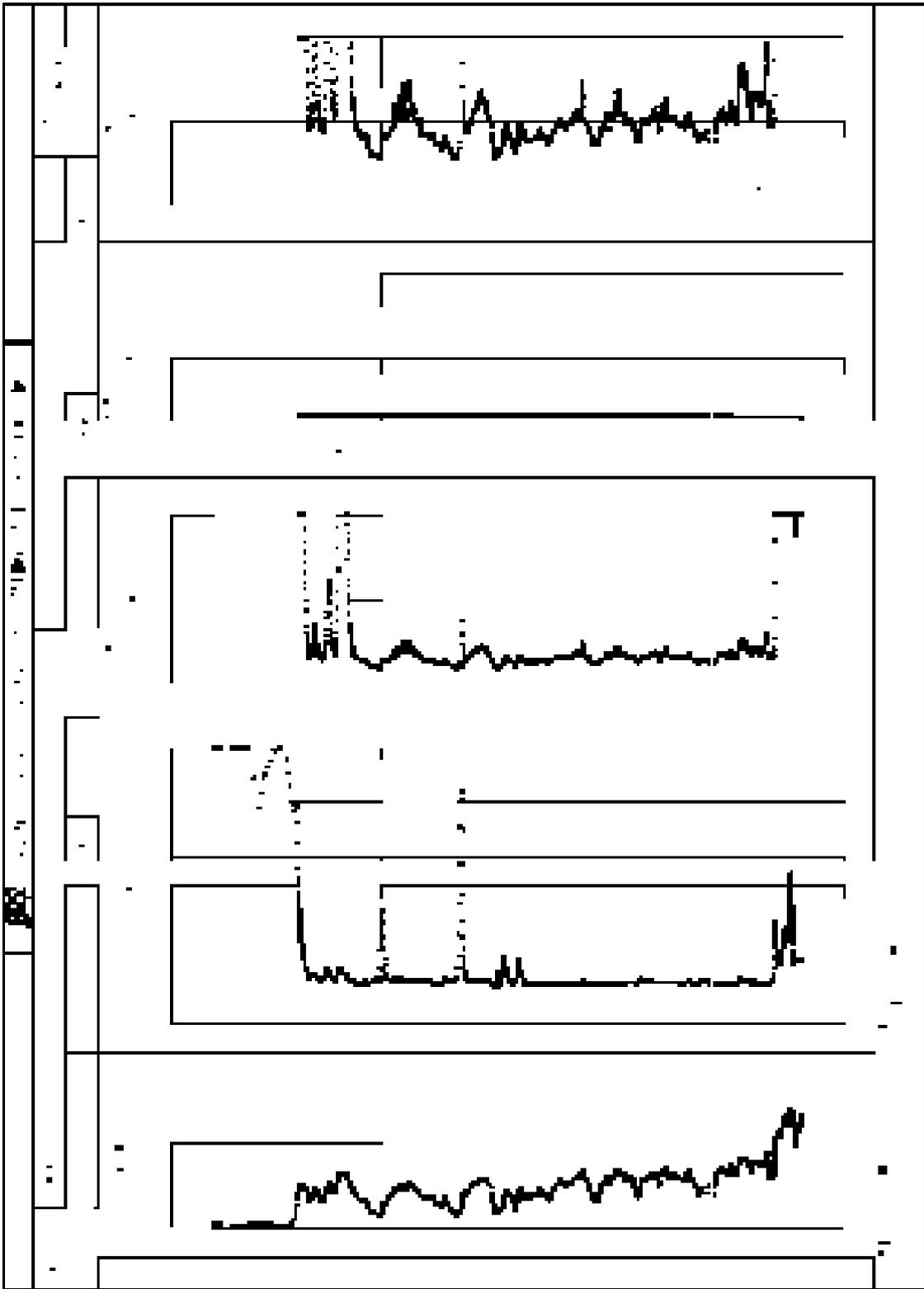


図 3.5-3 データ解析結果の図化の例

```

cccccc Program PDC_miniRAM_douro_Ver.2.4.f
c
c --- 2013年06月
c "014_INPUT.txt"を読み込む！
c 移動平均を N_idou 回 に調整した。
c 深度加算あり
c 標高、日付、測定者、記録者を入力する。
c mini-RAM 対応<トルク> N・m 用 >
c N 値の棄却上限を N_Nvalue 上げた版
c Fc がマイナスのとき 0 にする
c 設計水平震度、地震動タイプを任意入力
c Fc 推定法を新旧から選択
c Fc 推定式の係数を設定可能(xAFc, xBFc)
c 液状化判定する Fc の最大値を設定可能(xLiqFc)
c N 値のトルク補正係数を設定可能(xTQ)
c
c --- 道路橋仕様(平成24年3月改訂版) ---
c 液状化判定は<砂質土の場合>で<れき質土の場合>は考慮していない。
c レベル2地震動(タイプ、タイプ)対応・レベル1地震動対応
c
c dimension sindo(100),gamma(100), DD(2000,3),DS(9000),DE(9000),
1 SINND(9000),SIGZC(100),SIGZ(9000),SIGY(9000),DHK(2000),
2 zn(9000),zn1(9000),US(9000),UE(9000),wave(9000,2000,2),
3 TQD(100),ITQ(100),SD(0:100),UESV(9000),DUESV(9000),
4 zzn(9000),zUS(9000),zUE(9000),FC(9000),U(9000),
5 zna(9000),xRL1(9000),xRL2_1(9000),xRL2_2(9000),
6 xR3(9000),xLL1(9000),xLL2_1(9000),xLL2_2(9000),
7 xL3(9000),FLL1(9000),FLL2_1(9000),FLL2_2(9000),
8 FL3(9000),s_shindo_L2(2,3),s_shindo_L1(3)
c character*5 KGGou(100),KGG(9000)
c character*20 hyo(27)
c character*8 tit2(9000)
c character*100 tit1,tit,t_input,t_output,w_output,mr_output
c character*90 dummy(20)
c character*50 site_name
c character*30 no_name
c character*5 chiikikubun
c character*20 hiduke,sokutei,kiroku
c character*3 f_PDC,f_TRK
c character*4 f_CSV
c character*1 n(0:9),f_z
c character*5 jtype
c character*20 n_FCsuitei
c
c n(0)='0'
c n(1)='1'
c n(2)='2'
c n(3)='3'
c n(4)='4'
c n(5)='5'
c n(6)='6'
c n(7)='7'
c n(8)='8'
c n(9)='9'
c
c f_PDC='PDC'
c f_TRK='TRK'
c f_CSV='.CSV'
c f_z='z'
c
c
c hyo(1)=' No. '
c hyo(2)=' File Name '
c hyo(3)=' 深度(m) '
c hyo(4)=' 地層区分 '
c hyo(5)=' v (kPa) '
c hyo(6)=' U (kPa) '
c hyo(7)=' vd(kPa) '
c hyo(8)=' N値 '
c hyo(9)=' N1 値 '
c hyo(10)=' Us(kPa) '
c hyo(11)=' Ue(kPa) '
c hyo(12)=' Ue/ vd '
c hyo(13)=' U/ vd '
c hyo(14)=' Na '

```

図 3.5-4 PDC による液状化システムの構築(1) (道路橋示方書・同解説 耐震設計編)

```

hyo(15)=' FC '
hyo(16)=' R(任意) '
hyo(17)=' R(L1) '
hyo(18)=' R(L2_タイ°) '
hyo(19)=' R(L2_タイ°) '
hyo(20)=' L(任意) '
hyo(21)=' L(L1) '
hyo(22)=' L(L2_タイ°) '
hyo(23)=' L(L2_タイ°) '
hyo(24)=' FL(任意) '
hyo(25)=' FL(L1) '
hyo(26)=' FL(L2_タイ°) '
hyo(27)=' FL(L2_タイ°) '

c
c-----基本データの読み込み
c
open(unit=5,file='014_INPUT.txt',status='old')
c
read(5,100) site_name
read(5,100) no_name
read(5,100) tit
read(5,115) hiduke,sokutei,kiroku
read(5,121) nnmax,hyoukou,gwl,DKasan
read(5,123) jshu,chiikikubun
read(5,124) jisinsw
read(5,125) setteisindo,jtype
read(5,122) iidou,iram,iwave
read(5,122) N_idou,iFcSW,N_Nvalue
read(5,126) xAFc,xBFc
read(5,127) xLiQFc,xTQ
read(5,120) nn
do i=1,nn
  read(5,130) sindo(i),gamma(i),KGGou(i)
end do
do i=1,20
  read(5,100,end=30) dummy(i)
end do
30 im=i-1
c
close(5)
c
c====係数 ( Keisuu ) =====
c---水の単体 (kN/m3)
wgamma=10.0
c---設計水平震度
s_shindo_L1(1)=0.12
s_shindo_L1(2)=0.15
s_shindo_L1(3)=0.18
s_shindo_L2(1,1)=0.50
s_shindo_L2(1,2)=0.45
s_shindo_L2(1,3)=0.40
s_shindo_L2(2,1)=0.80
s_shindo_L2(2,2)=0.70
s_shindo_L2(2,3)=0.60
c---地域別補正係数
if (chiikikubun .EQ. ' A1') then
  chiikil1=1.0
  chiikil2_1=1.2
  chiikil2_2=1.0
else if (chiikikubun .EQ. ' A2') then
  chiikil1=1.0
  chiikil2_1=1.0
  chiikil2_2=1.0
else if (chiikikubun .EQ. ' B1') then
  chiikil1=0.85
  chiikil2_1=1.2
  chiikil2_2=0.85
else if (chiikikubun .EQ. ' B2') then
  chiikil1=0.85
  chiikil2_1=1.0
  chiikil2_2=0.85
else if (chiikikubun .EQ. ' C') then
  chiikil1=0.7
  chiikil2_1=0.8

```

図 3.5-5 PDC による液状化システムの構築(2) (道路橋示方書・同解説 耐震設計編)

```

    chiikiL2_2=0.7
  else
    write(*,100)'ERROR "地域区分が間違っています。"'
    go to 99
  end if
c---任意地震動用地域別補正係数
  if (jisinSW .EQ. 1)then
    if (jtype .EQ. ' L1') then
      setteichiiki=chiikiL1
    else if (jtype .EQ. ' L2-1') then
      setteichiiki=chiikiL2_1
    else if (jtype .EQ. ' L2-2') then
      setteichiiki=chiikiL2_2
    else
      write(*,100)'ERROR "地震動タイプが間違っています。"'
      go to 99
    end if
  end if
c
cccccccc 計算条件の書き出し ccccccccccccccccccccc
write(*,100) '***** 計算条件 *****'
  if (iFcSW.eq.1) then
    n_FCsuitei=' Fc 推定法：旧'
    write(*,100) ' 細粒分含有率 Fc 推定式：旧'
    write(*,272) ' Fc=',xAFc,'* uR/ vd +',xBFc
  else if (iFcSW.eq.2) then
    n_FCsuitei=' Fc 推定法：新'
    write(*,100) ' 細粒分含有率 Fc 推定式：新'
    write(*,272) ' Fc=',xAFc,'* u/ vd +',xBFc
  else
    write(*,100)'ERROR "Fc 算定式選択が間違っています。"'
    go to 99
  end if
  write(*,273) ' N 値のトルク補正係数 =' ,xTQ
  write(*,272) ' 液状化判定する最大 Fc=' ,xLiqFc, '%'
  write(*,270) ' 地盤種別=',jshu,' 地域区分=',chiikikubun
  write(*,271) ' 水平震度(L1)=' ,s_shindo_L1(jshu)
  write(*,271) ' 水平震度(L2-1)=' ,s_shindo_L2(1,jshu)
  write(*,271) ' 水平震度(L2-2)=' ,s_shindo_L2(2,jshu)
  if (jisinSW.EQ.1)then
    write(*,271) ' 水平震度(任意入力)=' ,setteisindo
  end if
  write(*,271) ' 地域別補正係数(L1)=' ,chiikiL1
  write(*,271) ' 地域別補正係数(L2-1)=' ,chiikiL2_1
  write(*,271) ' 地域別補正係数(L2-2)=' ,chiikiL2_2
  if (jisinSW.EQ.1)then
    write(*,271) ' 地域別補正係数(任意入力)=' ,setteichiiki
  end if
  write(*,100) '***** 計算実行中 *****'
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
c
c=====
c
c-----ディレクトリーの文字数
c
  do i=1,100
    if (tit(i:i) .eq. ' ') go to 10
  end do
c
  20 write(*,100)'----- DIR name error -----'
  go to 99
c
  10 iim=i-1
c
c-----ファイルネームの作成
c
  tit1(1:iim)=tit(1:iim)
  t_input(1:iim)=tit(1:iim)
  t_input(iim+1:iim+13)='014_INPUT.txt'
  t_output(1:iim)=tit(1:iim)
  t_output(iim+1:iim+14)='014_RESULT.csv'
  w_output(1:iim)=tit(1:iim)
  w_output(iim+1:iim+8)='014_WAVE'
c-----入力データの保存

```

図 3.5-6 PDC による液状化システムの構築(3) (道路橋示方書・同解説 耐震設計編)

```

      mr_output(1:iim)=tit(1:iim)
      mr_output(iim+1:iim+11)='014_SRS.csv'
c
      open(unit=60,file=t_input)
c
      write(60,100) site_name
      write(60,100) no_name
      write(60,100) tit
      write(60,115) hiduke,sokutei,kiroku
      write(60,121) nnmax,hyoukou,gwl,DKasan
      write(60,123) jshu,chiikikubun
      write(60,124) jisinSW
      write(60,125) setteisindo,jtype
      write(60,122) iidou,iram,iwave
      write(60,122) N_idou,iFcSW,N_Nvalue
      write(60,126) xAFc,xBFc
      write(60,127) xLiqFc,xTQ
      write(60,120) nn
      do i=1,nn
        write(60,130) sindo(i),gamma(i),KGGou(i)
        sindo(i)=sindo(i)+DKasan
      end do
      do i=1,im
        write(60,100) dumi(i)
      end do
c
      close(60)
c
c----- Initialize(msec)
      do i=1,2000
        DD(i,1)=float(i)*0.1
      end do
c----- v (地層境界)
      SIGZC(1)=sindo(1)*gamma(1)
      do i=2,nn
        SIGZC(i)=SIGZC(i-1)+(sindo(i)-sindo(i-1))*gamma(i)
      end do
c----- (nnn)
      nnn=0
      nnt=0
c
      tit1(iim+1:iim+3)=f_PDC
c
c-----do roop !!!(1)-----
      open(unit=21,file='check.dat')
c-----トルク補正值 (読込)
c
      do ic=1,nnmax
        if (ic .lt. 10) then
          tit1(iim+4:iim+7)='0000'
          tit1(iim+8:iim+8)=n(ic)
        else if (ic .lt. 100) then
          tit1(iim+4:iim+6)='000'
          tit1(iim+7:iim+7)=n(ic/10)
          tit1(iim+8:iim+8)=n(ic-(ic/10)*10)
        else if (ic .lt. 1000) then
          tit1(iim+4:iim+5)='00'
          tit1(iim+6:iim+6)=n(ic/100)
          tit1(iim+7:iim+7)=n((ic-(ic/100)*100)/10)
          tit1(iim+8:iim+8)=n(ic-(ic/10)*10)
        else
          tit1(iim+4:iim+4)='0'
          tit1(iim+5:iim+5)=n(ic/1000)
          tit1(iim+6:iim+6)=n((ic-(ic/1000)*1000)/100)
          tit1(iim+7:iim+7)=n((ic-(ic/100)*100)/10)
          tit1(iim+8:iim+8)=n(ic-(ic/10)*10)
        end if
c
        tit1(iim+9:iim+11)=f_TRK
        tit1(iim+12:iim+15)=f_CSV
        ifl=iim+15
c
        open(unit=24,file=tit1(1:ifl),status='old',err=44)

```

図 3.5-7 PDC による液状化システムの構築(4) (道路橋示方書・同解説 耐震設計編)

```

        nnt=nnt+1
        read(24,*) ZITQ
        ITQ(nnt)=INT(ZITQ)
        nflg=1
44      close(24)
c
c-----打撃データ (読込)
c
        tit1(iim+9:iim+9)=f_z
        tit1(iim+10:iim+13)=f_CSV
        ifl=iim+13
c
        open(unit=22,file=tit1(1:ifl),status='old',err=88)
        nnn=nnn+1
        tit2(nnn)=tit1(iim+1:iim+8)
        write(21,105) nnn,tit2(nnn)
c
        do j=1,2000
            read(22,*,err=99) DD(j,2),DD(j,3)
c-----<(m) 単位の深度表現に修正>
            DD(j,3)=-1.0*DD(j,3)
        end do
        close(22)
c===== <j=2: u>
c
        DSX=0.0
        do k=1,80
            DSX=DSX+DD(k,2)
        end do
        US(nnn)=DSX/80.0
c
        DEX=0.0
        do k=1901,2000
            DEX=DEX+DD(k,2)
        end do
        UE(nnn)=DEX*0.01
c
        do k=1,2000
            DD(k,2)=DD(k,2)-US(nnn)
        end do
c
c----- 衝撃慣性力による過剰間隙水圧の除去
        dux=0.0
        do ip=80,120
            if(dux .lt. DD(ip,2)) then
                dux=DD(ip,2)
                idx=ip
            end if
        end do
c
        do iq=idx-2,idx+2
            DD(iq,2)=DD(idx-3,2)
        end do
c-----移動平均( u)
c
        do l=1,3
            do k=5,1996
                DHK(k)=(DD(K-4,2)+DD(K-3,2)+DD(K-2,2)+DD(K-1,2)+DD(K,2)+
1                DD(k+1,2)+DD(K+2,2)+DD(K+3,2)+DD(K+4,2))/9.0
            end do
c
            do k=5,1996
                DD(k,2)=DHK(k)
            end do
        end do
c
c-----wave data の書き込み
c
        do k=1,2000
            wave(nnn,k,1)=DD(k,2)
        end do
c

```

図 3.5-8 PDC による液状化システムの構築(5) (道路橋示方書・同解説 耐震設計編)

```

c===== <j=3:貫入量>
c-----移動平均(貫入量)
c
  do l=1,3
  do k=5,1996
    DHK(k)=(DD(K-4,3)+DD(K-3,3)+DD(K-2,3)+DD(K-1,3)+DD(k,3)+
1      DD(k+1,3)+DD(K+2,3)+DD(K+3,3)+DD(K+4,3))/9.0
  end do
c
  do k=5,1996
    DD(k,3)=DHK(k)
  end do
c-----深度加算!
  do k=1,2000
    DD(k,3)=DD(k,3)+DKasan
  end do
c-----
  DSX=0.0
  do k=1,100
    DSX=DSX+DD(k,3)
  end do
  DS(nnn)=DSX*0.01
c
  DEX=0.0
  do k=1901,2000
    DEX=DEX+DD(k,3)
  end do
  DE(nnn)=DEX*0.01
c
  do k=1,2000
    DD(k,3)=DD(k,3)-DS(nnn)
    if(DD(k,3).lt.0.0) DD(k,3)=0.0
    wave(nnn,k,2)=DD(k,3)
  end do
c
c-----トルク補正深度の読込(nflg=1)
c
  if(nflg.eq.1)then
    TQD(nnt)=DE(nnn-1)
    nflg=0
  end if
c
c-----深度(m)
c-----N値>N_Nvalue以上をDISP.ERR
c      例えば、N値>200で0.001
c      N値>2000で0.0001
c
  xN_Nvalue=0.2/(float(N_Nvalue)*2.0)
c
  if(ABS(DE(nnn)-DS(nnn)) .lt. xN_Nvalue)then
    nnn=nnn-1
    write(21,100)'----->DISP. ERROR'
    go to 88
  else
    if(DE(nnn) .ge. DE(nnn-1))then
      DST=DE(nnn)-DE(nnn-1)
    else
      DST=DST_before
      write(21,100)'----->DISP. COUNT ERR DST_before'
    end if
  end if
c
c----- 中心深度
c
  SINND(nnn)=(DS(nnn)+DE(nnn))*0.5
c
  DST_before=DST
c
c----- check_file
c
  write(21,140) SINND(nnn),DST,DE(nnn),DS(nnn)
c----- v

```

図 3.5-9 PDC による液状化システムの構築(6) (道路橋示方書・同解説 耐震設計編)

```

do i=1,nn
  if(SINND(nnn) .le. sindo(i)) go to 50
end do
write(*,110) 'SINND =',nnn,SINND(nnn)
write(*,100) '***** DEPTH ERROR *****'
go to 99

c
  if(iii .eq. 1)then
    SIGZ(nnn)=SINND(nnn)*gamma(1)
  else
    SIGZ(nnn)=SIGZC(iii-1)+(SINND(nnn)-sindo(iii-1))*gamma(iii)
  end if
c-----地層記号
  KGG(nnn)=KGGou(iii)
c----- 'v
  if(gwl .ge. SINND(nnn))then
    U(nnn)=0.0
  else
    U(nnn)=(SINND(nnn)-gwl)*wgamma
  end if
  SIGY(nnn)=SIGZ(nnn)-U(nnn)
c-----貫入量 & N値(mini ラム仕様 : N 値 =Nd 値)
c
c   zn(nnn)=0.2/DST   :<ラム仕様>
c   zn(nnn)=0.2/DST*0.5

c
88   end do
c-----トルク補正值
c
  TQD(nnt)=DE(nnn)
c
c   write(21,100) '-----トルク補正值-----'
c   write(21,100) '  深度(m)   トルク補正值  '
c   do i=1,nnt
c     write(21,150) TQD(i),ITQ(i)
c   end do

c
c   close(21)
c=====計算ルーチン>
c-----トルク補正
c   do i=1,nnt
c     if(SINND(nnn) .lt. TQD(i))go to 60
c   end do
c   write(*,100) '***** TQ ERROR *****'
c   go to 99

c
60   iiit=i
c   if(iiit .eq. 1)then
c     xitq=SINND(nnn)/TQD(1)*FLOAT(ITQ(1))
c   else
c     satq=FLOAT(ITQ(iiit)-ITQ(iiit-1))
c     saxitq=(SINND(nnn)-TQD(iiit-1))/(TQD(iiit)-TQD(iiit-1))
c     xitq=saxitq*satq+FLOAT(ITQ(iiit-1))
c   end if
c   -----トルク補正 (miniRAM = kgf・cm)
c   zn(nnn)=zn(nnn)-0.016*xitq
c   if(zn(nnn) .lt. 0.0)zn(nnn)=0.0
c   -----トルク補正 (miniRAM = N・m)
c   zn(nnn)=zn(nnn)-xTQ*xitq
c   if(zn(nnn) .lt. 0.0)zn(nnn)=0.0

c
c   end do

c
c-----N 値,US,UE の移動平均
c
c   if(iidou .eq. 1)then
c
c     zn(1)=zn(2)
c     zzn(1)=zn(2)
c     zzn(2)=zn(2)
c     US(1)=US(2)
c     zUS(1)=US(2)

```

図 3.5-10 PDC による液状化システムの構築(7) (道路橋示方書・同解説 耐震設計編)

```

zUS(2)=US(2)
UE(1)=UE(2)
zUE(1)=UE(2)
zUE(2)=UE(2)
c
zzn(nnn-1)=zn(nnn-1)
zzn(nnn)=zn(nnn)
zUS(nnn-1)=US(nnn-1)
zUS(nnn)=US(nnn)
zUE(nnn-1)=UE(nnn-1)
zUE(nnn)=UE(nnn)
c
do imm=1,N_idou
do inn=3,nnn-2
zzn(inn)=(zn(inn-2)+zn(inn-1)+zn(inn)+zn(inn+1)+zn(inn+2))/5.0
zUS(inn)=(US(inn-2)+US(inn-1)+US(inn)+US(inn+1)+US(inn+2))/5.0
zUE(inn)=(UE(inn-2)+UE(inn-1)+UE(inn)+UE(inn+1)+UE(inn+2))/5.0
end do
c
do inm=1,nnn
zn(inm)=zzn(inm)
US(inm)=zUS(inm)
UE(inm)=zUE(inm)
end do
end do
c
end if
c
c
c
-----Ue/ 'v
do inm=1,nnn
UESV(inm)=UE(inm)/SIGY(inm)
DUESV(inm)=(UE(inm)-U(inm))/SIGY(inm)
end do
c
c=====FL 計算
do inm=1,nnn
c-----<N 1 値>
zn1(inm)=170.0*zn(inm)/(SIGY(inm)+70.0)
c-----<地下水水位以浅 or Ue/ 'v>2.811 は 0.0>
if (SINND(inm).lt.gwl) then
FC(inm)=-999.0
xRL1(inm)=-999.0
xRL2_1(inm)=-999.0
xRL2_2(inm)=-999.0
xR3(inm)=-999.0
xLL1(inm)=-999.0
xLL2_1(inm)=-999.0
xLL2_2(inm)=-999.0
xL3(inm)=-999.0
FLL1(inm)=-999.0
FLL2_1(inm)=-999.0
FLL2_2(inm)=-999.0
FL3(inm)=-999.00
zna(inm)=-999.0
else
c-----<FC 計算>
c FC 推定法の選択 (iFcSW=1:旧, 2:新)
if (iFcSW.eq.1) then
FC(inm)=xAfc*UESV(inm)+xBFc
else if (iFcSW.eq.2) then
FC(inm)=xAfc*DUESV(inm)+xBFc
end if
if (FC(inm) .gt. 100.0) FC(inm)=100.0
if (FC(inm) .lt. 0.0) FC(inm)=0.0
c-----<FL 計算>
c-----<液状化判定する最大の Fc : xLiqFc>
if (FC(inm) .lt. xLiqFc) then
c
if (FC(inm) .lt. 10.0) then
c1=1.0
c2=0.0
else if (FC(inm) .lt. 60.0) then

```

図 3.5-11 PDC による液状化システムの構築(8) (道路橋示方書・同解説 耐震設計編)

```

      c1=(FC(inm)+40.0)/50.0
      c2=(FC(inm)-10.0)/18.0
    else
      c1=FC(inm)/20.0-1.0
      c2=(FC(inm)-10.0)/18.0
    end if
c-----<Na 値>
      zna(inm)=c1*zn1(inm)+c2
c-----<RL>
      RL=0.0882*(zna(inm)/1.7)**0.5
      if (zna(inm) .ge. 14.0)then
        RL=RL+1.6*10.0**(-6)*(zna(inm)-14.0)**4.5
      end if
c-----<xRL1: レベル1, xRL2_1:タイプ, xRL2_2:タイプ, xR3: 任意地震動>
      xRL1(inm)=RL
      xRL2_1(inm)=RL
c
      if (RL .le. 0.1) then
        xRL2_2(inm)=RL
      else if (RL .le. 0.4) then
        xRL2_2(inm)=(3.3*RL+0.67)*RL
      else
        xRL2_2(inm)=2.0*RL
      end if

      if (jisinSW .EQ. 1)then
        if (jtype .EQ. ' L1') then
          xR3(inm)=xRL1(inm)
        else if (jtype .EQ. ' L2-1') then
          xR3(inm)=xRL2_1(inm)
        else if (jtype .EQ. ' L2-2') then
          xR3(inm)=xRL2_2(inm)
        end if
      else
        xR3(inm)=-999.0
      end if

c-----<xLL1: レベル1, xLL2_1:タイプ, xLL2_2:タイプ, xL3: 任意地震動>
      rd=1.0-0.015*SINND(inm)
      xLL1(inm)=rd*s_shindo_L1(jshu)*chiikiL1*SIGZ(inm)/SIGY(inm)
      xLL2_1(inm)=rd*s_shindo_L2(1,jshu)*chiikiL2_1*SIGZ(inm)
1 /SIGY(inm)
      xLL2_2(inm)=rd*s_shindo_L2(2,jshu)*chiikiL2_2*SIGZ(inm)
1 /SIGY(inm)
      if (jisinSW .EQ. 1)then
        xL3(inm)=rd*setteisindo*setteichiiki*SIGZ(inm)/SIGY(inm)
      else
        xL3(inm)=-999.0
      end if
c-----<FLL1: レベル1, FLL2_1:タイプ, FLL2_2:タイプ, FL3: 任意地震動>
      FLL1(inm)=xRL1(inm)/xLL1(inm)
      FLL2_1(inm)=xRL2_1(inm)/xLL2_1(inm)
      FLL2_2(inm)=xRL2_2(inm)/xLL2_2(inm)
      if (jisinSW .EQ. 1)then
        FL3(inm)=xR3(inm)/xL3(inm)
      else
        FL3(inm)=-999.0
      end if
c-----<R,L,FLmax=2.0>
      if(xRL1(inm) .gt. 2.0)xRL1(inm)=2.0
      if(xRL2_1(inm) .gt. 2.0)xRL2_1(inm)=2.0
      if(xRL2_2(inm) .gt. 2.0)xRL2_2(inm)=2.0
      if(xR3(inm) .gt. 2.0)xR3(inm)=2.0
      if(xLL1(inm) .gt. 2.0)xLL1(inm)=2.0
      if(xLL2_1(inm) .gt. 2.0)xLL2_1(inm)=2.0
      if(xLL2_2(inm) .gt. 2.0)xLL2_2(inm)=2.0
      if(xL3(inm) .gt. 2.0)xL3(inm)=2.0
      if(FLL1(inm) .gt. 2.0)FLL1(inm)=2.0
      if(FLL2_1(inm) .gt. 2.0)FLL2_1(inm)=2.0
      if(FLL2_2(inm) .gt. 2.0)FLL2_2(inm)=2.0
      if(FL3(inm) .gt. 2.0)FL3(inm)=2.0
    else
      xRL1(inm)=-999.0

```

図 3.5-12 PDC による液状化システムの構築(9) (道路橋示方書・同解説 耐震設計編)

```

xRL2_1(inm)=-999.0
xRL2_2(inm)=-999.0
xR3(inm)=-999.0
xLL1(inm)=-999.0
xLL2_1(inm)=-999.0
xLL2_2(inm)=-999.0
xL3(inm)=-999.0
FLL1(inm)=-999.0
FLL2_1(inm)=-999.0
FLL2_2(inm)=-999.0
FL3(inm)=-999.0
zna(inm)=-999.0
end if
end if
end do
C===== data write
C
open(unit=10,file=t_output)
C
if(jisinSW.EQ.1)then
write(10,201) site_name,no_name,hiduke,sokutei,kiroku,
1          hyoukou,gwl,setteisindo,jtype,n_FCsui tei,
2          xAFc,XBFc,xLiqFc,xTQ
else
write(10,200) site_name,no_name,hiduke,sokutei,kiroku,
1          hyoukou,gwl,n_FCsui tei,xAFc,XBFc,xLiqFc,
2          xTQ
end if
write(10,220) (hyo(i),i=1,27)
C
do ii=1,nnn
C
write(10,210) ii,tit2(ii),SINND(ii),KGG(ii),SIGZ(ii),U(ii),
1          SIGY(ii),zn(ii),zn1(ii),US(ii),UE(ii),UESV(ii),
2          DUESV(ii),zna(ii),FC(ii),xR3(ii),xRL1(ii),
3          xRL2_1(ii),xRL2_2(ii),xL3(ii),xLL1(ii),
4          xLL2_1(ii),xLL2_2(ii),FL3(ii),FLL1(ii),
5          FLL2_1(ii),FLL2_2(ii)
C
end do
C
close(10)
C
C----- ラムデータシート
C
if(iram .eq. 1) then
C-----注意 深度1cm加算して20cm単位の判定を確保(+1の削除!!!)
nrmax=INT((SINND(nnn)+0.1)*5.0)
nrmin=INT(SINND(1)*5.0)+1
C
SD(0)=0.0
do i=1,nrmax
SD(i)=float(i)*0.2
end do
C
C-----
open(unit=10,file=mr_output)
C
write(10,200) site_name,no_name,hiduke,sokutei,kiroku,
1          hyoukou,gwl
C
do i=nrmin,nrmax
mnr=0
do j=1,nnn
if(SINND(j).gt.SD(i-1) .and. SINND(j).le.SD(i)) then
mnr=mnr+1
end if
end do
C
zSD=(SD(i-1)+SD(i))*0.5
if(zSD .le. TQD(1))then
xITQ=zSD/TQD(1)*float(ITQ(1))
else

```

図 3.5-13 PDC による液状化システムの構築(10) (道路橋示方書・同解説 耐震設計編)

```

do k=1,nnt-1
  if (zSD.gt.TQD(k) .and. zSD.le.TQD(k+1)) then
    xITQ=float(ITQ(k+1)-ITQ(k))*(zSD-TQD(k))/(TQD(k+1)-TQD(k))
1      +float(ITQ(k))
    go to 70
  end if
end do
write(*,100)'*****ERROR TQ data sheet*****'
go to 99
end if
70  continue
c  -----<ミニラム仕様:kgf・cm>
c    xmnr=float(mnr)*0.5
c    Dnd=0.016*xITQ
c  -----<ミニラム仕様:N・m>
c    xmnr=float(mnr)*0.5
c    Dnd=xTQ*xITQ
c  -----<ラム仕様>
c    xmnr=float(mnr)
c    Dnd=0.004*xITQ
c
c    ihon=i/5+1
cc  -----トルク補正(kgf・cm)
c    xmnrN=xmnr-Dnd
c    if(xmnrN.lt.0.0)xmnrN=0.0
c
c    write(10,260)SD(i),ihon,mnr,xmnr,int(xITQ),Dnd,xmnrN
end do
c
c  close(10)
c
c  end if
c
c===== wave write
c
c  if(iwave.eq.1) then
c
c    nkk=nnn/100+1
c    do ia=1,nkk
c
c    kks=(ia-1)*100+1
c    kke=ia*100
c
c    if(ia.lt.10)then
c      w_output(iim+9:iim+9)='0'
c      w_output(iim+10:iim+10)=n(ia)
c    else
c      w_output(iim+9:iim+9)=n(ia/10)
c      w_output(iim+10:iim+10)=n((ia-(ia/10)*10))
c    end if
c    w_output(iim+11:iim+14)='.csv'
c
c  open(unit=10,file=w_output)
c
c    write(10,250) site_name,no_name
c    write(10,230) 'time',(tit2(i),i=kks,kke)
c
c    do i=1,2000
c      write(10,240) DD(i,1),(wave(j,i,1),j=kks,kke)
c    end do
c
c    do i=1,2000
c      write(10,240) DD(i,1),(wave(j,i,2),j=kks,kke)
c    end do
c
c  close(10)
c
c  end do
c
c  end if
c
c-----
c  write(*,100) no_name

```

図 3.5-14 PDC による液状化システムの構築(11) (道路橋示方書・同解説 耐震設計編)

```

        write(*,100)'***** compleated *****'
c----- format
100 format(a)
105 format(i5,1x,a)
110 format(5x,a,i5,f5.2)
115 format(3a)
120 format(i5)
121 format(i5,2f5.2,f6.3)
122 format(3i5)
123 format(i5,a)
124 format(i5)
125 format(f5.2,a)
126 format(2f5.1)
127 format(f5.1,f10.3)
130 format(2f5.2,a)
140 format(5x,4f10.5)
150 format(f10.3,5x,i5)
200 format(a,4(' ',a),' ',f5.2,' ',f5.2,3(' ',a),' ',f5.1,' ',f5.1,
1      ' ',f5.1,' ',f10.3)
201 format(a,4(' ',a),' ',f5.2,' ',f5.2,' ',f5.2,' ',2(a,' '),
1      f5.1,' ',f5.1,' ',f5.1,' ',f10.3)
210 format(i10,' ',a,' ',f10.3,' ',a,' ',3(f10.3,' '),2(f10.1,' '),
1      2(f10.3,' '),2(f10.5,' '),2(f10.1,' '),8(f10.5,' '),
2      f10.3,' ',f10.3,' ',f10.3,' ',f10.3)
220 format(31(a,' '))
230 format(3000(a,' '))
240 format(f10.1,' ',3000(f10.5,' '))
250 format(10(a,' '))
260 format(f5.2,' ',2(i5,' '),f5.1,' ',i5,' ',f10.3,' ',f5.1)
270 format(a,11,2a)
271 format(a,f5.2)
272 format(a,f5.1,a,f5.1)
273 format(a,f10.3)
c
99 continue
stop
end

```

図 3.5-15 PDC による液状化システムの構築(12) (道路橋示方書・同解説 耐震設計編)

4. ピエゾドライブコーン試験による液状化調査システムの検証

本章では、従来のボーリングによる標準貫入試験と粒度試験を用いて各種設計基準より液状化判定を行った結果とピエゾドライブコーン（PDC）による液状化判定結果の比較し、PDCによる液状化調査システムの妥当性を評価する。

液状化判定には、道路橋示方書・同解説 耐震設計編（平成 24 年）と建築基礎構造設計指針（平成 13 年）の方法を用いた。図 3.5-1 および図 3.5-2 に道路橋示方書・同解説および建築基礎構造設計指針の液状化判定の計算方法と PDC データ解析における検討条件を示した。

液状化判定の結果は、動的せん断強度比 R （建築は液状化抵抗比 τ/σ'_v ）、動的せん断応力比 L （建築は繰返しせん断応力比 τ_d/σ'_z ）、液状化抵抗率 F_L （建築は液状化安全率 F_L ）の深度分布図で示した。

4.1. ピエゾドライブコーン試験による液状化調査判定（道路橋示方書・同解説）

液状化の判定の対象地震は、レベル1地震動とした。レベル1地震動における水平設計震度の標準値は0.18である。データ解析に用いた地下水位および単位体積重量を表4.1-1に示す。

表 4.1-1 地下水位および単位体積重量

(a)茨城県神栖市堀割

地下水位	GL-0.95m
地層	単位体積重量(kN/m ³)
埋土（砂質土）	18.0
沖積粘性土	16.0
沖積砂質土	19.0

(b)千葉県香取市佐原

地下水位	GL-0.68m
地層	単位体積重量(kN/m ³)
沖積粘性土	16.0
沖積砂質土	18.0

(c)新潟県北蒲聖籠町東港

地下水位	GL-2.15m
地層	単位体積重量(kN/m ³)
沖積砂質土	18.0

(d)滋賀県守山市水保

地下水位	GL-1.05m
地層	単位体積重量(kN/m ³)
盛土（砂礫）	20.0
沖積粘性土	16.0
沖積砂質土	18.0

(e)千葉県浦安市舞浜

地下水位	GL-2.50m
地層	単位体積重量(kN/m ³)
盛土（礫混り土）	18.0
埋土（砂質土）	17.0
埋土（粘性土）	16.0
沖積砂質土	18.0
沖積粘性土	16.0

(f)埼玉県久喜市南栗橋

地下水位	GL-1.00m
地層	単位体積重量(kN/m ³)
埋土（砂質土）	18.0
沖積粘性土	16.0
沖積砂質土	18.0

(1) 茨城県神栖市堀割

図4.1-1に神栖市堀割の液状化判定結果を示す。PDCでは、埋土（砂質土）で液状化が発生し（ F_L 値<1.0）、沖積粘性土と砂質土は液状化が発生しない判定結果（ F_L 値 1.0）となった。この結果は、ボーリングおよび粒度試験による液状化判定結果と合致している。

(2) 千葉県香取市佐原口

図4.1-2に香取市佐原口の液状化判定結果を示す。PDCでは、沖積砂質土は大半が液状化する判定結果となった。この結果は、ボーリングおよび粒度試験による液状化判定と概ね合致している。なお、11m以深では地盤の動的貫入抵抗 N_d 値の影響により、PDCの液状化抵抗率 F_L 値が大きめの値を示す。

(3) 新潟県北蒲原聖籠町東港（新潟東港）

図 4.1-3 に新潟東港の液状化判定結果を示す。PDC では、全深度にわたり液状化しない判定結果 (F_L 値 1.0) となった。この結果は、ボーリングおよび粒度試験による液状化判定と合致している。

(4) 滋賀県守山市水保

図 4.1-4 に守山市水保の液状化判定結果を示す。PDC では、深度 11m 付近までは液状化層と非液状化層が細かな間隔で変化、11m 以深は液状化が生じない結果 (F_L 値 1.0) となった。一方、ボーリングおよび粒度試験による判定は、深度 11m までは液状化しない所 (F_L 値 1.0) も見られるが、全体的には液状化が発生する結果 (F_L 値 < 1.0) となった。この原因としては、細粒分含有率 F_C が 50% となるものの塑性指数 I_p が 15 以下の低塑性のシルトの挟在によるものと考えられる。すなわち、道路橋示方書では上記の低塑性のシルトは液状化判定の対象層となるが、塑性指数 I_p を評価できない PDC では、非液状化層と判定するためである。深度 19m ~ 20m において、PDC の液状化抵抗率 F_L 値がボーリングおよび粒度試験よりも大きいのは、地盤の動的貫入抵抗 N_d 値の影響によるものである。

(5) 千葉県浦安市舞浜 (浦安運動公園)

図 4.1-5 に浦安市運動公園の液状化判定結果を示す。PDC では、深度 11m までは大半が液状化する結果 (F_L 値 < 1.0) となった。この結果は、ボーリングおよび粒度試験による液状化判定と合致している。深度 11m ~ 13m において、PDC の液状化抵抗率 F_L 値がボーリングおよび粒度試験よりも大きいのは、地盤の動的貫入抵抗 N_d 値の影響によるものである。深度 13m 以深の PDC の液状化判定結果の傾向は概ねボーリングおよび粒度試験による液状化判定と合致している。

(6) 埼玉県久喜市南栗橋

図 4.1-6 に久喜市南栗橋の液状化判定結果を示す。PDC では、埋土 (砂質土) で液状化が発生し (F_L 値 < 1.0) 沖積粘性土は液状化対象外となる判定結果となった。この結果は、ボーリングおよび粒度試験による液状化判定結果と合致している。8m 以深において、PDC の液状化抵抗率 F_L 値がボーリングおよび粒度試験よりも大きいのは、地盤の動的貫入抵抗 N_d 値の影響によるものである。

PDC の液状化判定結果は、動的貫入抵抗 N_d 値と細粒分含有率 F_C を適正に評価することでボーリングおよび粒度試験による判定結果と概ね整合し、PDC による液状化調査システムの妥当性を確認した。

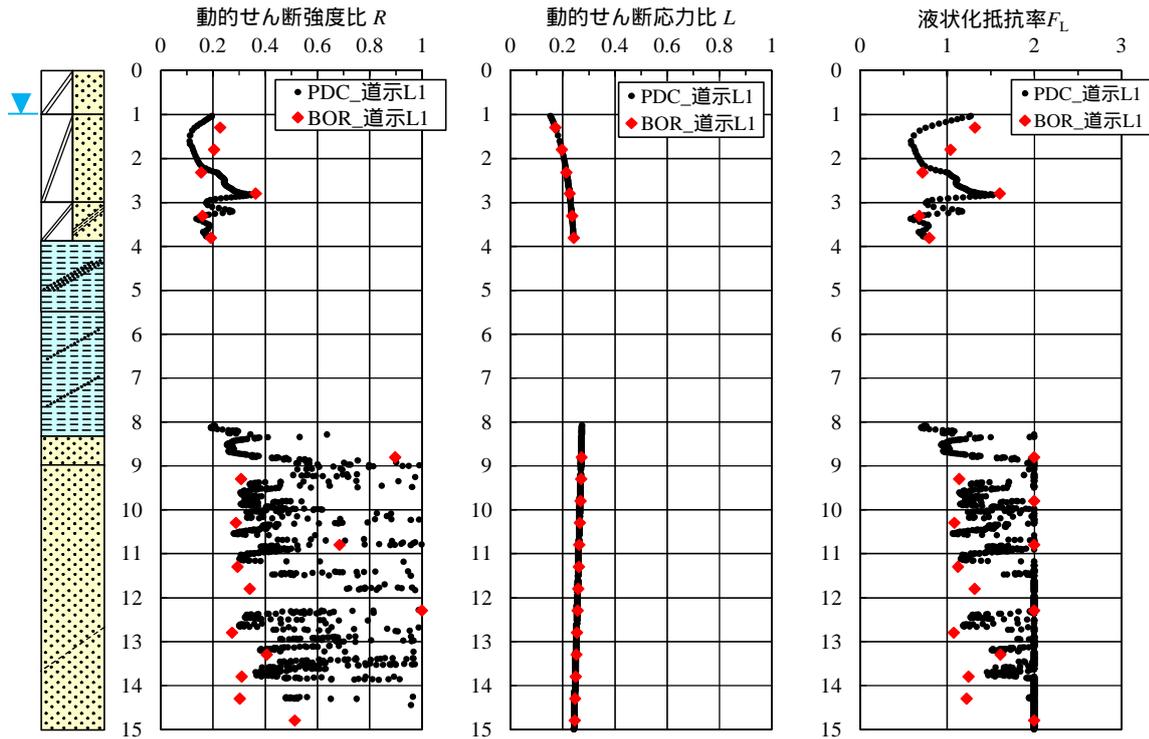


図 4.1-1 液化化判定結果（道路橋示方書レベル1地震、茨城県神栖市堀割）

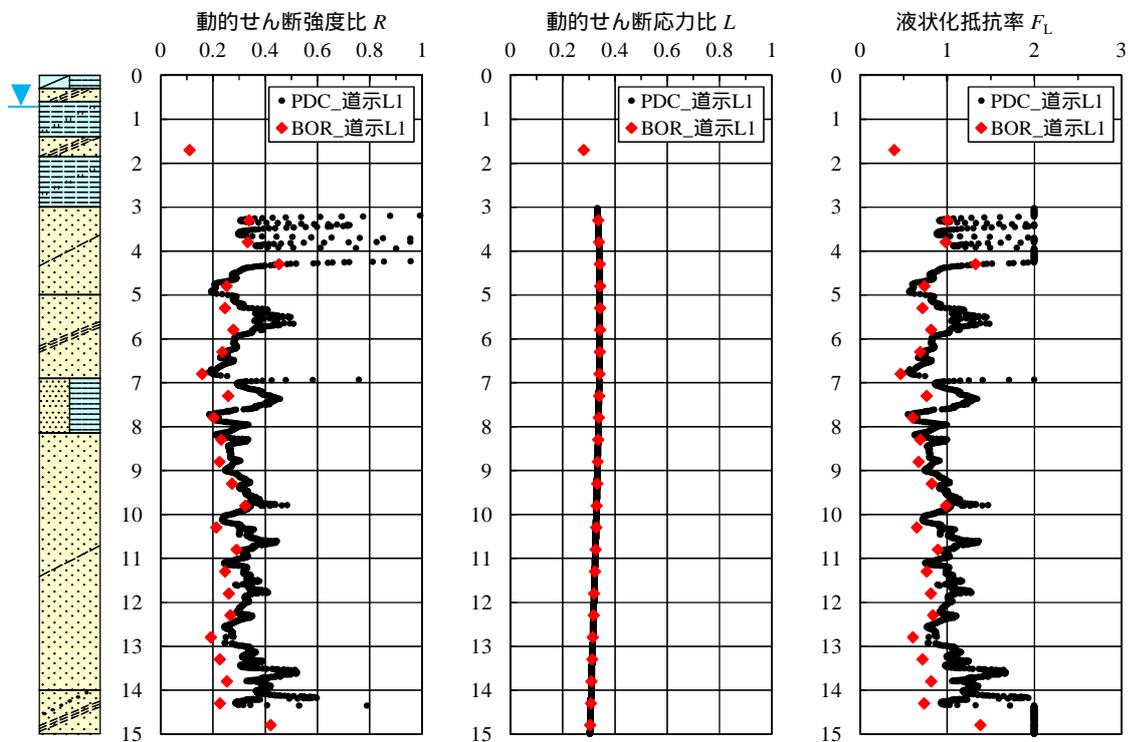


図 4.1-2 液化化判定結果（道路橋示方書レベル1地震、千葉県香取市佐原口）

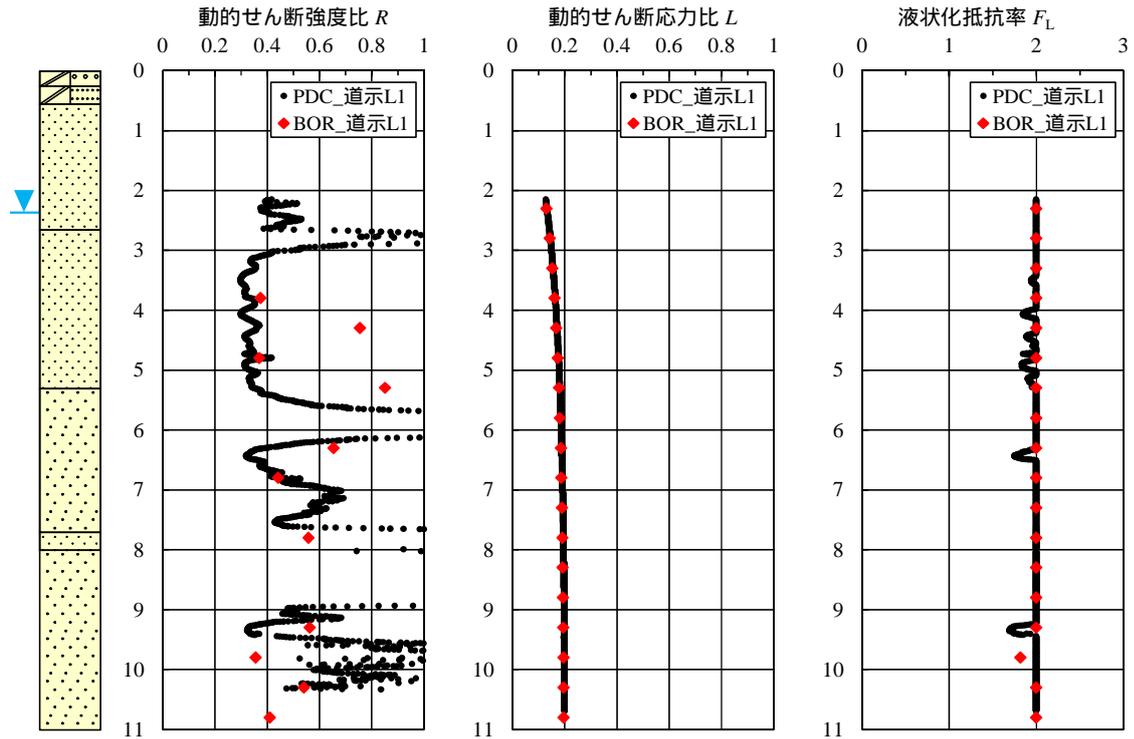


図 4.1-3 液状化判定結果（道路橋示方書レベル1地震、新潟県北蒲原聖籠町東港）

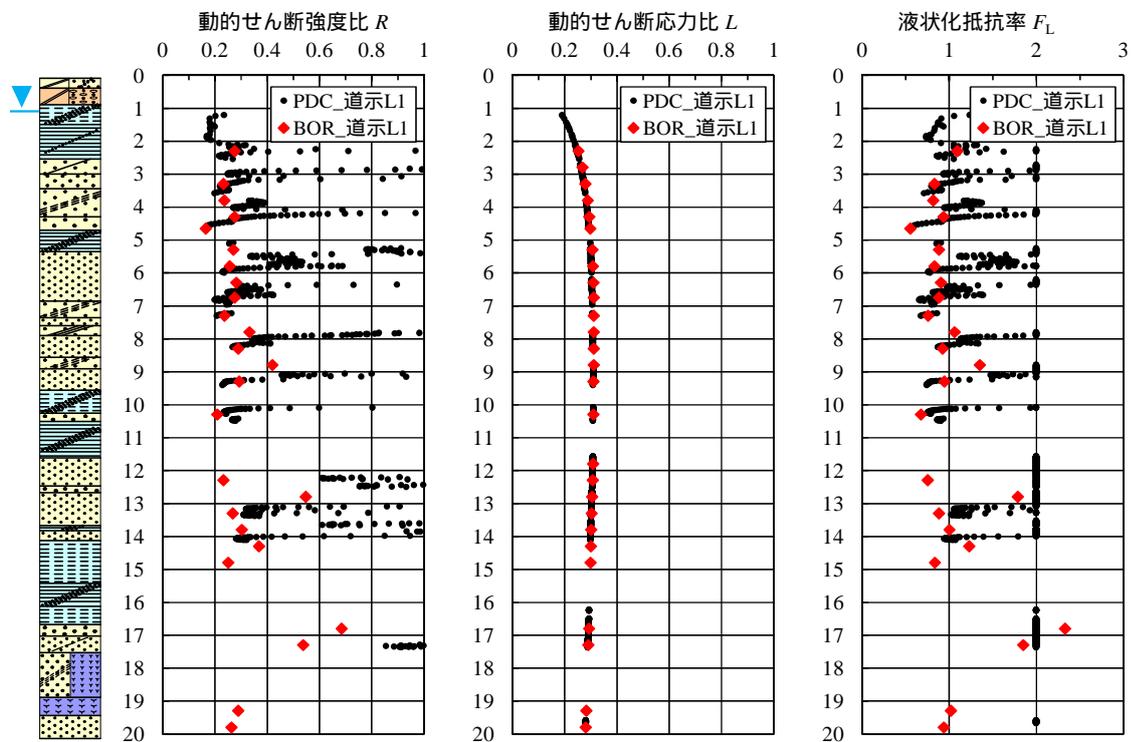


図 4.1-4 液状化判定結果（道路橋示方書レベル1地震、滋賀県守山市水保）

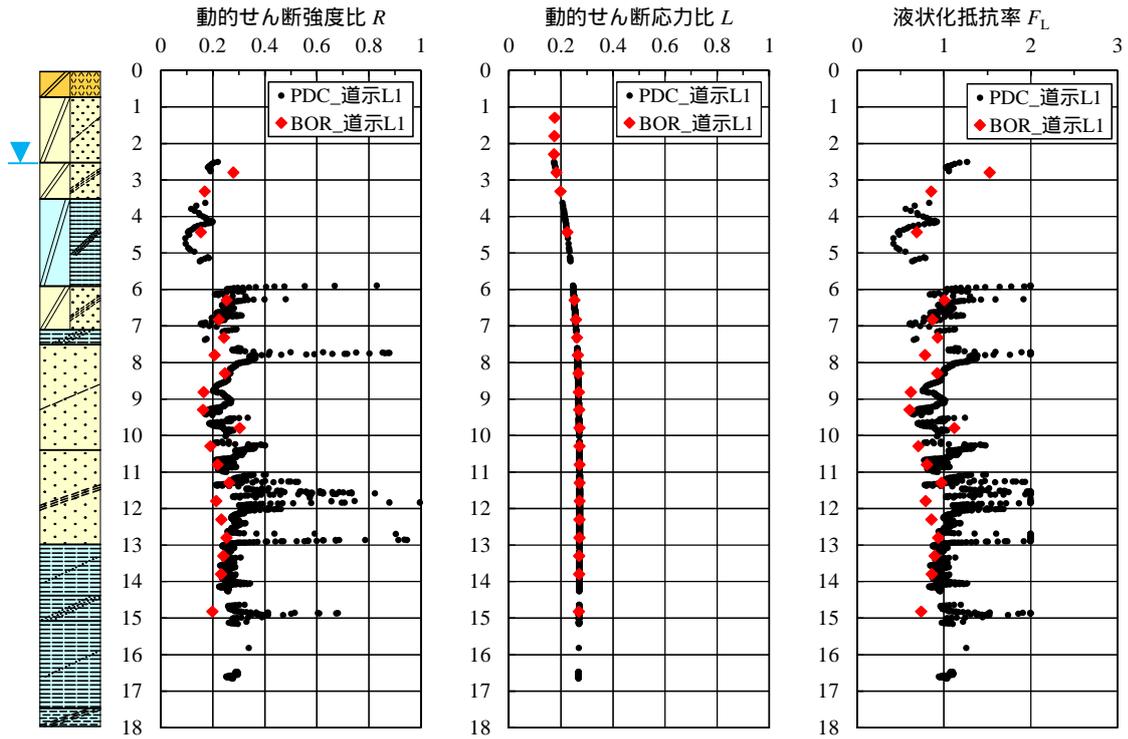


図 4.1-5 液状化判定結果（道路橋示方書レベル1地震、千葉県浦安市舞浜）

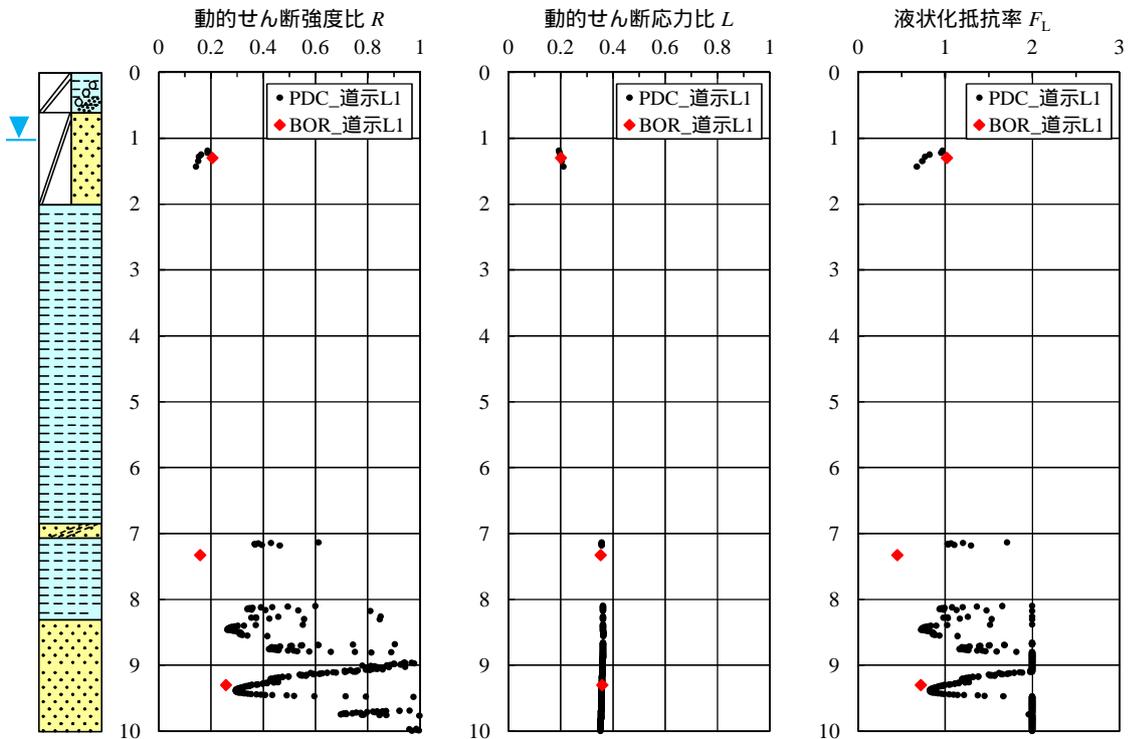


図 4.1-6 液状化判定結果（道路橋示方書レベル1地震、埼玉県久喜市南栗橋）

4.2. ピエゾドライブコーン試験による液状化調査判定（建築基礎構造設計指針）

液状化判定の対象地震は、中地震とした。中地震の地表面最大加速度は標準値 200gal、マグニチュードは 7.5 を用いた。

(1) 茨城県神栖市堀割

図 4.2-1 に神栖市堀割の液状化判定結果を示す。PDC では、埋土（砂質土）で液状化が発生し（ F_L 値 < 1.0 ）、沖積粘性土と砂質土は液状化が発生しない判定結果（ F_L 値 1.0 ）となった。この結果は、ボーリングおよび粒度試験による液状化判定結果と合致している。なお、9m 以深については、図 4.1-1 に示した道路橋示方書の判定結果よりもボーリングおよび粒度試験による液状化判定結果との開きが大きくなる。

(2) 千葉県香取市佐原口

図 4.2-2 に香取市佐原口の液状化判定結果を示す。PDC では、沖積砂質土が非液状化層と液状化層が互層状に分布する結果となった。全体的には非液状化層の方がやや多い。一方、ボーリングおよび粒度試験による液状化判定は、液状化層の方がやや多く、異なる結果となった。

(3) 新潟県北蒲原聖籠町東港（新潟東港）

図 4.2-3 に新潟東港の液状化判定結果を示す。PDC では、全深度にわたり液状化しない判定結果（ F_L 値 1.0 ）となった。この結果は、ボーリングおよび粒度試験による液状化判定と合致している。

(4) 滋賀県守山市水保

図 4.2-4 に守山市水保の液状化判定結果を示す。PDC では、深度 11m 付近までは液状化層と非液状化層が細かな間隔で変化、11m 以深は液状化が生じない結果となった。一方、ボーリングおよび粒度試験による判定結果は、深度 11m までは液状化抵抗率 F_L 値が 1.0 を前後する結果となった。深度 19m~20m において PDC の液状化抵抗率 F_L 値がボーリングおよび粒度試験よりも大きくなるのは、地盤の動的貫入抵抗 N_d 値の影響によるものである。

(5) 千葉県浦安市舞浜（浦安運動公園）

図 4.2-5 に浦安市運動公園の液状化判定結果を示す。PDC では、深度 11m までは大半が液状化する結果（ F_L 値 < 1.0 ）となった。この結果は、ボーリングおよび粒度試験による液状化判定と合致している。深度 11m~13m において、PDC の液状化抵抗率（ F_L 値）がボーリングおよび粒度試験よりも大きいのは、地盤の動的貫入抵抗（ N_d 値）の影響によるものである。深度 13m 以深の PDC の液状化判定結果の傾向は概ねボーリングおよび粒度試験による液状化判定と合致している。

(6) 埼玉県久喜市南栗橋

図 4.2-6 液状化判定結果（建築基礎構造設計指針中地震、埼玉県久喜市南栗橋）に久喜市南栗橋の液状化判定結果を示す。PDC では、埋土（砂質土）で液状化が発生し（ F_L 値 < 1.0 ）、沖積粘性土は液状化対象外となる判定結果となった。この結果は、ボーリングおよび粒度試験による液状化判定結果と合致している。8m 以深において PDC の液状化抵抗率（ F_L 値）がボーリングおよび粒度試験よりも大きくなるのは、地盤の動的貫入抵抗（ N_d 値）の影響によるものである。

PDCの液状化判定結果は、動的貫入抵抗 N_d 値と細粒分含有率 F_C を適正に評価することでボーリングおよび粒度試験による判定結果と概ね整合し、PDCによる液状化調査システムの妥当性を確認した。

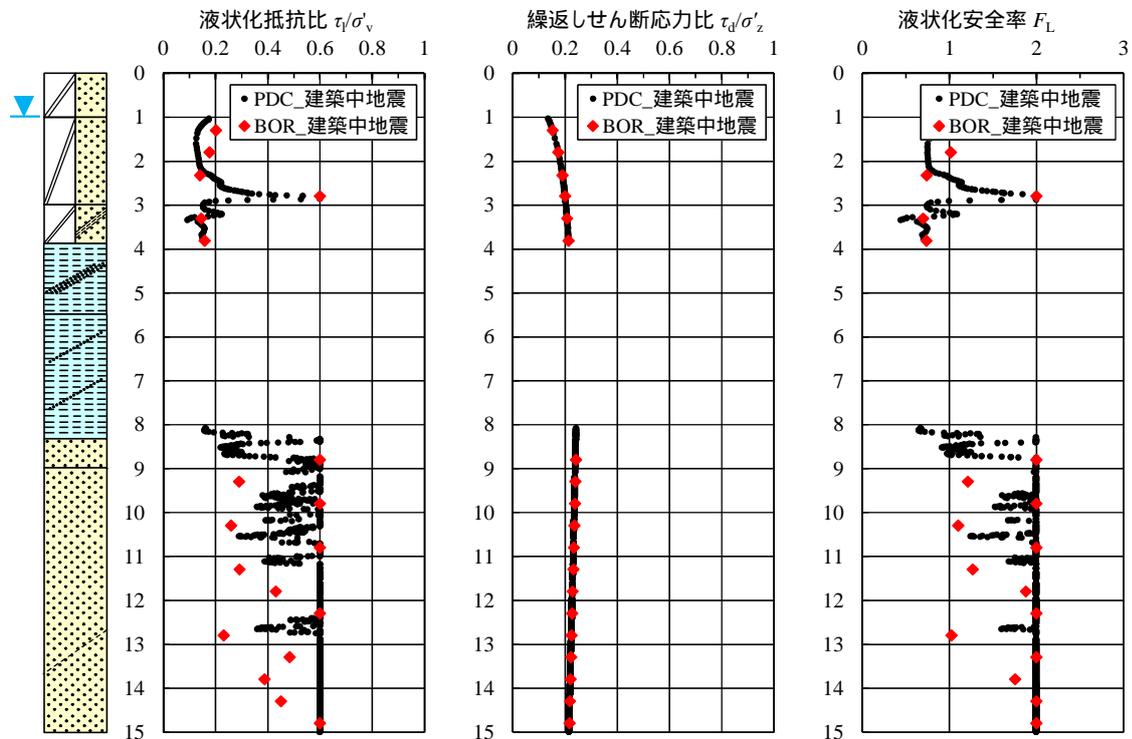


図 4.2-1 液状化判定結果（建築基礎構造設計指針中地震、茨城県神栖市堀割）

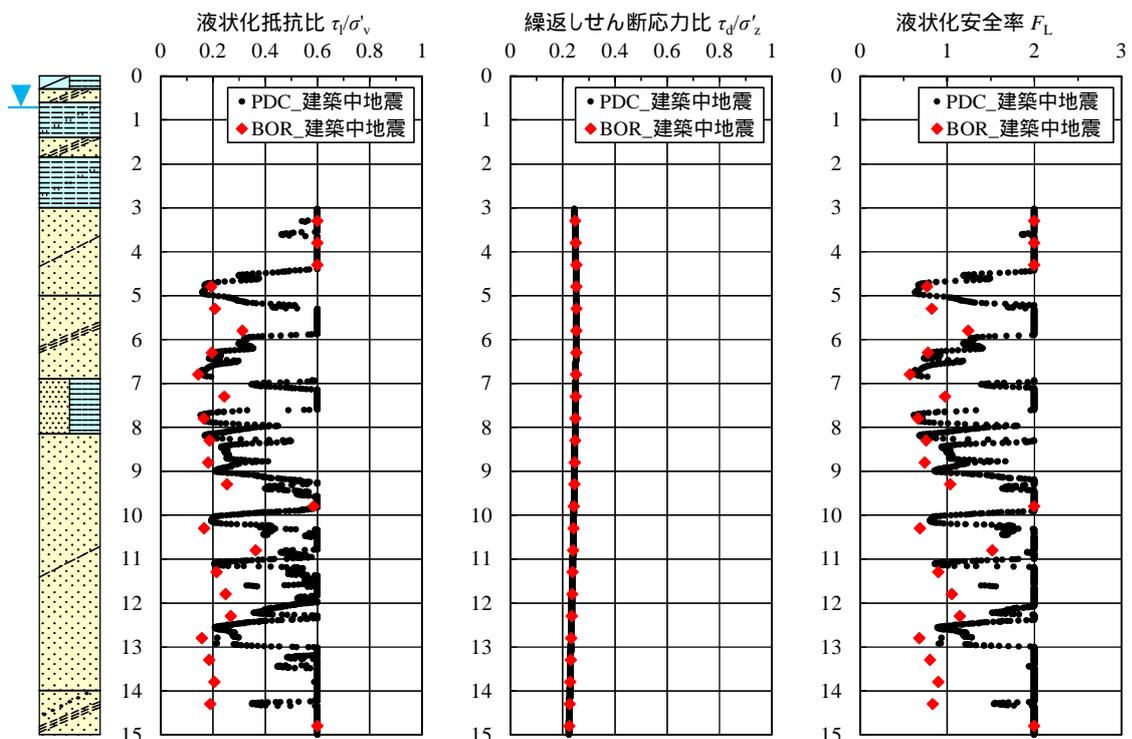


図 4.2-2 液状化判定結果（建築基礎構造設計指針中地震、千葉県香取市佐原口）

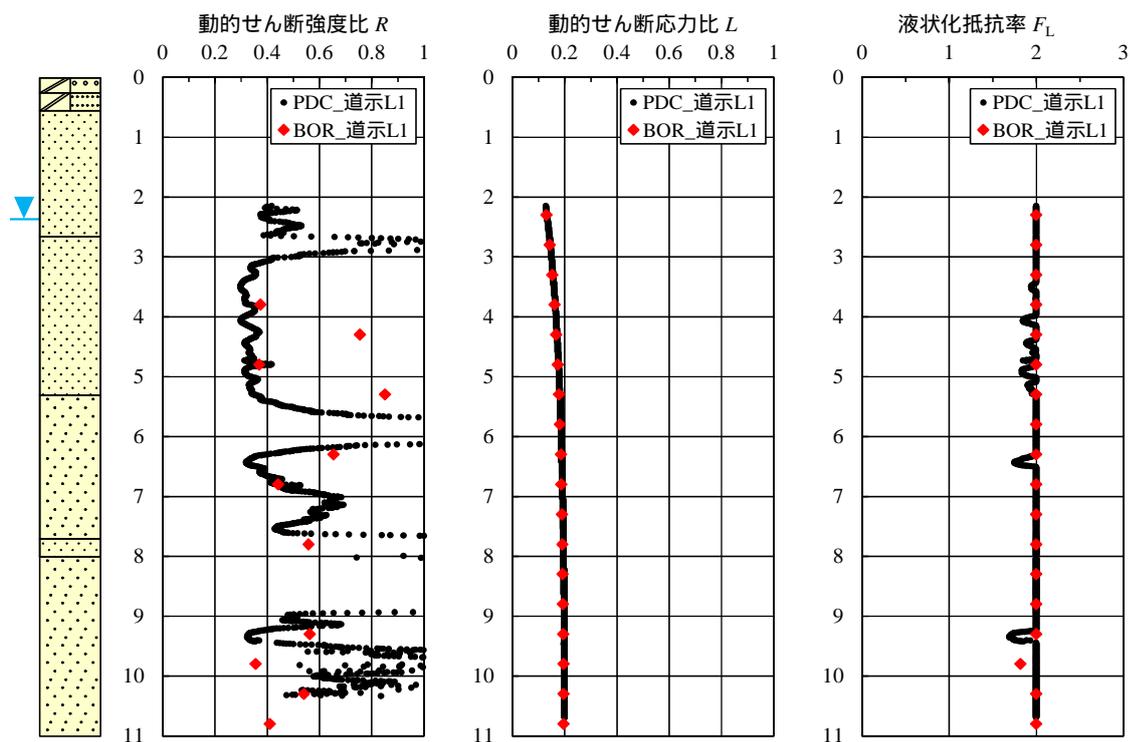


图 4.2-3 液状化判定結果（建築基礎構造設計指針中地震、新潟県北蒲原聖籠町東港）

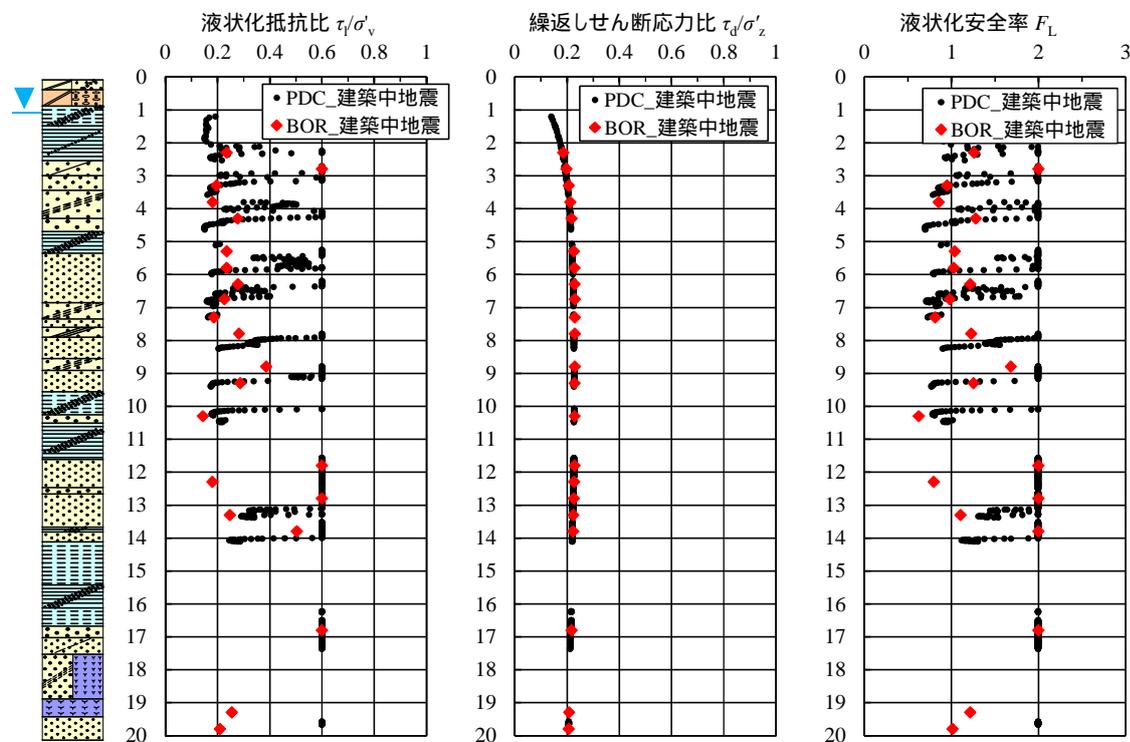


图 4.2-4 液状化判定結果（建築基礎構造設計指針中地震、滋賀県守山市水保）

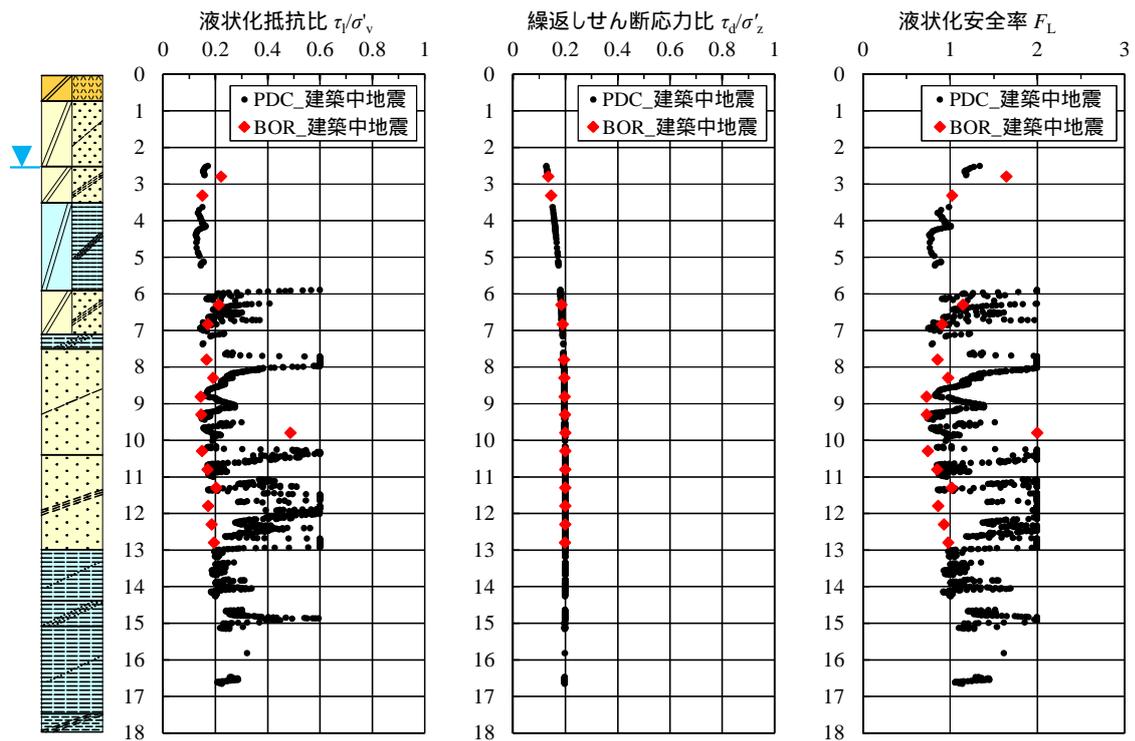


図 4.2-5 液状化判定結果（建築基礎構造設計指針中地震、千葉県浦安市舞浜）

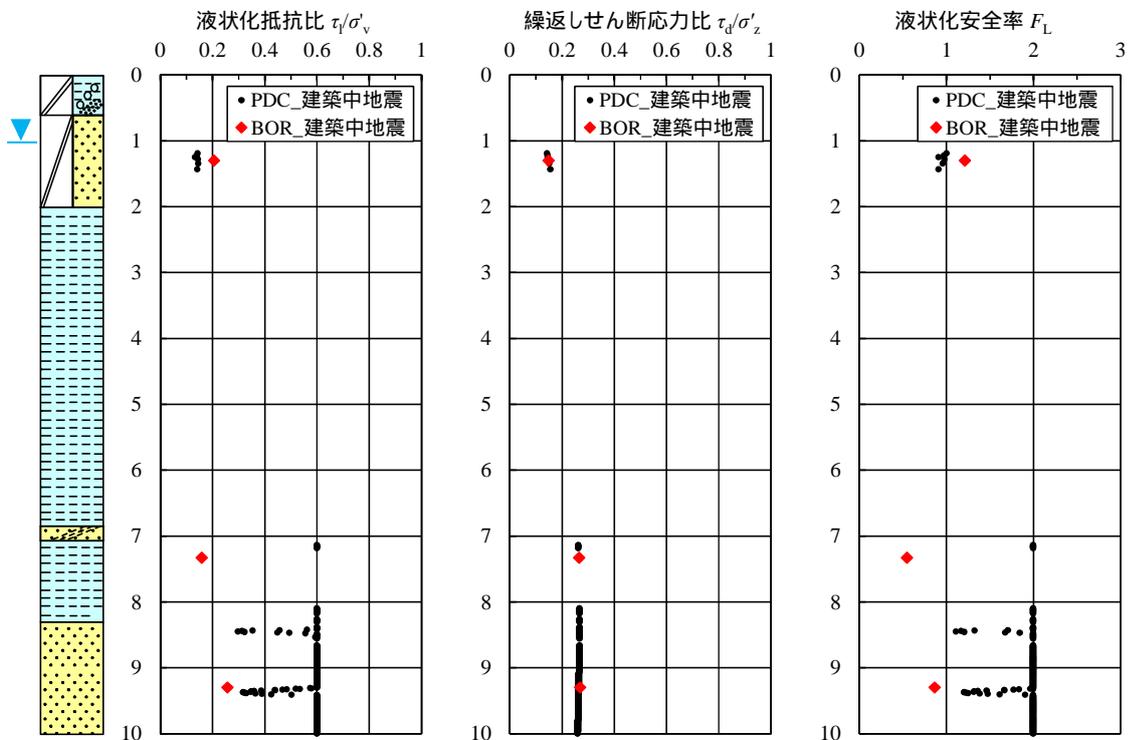


図 4.2-6 液状化判定結果（建築基礎構造設計指針中地震、埼玉県久喜市南栗橋）

5. まとめ

リアルタイム液状化判定装置ピエゾドライブコーン(PDC)は、動的コーン貫入試験による1打撃毎の貫入量と過剰間隙水圧の計測により地盤の動的貫入抵抗 N_d 値(推定 N 値)と細粒分含有率 F_C の評価が可能であることから、地下水位 GWL を設定することにより液状化強度 R_L を推定することができる試験法である。過剰間隙水圧比 u_R/σ'_v と細粒分含有率 F_C は非常に良い相関を確認しているが、両者の定式化に用いたデータには限りがあることから、現状では必ずしも十分な実用性を有するには至っていない。そこで、埋立地盤(浚渫)、自然地盤(三角州、中洲、砂丘)等の堆積環境の異なる地盤で現場実験を行い、液状化検討に必要となる基本的な地盤物性およびPDCの計測データを取得し(160データ)、両者の相関を精査した。その結果、これまで同様に原点を通る一次式で近似されることを確認するとともに、信頼性を表す決定係数の向上が見られた。また、間隙水圧の計測値から静水圧を差し引いた過剰間隙水圧による細粒分含有率の推定式(新推定式)を示した。新推定式に用いることで、砂地盤の細粒分含有率の推定精度を向上させることができた。

地盤の動的貫入抵抗 N_d 値については、一般に10mより深度が深くなるとトルク補正を行っても標準貫入試験の N 値よりも大きめの値を示すことが多く、これまでは代表地点においてボーリングによる標準貫入試験を実施し、トルク補正係数のキャリブレーションを行ってきた。そこで、地盤の動的貫入抵抗 N_d 値のトルク補正に代わる方法として、新たにエネルギー効率による補正法を提案した。先端コーンに内蔵した荷重計で直接的に先端コーンに伝達されるエネルギー E_C を算出し、ハンマーの落下エネルギー Mgh に対するエネルギー比(エネルギー効率 e_{PDC})を用いて補正することで、10m以深においても N 値に概ね整合する結果が得られることを現場実験により明らかにした。更に、標準貫入試験のエネルギー効率 e_{SPT} を考慮することで、更に N 値の推定精度が向上する方向性が示された。標準貫入試験のエネルギー計測は本研究でも試みたが、貫入量を正しく計測することができなかった。今年、再計測を計画している。また、PDCの計測値(貫入量 D 、ロッドのトルク M_v 、間隙水圧 u_R)によるエネルギー効率 e_{PDC} の推定法を検討したが、両者の関係の定式化には至らなかった。

地下水位については、圧力センサの各種応答値から地下水位の指標となる値を抽出した。その結果、均質な砂より成る自然地盤では打撃前の圧力 u_s 、砂質土と粘性土が混在する不均質な埋立地盤では最大圧力比 u_{max}/σ'_v と地盤により地下水位の指標値が異なり、今後も更なるデータの蓄積が必要となった。なお、液状化の検討が必要となる地盤は、比較的浅い深度に地下水位が分布しており、試験後に試験孔を用いた孔内水位の測定が可能である。現状では、試験孔の孔内水位測定を併用する方法を別途提案した。

次に、PDCの動的貫入抵抗 N_d 値、細粒分含有率 F_C 、地下水位 GWL を用いて道路橋示方書・同解説の方法より算出した液状化強度 R_L と、ボーリングによる乱れの少ないサンプリング試料を用いて液状化試験により直接求めた液状化強度 R_{L20} の比較検討を行い、PDCによる液状化強度 R_L の推定法を確立した。

最後に、道路橋示方書・同解説「耐震設計編(平成24年)および建築基礎構造設計指針(平成13年版)に準拠したPDCの液状化調査システムを構築し、液状化判定結果(液状化抵抗率 F_L 値)について、ボーリングおよび粒度試験による方法と比較検討を行った。PDCによる液状化判定結果は、動的貫入抵抗 N_d 値と細粒分含有率 F_C を適正に評価することでボーリングおよび粒度試験による判定結果と概ね整合し、PDCの液状化調査システムの妥当性を確認した。

PDCの更なる高度化に向けた課題としては、細粒分含有率 F_C が50%以上で塑性指数 I_p が15以下となる低塑性の地盤材料の評価、PDCによる動的貫入抵抗 N_d 値のエネルギー効率による補正が挙げられる。PDCでは細粒分含有率 F_C が50%以上の土層は液状化の検討対象外と判定しているが、各種技術基準では細粒分含有率 F_C が50%以上であっても塑性指数 I_p が15以下となる低塑性の地盤材料は液状化の検討対象となる。地盤の貫入抵抗 N_d 値については、エネルギー効率 e_{PDC} による補正法を提案したが、PDCの計測値(貫入量 D 、ロッドのトルク M_v 、間隙水圧 u_R)とエネルギー効率 e_{PDC} の定式化には至らなかった。今後は、更なるデータの蓄積により検討を継続するとともに、PDC先端コーンに荷重計を追加した間隙水圧と荷重を計測する2成分動的コーン貫入試験装置を開発する。

【参考文献】

- 1) Shun-ichi Sawada, Ikuro Towhata : ISSMGE Bulletin : Volume5, pp.15-25, 2011.
- 2) 菅原紀明, 鈴木勝久, 菅原章治 : 小型動的貫入試験機の開発とその利用, 全地連「技術フォーラム '97」, pp.461-464, 1997.
- 3) 馬場香奈江, 利藤房男, 澤田俊一, 吉澤大造, 藤井紀之, 規矩大義, 山口恵美 : ピエゾドラブコーンによる細粒分含有率の推定に関する現場実験, 第48回地盤工学研究発表会, pp.357-358, 2013.
- 4) 西山 備, 馬場香奈江, 規矩大義, 山口恵美, 利藤房男, 澤田俊一, 吉澤大造, 藤井紀之 : ピエゾドライブコーンによる N 値の推定精度に関する現場実験, 第48回地盤工学研究発表会, pp.359-360, 2013.
- 5) 山口恵美, 利藤房男, 澤田俊一, 規矩大義 : 滋賀県守山市における地盤調査一斉試験(その5 PDC), 第48回地盤工学研究発表会, pp.179-180, 2013.
- 6) 北野真司, 堀之内富夫, 米森博喜, 澤田俊一, 吉澤大造, 藤井紀之, 信本 実, 植村一瑛 : 小型動的貫入試験(ミニラム)のエネルギー効率測定, 第48回地盤工学研究発表会, pp.349-350, 2013.
- 7) ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing, SPT Working Party[1988] : Standard penetration test (SPT):International reference test procedure, Penetration Testing 1988, ISOPT, Balkema, Rotterdam
- 8) 藤田圭一 : 標準貫入試験のメカニズム, N 値の解釈と評価, 基礎工[1997], Vol.25, No.12, pp.2-13.
- 9) 松本樹典, 下野慎也, Le Ta PHAN, 大島昭彦, 西村真二[2013] : 滋賀県守山市における地盤調

査一斉試験（その 8：SPT および各種 DCPT の打撃効率の測定結果），第 48 回地盤工学研究
発表会，pp.185-186.

10) 牧原依夫・窪田洋司：標準貫入試験における打撃応力の測定[1996]：第 31 回地盤工学研究
発表会講演集，pp.413-414.

図-1 エネルギー損失