様式第11 別紙2

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

(1) 課 題 名:各種センサ等を用いたコンクリート工事における品質管理の高度化・ 工期短縮化技術の開発

(2) 研 究 期 間: 平成 28~29 年度

(3) 交付申請者名:野口 貴文(東京大学・教授)

(4) 研究代表者名:野口 貴文(東京大学・教授)

(5) 共同研究者名:北垣 亮馬 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻

西島 茂行 児玉株式会社エンジニアリング事業部

山本 秀之 児玉株式会社エンジニアリング事業部 商品開発部 山内 匡 日本国土開発㈱技術センター コンクリート研究室

(6) 補助金交付総額: 24,830,000円

(7) 技術研究開発の目的

各種センサを用いたセンシング技術によって、コンクリート工事の施工段階における品質管理の高度化を図ると共に、施工の最適化、即ち工期短縮につながるセンサ搭載型枠システムの開発を行なう。

開発の具体的な取組みとしては、以下に挙げる管理・検知等に関する要素技術を確立した上で、それら諸機能を実装したセンサユニットを搭載したコンクリート型枠を端末とし、タブレット PC 等をホストとする無線式センサ搭載型枠システムの構築を図る。

- ①温度センサと湿度センサの複合化によるコンクリート強度管理方法の確立
- ②温度センサによるマスコンクリート内部温度推定に基づく温度ひび割れ管理方 法の確立
- ③加速度センサによる型枠取り外し時期検知方法の確立
- ④加速度センサによるコンクリートの締固め度合い検知方法の確立
- ⑤コンクリートの密実性検知方法の確立
- ⑥温度センサと熱源を用いたコンクリート加熱養生方法の確立
- (8) 技術研究開発の内容と成果

前項に挙げた各開発テーマ(①~⑥項)の成果について、以下に概要を示す。

①温度センサと湿度センサの複合化によるコンクリート強度管理方法の確立

温度のみによる若材齢コンクリートの強度推定手法に湿度の要素を新たに加え、 セメント等の水和反応率に基づく材齢 4 週まで適用し得るコンクリートの強度推定式を 確立する。

*研究開発の内容と成果

1)強度推定モデルを確定し、測定試験を開始

温度のみに依存する有効材齢法を用いると、スラブのような表面積の大きい部材において、表面含水率の低下により良好な推定結果が得られないことが判明してお

り、これを考慮した有効材齢法に拡張する必要があると考えられる。 初年度は、モルタル実験により対象とするスラブ表面を想定した表層湿度を測定できるかの確認を行ない、W/C=50%、W:C:S=1:2:3のモルタルの配合で、表面及び 60mm 深さの湿度を測定した。

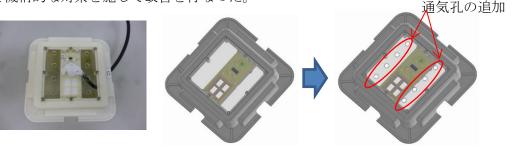
コンクリート打ち込みからの経時に合わせて、表層および深さ 60mm における湿度の変化を測定できることを確認した。その上で、深さごとに湿度とセメントの反応率との関係を確認するために、試験体を作製した。

また、次年度における本実験結果に基づく温度の影響と湿度の影響との統合化に向けて、既往研究の調査を行ない、有効材齢法への湿度の組込み方法(湿度の影響を表す関数形)を検討した。

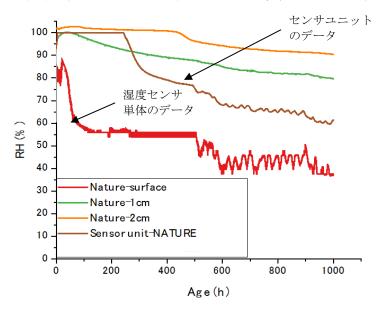
さらに、次年度における実証実験用において用いる湿度センサユニットおよび基板を開発した。湿度センサの開発では、センサの選定を行なうとともに、実証実験用に向けて基板の開発およびセンサの基板への実装を行なった。一方、センサユニットの開発では、スラブでの使用を前提に、天候の影響を余り受けない構造のユニットを設計・試作した。

2) センサユニットの課題改善:湿度データの応答性の改善

初年度に製作した湿度センサユニットで実験を行なったところ、周辺湿度に対してユニット内の湿度センサの変化が緩慢ということが判明した為、通気孔の増設など機構的な対策を施して改善を行なった。



更に湿度変化に対する応答性を向上する為、センサユニット内の湿度センサの周囲の空気流路を変えて通気性を良くしたところ、従来よりも応答性が改善された。



②温度センサによるマスコンクリート内部温度推定に基づく温度ひび割れ管理方法の確立

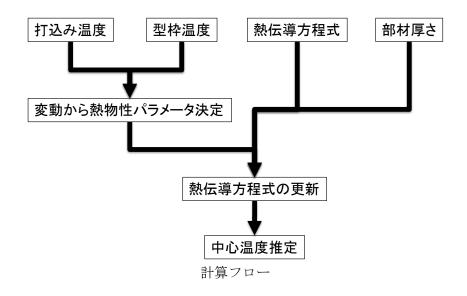
型枠に搭載したセンサユニット(以降、センサユニット)内に複数の温度センサを実装し、型枠を通過する熱流を算出することによって、コンクリート構造体の内部温度の推定を行なうことができる方法を確立する。

*研究開発の内容と成果

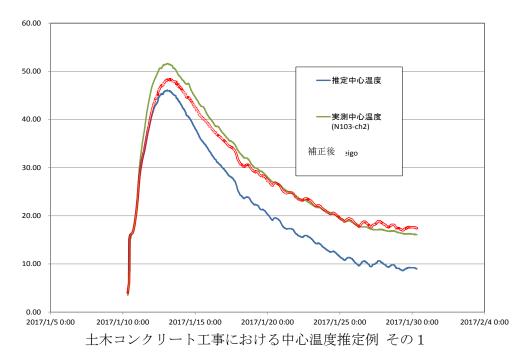
コンクリート構造物に求められる品質性能が高まりつつある。若材齢コンクリートの品質管理は難しく、現場の状況判断に大きく依存しているという現状である。コンクリート表面の正確な温度計測、養生期間の時間計測によって、正確な脱型時期の判断や温度管理などが可能となる。そこで、本研究ではコンクリートの表面温度を温度計付き型枠(スマート型枠)で測定することで、中心内部温度を推定し、断面のコンクリートの温度分布によって生じる温度ひび割れ管理に役立てることを目的とする。

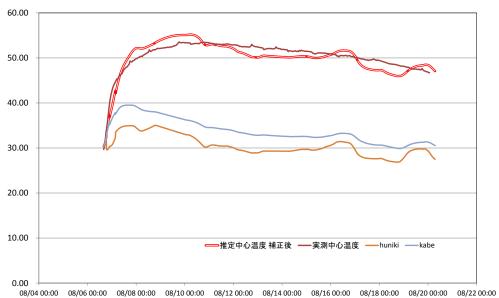
1) 型枠と生コンクリートの打ち込み時の温度差解消にかかるタイムラグを利用した熱物性評価を熱伝導方程式に組み込むことで内部温度推定が可能となる計算プロセスを構築した.

下図に計算プロセスの概要を示す.



2) これまでの手法をもとに、実構造物に対して温度推定の実証試験を行い、部材大きさにかかわらず推定可能であることが明らかとなった。下図にコンクリート工事における打ち込み部材の中心温度の実測結果と推定結果の比較である。最終年度の補正項の導入により初年度よりも大幅に精度が改善した。





土木コンクリート工事における中心温度推定例 その2

以上により、以下の本技術開発によって結論が得られた。実構造物のコンクリート工事に本技術を適用したところ、中心温度実測結果と推定結果のグラフの概形はほぼ一致しており、推定の精度は高いと言える。また、昨年度まで:部材の厚みによって推定の精度に差があった点について、蓄熱成分の考え方を補正項として導入することで、中心内部温度の推定を行ったところ部材の厚さによらず推定ができるようになった。

これをもってひとまず当初目標は十分達成したと考えるが、一方で、コンクリート工事中における日射の影響まだ改善の余地があると思われる

③加速度センサによる型枠取り外し時期検知方法の確立

センサユニット内に各種センサを実装し、打設・脱型の実験を行い、センサの挙動変化 から型枠取り外し時期を特定できる方法を確立する。

*研究開発の内容と成果

1)型枠取り外し時期の検知方法の妥当性検証実験

実際の橋脚現場(福島県南相馬市)にて、センサユニットを設置し型枠取り外し 時期の検知方法の妥当性検証実験を実施した。

福島県南相馬市の現場において、センサユニットを設置して、型枠取り外し時期の検知方法の妥当性に関する検討を行なった。その結果、加速度センサと静電センサを併用することで、型枠取り外し時期を高い精度で判定できることがわかった。

また同時に、温度データからもコンクリートの打込み状況を検出し得るという新たな知見も得られた。

結果、加速度センサと静電センサを併用することで、型枠取り外し時期が判定できることが実証できた。 追加実験でさらに精度を上げ確証を得たい。

2) 追加実験:型枠取り外し時期の検知方法の妥当性検証実験

環境条件の違う4か所の実現場にて、センサユニットを設置して、型枠取り外し 期検知方法の妥当性に関する検討を行なった。

2)-1 実現場検証例





検証例2:奈良県 橋梁現場

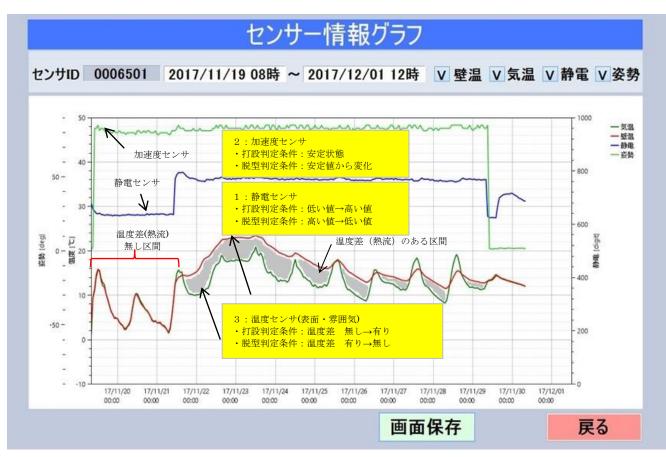


検証例3:岩手県 防潮堤現場



検証例 4: 新潟県 ボックスカルバート現場

2)-2 センサ情報データ (検証例1大阪府 橋梁現場 の事例)



2)-3. 検証結果

・実現場データを検証した結果、各センサ①静電センサ ②加速度(姿勢)センサ ③温度センサ(コンクリート/雰囲気)の 挙動により、打設・脱型時期を正確に特定できることが検証できた。

※各センサの打設及び脱型の判定条件として下記を得た。

①静電センサ

打設判定条件:低い値→高い値へ変化する時点 脱型判定条件:高い値→低い値へ変化する時点

②加速度センサ

打設判定条件:安定状態

脱型判定条件:安定状態から変化する時点

③温度センサ

打設判定条件:温度差(熱流)無し→有りへ変化する時点 脱型判定条件:温度差(熱流)有り→無しへ変化する時点 ※温度差(熱流)=コンクリート表面温度と雰囲気温度の差

また同時に、温度データからもコンクリートの打込み状況を検出し得るという 新たな知見も得られた。

2)-4 今後の取り組み

スマートセンサのデータを収集・解析するリーダーアプリに今回の脱型判定のロジックを組み込み、フィールドテストを継続して行きたい。

④加速度センサによるコンクリートの締固め度合検知方法の確立

バイブレータ加振時にコンクリートが受ける振動エネルギーを、コンクリート型枠に搭載されたスマートセンサ内の加速度センサによって検知し、コンクリートの品質に大きな影響を与えるコンクリートの締固め度合いを評価する方法を確立する。

*研究開発の内容と成果

1)配合影響など基礎調査を実施し、技術の確立目指す

バイブレータ加振時にコンクリートが受ける振動エネルギーを、コンクリート型枠に搭載されたスマートセンサ内の加速度センサによって検知し、コンクリートの品質に大きな影響を与えるコンクリートの締固め度合いを評価する方法の確立を目的に、本年度は以下の課題について取り組んだ。

- i) スマートセンサ内の加速度センサによって測定された加速度値の妥当性
 - 一般的な加速度計(ひずみゲージ式加速度計)によって測定された値との違い
- ・いずれの受感方向(X、Y、Z)の値に着目すべきか
- ・バイブレータからの距離との関係
- ii) 振動エネルギーの算出方法
- iii) コンクリートの締固め度合の判断基準設定の可能性

成果:

それぞれ以下の結果が得られた。

- i)については、ひずみゲージ式加速度計等の一般的な加速度計の振動伝搬方向の加速度と、型枠に設置したスマートセンサ内の Z 方向の加速度は同等であること。スマートセンサ内の Z 方向の加速度は、バイブレータからの距離が同じコンクリート中に作用している加速度を示していると評価できることを確認した(図 1 4)。
- ii) については、締固め完了エネルギーの目標値を1000(m/s2×s)とした場合、加速度と振動時間(経過時間)から算出した振動エネルギーによって、振動締固めの評価が可能であることがわかった(図15)。
- iii) については、バイブレータによる締固め時にコンクリートに作用する締固めエネルギーを(1)式、また締固め時間 t 秒間の累積振動締固め総エネルギーE を(2)式で評価したところ、累積振動締固め総エネルギーとコア強度との関係から、コンクリートの締固め度合を判断する基準を設定できることがわかった(図16)。なお、既往の研究では、スランプ15cm の締固め完了エネルギーを0.63 (J/L) としている。

来年度は、コンクリートの締固め度合いを実際の現場で判断できる基準を設定する 予定であり、累積振動締固め総エネルギーと強度との関係に及ぼすスランプの違い、お よび寸法の違いの影響についても検討する予定である。

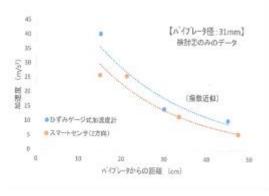


図14 バイブレータからの距離と加速度

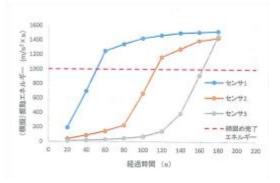


図15 経過時間と振動エネルギー

ここに、E: : t 秒間の振動締固めエネルギー (J/L)

ρ : 単位容積質量(2.35kg/L とする)

α : t秒間の(平均)振動加速度(m/s²)

t : 振動時間 (s)

f :振動数 (一般の高周波バイブレータの値として 250 s⁻¹とする)

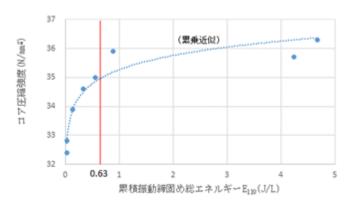


図16 累積振動締固め総エネルギーとコア強度の関係

2) コンクリートの締固め度合いを評価する方法の確立を目指し、実構造物による試行 前年度には、室内試験により、加速センサで検知した値から算定した累積振動締固め総エネルギーとコンクリートコア強度との相関性から、コンクリートの締固め度合いを評価できる可能性を見出した。

今年度は、実構造物による試行から、加速度センサによる締固め状況の把握の実用性、また加速度値から算定した累積振動締固め総エネルギーと、型枠脱型後のコンクリート表面の表面吸水速度(SWAT)、および透気係数(トレント法)との相関性から、コンクリートの締固め度合いを評価できる可能性について検討を行った。

成果:実構造物の試行において、加速度センサによる締固め状況の把握の実用性が確認された。本施工においては、十分な締固めができており、累積振動締固め総エネルギーと表面吸水速度(SWAT)、および透気係数(トレント法)に明確な関係はみられなかったが、累積振動締固め総エネルギーが低い領域での検討によって、コンクリートの締固め度合いの評価は可能と考えられる。

1. 実構造物による試行

1) 試行①

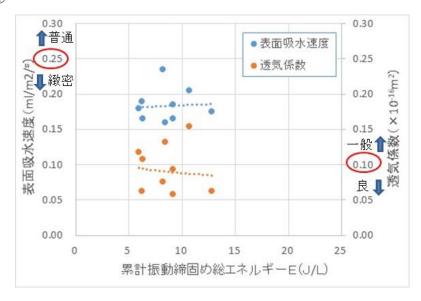
橋台ウイングの縦 900mm×横 1800mm の範囲 (300mm×600mm の樹脂型枠 9 枚使用) で実施

2) 試行②

浄水施設壁部(厚さ 500mm)の縦 1800mm×横 5400mm の範囲(600mm×1800mm の樹脂型枠 9 枚使用)で実施

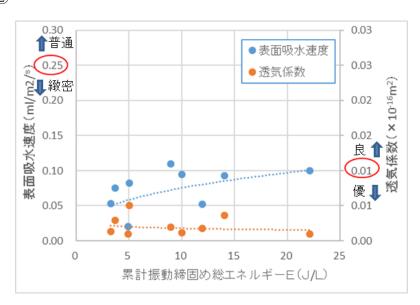
2. 試行結果

1) 試行①



充填状況の把握はできたものの、累積振動締固め総エネルギーと表面吸水速度(SWAT)、および透気係数(トレント法)に明確な関係はみられなく、締固め状況を評価できるエネルギー値を把握することは難しい。もう少し測定範囲を広げた実構造物を用いた検討が必要。

2) 試行②



累積振動締固め総エネルギーと表面吸水速度(SWAT)、および透気係数(トレント法)に明確な関係はみられないが、通常の施工を行えば、十分な締固めができている。

本施工においては、例えば、「2(J/L) 程度以上の累積振動締固め総エネルギーが得られれば、締固めは完了」といった評価は可能と考えられる。

3. 今後の展開

施工・品質管理の「見える化」

① コンクリート打設時の「流動・充填状況の見える化」

静電容量値:コンクリート接触による値の変化で充填状況を把握

② コンクリート充填後の「振動締固め状況の見える化」

振動加速度:締固め時の振動加速度測定値から締固め度を把握

⇒モニターや回転灯等で作業員に周知

③ 養生打切り・脱型時の「強度発現状況の見える化」 コンクリート温度:積算温度法で養生打切り・脱型時の強度発現を把握

⑤コンクリートの密実性検知方法の確立

構造体の初期欠陥(空隙・施工欠陥)を検出できるセンシング技術の開発を目標に、コンクリート密実性検知を目的としているセンシング技術や製品、および研究論文について調査を実施した。その結果、現時点で、若材齢コンクリートの密実性を検知する技術や製品はほとんどないため、技術開発の難易度は比較的高いが、超音波方式などによる基礎実験を実施し、その結果に基づいて、方式決定を行なう予定である。

*研究開発の内容と成果

1) センシング技術や製品、および研究論文について調査

コンクリート密実性検知を目的としているセンシング技術や製品、及び研究論文について調査を実施した結果、若材齢コンクリートの密実性を検知する技術や製品はほとんどなく、技術開発の難易度は高いが、次年度の方式として、圧電振動方式および超音波方式を核とした基礎実験の方向性を定めることができた。

i) 製品の調査結果

検出方式機関名		製品•研究名	
圧電振動デバイス 加振方式	曙ブレーキ	ジューテンダー(コンクリート充填検知システム)	
IJ	"	ジューテンダー II (コンクリート充填・締固め振動検知シ ステム)	
IJ	日本国土開発	コンクリート完全充填システム(FCP)	
電極間抵抗測定 方式	三笠産業	コンクリート充填感知システムCF-12	

ii) 技術研究の調査結果

検出方式	機関名	論文名
超音波方式	函館高専等	若材齢コンクリートの超音波速度と弾性係数に対する骨材の 影響
"	名古屋大学	セメント硬化体の若材齢時におけるポアソン比の経時変化

iii) 各検出方式の得失評価

検出方式	長所	短所
圧電振動デバイス方式	・小型軽量・消費電力やや低い(25VA)	・検出範囲が狭い・センサ部が使い捨てで、ランニング コストがかかる・設置の手間がかかる
電極間抵抗測定方式	・小型軽量 ・低消費電力やや低い(30W)	・検出範囲が狭い (10mmの区間)・センサ使い捨て?・設置の手間がかかる
超音波方式	・比較的広範囲の検出が可能 ・型枠裏面への設置可能性 ・低消費電力(5W)	・骨材による測定精度への影響 ・測定分解能が未知数

2) 超音波方式での検出評価

初年度の調査結果より 超音波を用いてコンクリート型枠裏面の気泡(空気)を検出し、 密実性(初期欠陥)の評価を行なう。

成果: 各方式と結果について以下に示す。

1) 方式 1: 超音波洗浄機(発振周波数: 40kHz)での検討 結果: 高分子吸水ポリマーでの実験を行なったが、空気の検出は不可であった。

2) 方式2:魚群探知機での検討

結果:市販の魚群探知機(発振周波数:200KHz)を使って実験したが、<u>至近距離</u> (数cm)内での検出が出来なかった。

3) 方式3:改善策 医療用超音波診断装置

検出不可の解析結果、検出が出来なかった理由は発振周波数が低すぎた為であった。 改善策

発振周波数が高い(発振周波数2~10MHz)の医療用超音波診断装置を用いて各種実験を行なった。

4) 医療用超音波診断装置を用いた実験

4)-1 使用装置: ALOKA エコーカメラ 超音波診断装置 SSD-1000/USI-145



4)-2 検討概要

- i)型枠裏面の空気(気泡)の検出可否確認
- ・空気の代わりに発泡スチロール、モルタルの代わりにフライアッシュと水の 混合物(以降、「擬モルタル」、 重量比 W/FA ⇒ 0.5)を使って、超音波による 検出の可否確認を行なう。
- ・検出出来た場合、最小サイズ(分解能)を調べる。
- ii)空気(発泡スチロール)と骨材の識別可否確認
- i)で空気(発泡スチロール)の検出が出来た場合、骨材との識別が可能かどうかを調べる。

4)-3 試験内容

下記の各種素材にて検出が可能かを確認。

1)空気の検出

空気の代わりに、幅Wと厚みtを変えた発泡スチロール材で検出を確認

- i) 板材発泡スチロール
 - ア) 厚み 5 (幅 W×厚み t) 5×5 、 10×5 、 20×5 、 40×5 mm
 - f) 厚み20 (幅 W×厚みt) 5×20、10×20、20×20、40×20mm



ii) 角ブロック状発泡スチロール:□50mm



- iii) 球状発泡スチロール: φ20mm
 - ア) 球体 4 個を三角錐状に連結
 - イ) 球体3個を串刺し状に連結





2) 骨材の検出

市販の砕石で検出確認

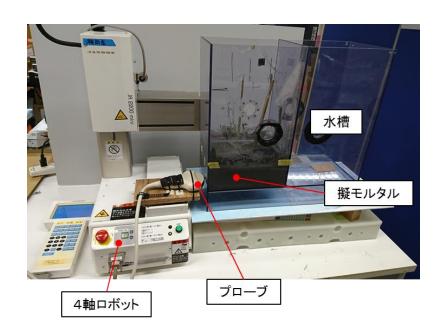
- i) 大きさ 10mm の砕石
- ii) 大きさ 20mm の砕石





4)-4 実験用装置

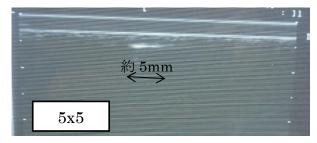
- ・実験用水槽に擬モルタルを入れ、水槽裏面に対象物を当てた状態で超音波診断 装置のプローブを4軸ロボットで一定速度で動かし、超音波画像を記録する。
- ・プローブ移動速度は10mm/secとした。

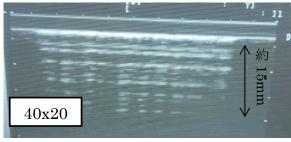




4)-5 実験結果

- ・各検出対象物を、水槽内の疑モルタルにセットした状態で、超音波診断装置 プローブを4軸ロボットで一定速度で動かし、空気や骨材の検出状態を 超音波画像で記録する。
- 1) 発泡スチロール (板材:幅W×厚さt) の検出例 (5×5 と40×20の例)



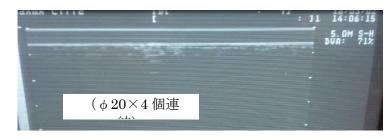


2)発泡スチロール (角ブロック) の検出



3)発泡スチロール(球体4連)の検出

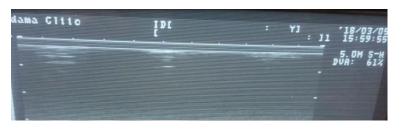




4)発泡スチロール (球体3連)の検出



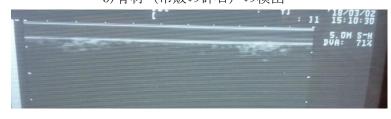
(φ20×3個連



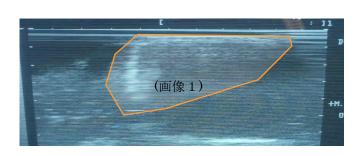
5) 骨材(市販の砕石)の検出

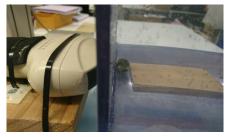


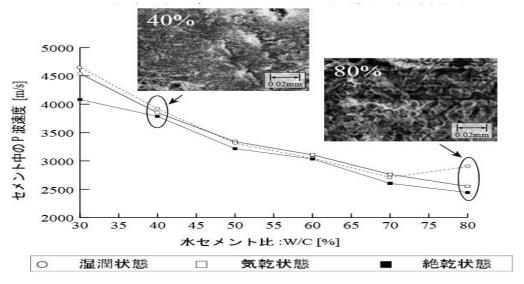
(10、20mm 混



6) ※疑モルタル→水に替えた場合(砕石 20mm×1 個) 疑モルタルの代わりに水に替えた場合の検証も行なった。







(図1) セメントの W/C 比と音速の関係

(出典:土木学会論文集「骨材による多重散乱を考慮したコンクリート中の超音波の3次元伝搬シミュレーションと実験波形による検証」中畑、矢野、河村、他)

5. 結論

- ・今回の実験の結果、下記の結果が得られた。
- ① 角形発泡スチロール
 - ・幅方向は一定の精度で検出が可能。但し、深さ方向では減衰の影響で、深くても 20mm 程度までしか検知できない。
 - ・最小5 x 5 でも検出は可能。
- ② 球形発泡スチロール
 - ・検出は可能だが周縁部ではプローブ方向への反射が無くなり、角形に比して不明瞭 な画像しか得られない。
- ③ 砕石
 - -1) 擬モルタルの場合
 - : 発泡スチロールに比べて陰影は薄く、識別できる可能性は高い。
 - -2)水の場合
 - : 擬モルタルの代わりに水に替えた場合、明瞭な反射が見られた。(前頁) これは、図1に示す通り、比重と共に超音波の伝搬速度も低下(3000→1500m/s) したため、両者の音響インピーダンスの差が大きくなり反射率が高まってしまっ たためと思われる。

◇このことから、例えば水セメント比が変わっただけでも比重と伝搬速度が変わり(図1)、砕石(骨材)の反射が強くなって気泡との区別が出来なくなってしまう可能性がある。

従って、実用化に当たってはセメントの種類を含め、考えられる組合せ条件の下で、 骨材の識別がどれだけ可能かについて細密な検討を行なう必要がある。

⑥温度センサと熱源を用いたコンクリート加熱養生方法の確立

寒冷地では地域経済の発展に直結する冬季建設工事の合理化が求められている。この ため寒中コンクリートの養生対策としてこれまで様々な提案がされているが、中でも上 屋を設けて内部の空間をジェットヒータ等で加熱する加熱養生が広く行なわれているも のの、仮設が必要、精緻な温度管理が困難、部分加熱による温度ひび割れの問題など、解決すべき課題を数多く抱えている。既に、養生中のコンクリートの品質管理を行なうスマートセンサ型枠システムを開発しているが、今回寒中コンクリート対策としてスマートセンサにより温度制御が可能な加熱養生用型枠システムの構築の為の第一段階として、ヒータ付き型枠(図-1)を試作し、環境試験槽内で0℃、-5℃の環境温度にて打設・養生試験を実施し、加温効果についての試験検証を行なった。

*研究開発の内容と成果

1) 実用化技術、研究技術の調査

型枠に装着したセンサユニットによる制御が可能な熱源方式について、実用化されている技術・製品、及び研究レベルの技術について調査を行なった。

【製品の調査結果】

寒中コンクリート対策の製品の調査を行なった。

種類 メーカー		製品名	仕様	特長
ヒーター付養生	リバーストン	コンガード	1.8 × 1m, AC100/200V, 200W 3.0 × 1m, AC100/200V, 350W	PTCヒーター採用
シート	サンライズ工業	電熱式コンクリート 養生シート	1×12m, AC200V	"
ジェットヒーター 自動制御	エコモット	コンクリート養生温度管理システム		
ヒーター無し養	日本コンクリート	TSN寒中コンクリー		
生シート	技術	ト養生システム		

【特許調查結果】

寒中コンクリート対策関連する出願数は多く、ニーズが高いことが伺えた。

出願者	出願番号	発明の名称	登録済
セキスイ化成品工業	2014-164878	長尺PTCヒーターおよびその使用方法	
熊谷組	2003-268976	コンクリート養生用ネットヒーター及び該ネットヒー ターを用いたコンクリート養生方法	0
浅見製作所	2008-114376	コンクリート用型枠、コンクリート用型枠の電気ヒー タ装置及びコンクリートの養生方法	
浅見製作所	2007-186968	加熱床板及びその製造方法	0
浅見製作所	2007-055225	コンクリートの養生方法及びコンクリート用型枠並び にコンクリート製品の養生装置	
鹿島建設	2013-185296	温度管理システム	0
大和ハウス	2005-108582	コンクリート養生用面状発熱体	•
大林組	2013-253433	給熱養生によるマスコンクリートのひび割れ抑制工法	

2) ヒータ型枠を使用し、打設、養生試験の実施。

初年度の調査結果より ヒータ付き型枠を使用し、各環境温度にて打設・養生試験 を実施し、加温効果について試験検証を行なった。

1. 試験概要

1-1) 試験用型枠仕様

- 1) 使用部材:樹脂型枠(GFPP)、パネルヒータ(DC24V、20W)、伝熱板(黄銅、600×300×
- t1.0mm)、断熱材(発泡 PE)、スマートセンサ(以降、'SS'と呼ぶ)
- 2) 構成:型枠面板部にネジ留めされた伝熱板の裏面にパネルヒータを取付け、ヒータの熱を伝熱板を介して直にコンクリートに伝える構造とした。型枠裏面には、保温効果を高める為に全面に発泡 PE 製の断熱材を装填した。SS を裏面に取付け、本試験条件下で強度推定を行なうものとした。
- 3) 供試体:底面にパネルヒータ付型枠を配置し、側面4面を断熱材で囲み断熱状態とし、天面はブルーシートで養生した(図-2a、図-2c)。内寸は、 $W600 \times D300 \times 200$ mm とし

た。

4) 温度測定点:型枠内面の周囲4隅と中央部の計5か所で、上中下の3点ずつ計15点に熱電対を配置して、コンクリート内の温度を計測した(図-2b)。「上」はコンクリート天面から5mm下の地点、「中」は型枠面から100mm上の中央地点、「下」は型枠上面から5mm上の地点である。

1-2) 試験条件

- 1) 環境試験槽の設定温度は 0℃と-5℃、ヒータ設定温度は 30℃と 40℃とした。
- 2) コンクリート配合は24-18-20N とし、試験期間は7日間とした。
- 3) ①標準養生試験体、②コア供試体(6 か所コア抜き)、③現場(環境試験槽内)養生試験体の3種類について、材齢7日圧縮強度を確認した。

1-3) 評価項目

試験実施の結果から、①コンクリート内各部の温度、②内外温度差、③各養生条件での 圧縮強度、④SS による強度推定値、⑤消費電力量の各項目について評価を行なうもの とした。

2. 試験結果

2-1) コンクリート内部温度

型枠内面の周囲4隅と中央部の計5か所で、上中下の3点ずつ計15点に熱電対を配置して、コンクリート内の温度を計測した.

15 か所の測定点のグラフを図-3 および図-4 に示す。グラフから、最低温度と最高温度は表-1 の結果が得られた。最低温度は型枠隅部の天面に当たる測定点[右前上]、最高温度はヒータの真上に当たる[中央下]となった。同一サンプリング時点における測定点 [中央下]と [右前上] の温度差を求め、その最大値を表-1 中に示す。

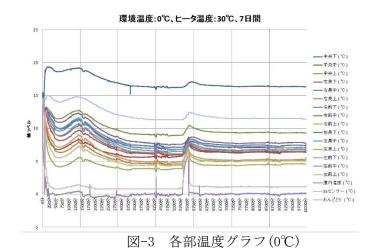


表-1 コンクリートの最低最高温度

環境	最低温度	最高温度	最大温度差
温度	(\mathcal{C})	(\mathcal{C})	(\mathcal{C})
0°C	3.7(右前上)	19.3(中央下)	14. 4
-5℃	1.3(右前上)	22.9(中央下)	20. 2

表-2 コンクリートの強度

	1 4	• /	/ !	プが及	
環境		強度(N/mm²)			SS での
温度	試験対象	最高	最低	平均	推定強度
/皿/支					(N/mm^2)
	標準養生	_	_	23. 1	
0℃	供試体	13. 9	12.5	13. 2	15. 5
	現場養生	_	-	6. 7	
	標準養生	_	-	22.5	
-5°C	供試体	10.7	12.8	11.3	15. 4
	現場養生	_	_	不可	



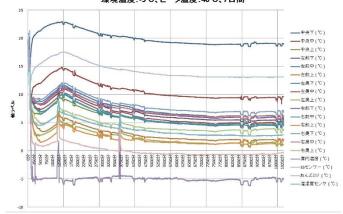


図-4 各部温度グラフ(-5℃)

2-2) 圧縮強度

標準養生試験体、供試体、現場養生試験体の 3 点について圧縮強度試験を実施したところ、表-2 に示す結果が得られた。また、SS での温度推定値は 0 \mathbb{C} 、-5 \mathbb{C} 共に表-2 の結果となった。

2-3) 消費電力量

-5℃の実験においてヒータへの供給電流をモニターして総消費電力量を求めたところ打設後 2 日間で約 0.8kWh であった。これを型枠サイズ 600×1800 mm に換算すると型枠 1 枚当り 2.4kWh/枚・日となる。

3. 考察

表-1 に示すように、0[°]C環境下ではコンクリートの最低温度は 3.7[°]Cなので、日本建築学会 JASS 5 の標準仕様書に示される養生温度の 2[°]Cは満足するが、土木学会の標準示方書の寒中コンクリートで示される 5[°]Cは下回る。但し、コンクリート内の最大温度差は 14.4[°]Cに留まることから、10[°]C程度ヒータ温度を上げることが出来るため、0[°]C環境下においても最低温度 5[°]Cに保つことは十分可能と思われる。

表-2 に示すように、圧縮強度は 0℃、-5℃の何れの環境下でも標準養生試験体の半分程度であるが、現場養生の場合に対して約 2 倍程度出ており、加熱養生の効果が認められる。また、SS での強度推定値がコア抜き供試体の強度を上回っているが、これは SS が伝熱板の直下にある為だが、今後実験を重ねて実強度との相関を取り、補正を加えることが必要と思われる。

本方式と従来式のジェットヒータによる加熱養生の場合で、必要なエネルギー量を試算

比較すると、本方式の場合が 100kW 弱、ジェットヒータ方式では約8倍の 816kWh となり、電気代を 25 円/kWh、灯油代を 85 円/L として試算すると、本方式ではジェットヒータの約 1/9 となり、ランニングコスト的にメリットが得られそうである。

4. まとめと課題

今回、予想以上の結果が得られ実用化の可能性が高まった。今後実用化に向けて、追試験の実施と共に設計仕様の最適化、コストダウンを進めてスマートセンサを用いた加熱養生用型枠システムの完成を目指したい。

(9) 成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍 又は 雑誌名(巻号数、論文 名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
土木学会全国大会講演論文集 (各種センサ等によるコンクリート工 事における品質管理の高度化技術の開 発(その1)	Н30. 4. 2	土木学会	孫 博超
土木学会全国大会講演論文集 (各種センサ等によるコンクリート工 事における品質管理の高度化技術の開 発(その2)	Н30. 4. 2	土木学会	北垣亮馬
土木学会全国大会講演論文集 (各種センサ等によるコンクリート工 事における品質管理の高度化技術の開 発(その3)	Н30. 4. 2	土木学会	山内 匡
土木学会全国大会講演論文集 (各種センサ等によるコンクリート工 事における品質管理の高度化技術の開 発(その4)	Н30. 4. 2	土木学会	山本秀之

(10) 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
なし				

- (11) 成果の実用化*の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装
- ①:温度センサと湿度センサの複合化によるコンクリート強度管理方法の確立 【実用化の見通し:実用化への可能性が高まった】

測定されたコンクリート温度と雰囲気湿度を考慮した有効材齢に基づく推定圧縮強度について,雰囲気湿度を考慮した強度推定式のモデルの構築のめどがついたが,様々な試験体を作製し実測値と比較する実証的な検討を進めていきたい.

②:温度センサによるマスコンクリート内部温度推定に基づくひび割れ管理方法の確立 【実用化の見通し:平成29年度の実現場での検証結果、実用化は可能と思われる】

実構造物のコンクリート工事に本技術を適用したところ、中心温度実測結果と推定結果のグラフの概形はほぼ一致しており、推定の精度は高いと言える。また、部材の厚みによって推定の精度に差があった点について、蓄熱成分の考え方を補正項として導入することで、中心内部温度の推定を行ったところ部材の厚さによらず推定ができるようになった.

当初目標は十分達成したと考えるが、一方で、コンクリート工事中における日射の影響まだ改善の余地があると思われるため、それらを考慮しながら実用化への展開が期待される.

③:加速度センサによる型枠取り外し時期検知方法の確立

【実用化の見通し:平成29年度の実現場での検証結果、実用化は可能と思われる】

今回の検証実験で得た、打設判定・脱型判定のロジックを、スマートセンサのデータを 収集・解析するリーダアプリに組込み、さらにフィールドテストを重ね、より精度の高い 判定条件を見い出し、実用化への運用を可能とする。

④:加速度センサによるコンクリート締固め度合い検知方法の確立

【実用化の見通し: 実用化への目処を立てる 】

表面吸水速度や透気係数の関係を用いたスマートセンサによる締固め度合の評価手法の確立については、累積振動締固め総エネルギーが低い領域での更なる検討が必要であるが、加速度センサによる締固め状況の把握は実現性が確認されており、実用化は可能と思われる。

⑤:コンクリートの密実性検知方法の確立

【実用化の見通し: 実用化への目処を立てる 】

今回の検証実験では、新たな課題も多く、さらに実験検証も加える必要がある。 実用化に当たっては、セメントの種類を含め考えられる組み合わせ条件の下で、骨材の識別が可能かについて綿密な検討を行ない実用化への目処を立てたい。

⑥:温度センサと熱源を用いたコンクリート加熱養生方法の確立

【実用化の見通し: 実用化への可能性が高まった 】

今後実用化に向けて、追試験の実施と共に設計仕様の最適化、コストダウンを進めてスマートセンサを用いた加熱養生用型枠システムの完成を目指したい。

(12) その他

「各種センサー等を用いたコンクリート工事における品質管理の高度化・工期短縮化技術の 開発」の活動において、

- ・コンクリート強度推定式の確立
- ・コンクリート内部の温度ひび割れ管理方法の確立
- ・型枠取外し時期検知方法の確立
- ・コンクリート締固め度合い検知方法の確立
- ・密実性検知方法の確立
- ・コンクリート加熱養生方法の確立
- の基礎的研究成果を得ることができた。
- コンクリート工事における品質管理の高度化・工期短縮化技術開発の本技術としての有効性

と併せて、製品開発を行う知見も得た。

本技術が確立できれば、コンクリートの強度推定が高い精度で行えるようになり、脱型の最適化、即ち工期短縮が可能となり、生産性の向上にも繋がる。また、それらのセンサー情報をWIFI等を利用したICTの活用による、遠隔システムを確立する事で、品質管理の効率化や省力化にも繋がるため、先導性、優位性のある技術開発であると考えられる。