

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書【概要版】

- (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(株)技術センター コンクリート研究室
- (6) 補助金交付総額：39,910,000 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認した上で、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**

国土交通省告示の改正により、測定されたコンクリート温度から計算した有効材齢に基づいて求めた圧縮強度により、建築工事における型わくおよび支柱の取り外しを行うことができる。この強度推定式では湿度が 100%と仮定されているが、実際には様々な温湿度での環境が想定され、夏季では床部材において圧縮強度が低下することが指摘されている。そこで正確な強度推定のために、有効材齢に湿度の影響を加えた以下の式を設定した。

$$f_{c_{te}} = \exp\left\{s\left[1 - \left(\frac{28}{(te(T,RH)-0.5)/t_0}\right)^{1/2}\right]\right\} \cdot f_{c_{28}} \quad (1)$$

$$te(T,RH) = \frac{1}{24} \sum \Delta ti \cdot \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + \frac{T_i}{T_0}}\right] \cdot g(RH) \quad (2)$$

$$g'(RH) = \frac{g(RH)}{g(100)} \quad (3)$$

ここで、 $f_{c_{te}}$  はコンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $s$  はセメントの種類による係数、 $t_0=1$  (日)、 $f_{c_{28}}$  は呼び強度の強度値 (N/mm<sup>2</sup>)、 $te(T,RH)$  は有効材齢 (日)、 $T_i$  はコンクリート温度 (°C)、 $\Delta ti$  は測定期間 (時間) とする。  $g(RH)$  は湿度影響関数であり、湿度 100%未満でのセメントの反応速度低下を表すため、湿度 100%で  $g(RH)$  は 1 となる。

- 1) 初年度では供試体寸法を 1cm×1cm キューブ、5cm×10cm シリンダー、10cm×20cm シリンダーと 3 条件に設定してモルタルの実験(W/C=50%)を行い、スラブの表層強度を確認するために適切な供試体寸法を検証した。
- 2) 次年度は前年度の検証から 5cm×10cm シリンダーの供試体寸法として、表-1 に示す 12 水準の養生環境における材齢 1, 3, 7, 28 日に圧縮強度試験を行なった。結果から算出した  $g'(RH)$  を下図に示す。この結果を、相対湿度とセメント粒子の反応率に関する既往研究に基づき、圧縮強度とセメント反応率は等価であるとみなし、養生環境温度を供試体の内部湿度に変換することができる。そこから内部湿度の影響を加えた有効材齢を表す式を算出する。

温度 (°C)	相対湿度(%)
10	70
	80
	90
	100
18	70
	80
	90
	100
40	70
	80
	90
	100

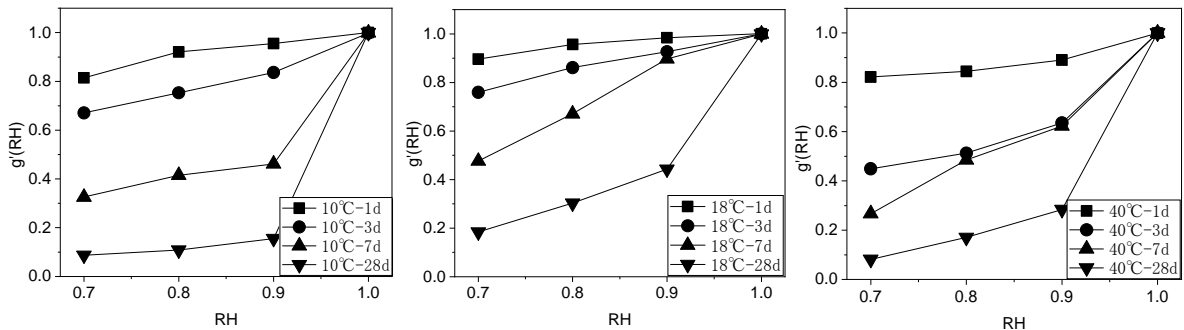


図 各養生温度で計算された  $g'(RH)$ 、左：10°C、中：18°C、右：40°C

1) センサユニットの設計

次年度の実証試験用の湿度センサユニット機構と基板の設計試作を行なった。

特に、センサユニットの開発において天候の影響を受けない構造を設計ポイントとしながら設計、試作を実施した。

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

湿度センサ単体に比べて、センサユニットの湿度データの応答性が悪く、構造変更により改良を加えた。

具体的には、センサユニット内の湿度センサの周囲のリブをカットし、通気孔を追加するなどを実施した。

改良品を用いた実験検証の結果、センサユニットの湿度データが湿度センサ単体に近づき改善効果が見られた。

## 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

\* 研究開発の内容と成果

「ほぼ完了。より精度の高い推定のためフィールドテストを継続していく。」

- 1) 内部温度推定モデルの構築と妥当性に関する実験的検討を行った。その結果、概ね多くの試験体について内部温度推定が実現できることが検証された
- 2) 実現場において測定された内部温度と推定モデルとの比較を行い、ピーク温度後の温度変化の推定精度の改善を行った。その結果、部材断面によらず内部温度推定を長期間に渡り実現することが検証された。

## 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

\* 研究開発の内容と成果

「ほぼ完了。スマートセンサリーダへの実装と共に、より精度の高い推定のためフィールドテストを継続していく。」

- 1) 型枠取り外し時期の検知方法の妥当性検討  
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。  
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ほぼ判定できることが実証できた。
- 2) 実現場を追加し、判定の妥当性検証を行なった  
下記の実現場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行なった。
  - i) 大阪府 橋梁現場
  - ii) 奈良県 橋梁現場
  - iii) 岩手県 防潮堤
  - iv) 新潟県 ボックスカルバート現場

その結果、新たに得られた熱流検出手法を併用することで、型枠取り外し時期がより正確に判定できることが実証できた。

## 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

\* 研究開発の内容と成果

「ほぼ完了。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。」

- 1) 配合影響など基礎調査を実施し、技術の確立を目指す  
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、取り組んだ結果

- 1) 加速度センサによる加速度値の妥当性について  
\* 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。また、スマートセンサ内のZ方向の加速度はパイプ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た。
- 2) 振動エネルギーの算出方法について  
\* 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、振動締固めの評価は可能であることがわかった。
- 3) コンクリートの締固め度合の判断基準設定の可能性について  
\* 振動締固め総エネルギーとコア強度の関係から、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。

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  
パイプ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  
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、コンクリートの締固め  
度合いを評価する方法を確立するため、以下を目的に研究に取り組んだ。

- i) 室内試験による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
  - ・ パイプレータからの距離との関係
- ii) 室内試験によるコンクリートの締固め度合の判断基準設定の可能性。  
（累積振動締固め総エネルギーとコア強度との相関性から設定）
- iii) 実構造物による加速度センサによる締固め状況把握の実用性。
- iv) 実構造物によるコンクリートの締固め度合の判断基準設定の可能性。  
（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）との相関性から設定）

\* 研究開発の成果

- i) 一般的な加速度計（ひずみゲージ式加速度計）との整合性はある。
  - ・ 受感方向Zの値に着目
  - ・ パイプレータからの距離と加速度値に相関性はある  
⇒ スマートセンサ内の加速度センサによって締固め状況の把握は可能。
- ii) 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。
- iii) 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を確認。
- iv) 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。

## ⑤コンクリートの密実性検知方法の確立

\* 研究開発の内容と成果

「基礎実験を完了。気泡検出に関する実用化に向けての課題を明確にした。」

1) コンクリート密実性検知に関する技術情報の調査

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。

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。

2) 医療用超音波診断装置による気泡検出実験と検証

初年度に実施した調査結果に基づき、超音波によりコンクリート中の空隙検出が可能かどうかの基礎実験を実施した。

超音波洗浄器、魚群探知機を用いた水槽と模擬コンクリートでの実験で、超音波の発振周波数が 2MHz 程度でないと必要な分解能が得られないことが判った。

そこで発振周波数が 2MHz の医療用超音波診断装置を用いて、模擬コンクリート実験を行なったところ一定以上の大きさの気泡であれば検出可能なことまでが確認出来た。

今後、実用化にあたっては水セメント比や骨材サイズによる影響や SN 比の把握など、基礎的な実験解析を重ねて、どんな条件下であれば実用化可能かの評価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

\*研究開発の内容と成果

「試験用型枠を設計・試作し、環境試験槽を用いた試験検証を完了した。必要な追試験の実施と、材料費・組立て工数を商品化可能なレベルにまで落とし込む改良設計を施すことにより、実用化を目指す」

1) 実用化技術、研究技術の調査

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。

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。

2) ヒータ型枠を使用し、打設、養生試験の実施。

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結果、

i) コンクリート内部温度は 0℃環境下にて土木学会標準示方書の最低温度 5℃を保つことが可能。

ii) 圧縮強度は 0℃、-5℃の環境下では標準養生試験体の半分程度の強度であるが、現場養生と比較すると約 2 倍の強度が出ており、加熱養生の効果は認められた。

iii) 消費電力量と電気代の試算より、本方式のランニングコストは従来のジェットヒータ方式の約 1/9 でメリットが見込めることが分かった。

(9) 論文発表等に関する件数

原著論文 (査読あり)	原著論文 (査読なし)	原著論文以外 (新聞・雑誌等)	その他 (パネル・ポスター等)	合計
0 件	4 件	0 件	3 件	0 件

(10) 知的財産権に関する件数

特許権 (取得)	特許権 (出願)	その他 (実用新案・商標等)	合計
なし	なし	なし	0 件

(11) 成果の実用化の見通し

前(8)項に挙げた各開発テーマ（①～⑥項）の成果より、各テーマ毎に実用化可能性の度合は異なるものの総合評価として実用化への見通しが確認できた。

今年度の活動での検証の結果、一部に於いては実現場での再検証の実施や、判定条件確定の為の追試験実施などの課題も残る為、テーマを絞り込んだ上で実用化実現を目指して取り組んで行く。

(12) その他

今回の「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」において、様々な知見、成果が得られた。

これらを具体的に製品の形で実現することにより、品質の向上と共に現場における工期短縮、生産性の向上が期待できる。