

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年4月15日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560606

研究課題名（和文）構造体コンクリートの発熱・熱伝導・水分拡散モデルを統合した強度推定システム

研究課題名（英文）System for prediction of concrete strength combined with the models of cement hydration heat, heat conduction and water diffusion in structural concrete member

研究代表者

杉山 央（SUGIYAMA HISASHI）

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50344015

研究成果の概要（和文）：コンクリート構造体内部で生じる発熱、熱伝導および水分拡散の影響を取り込んだ構造体コンクリートの強度推定システムを構築した。コンクリートの発熱にはセメントの水和反応が大きく関与し、またコンクリート中の水分拡散にはセメントの水和反応による水分消費が複雑に関与している。そこで、セメントの水和反応モデルを出発点としたコンクリート構造体の発熱モデル、熱伝導モデルおよび水分拡散モデルをそれぞれ構築し、それらを互いに関連付けることで広範な強度推定システムの開発を目指した。

研究成果の概要（英文）：A system for prediction of concrete strength including the effect of cement hydration heat, heat conduction and water diffusion in a structural concrete member was proposed. Temperature rise of concrete is caused by cement hydration heat. Consumption of water by cement hydration affects the water diffusion in a concrete member. Therefore, the cement hydration heat process, heat conduction process and water diffusion process in a structural concrete member were modeled with the introduction of cement hydration model. The models were combined with the system for prediction of concrete strength.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	0	1,300,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	660,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：コンクリート構造体，強度発現，セメント水和反応

1. 研究開始当初の背景

コンクリートは硬化過程における温度条件や水分条件によって硬化後の性質が大きく変わる材料である。例えば、柱や梁などの

断面厚が大きなコンクリート構造体では、セメントの水和熱を構造体内部に蓄積することにより高温状態となり、この現象が長期的な強度発現に影響を及ぼす。また、壁や床な

どの断面厚が小さなコンクリート構造体では、脱型後の水分逸散が著しく、この初期乾燥が強度発現に影響を及ぼす。要求性能を確実に満足させたコンクリート構造体を施工するためには、このような影響をあらかじめ定量的に予測し、調合計画や製造計画に反映させることが必要とされている。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、コンクリート構造体内部で生じる発熱、熱伝導および水分拡散の影響を取り込んだ構造体コンクリートの強度推定システムを開発することである。

図1に示すように、コンクリートの発熱にはセメントの水和反応が大きく関与し、またコンクリート中の水分拡散にはセメントの水和反応による水分消費が複雑に関与している。このため、本研究課題では、次の①～⑤のモデルを互いに関連付けるとともに統合し、さらに、それらが及ぼす影響を互いに反映させた⑥の強度推定システムを構築する。

- ①セメントの水和反応・組織形成モデル
- ②コンクリートの強度発現モデル
- ③コンクリートの発熱モデル
- ④コンクリート構造体の熱伝導モデル
- ⑤コンクリート構造体の水分拡散モデル
- ⑥上記モデルを統合した強度推定システム

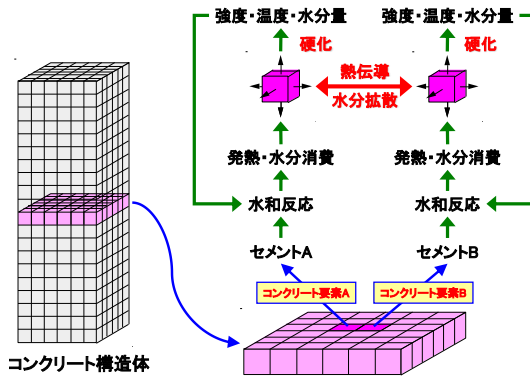


図1 コンクリート構造体中で生じる発熱・熱伝導および水分拡散とそのモデル化

3. 研究の方法

セメントの水和反応シミュレーションから出発し、コンクリート構造体内部の温度変化および水分拡散現象をシミュレートし、それらが進行する中でセメント水和組織が形成されてコンクリートとしての強度を発現していく過程を精緻にモデル化するためには、2. に示した①～⑥のモデルが必要である。このうち①～④については研究代表者が過去に実施した科学研究費補助金研究課題などによって、すでにプロトタイプモデルが完成している。本研究課題では⑤および⑥を

中心に取り組むこととし、以下の実験、解析およびシステム構築を行った。

(1) コンクリート構造体の水分拡散モデルの開発

コンクリート構造体内部で水分が拡散する過程をモデル化して、コンピュータプログラムを作成する。なお、水分はコンクリート構造体内部を移動するだけでなく、セメントの水和反応によって消費されるので、この現象もシミュレートする。

(2) コンクリート試験体中の水分拡散を定量的に把握するための実験

コンクリート構造体の水分拡散モデルの適合性を検証するために、コンクリート中の水分拡散現象を定量的に把握するための実験を行う。図2に示す壁状コンクリート試験体および図3に示す柱状コンクリート試験体を作製し、それぞれの所定位置に図4に示す印加電圧センサーおよびT型熱電対を埋め込み、水分量および温度の経時変化を調べる。



図2 壁状コンクリート試験体

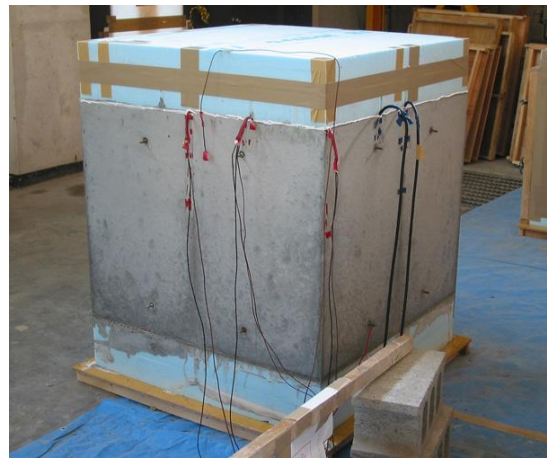


図3 柱状コンクリート試験体



図4 印加電圧センサー

(3) コンクリート構造体の水分拡散モデルの適合性検証

コンクリート試験体中の水分量および温度の実測データを用いて、水分拡散モデルの適合性を検証する。

(4) 発熱・熱伝導・水分拡散モデルを取り込んだ構造体コンクリートの強度推定システムの構築

構造体コンクリートの強度発現は構造体内部の発熱、熱伝導および水分拡散の影響を受けるが、これらの影響を統合した強度推定システムを構築する。

4. 研究成果

(1) コンクリート構造体の水分拡散モデルの開発

コンクリート構造体の水分拡散モデルを構築するために a)~d) のような仮定を設定した。

a) セメントペースト中には空隙（毛細管空隙）が存在する。この空隙は C3S、C2S、C3A、C4AF、その他のセメント成分および水和生成物の占める部分を除いた残りのスペースであり、水がセメントペーストセル外部に移動していない場合には水で満たされており、水がセメントペーストセル外部に移動した場合には水および空気が存在する。コンクリート部材中を拡散する水は、この空隙を通過して移動すると仮定する。すなわち、コンクリート中には練り混ぜ時に混入した空気（AE 剤等により連行された空気を含む）とセメントペースト中の水分逸散にともない流入した空隙内の空気が存在するが、前者は水の拡散に関与せず、後者の空隙内の水と空気の濃度バランスによって水が拡散すると仮定する。

b) モデル計算上は、コンクリート部材中を拡散する水はセメントペーストセル最外側に存在する水とする。最外側以外に位置する水が即座にコンクリート部材中を拡散することはない。最外側以外に位置する水は、まずセメントペーストセル最外側まで移動し、続いてセメントペーストセル外部に移動す

るというステップで拡散現象を捉える。

c) セメントペーストセル内のセメント成分およびセメント水和物はセメントペーストセル外に移動しない。

d) セメントペーストセル外に水が移動した場合、もともと水が存在していた空間には水の代わりに空気が浸入してくる。

これより、X 軸方向について、次の水分拡散方程式が得られる。

$$\frac{\partial C_{WRw}}{\partial t} = D_{WC} \frac{\partial}{\partial X} \left\{ u \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{C_{WRw}}{u} \right) \right\}$$

なお、 C_{WRw} ：水の濃度 (mol/m^3)、 t ：時間、 D_{WC} ：コンクリート中における水分拡散係数 (m^2/s)、 u ：水およびセル内空気でおめられているスペースのセメントペースト全体に対する容積比である。

Y および Z 軸方向についても同様の水分拡散方程式を設定し、3 次元方向の水分拡散をモデル化した。

(2) コンクリート試験体中の水分拡散を定量的に把握するための実験

水セメント比 28.3 および 48.4% のコンクリートを用いて、厚さ 600mm の壁状コンクリート試験体および断面 1000×1000mm の柱状コンクリート試験体を作製し、コンクリート打ち込み直後からの水分量および温度の経時変化を調べた。壁状コンクリート試験体は各水セメント比につき 2 体ずつであり、それぞれ材齢 3 日および 28 日に脱型した。柱状コンクリート試験体は各水セメント比につき 1 体ずつであり、材齢 3 日に脱型した。

(3) コンクリート構造体の水分拡散モデルの適合性検証

適合性検証の一例として、図 5 および図 6 に壁状コンクリート試験体中の含水率の経時変化を示す。材齢 3 日に脱型した場合には、計算値の方が実測値よりも小さな数値となった。しかし、いずれも脱型材齢以降は表面部の方が中心部よりも含水率の減少速度が大きくなる傾向を的確に表現している。

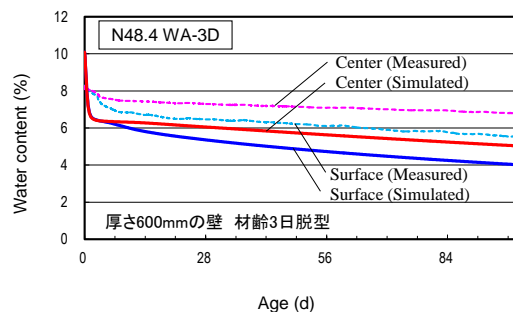


図5 壁状コンクリート試験体中の含水率の経時変化（脱型材齢：3日）

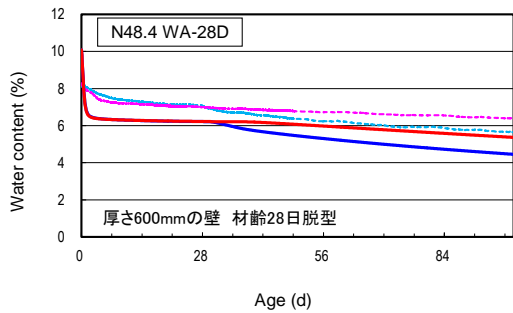


図6 壁状コンクリート試験体中の含水率の経時変化（脱型材齢：28日）

(4) 発熱・熱伝導・水分拡散モデルを取り込んだ構造体コンクリートの強度推定システムの構築

構造体コンクリート内部の発熱、熱伝導および水分拡散の影響を反映可能な強度推定システムを構築した。推定の一例として、図7に壁状コンクリート試験体の温度履歴を示す。計算値は実測値と差が小さく、高い精度で推定できていることがわかる。また、表面部では脱型材齢時に潜熱の影響によって温度が急激に低下する傾向を的確に表現している。

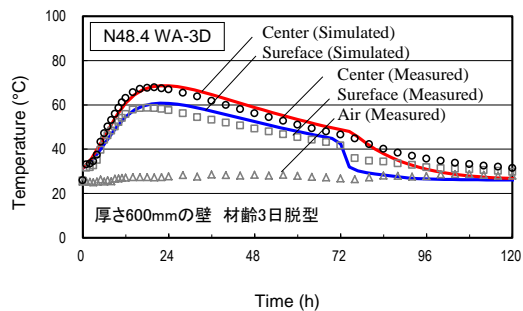


図7 壁状コンクリート試験体の温度履歴（脱型材齢：3日）

図8に壁状コンクリート試験体の強度発現を示す。壁状コンクリート試験体の中心部および表面部の強度は、20°C一定のコンクリートよりも初期強度は大きいですが、その後の強度増進が緩慢になる。これは、図7に示したように壁状コンクリート試験体が高温度履歴を受けたことによる。推定結果は、このような性状を正確に表現している。壁状コンクリート試験体の中心部と表面部を比較すると、強度差が小さい推定結果となった。温度履歴については中心部の方が高い温度を履歴しており、長期強度の増進が緩慢になる傾向が著しい。一方、表面部は材齢3日の脱型により、中心部よりも水分の逸散が著しく、この点で強度増進が停滞する傾向が現われてく

る。中心部と表面部で、それぞれ温度および水分の影響を受け、結果として同じような強度発現になったものと考えられる。

このように、構造体コンクリート内部の発熱、熱伝導および水分拡散の影響を的確に反映可能な強度推定システムを構築した。しかし、さらなる推定精度の向上を目指すため、もっと数多くの実測データにより適合性検証および各種係数のキャリブレーションを行う必要がある。

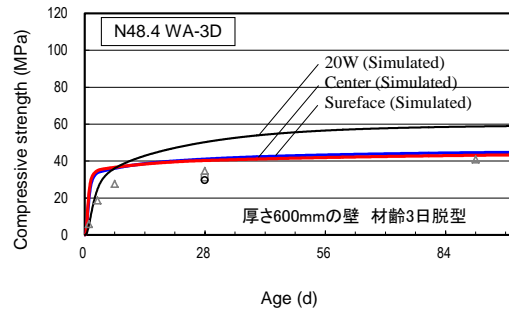


図8 壁状コンクリート試験体の強度発現（脱型材齢：3日）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計10件）

①根本裕規, 榎田佳寛, 杉山央, セメントの鉱物組成がコンクリート強度発現に及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 査読あり, Vol. 33, No. 1, 2011, pp. 317~322

〔学会発表〕（計9件）

①峯竜一郎, 榎田佳寛, 杉山央, 李榮蘭: 各種形状・断面厚を有する高強度プレキャストコンクリートの強度特性に関する基礎研究, 日本建築学会大会, 早稲田大学, 2011. 8. 24

②立木啓, 榎田佳寛, 杉山央, 李榮蘭, 石東昇: 高炉スラグ細骨材を利用したコンクリートの構造体における強度発現に関する研究, 日本建築学会大会, 早稲田大学, 2011. 8. 24

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉山 央 (SUGIYAMA HISASHI)

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50344015

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし