

論文 構造物中の躯体コンクリートの強度発現の評価に関する研究

門田 光弘^{*1}・氏家 勲^{*2}・小西 吉満^{*3}・大野 浩二^{*4}

要旨：コンクリート工事において、型枠や支保工の取外し時期などの施工の工程管理のための構造体コンクリートの強度推定には管理用供試体による圧縮強度試験結果が用いられている。本研究では構造物の躯体コンクリートの強度推定においては、実際に打ち込まれたコンクリートの温度を用いることが合理的であると考え、管理用供試体による圧縮試験を行わなくても、実測されたコンクリート温度と既往の積算温度に基づくコンクリートの早期強度の推定式から、構造体コンクリートの強度発現をある程度の精度を持って評価できることを示している。

キーワード：早期強度、躯体コンクリート、強度成長曲線、積算温度

1. はじめに

コンクリート構造物の建設工事において、躯体コンクリートの早期強度を適切に把握することは養生の終了時期、型枠・支保工の取外し時期やプレストレスの導入時期など施工の工程管理上、非常に関心の高い管理項目である。構造物のコンクリート強度は、土木および建築どちらの分野とも構造物に打ち込まれたコンクリートと同じ状態で養生した管理用供試体の圧縮強度試験の値から推定することになっている^{1),2)}。しかしながら、管理用供試体は構造物のコンクリートよりも外気温あるいは乾燥の影響を受けやすいのでこれらを考慮する必要がある、さらにマスコンクリートのように構造体のコンクリートが水和熱による温度履歴を受ける場合にはこの温度履歴も管理用供試体の養生で考慮する必要がある。桑原らはマスコンクリートの温度履歴または予測値を自動的に強度管理用供試体に与えるシステムを提案して³⁾、躯体コンクリートの強度を比較的適切に推定、把握できることを報告しているが、加熱ユニットや温度制御機器などが必要であり、手間とコストが掛かる。

コンクリートの強度発現がセメントの水和反

応に因るもので、水和反応が温度と時間に関係することから、コンクリートの強度を推定する方法として養生温度と材齢による積算温度の関数で表す考え方やアレニウス式を応用した等価材齢を用いるものがある^{4),5)}。これらはある範囲内で養生温度や養生期間が異なっても積算温度あるいは等価材齢が等しければ、同じ強度が得られるというもので、建築学会の仕様書や土木学会の示方書に取り入れられている。

管理用供試体による方法では構造物のコンクリートの強度を精度よく推定するためには、管理用供試体を構造物中のコンクリートの温度にできるだけ近い温度で養生する必要がある、一方、養生温度と養生期間を用いてある程度の精度をもってコンクリート強度を推定する方法がある。このことから、著者等は構造物で実測したコンクリート温度と適切なコンクリート強度推定式を用いて構造物の躯体コンクリートの強度を評価して管理することが、管理用供試体による方法より簡便でかつ合理的であると考えた。本研究では片持架設で実際に施工されているプレストレストコンクリート(PC)箱桁橋を検討対象例として取上げ、箱桁の部材厚さを参考に

*1 (株)愛橋 技術部 工修 (正会員)

*2 愛媛大学大学院 理工学研究科助教授 博士(工学) (正会員)

*3 (株)愛橋 技術事業部 (正会員)

*4 オーノデンシ

表－1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	目標ス ランプ (cm)	水セメ ント比 (%)	目標 空気量 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	混和剤 <i>A</i>
20	12	37.5	4.5	42.4	170	453	698	945	4.08

した実寸大規模の模擬試験体の躯体コンクリートの早期の強度発現を積算温度に基づく強度推定式により評価し、検討を行った。

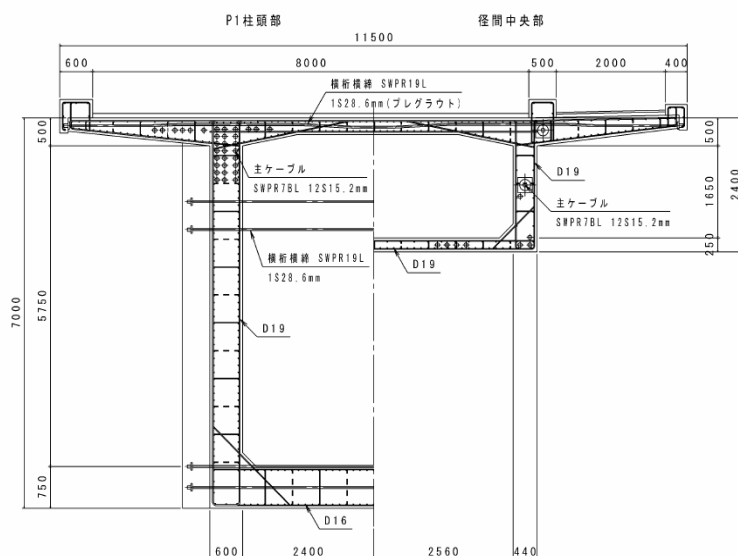
2. 実験概要

2.1 コンクリートの配合

本実験で使用したコンクリートの配合を表－1に示す。本研究の実験Aで使用したコンクリートはPC箱桁橋に打設されたレディーミクストコンクリートで呼び強度は40N/mm²(配合強度50N/mm²)である。セメントには早強ポルトランドセメント(密度3.14 g/cm³)を、細骨材には砕砂(表乾密度2.53 g/cm³)と海砂(表乾密度2.60 g/cm³)を容積比1:1で混合した混合砂を、粗骨材には碎石(表乾密度2.56 g/cm³)をそれぞれ用いた。混和剤にはポリカルボン酸系化合物を主成分とする高性能AE減水剤を使用した。実験Bで使用したコンクリートでは細骨材に砕砂のみを使用している。

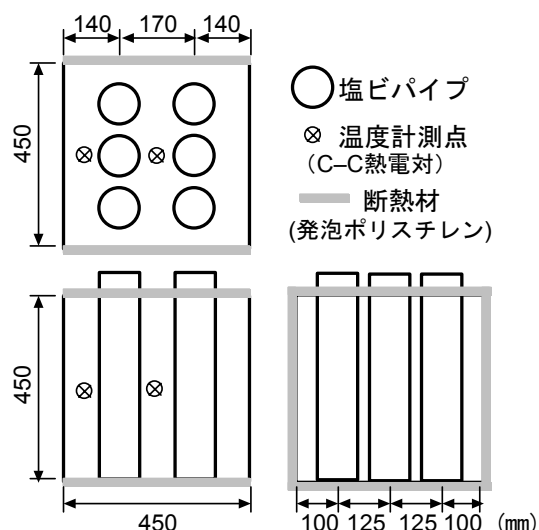
2.2 模擬試験体および圧縮強度用供試体

図－1は本研究で取り上げたPC箱桁橋の主桁標準断面図である。3径間連続ラーメン橋(桁長191.4m=63.7m+95.0m+32.7m)で、張出し工法(1ブロック2.5m～4.0m)で施工し、桁高は柱頭部の7.0mから径間中央部の2.4mまで徐々に変化する。本研究では箱桁の腹部の寸法を参考にして、図－2、図－3に示す模擬試験体を作製した。実験Aの模擬試験体では、箱桁と近い温度とするため、2側面以外の面を断熱材(発泡ポリスチレン、厚さ2cm)で覆うこととした。また、構造物のコンクリート強度を試験する場合にコア供試体を取りだして行う方法があるが、



図－1 PC箱桁橋の標準断面図

コア採取時に粗骨材がゆるむため、強度が若干低下すると言われている。本研究ではコア採取による影響を避けて、かつ実構造物になるべく近い状態のコンクリートから圧縮強度用供試体を得るため、塩化ビニールパイプ(以下、塩ビパイプと呼ぶ)を用いて模擬試験体から円柱供試体を取り出した。本研究ではこの供試体による圧縮強度を躯体コンクリートの強度とした。な



図－2 模擬試験体(実験A)の概要

お、予備実験において、塩ビパイプ内外でコンクリート温度にほとんど差がないことを確認している。

実験 A では、コンクリートを打設してある程度締固めた後、塩ビパイプ (VP100: 内径 100mm) を振動を与えながら底面まで挿入し、塩ビパイプ内をコンクリートで充填した。所定の材齢で切込みを入れるなどしてコンクリートを割裂破碎して塩ビパイプを取り出し、さらに塩ビパイプ内からコンクリートを取り出し、コンクリートカッターで上下を切断して、圧縮強度用の円柱供試体を作製した。試験材齢は 1 材齢あるいは 2 材齢とし、1 材齢の場合は塩ビパイプを中央に配置した。また、円筒型枠を用いた通常の円柱供試体も作製し、断熱材で覆った保温箱の中での養生および温度 20℃ の水中養生を行った。なお、実験 A は PC 箱桁橋の施工現場で実施した。

実験 B では、長さ 200mm の塩ビパイプ (VU100: 内径 107mm) にコンクリートを詰めて上下に塩ビキャップをし、型枠内の所定の位置に設置するための合板の箱の中に塩ビパイプを置き、その後、合板箱内を含めて型枠内にコンクリートを打設し、締固めを行い、塩ビパイプを取り出しやすくするためのスリット用の合板を挿入した。所定の材齢ごとに、一方向から順に塩ビパイプ 3 組を含むコンクリート塊をスリットで切り出し、コンクリート塊を割裂破碎して塩ビパイプを取り出し、さらにその中からコンクリートを取り出し、上下面を研磨機で処理して円柱供試体を作製した。また、円筒型枠を用いた通常の円柱供試体を作製し、温度 20℃ で封かん養生を行った。実験 B は屋内で実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 構造体コンクリートの温度

図-4 は PC 箱桁の腹部および模擬試験体で

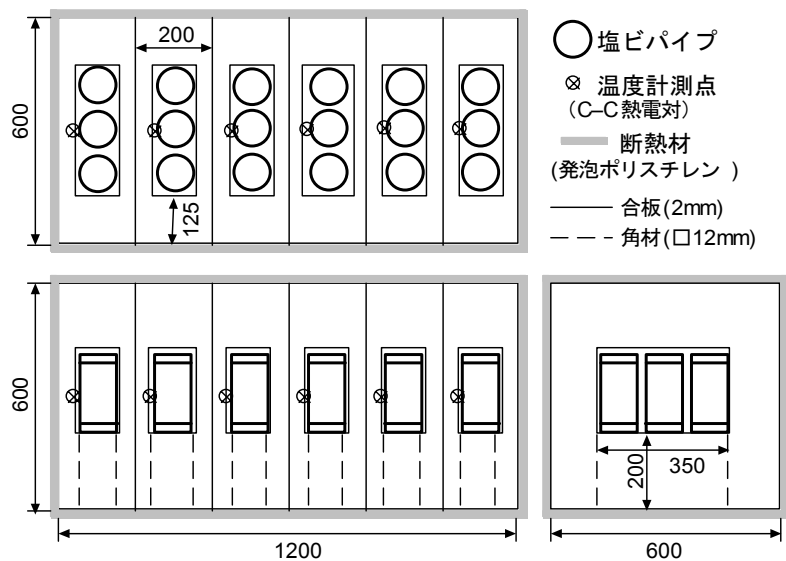


図-3 模擬試験体 (実験 B) の概要

実測されたコンクリート温度の経時変化を示す。PC 箱桁の腹部では外側がメタル型枠、内側が合板型枠を使用しており、コンクリート温度は部材中心と両側面からそれぞれ 2cm の位置で計測した。箱桁の部材寸法はマスコンクリートに分類されるほど大きくないが、富配合で早強セメントを用いたコンクリートであるため、打設後 17 時間で部材中心のコンクリート温度は最高の約 75℃が生じている。また、腹部両側の温度は最高温度時で中心より 10~12℃低く、材齢 1 日までは熱伝導が良いメタル型枠の外側のほうが合板型枠の内側よりコンクリート温度が低くなっている。なお、材齢 1 日以降で合板型枠の内

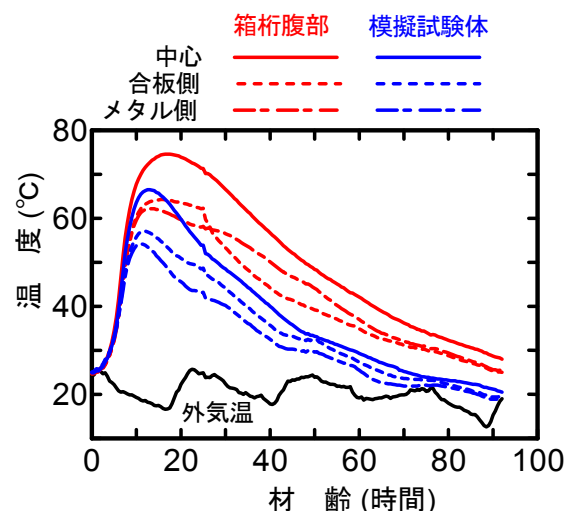


図-4 PC 箱桁腹部および模擬試験体のコンクリート温度の経時変化

側のコンクリート温度が外側より低くなっているのは合板型枠を取ったためである。

模擬試験体では箱桁腹部のコンクリート温度を再現するため、模擬試験体の相対する2側面はメタル型枠と合板型枠とし、残りの側面と上下面は断熱材で覆った。しかしながら、図-4に示すよう、最高温度は約8℃低く、その時間も約4時間早くなっている。この例のように構造物のコンクリートに近い温度履歴を再現することは容易ではなく、また、既往の温度履歴や予測値を用いて圧縮強度用供試体の温度を管理する方法も現場で予定変更が生じた場合には対応が難しいと思われる。

3.2 コンクリート強度の成長曲線

以上のことから、コンクリートの強度発現に大きく影響する要因である温度に関しては強度の評価対象である構造物で実測される温度を用いることが合理的であり、構造物の躯体コンクリートの強度評価に最も適切な温度であると言える。そこで、本研究は対象構造物で計測されたコンクリート温度とコンクリート強度の成長曲線を用いることにより、躯体コンクリートの強度を評価できると考えた。本研究ではコンクリート強度の成長曲線に以下に示す著者らが提案しているゴースタル曲線によるものを用いた⁶⁾。

$$f_c = \frac{a_g f_{28} t_e}{t_e + b_g} \quad (1)$$

ここで、

f_c : コンクリート強度

t : 積算温度による等価材齢

$$t_e = \frac{\int_0^t (T - T_0) dt}{T_s - T_0} = \sum \frac{T - T_0}{T_s - T_0} \Delta t \quad (2)$$

T : コンクリート温度

T_s : 基準温度, $T_s = 20^\circ\text{C}$

T_0 : 強度増進がないと考える温度, $T_0 = -10^\circ\text{C}$

Δt : 温度 T での期間

f_{28} : 材齢 28 日でのコンクリート強度

a_g, b_g : 定数

$$a_g = (b_g + 28) / 28$$

$$b_g = 5.19(W/C) - 0.74$$

W/C : 水セメント比

式(1)は水セメント比の違いを考慮した材齢 28 日までの早期材齢の強度推定式であり、定数 b_g を求める水セメント比の一次式の係数はセメントの種類によって異なる。

3.3 躯体コンクリート強度の評価結果

図-5は実験Bの模擬試験体で実測されたコンクリート温度の経時変化を示す。

図-6は模擬試験体の躯体コンクリートの圧縮強度発現を示す。図-6には温度 20°C で封かん養生された円柱供試体の圧縮強度も示している。躯体コンクリートの強度は水和熱によるコンクリート温度の上昇により、早期材齢においては円柱供試体の強度より高くなっているが、材齢 14 日と材齢 28 日では躯体コンクリートの強度は円柱供試体の強度を下回っている。これは図-5に示されているように、約材齢 5 日以

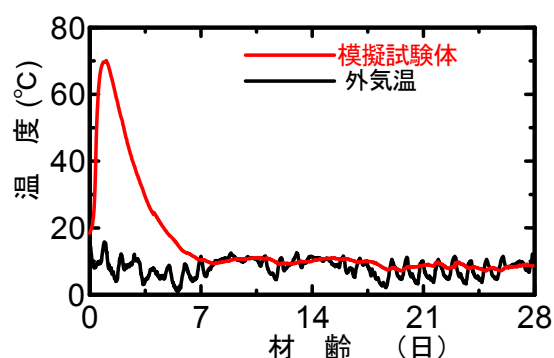


図-5 コンクリートの温度履歴（実験B）

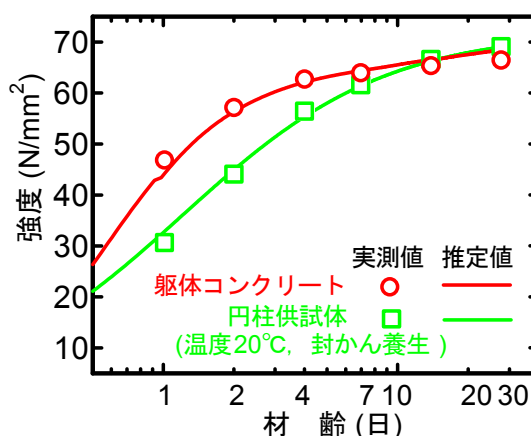


図-6 コンクリート強度の推定値と実測値の比較（実験B）

降は模擬試験体のコンクリート温度が 20℃より低くなったためである。また、図-6には式(1)の強度成長曲線と図-5に示すコンクリート温度を用いて計算した躯体コンクリート強度の推定値と温度 20℃で一定として計算した円柱供試体の強度の推定値も示している。コンクリート温度は 30 分間隔で計測し、その間は温度が一定であるとして式(2)の summation の形式で積算温度を計算し、等価材齢を求めた。推定値はどちらも実測値とよく一致しており、躯体コンクリートの強度が円柱供試体の強度より低くなることも適切に表している。

図-7は実験 A の模擬試験体の材齢 2 日で試験した躯体コンクリート強度と保温箱内で養生した管理用円柱供試体の強度を示す。外気温の影響を少なくするために一般の建設現場でしばしば行われる保温箱内養生の管理用供試体の強度は躯体コンクリート強度より低い値となった。これは後述するが管理用円柱供試体のコンクリート温度が模擬試験体より低いためである。

図-8は図-7の No.4 に関する実測のコンクリート温度とその温度と式(1)を用いて推定した圧縮強度を示す。なお、式(1)では材齢 28 日強度 f_{28} を用いるが、PC 箱桁橋に用いられたレディミクストコンクリートは早強ポルトランドセメントを使用しているので、配合強度に材齢 7 日強度 f_7 が用いられているので次式により材齢 28 日強度 f_{28} を計算した。

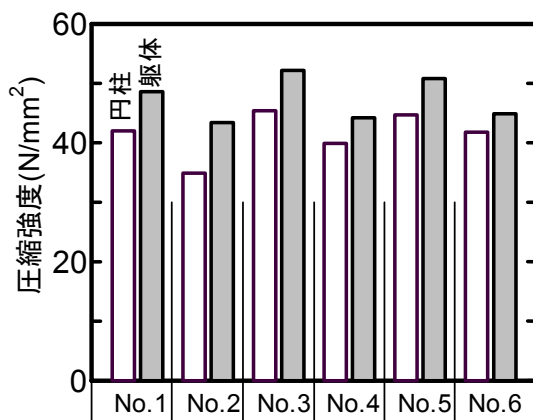


図-7 模擬試験体の躯体コンクリートおよび管理用円柱供試体の圧縮強度

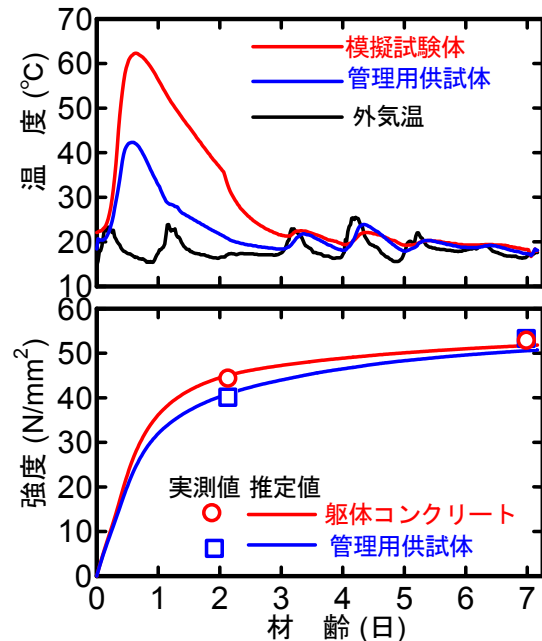


図-8 模擬試験体の躯体コンクリートおよび管理用円柱供試体の強度推定

$$f_{28} = \frac{b_g + 7}{7a_g} f_7 \quad (3)$$

推定値は躯体コンクリートおよび管理用供試体どちらの強度も精度よく評価している。

図-9は8回実施した実験 A の試験結果と推定値を比較したものである。試験材齢は材齢 1 日から材齢 7 日までである。図中の一点鎖線は原点を通るよう回帰した直線で、回帰直線は実測値と推定値が一致する 45° の実線に近く、標準

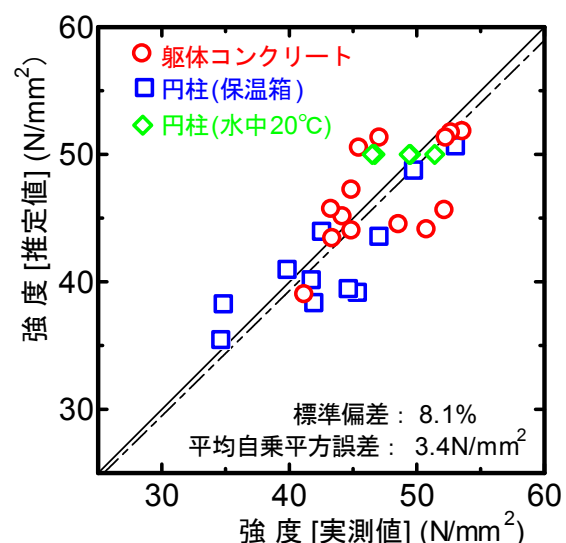


図-9 コンクリート強度の推定値と実測値の比較（実験 A）

偏差も 8.1%と小さく、推定値は精度よく実測値を推定しているといえる。

以上のように、実測コンクリート温度と強度推定式を用いて十分な精度で躯体コンクリートの強度を評価することができ、この方法により合理的にコンクリート工事の施工管理ができると考えられる。

表－2は今回対象とした PC 箱桁橋の 1 ブロックの標準的な施工サイクルを示す。道路橋示方書共通編コンクリート橋編に“プレストレッシング時のコンクリートの圧縮強度は、プレストレッシング直後にコンクリート生じる最大圧縮応力度の 1.7 倍以上とする。尚、圧縮強度の確認は構造物と同様な養生条件におかれた供試体を用いて行うものとする。”とあり、これに従い、強度試験の実施も含めて養生期間を 3 日間としている。この工事での具体的なプレストレッシング時のコンクリートの圧縮強度は 29.0N/mm^2 以上で、図－9において実験 A の全てで、材齢 1 日で所定の強度以上となった。これに基づけば 1 サイクルでは 2 日短縮でき、最大 17 ブロックで箱桁が施工されることから張出架設工においては約 1 ヶ月の工期短縮となり、それに関係して機器損料等の工費削減にもつながる。

4. まとめ

本研究はコンクリート構造物の建設工事において、養生の終了時期、型枠・支保工の取り外し時期やプレストレスの導入時期など施工の工程管理上、非常に関心の高い管理項目である構造物中の躯体コンクリート強度の評価について検討した。躯体コンクリート強度は管理用供試体の圧縮強度試験の値から推定することになっているが、打ち込まれたコンクリートと同じ状態で養生することは難しく、セメントの水和熱の影響があるコンクリート構造物では、安全側

表－2 片持架設工各工種標準施工日数

工程 \ 日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
プレストレッシング	↔										
作業車移動据付け		↔									
下床版とウェブ配筋			↔	→							
シーす組立て				↔	→						
内型枠組立て					↔	→					
上床版配筋						↔	→				
小口型枠設置							↔	→			
コンクリート打設								↔	→		
養生工									↔	→	
PC 鋼材挿入											↔
緊張準備											↔

ではあるが管理用供試体を用いる方法では躯体コンクリート強度を過小評価することとなる。本研究では構造物で実測されたコンクリート温度と強度推定式を用いることにより、躯体コンクリート強度を十分な精度で評価できることを示した。この方法は構造物のコンクリート温度を用いて評価することから、打ち込まれたコンクリートと同じ状態で養生するという条件に関しては管理用供試体を用いる方法より優れており、簡便で合理的な方法であるといえる。

参考文献

- 1) 土木学会：2002 年制定 コンクリート標準示方書[施工編]，土木学会，2002
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5，日本建築学会，2003
- 3) 桑原隆司，森永繁：マスコンクリートの強度管理方法について，セメント技術年報，38，pp.317-320，1984.12
- 4) Saul, A.G.A. : Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure, Magazine of Concrete Research, Vol.2, No.6, pp.127-140, Mar. 1951.
- 5) Chengju, G. : Maturity of concrete, Method for predicting early-stage strength, ACI Materials Journal, Vol.86, No.4, pp.341-353, July-Aug. 1989.
- 6) 氏家勲，大野浩二：各種の成長曲線によるコンクリートの早期強度推定に関する検討，土木学会論文集，No.798/VI-68，pp.51-61，2005.