

論文 自己充てん型高強度コンクリートを用いた構造体強度のばらつきに関する検討

福山 雅典*1・山本 和範*2・渡部 正*3・小澤 一雅*4

要旨：土木学会コンクリート標準示方書によれば，一般の構造物の材料係数は 1.3，高強度領域の材料に対しては 1.5 と定められている。しかし，自己充てん型高強度コンクリートに対しても 1.5 が適用されることにより，自己充てん材料の特性を十分に活かすことができない。本研究では，普通コンクリートと自己充てん型高強度コンクリートを用いた実大模型実験を実施し，構造体強度のばらつきを比較することによって，自己充てん型高強度コンクリートの材料係数を検討した。

キーワード：材料係数，自己充てん性，高強度，構造体強度，低熱ポルトランドセメント

1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書¹⁾によると，一般構造物の設計におけるコンクリートの材料係数は 1.3 を，高強度領域のコンクリートの材料係数は 1.5 という数値が推奨されている。材料係数は，打設方法や環境条件等によって生じる実構造体中の強度のばらつきや，構造体強度と管理用供試体との強度差を考慮して定められた安全率である。ここで，高強度領域のコンクリートに対して材料係数が高く設定されているのは，実構造体強度と管理用供試体強度の差異が高強度領域において増加する可能性があることを考慮したためであると考えられる。

自己充てん型高強度コンクリートは，材料分離抵抗性に優れ，高い自己充てん性能により締固めをしないで施工することを可能としている。つまり，自己充てん型高強度コンクリートを用いた構造体は，打設の良否によって生じる品質の強度のばらつきは小さく，普通コンクリートに比べて均一な品質が得られると考えられる。したがって，自己充てん型高強度コンクリートを用いた構造物の材料係数を考える場合に，普通コンクリートと比較して，実構造体強度と管

理用供試体強度の差異が高強度領域において大きくなる傾向が無ければ，コンクリートの脆性的な破壊が問題とならない構造物において，材料係数を普通コンクリート程度に低減しても差しつかえないと考えられる。

これまで，高強度コンクリートの実構造体と管理用供試体の強度差に関する研究報告²⁾は多くなされているが，その差異に対して一定の評価方法を与えるまでには至っていない。

本研究では，自己充てん型高強度コンクリートの均一性を活かした合理的な設計を可能とするために，普通コンクリートと自己充てん型高強度コンクリートの実大模型実験を実施し，構造体強度のばらつきを比較検討した。

2. 実験概要

構造体強度のばらつきを検討するために，RC壁形状の模擬試験体を作製し，構造体のコア強度を測定した。構造体強度のばらつきは，コアと標準養生供試体の強度比（K 値）を用いて評価し，K 値と材料係数 α の関係性を明らかにすることによって，自己充てん型高強度コンクリートの材料係数を検討した。また，普通コンクリ

*1 前田建設工業(株) 技術研究所 (正会員)

*2 同上 工修 (正会員)

*3 同上 課長 工博 (正会員)

*4 東京大学 大学院助教授 新領域創成科学研究科 工博 (正会員)

ートについては、締固め方法の良否が構造体強度のばらつきに与える影響を確認するために、異なる締固め方法を用いて比較した。

2.1 試験構造体

(1) 構造体の形状寸法

壁構造体の形状寸法と配筋図を図 - 1、図 - 2 に示す。なお、壁の長さが高流動コンクリートの標準流動距離を確保するため 8.0m とした。また、せん断補強筋を模擬した幅止め鉄筋を @300 の千鳥配置し、約 130kg/m³ の鉄筋量で配筋した。さらに、当施工実験が冬期打設となったことから、構造体の周囲を厚さ 50mm の硬質発泡ウレタンフォームで覆った。

(2) コンクリート配合

普通コンクリートは、呼び強度 24 とし、JIS 認定工場の標準配合を用いた。また、自己充填型高強度コンクリートは、低熱ポルトランドセメントの 1 成分粉体系配合とし、配合試験によって、ランク 2 の自己充填性能が得られる配合とした。表 - 1 および表 - 2 にコンクリートの配合表を示す。

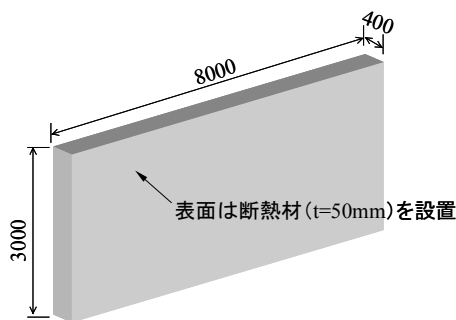


図 - 1 壁構造体形状寸法 (mm)

2.2 施工方法

壁構造体の施工モデルと各コンクリートの打設方法の違いを表 - 3、図 - 3 に示す。

普通コンクリートについては、土木学会コンクリート標準示方書に基づいた理想的な締固め方法と、簡易な締固め方法で施工し、それぞれ施工方法 A および施工方法 B とした。近年の過密配筋や安価な労働力が不足する状況の中では、示方書に示すような入念な締固めが実施しにくくなっている。この様な現状を踏まえて、標準示方書に準ずるか否かで締固め方法をモデル化することとした。また、自己充填型高強度コンクリートの施工は、土木学会の高流動コンクリート施工指針²⁾に基づいて施工し、一方向から連続打設した。

2.3 強度測定位置

構造体強度を測定するためのコア採取位置を図 - 4 の示す。コアは 100mm とし、鉄筋を避けて各構造体毎に 35 本(縦 5 × 横 7)採取した。なお、コアの採取は強度測定材齢の直前に

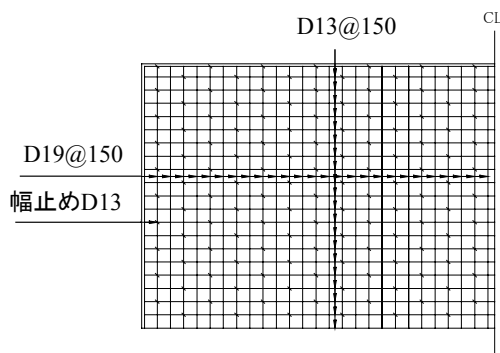


図 - 2 壁構造体配筋図

表 - 1 普通コンクリート配合表 (24 - 12 - 20N)

呼び強度 (N/mm ²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (mm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
						水 W	セメント C	細骨材		粗骨材 G	混和剤 AE減水剤 A
								砕砂 S1	陸砂 S2		
24	20	12	57.5	4.5	47.1	166	289	431	431	982	2.89

表 - 2 自己充填型高強度コンクリート配合表

自己充填性のランク	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (mm)	水結合材比 (%)	水結合材容積比 (%)	空気量 (%)	単位粗骨材絶対容積 (m ³ /m ³)	単 位 量 (kg/m ³)					
							水 W	セメント C	細骨材		粗骨材 G	高性能 AE減水剤
									砕砂 S1	陸砂 S2		
2	20	650	29.6	106	5.5	0.3	163	551	245	568	798	5.79

表 - 3 コンクリート打設方法

項 目	普通コンクリート		自己充てん型 高強度コンクリート
	施工方法 A	施工方法 B	
1層当たりの打設高さ	40～50cm	100～150cm	連続打設
締固め方法	高周波パイプレーター	高周波パイプレーター	締固め無し
締固め機挿入間隔	50cm	100cm	-
締固め機挿入深さ	下層コンクリート中に10cm	下層コンクリート中に50cm	-
1カ所当たりの挿入時間	5～15秒	20～30秒	-
打ち上がり速度	50cm / 10分 / 層	150cm / 20分 / 層	100cm / 10分
コンクリート流動距離	横移動無し	流動勾配により移動	8.0m
コンクリート落下高さ	落下無し (0cm)	50～100cm	落下無し (0cm)
打設口間隔	1.5m間隔	4.0m間隔	基本的に1カ所から打設

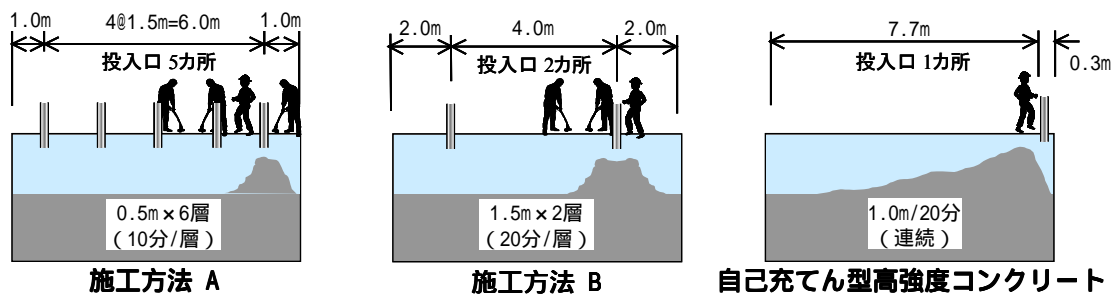


図 - 3 コンクリート打設方法

実施し、普通コンクリートは材齢 28 日、自己充てん型高強度コンクリートは材齢 56 日で圧縮強度を測定した。

3. 強度測定結果

図 - 5 に構造体強度の測定結果と K 値 (コア強度 / 標準供試体強度) のばらつきを示す。

3.1 普通コンクリート

普通コンクリートにおいて、施工方法 A は全体にばらつきの変動幅が小さいのに対し、施工方法 B は、壁の中心付近と打ち継ぎ面付近に不良品質が見受けられる。また、施工方法 A と B の K 値を比較すると、平均値はほとんど変わらないものの、施工方法 B のばらつきが明らかに大きいことが分かる。

したがって、普通コンクリートの場合、締固めの良否は構造体強度のばらつきに対して大きく影響していることが分かる。

3.2 自己充てん型高強度コンクリート

自己充てん型高強度コンクリートについては、最上部の中心付近に大幅に強度の小さいコアが

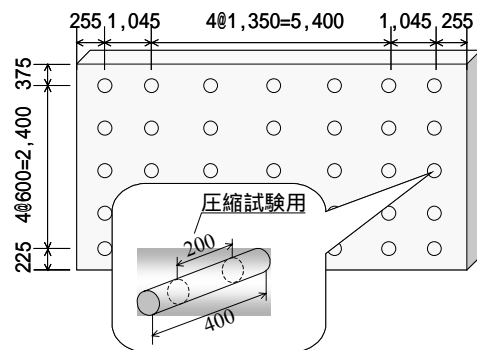
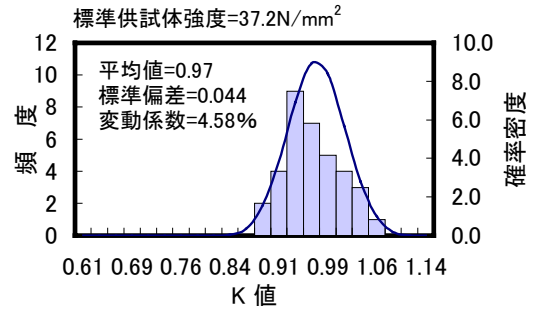
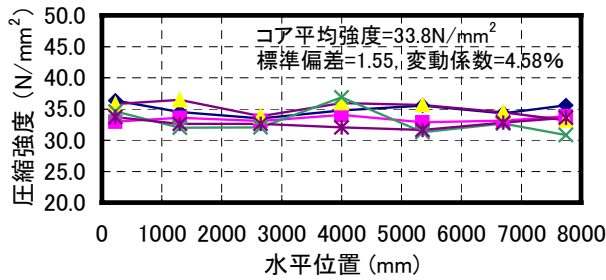


図 - 4 コア採取位置

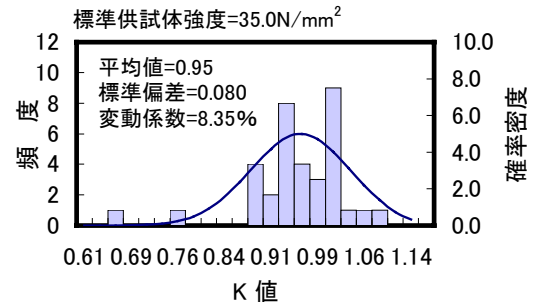
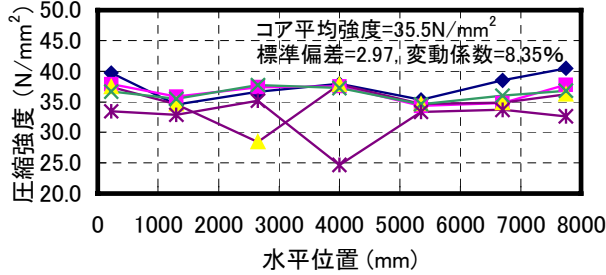
1カ所存在したが、その他は $85.0 \pm 5.0 \text{ N/mm}^2$ の範囲に分布している。このコア強度の低い範囲は、流動勾配によるコンクリートの不足分を後から打ち足した部分であり、打設口を移動したことによって、施工に伴う何らかの不良品質が発生したものと考えられる(図 - 6)。また、K 値のばらつきを比較すると、示方書に準じた施工方法 A とほぼ同等であり、全体的に均一な品質であることが分かる。

さらに、自己充てん型コンクリートは、施工の良否の影響を受けにくいことを考慮すれば、普通コンクリートのように施工条件毎の K 値の

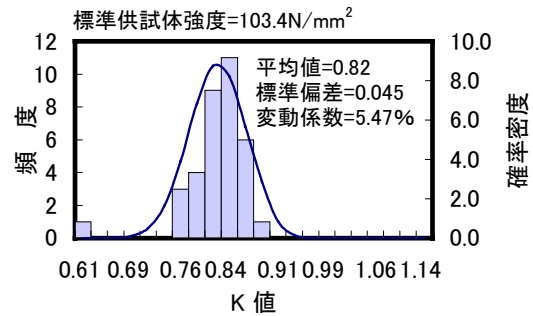
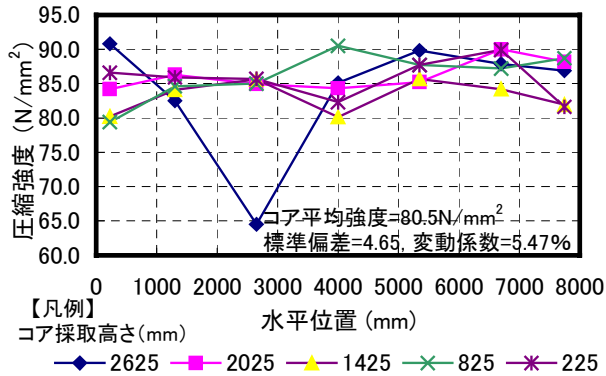
普通コンクリート施工方法 A



普通コンクリート施工方法 B



自己充てん型高強度コンクリート



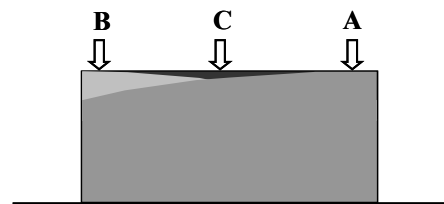
圧縮強度

K値のヒストグラム

図 - 5 構造体強度のばらつき

変動幅は小さいと考えられる。したがって、自己充てん型高強度コンクリートのばらつきは、示方書に基づいて十分に締固めした普通コンクリート構造物と同程度であると言える可能性がある。

一方で、自己充てん型高強度コンクリートの K 値の平均値は 0.82 となっており、構造体強度は標準供試体強度に比べて 2 割程度小さい値を示している。これは、一般に高強度コンクリートが、初期材齢時における高温履歴の影響を受けることによって強度低下すると言われている傾向と一致しており²⁾、コンクリート温度の測定結果(図 - 7)によると、最高温度は施工方法 A と比べて 8 程度高い値を示している。



天端まで一方向から(A)打設し、不足部分に対しては打設口を移動して打設した(B、C)

図 - 6 自己充てんコンクリートの打設

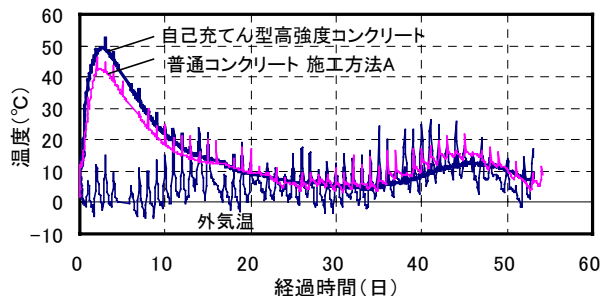


図 - 7 コンクリート温度履歴

ここで、コンクリート標準示方書に基づいて K 値の下限規格値 ($K_{5\%}$) を算出し、材料係数 $\gamma_c = 1.3$ ($K = 1/\gamma_c = 0.77$) を満足しているか確認した(図 - 8)。その結果、自己充てん型高強度コンクリートは、K 値のばらつきは小さいものの、現状の材料係数 γ_c (構造体と標準供試体の強度差と構造体自身の強度のばらつきの両方を考慮している) で評価した場合には $K_{5\%} > 0.77$ ($\gamma_c = 1.3$) を満足出来ていないことが分かった。

4. 考察

4.1 K 値と材料係数 γ_c の関係

自己充てん型高強度コンクリートの均一性の特性を、合理的な手法で設計に取り入れるためには、設計基準強度を構造体と標準供試体の強度比である K 値の平均値と、構造体内の強度のばらつきに分けて評価する必要があると言える。

そこで、構造体強度のばらつきに対する安全率を γ_c^* 、K 値の平均値を K_{ave} として構造体強度を表すと以下ようになる。

$$f'_{cd} = f_{ck} / \gamma_c^* = K_{ave} \cdot f_{ck,t} / \gamma_c^* \quad (1)$$

ここに f'_{cd} : 構造体強度

f_{ck} : 設計基準強度

$f_{ck,t}$: 標準供試体強度

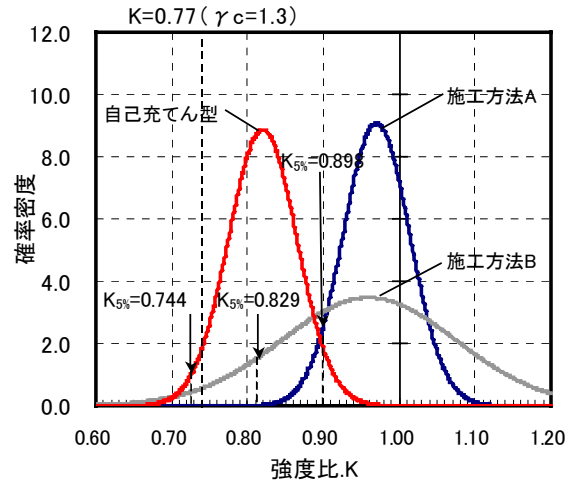
K_{ave} : 構造体と標準供試体の強度比の平均値

γ_c^* : 構造体強度のばらつきに対する安全率

式(1)は、 $f'_{cd} = f_{ck,t} / (\gamma_c^* / K_{ave})$ とも表せるため、従来の材料係数は $\gamma_c = \gamma_c^* / K_{ave}$ と考えることが出来る。すなわち、従来の γ_c は構造体強度のばらつきに関する安全率と構造体強度と標準供試体強度の平均値のズレの両者の影響を含んだ安全係数として表せる。

これまで普通コンクリートの場合は、材料係数 γ_c に対して構造体と標準供試体の強度差 K_{ave} の影響はそれほど大きくなかったと考えられる。しかし、自己充てん型高強度コンクリートのように K_{ave} 値が 0.80 程度まで減少する材料では、 γ_c を大きくする必要があった。

そこで、K 値の影響を考慮して設計基準強度



下限規格値 ($K_{5\%}$) = 平均値 - 1.64 × 標準偏差 不良発生確率を 5% とした場合の下限規格値 (平成 8 年度 土木学会 標準示方書による)

図 - 8 K 値の下限規格値

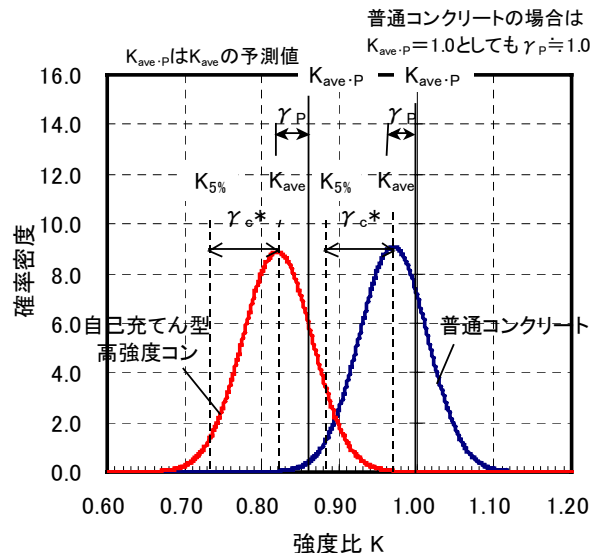


図 - 9 p と γ_c^* の関係

表 - 4 γ_p が 1.0 の場合の γ_c^* と $\gamma_{c \cdot new}$ の関係

項目	K_{ave}	$K_{5\%}$	p	γ_c^*	$\gamma_{c \cdot new}$
施工方法 A	0.97	0.898	1.00	1.08	1.08
施工方法 B	0.95	0.829	1.00	1.15	1.15
自己充てん型高強度コンクリート	0.83	0.744	1.00	1.12	1.12

を評価する方法として、 K_{ave} を K_{ave} の推定値である $K_{ave,p}$ と、 $K_{ave,p}$ の推定精度に対する安全率 p を用いると(図 - 9)、式(1)は以下のように表すことが出来る。

$$f'_{cd} = (K_{ave,p} / p) \cdot (f_{ck,t} / \gamma_c^*) = (K_{ave,p} \cdot f_{ck,t}) / (\gamma_c^* \cdot p) \quad (2)$$

ここに $K_{ave,p}$: K_{ave} の推定値

p : $K_{ave,p}$ の信頼性に対する安全率

さらに、構造体強度 f'_{cd} と標準養生供試体強度 $f'_{ck,t}$ の関係は、新たな材料係数 $c_{new} = p \cdot c^*$ を定義することによって次式で表すことが出来る。

$$f'_{cd} = K_{ave,p} \cdot f'_{ck,t} / c_{new} \quad (3)$$

$$\text{ここに } c_{new} = p \cdot c^* \quad (4)$$

$$c^* = K_{ave} / K_{5\%} \quad (5)$$

$$p = K_{ave,p} / K_{ave} \quad (6)$$

$K_{5\%}$ ：正規分布の下側 5%における K 値

今回の実験の場合、構造体強度はコア強度から正確に推定できるため、 $K_{ave,p} = K_{ave}$ であり、 $p = 1.0$ とすることが可能である。つまり、構造体強度の測定結果と式(5)を用いると、各コンクリートの c_{new} は表 - 4 のように表すことが出来る。表 - 4 によると、自己充てん型高強度コンクリート構造物の安全係数 c_{new} は、普通コンクリートと同程度であると言える。

現在、「自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物 設計・施工指針(案)」⁴⁾から、自己充てん型高強度コンクリートの材料係数は $c=1.3$ が提案されている。しかし、自己充てんコンクリートの品質は施工の影響を受けにくいいため、材料係数に $K_{ave,p} / p$ を導入することによっては、自己充てん型高強度コンクリートの c_{new} はさらに小さく出来ると考えられる。

4.2 S 値と材料係数 c

JASS5 では、高強度コンクリートの構造体強度と供試体強度の差異を考慮するために S 値が用いられている。S 値は管理用供試体と構造体コンクリート強度推定値の差としており、一般的には、実際の施工条件を考慮した事前の施工試験によって、現場ごとに実際の強度差を測定することによって定められている。

一方で、 $K_{ave,p}$ は標準養生供試体と構造体の強度の比の推定値であり、推定精度に対する安全率 p を導入することによって、高強度コンクリートの材料係数を合理的に表現しようとした方法であるが、高強度領域のコンクリートの構造体と標準供試体の強度差を考慮する点では S 値と同じ目的を持つと考えられる。

$K_{ave,p}$ および S 値の設定は、今後十分なデータの蓄積によれば、いずれ可能となるであろう。その結果、 $K_{ave,p}$ の推定精度が高まれば、材料係数 c_{new} を適用することによって合理的な構造物の設計が可能となる。つまり、自己充てん型高強度コンクリートにおいては、構造体強度の均一性の特性を活かすことが可能となる。

5. まとめ

- (1) 普通コンクリートの構造体強度のばらつきには、締固めの良否が大きく影響している。
- (2) 自己充てん型高強度コンクリートの構造体強度のばらつきは、示方書に基づいた施工による普通コンクリート構造体と同等である。
- (3) 今回の実験条件では、自己充てん型高強度コンクリートの K 値は 0.82 程度であった。
- (4) 材料係数に $K_{ave,p} / p$ を導入することによって、自己充てん型高強度コンクリート材料の材料係数を合理的に表現できる。
- (5) 今後のデータの蓄積によって、 $K_{ave,p}$ の推定精度が高まれば自己充てん型高強度コンクリート構造物の合理的な設計が可能となる。

謝辞

研究の一部は平成 12 年度科学技術庁(現文部科学省)の革新的技術開発研究推進費補助金(研究課題：高性能コンクリートを用いた次世代建設システムに関する研究、研究代表者：東京大学 大学院 小澤 一雅)によるものであり、本研究分担者各位より貴重な助言を頂いた。

参考文献

- 1) 土木学会：【平成 8 年度版】コンクリート標準示方書-設計編, pp. 19-22, 1996
- 2) 建築学会：高強度コンクリートの技術の現状, 1991
- 3) 土木学会：【コンクリートライブラリー93】高流動コンクリート施工指針, 1998
- 3) 土木学会：【コンクリートライブラリー105】自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計・施工指針(案), 2001