

報告 プレキャスト部材用高強度コンクリートの諸性状

松田 学^{*1}・長岡誠一^{*2}・上原伸郎^{*3}・一家惟俊^{*4}

要旨: 耐久性および経済性に優れたプレキャストコンクリート構造部材を製造することを目的として開発した設計基準強度 80N/mm² 級の高強度コンクリートについて、その諸性状を試験により明らかにした。さらに、本コンクリートを使用してボックスカルバートを製作し、外圧試験を実施した。これらの試験の結果、本コンクリートは耐久性に非常に優れること、本コンクリートを使用したボックスカルバートは製品版厚を変更することなく高盛土などの特殊設計条件に対応可能であることが明らかになった。

キーワード: プレキャストコンクリート, 高強度, 耐久性, ボックスカルバート

1. はじめに

従来のプレキャストコンクリート製品、特に土木分野においては仕様規定により製品の規格化が図られていた。しかし、顧客の立場は仕様よりも目的・用途を満足する性能を求めており、新たなニーズへの対応のため、プレキャストコンクリート製品 JIS の再編が進められている¹⁾。今後、性能規定化の実現によって製造の自由度が広がり、低コストで信頼性の高い製品の製造が期待される。その中でコンクリートの高強度化・高耐久化は、設計・製造の自由度が高まるとともに製品品質の向上においても有望視される。本報告は、プレキャストコンクリート構造部材に適した設計基準強度 80N/mm² 級の高強度コンクリートの諸性状および本コンクリートを使用して製作したボックスカルバートの耐圧性状について試験した結果を述べるものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に使用材料を示す。結合材は普通ポルトランドセメントを基本として微粉末系混

表-1 使用材料

材 料		仕 様 等
結合材 (B)	セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度: 3.15g/cm ³
	混和材 (A)	微粉末系混和材 密度: 2.36 g/cm ³
細骨材 (S)		長崎県壱岐産海砂 表乾密度: 2.58 g/cm ³ FM: 2.44
粗骨材 (G)		熊本県山鹿産碎石 2005 表乾密度: 3.02 g/cm ³ FM: 6.72
混和剤 (SP)		高性能 AE 減水剤

和材を 10% 置換した。細骨材に海砂、粗骨材に安山岩系碎石を用いた。また混和剤にはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合は設計基準強度を 80N/mm² とし、配合強度 95N/mm² を満足するものとした。配合条件は、目標スランプ 21 ± 1.5cm, 目標空気量 2 ± 1.5% とした。なお、単位水量は施工性が確保できる範囲における最

*1 (株) ヤマックス 開発研究本部係長 工修 (正会員)

*2 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 主任研究員 (正会員)

*3 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 研究員 (正会員)

*4 (株) ヤマックス 常務取締役開発研究本部本部長 工博

小値を試験練りにより求めた。コンクリートの配合を表-2に示す。

2.3 コンクリートの練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜは水平二軸強制ミキサ（室内試験：容量 55ℓ，練混ぜ量 35ℓ/バッチ，実機試験：容量 1.0m³，練混ぜ量 0.7m³/バッチ）を用いた。練混ぜは粉体量が多いことを考慮して，分割方式により行った。まず，結合材と細骨材を投入後 30 秒間混練り，一次水投入後 50 秒間混練り，最後に粗骨材および二次水を投入して 150 秒間混練りして排出した。なお，一次水と細骨材の表面水を合わせた水量は単位水量の 85%とした。また，室内試験はすべて 20℃の恒温室で練混ぜを行った。

2.4 試験項目および方法（室内試験）

実施した試験項目および方法は表-3に示す通りである。

2.5 ボックスカルバートの外圧試験

本コンクリートならびに設計基準強度 35N/mm² の普通強度コンクリートを用いて 1500×1500×1000mm のボックスカルバート試験体を製作した。製品形状，配筋ならびに外圧試験は全国ボックスカルバート協会規格に準じ，材齢 28 日において試験を行った。

図-1 に試験体形状図を示す。図中に示した部位に変位計を取付け，試験体の載荷時の変位量を測定した。なお，標準養生ならびにシート保温養生において供試体の強度試験を行った。

表-2 コンクリートの配合

W/B (%)	s/a (%)	単位容積質量(kg/m ³)					
		W	C	A	S	G	SP
23	39.3	170	665	74	575	1042	6.50

表-3 試験項目および方法

項目	方法
圧縮強度	JIS A 1108
曲げ強度	JIS A 1106
引張強度	JIS A 1113
せん断強度	JCI-SF6
静弾性係数	JSCE-G 502-1999
乾燥収縮	JIS A 1129
自己収縮	JCI (案)
クリープ	JIS 原案
促進中性化	建築学会 (案)
凍結融解	JIS A 6204 附属書 2

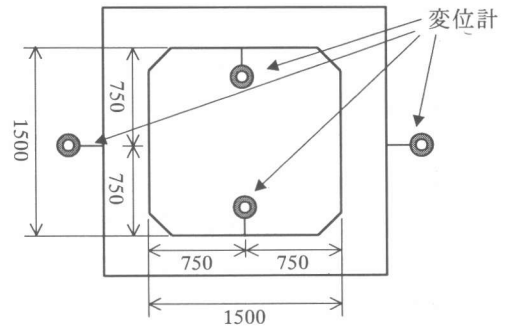


図-1 ボックスカルバート試験体形状図

3. 試験結果

3.1 各種強度

各種強度試験結果をまとめて表-4に示す。また，圧縮強度と曲げ強度，引張強度およびせん断強度の関係を図-2に，圧縮強度と静弾性係数の関係を図-3に示す。

曲げ強度は日本建築学会

表-4 各種強度試験結果

項目	材 齢 (日)				
	1	7	14	28	91
圧縮強度 (N/mm ²)	55.6	77.5	82.9	96.6	104.3
曲げ強度(N/mm ²)	6.10	9.80	11.3	10.4	12.3
引張強度(N/mm ²)	3.41	5.00	4.72	5.10	5.05
せん断強度(N/mm ²)	—	—	—	10.8	—
静弾性係数(kN/mm ²)	34.5	39.7	38.9	42.9	46.6

「高強度コンクリートの技術の現状'91」において、約 85N/mm² の高強度コンクリートまで表せるとされている関係式 (1) ²⁾ に比べて若干高くなっているが、引張強度は同様の関係式 (2) ²⁾ に比べて若干低くなった。

また高強度コンクリートのせん断強度に関しては報告例がないので、モールの応力円 (3) 式からせん断強度をもとめると 11.1N/mm² となり、実測値 (10.8N/mm²) とほぼ一致する結果となった。

$$\sigma_b = 0.990 \times \sigma_c^{1/2} \quad (1)$$

$$\sigma_t = 0.626 \times \sigma_c^{1/2} \quad (2)$$

$$\sigma_s = (\sigma_c \times \sigma_t)^{0.5/2} \quad (3)$$

静弾性係数は、高強度コンクリートへの適応に優れる New RC の式 (4) とほぼ一致する結果となった。

$$E = 33.5 \times k_1 \times k_2 \times (\gamma / 2.4)^2 \times (F_c / 60)^{1/3} \quad (4)$$

E : コンクリートの静弾性係数 (kN/mm²)

γ : コンクリートの単位容積質量 (t/m³)

F_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

k₁ : 粗骨材の種類による補正係数

k₂ : 混和材の種類による補正係数

3.2 乾燥収縮

乾燥収縮試験結果を図-4に示す。図中の式は高強度領域においても予測値と実測値が概ね一致するとされている土木学会コンクリート標準示方書の予測式 (5) を示している ³⁾。乾燥による長さ変化率は土木学会の予測式の6割程度で、かなり小さいものと考えられる。

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\}] \varepsilon'_{sh} \quad (5)$$

$\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$: コンクリートの材齢 t_0 から t までの収縮ひずみ ($\times 10^{-5}$)

ε'_{sh} : 収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-5}$)

3.3 自己収縮

自己収縮試験結果を図-5に示す。図中の予測値は水結合材比が 20~60% の範囲で適応できるとしている田澤らの予測式 (6) ⁴⁾ から算定したものである。本コンクリートの自己収縮は、田澤らの予測式においてセメントおよび混和材の影響を表す係数を普通ポルトラン

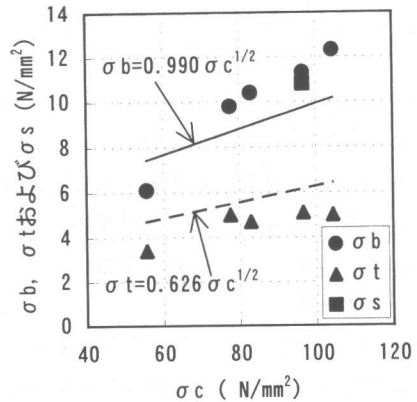


図-2 圧縮強度 (σ_c) と曲げ (σ_b), 引張 (σ_t) およびせん断強度 (σ_s) の関係

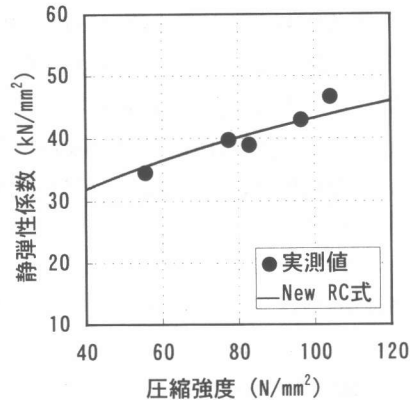


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

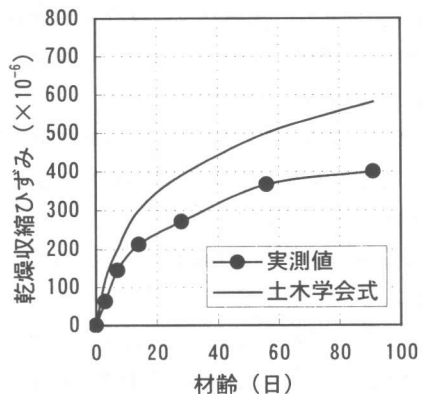


図-4 乾燥収縮試験結果

ドセメントの1.0を使用した場合に比べて著しく小さく、この係数を0.7とした中庸熟ポルトランドセメントと同等となった。

$$\varepsilon_c(t) = \gamma \varepsilon_{c0} (W/B) \beta(t) \quad (6)$$

$\varepsilon_c(t)$: 材齢 t 日の自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

$\varepsilon_{c0}(W/B)$: 自己収縮ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$)

γ : 結合材の種類の影響を表す係数

$\beta(t)$: 自己収縮の進行を表す関数

3.4 クリープ

荷重材齢と単位クリープひずみを図-6に示す。図中には高強度領域において予測値と実測値がよく一致することが確認されている Müller-Küttner 式⁵⁾および土木学会コンクリート委員会クリープ・乾燥収縮小委員会において提案されている予測式(7)⁶⁾を示している。

供試体の養生および保存方法が密封の場合に綾野らの予測式とよく一致する結果となり、気中の場合には3割程度大きな値となった。

$$Cr.(t,t') = \left\{ \frac{4W(1-h)+350}{12+ft'} \right\} \cdot \ln(t-t'+1) \quad (7)$$

$Cr.(t,t')$: 単位応力あたりのクリープひずみ ($\times 10^{-6}$)

t : コンクリートの材齢 (日)

t' : 荷重開始時材齢 (日)

W : 単位水量 (kg/m^3)

h : 相対湿度 (as decimal)

ft' : 荷重開始時材齢の圧縮強度 (N/mm^2)

3.5 中性化

促進中性化試験材齢26週における中性化深さは0mmであり、密実なコンクリートであるため中性化進行速度は著しく遅いと思われる。

3.6 凍結融解

凍結融解試験結果を図-7に、凍結融解抵抗性を向上させるために空気量を増加させたものと併せて示す。試験の結果、空気量2%においても300サイクルで100%以上の相対動弾性係数を示し、空気量が2%でも十分な凍結融解抵抗性を有していることが明らかになった。

ちなみに、標準養生における材齢28日の圧縮強度は、空気量が1%増えるごとに約3.5%の強度低下を示した。

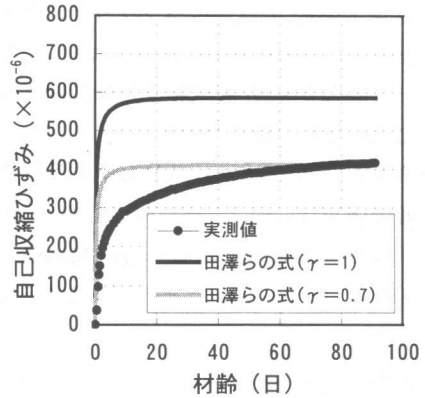


図-5 自己収縮試験結果

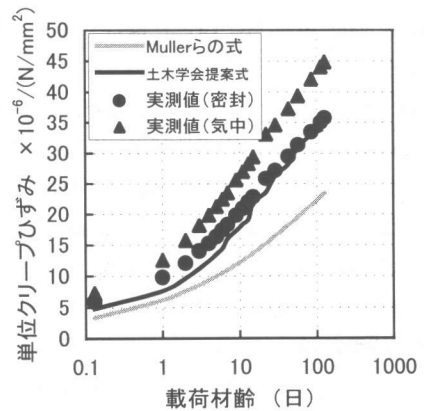


図-6 クリープ試験結果

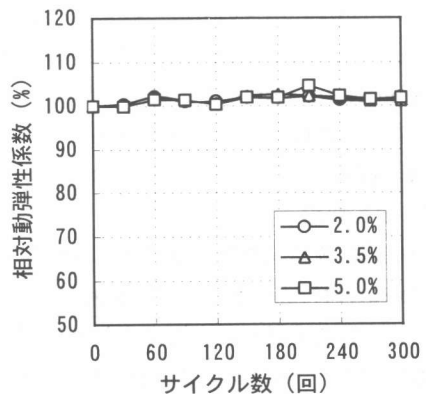


図-7 凍結融解試験結果

3.7 外圧試験

(1) 供試体強度

表-5 に供試体の強度試験結果を示す。ボックス試験体の養生はシート保温養生とした。養生材齢 28 日間の外気平均温度は 5.3℃と低く、強度発現は遅れる傾向にあったが、材齢 1 日の圧縮強度は 23.8N/mm²であり十分な脱型強度が確保された。なお、普通強度のコンクリート試験体は最高温度 65℃の蒸気養生を行い、その後試験材齢まで気中養生を行った。

(2) ボックス試験体の外圧試験

表-6 に外圧試験結果、図-8 に荷重値と頂版変位の関係および図-9 に荷重値と側版変位の関係を示す。設計基準強度 80N/mm²の高強度コンクリート試験体ならびに設計基準強度 35N/mm²の普通強度コンクリート試験体ともに RC1 種規格荷重値を満足した。高強度コンクリート試験体においては RC2 種規格荷重値および土被りを 8m とした設計荷重値においても異常は観察されなかった。試験体のひび割れ発生荷重値は供試体強度より算定したひび割れ荷重値とほぼ一致する結果を示した。

地中埋設構造物であるボックスカルバートは通常、土被り 0.2~3m の土圧を考慮して設計

表-5 強度試験結果

項目	区分	高強度			普通
		1日	14日	28日	28日
圧縮強度 (N/mm ²)	製品同一	23.8	73.2	80.0	41.8
	標準	—	—	99.5	52.2
静弾性係数 (kN/mm ²)	製品同一	—	—	41.7	30.6
引張強度 (N/mm ²)	製品同一	—	4.28	4.51	3.69
	標準	—	—	5.11	—
曲げ強度 (N/mm ²)	製品同一	—	6.81	8.00	4.95
	標準	—	—	10.8	—

註) 高強度: $\sigma_{ck}=80\text{N/mm}^2$ 配合, 普通: $\sigma_{ck}=35\text{N/mm}^2$ 配合

表-6 外圧試験結果

区分	荷重値 (kN)	状況	
		普通	高強度
RC1種規格	55.0	異常なし	異常なし
RC2種規格	82.4	亀裂有り	異常なし
高盛土8m時の設計荷重	102	—	異常なし
頂版ひび割れ荷重の計算値	—	*81.9kN	*135kN
頂版ひび割れ荷重の実測値	—	80.0kN	135kN
側壁ひび割れ荷重の実測値	—	110kN	290kN

※供試体強度による計算値

しているが、これ以上の土圧を考慮しなければならない高盛土などの特殊設計条件になると①補強筋等の使用②製品版厚を増加するなどの対応が図られている。しかしながら、②の対応になると製品型枠の改造や新規型枠の製作がともない、経済面からも十分に対応されていないのが実状である。

図-10 に 1500×1500×1000mm のボック

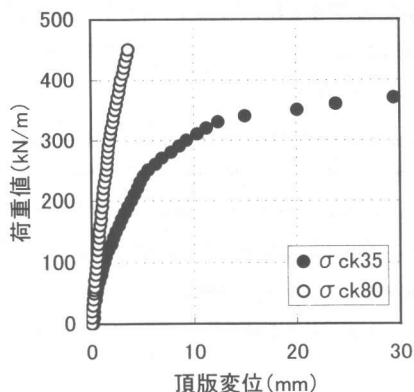


図-8 荷重値と頂版変位の関係

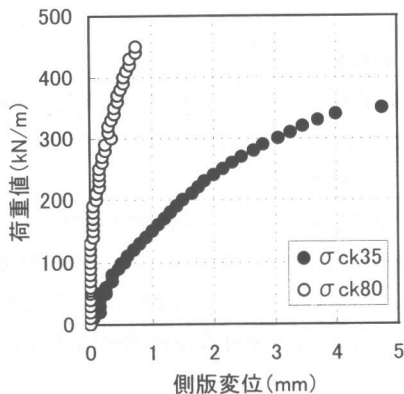


図-9 荷重値と側版変位の関係

スカルバートにおける土被りと頂版に発生するモーメントの関係を示す。なお、図中に設計基準強度 35N/mm^2 の普通強度コンクリートと設計基準強度 80N/mm^2 の本コンクリートを用いた場合に既存版厚および標準配筋で設計対応が可能と計算される上限値を示した。現状の規定による設計法では設計基準強度 80N/mm^2 級の高強度コンクリートが負担する許容応力度の規定がないため、終局強度による設計検討等の必要性が有るものの、本実験の耐圧性能から判断してプレキャスト構造部材への高強度コンクリートの適用は有効であるものと思われる。

4. まとめ

プレキャストコンクリート構造部材に適した設計基準強度 80N/mm^2 の高強度コンクリートの諸性状、および本コンクリートを使用して製作したボックスカルバートの外圧試験をした結果、以下のことが明らかになった。

(1) 強度・クリープ特性

本コンクリートは 5°C 雰囲気においても保温養生により材齢 1 日で 20N/mm^2 以上、 20°C 雰囲気では 50N/mm^2 以上の初期強度を発現し、標準養生材齢 28 日で 96N/mm^2 以上の圧縮強度を示した。また静弾性係数、曲げ強度、引張強度、せん断強度およびクリープに関しては既往の高強度コンクリートとほぼ同様な傾向を示した。

(2) 収縮特性

乾燥収縮および自己収縮は、土木学会予測式および田澤らの予測式から得られる値に比べてかなり小さくなった。

(3) 中性化試験および凍結融解試験

中性化の進行は、促進中性化試験材齢 26 週においても全く認められなかった。また、空気量 2% においても十分な凍結融解抵抗性を有することが明らかとなった。

(4) 耐圧性状

プレキャストボックスカルバート製品への

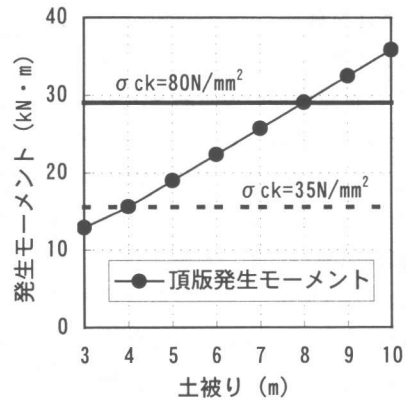


図-10 土被りと発生モーメントの関係

高強度コンクリートの適用は、従来規格製品の版厚を変更することなく、高盛り土などの特殊設計条件に対応可能である結果を示した。

参考文献

- 1)長瀬重義、國府勝郎、河野広隆：工業標準およびコンクリート製品規格の動向、セメント・コンクリート、No.645, 2000
- 2)Carrasquillo,Ramon L.,Arthur H. and Slate, Floyd O.:Properties of High Strength Concrete Subjected to Short - Term Loads,ACI Journal,Proceedings Vol.78,No.3,pp.171~178,1981, and Discussion, Proceedings Vol.79, No.2, Mar.-Apr.pp.162~163,1982
- 3)土木学会 コンクリート技術シリーズ、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮、1997
- 4)田澤栄一、宮澤信吾：コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究、土木学会論文集、No.571/V-36,pp.211-219,1997
- 5)H.S.Müller, C.H.Küttner : Creep of high-performance Concrete-Characteristics and Code-Type Prediction Model, 4th International Symposium on Utilization of High-strength / High-performance Concrete, Paris, pp377-385, 1996
- 6)土木学会 コンクリート技術シリーズ、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮Ⅱ、2000