

論文 高ビーライト系セメントを使用した高強度・高流動コンクリートの諸物性

石川伸介*1・福岡信*2・立山創一*1

要旨：超高層RC集合住宅用として60N/mm²級高強度コンクリートを高ビーライト系セメントを使用して実用化するための基礎実験を行い、圧縮強度や諸物性について検討を行った。結果は、高ビーライト系セメントを用いた高強度コンクリートは長期材齢における強度の伸びが大きく、高い部材強度を得ることができる。簡易断熱養生、温度追随養生はコア強度とよく一致していた。今回の高ビーライト系セメントを用いた高強度コンクリートは耐久性に優れたコンクリートである。

キーワード：高強度コンクリート、高流動コンクリート、高ビーライト系セメント

1. はじめに

本研究では設計基準強度60N/mm²級の高強度・高流動コンクリートの実用化を図るため、コンクリートの強度特性および、基礎性状について検討したものである。

普通ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリート調合では、セメント量の増大に伴う発熱によるひび割れの発生や施工性の低下が問題となる。

そこで本実験においては、高ビーライト系低熱ポルトランドセメントを用いることにより、発熱速度と発熱量を抑制するとともに、高流動コンクリートとした。

本報告においては、3シーズンにおける模擬試験体と、各種養生試験体の強度発現性を測定し、躯体強度管理方法を検討した。

また、このコンクリートの基礎性状について測定を行ったのであわせて報告する。

2. 試験概要

実験は予備実験により得られた、W/Cによる3水準の調合を用い冬期（12月打設）、標準期（3月打設）、夏期（7月打設）の3回行った。また、基礎性状試験は、W/C=32%の調合について行った。

2.1 調合および使用材料

調合を表-1に示す。水セメント比を32、38、45%の3種類とした。

表-1 コンクリートの調合

調合 No.	水セメント 比 (%)	目標 70- (cm)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	細骨材 率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	高性能AE 減水剤
1	45.0	50	20	53.4	175	389	956	843	6.58
2	38.0	60	20	52.5	170	447	922	843	7.60
3	32.0	65	20	50.6	170	531	854	843	9.12

*1 安藤建設(株)技術研究所（正会員）

*2 安藤建設(株)技術研究所材料研究室長、工博（正会員）

表-2 使用材料

調合の種類	使用材料	種類	物性および成分
高強度用	セメント	高ビーライト系セメント	比重:3.20, 比表面積:4080cm ² /g
	細骨材 1	陸砂 (30%)	表乾比重:2.61, 吸水率:1.31%, FM=1.63
	細骨材 2	陸砂 (70%)	表乾比重:2.63, 吸水率:1.05%, FM=3.18
	粗骨材	硬質砂岩	表乾比重:2.65, 吸水率:0.80%, FM=6.73
	混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

目標スランプフロー値は、予備実験によりコンクリートが分離せず流動性を確保できる範囲で定めた。水セメント比32%の調合ではスランプフローを65±5cm、水セメント比38%は60±5cm、水セメント比45%では50±5cmとした。空気量は3調合とも2±1.0%とした。

使用材料を表-2に示す。

2.2 コンクリートの製造

模擬部材試験および強度試験用供試体に用いたコンクリートは、レディーミクストコンクリート工場の練混ぜ容量3m³の強制2軸ミキサを使用して製造した。練混ぜ量は1.75m³である。練混ぜ方法はモルタル先練り30秒の後、粗骨材を投入しW/C=45%では90秒、W/C=38および32%では120秒練り混ぜた。試験時の外気温とコンクリート温度を表-3に示す。

工場から実験場所までの輸送時間は約40分であった。

基礎性状測定用の試験体は、20℃の恒温室で、50リットルの強制2軸ミキサを使用し練混ぜ作製した。

2.3 計測項目および方法

(1) 模擬試験体

模擬試験体は、図-1のとおりである。高層RC建築物の柱部材を想定し、部材上下面は発泡スチロールにより断熱を行った。

打設は、振動機による締め固めを行わず、流し込みのみで行った。ただし、冬期W/C=45%のみ目標フロー値を下まわったため、補助的に高周波パイプレーターによる締め固めを行った。中心部に熱電対を埋め込み温度の測定を行うとともに温度追従養生する供試体の温度管理にも使用した。打設後1週間で脱型し、各試験材齢の数日前にコアボーリングを行った。

いずれの強度測定用供試体も端面処理は研磨によった。

(2) 簡易断熱養生

表-3 コンクリート温度および外気温

	外気温 (°C)	コンクリート温度 (°C)		
		W/C=32%	W/C=38%	W/C=45%
冬期	8.0	12.0	12.0	12.0
標準期	15.0	17.5	17.5	16.0
夏期	21.0	24.5	23.0	23.0

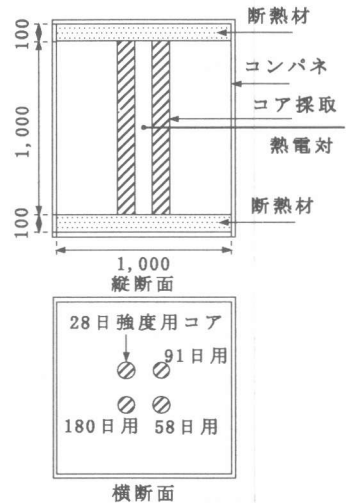


図-1 模擬試験体

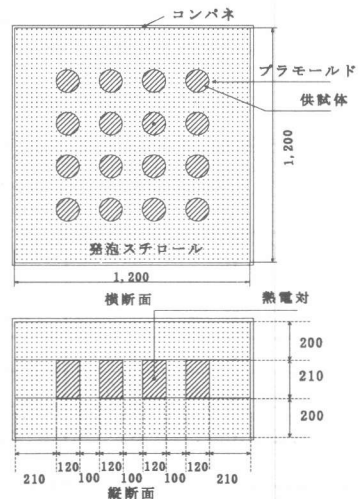


図-2 簡易断熱養生槽

簡易断熱養生槽を図-2に示す。供試体を入れる部分は、発泡スチロールをくりぬき、型枠にはプラスチック製モールドを使用した。供試体は、打設後、14日間槽内で養生した後、現場封緘養生とした。

(3) 温度追隨養生

模擬試験体中心部に熱電対をセットし、W/C=32%の調合について（冬期はW/C=38%）行った。供試体は、打設後14日間温度追隨養生を行なった後、現場封緘養生とした。

(4) 凍結融解試験

凍結融解試験はJIS A 6204 付属書2「コンクリートの凍結融解試験方法」によった。ただし、測定サイクルは300サイクルとし、試験前の養生期間は4週間とした。

(5) 長さ変化試験

長さ変化は、JIS A 1129「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法（コンパレータ方法）」に準じて測定した。

(6) 自己収縮

自己収縮は、JCI自己収縮研究委員会「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法（案）：1994年版」に準じて測定した。

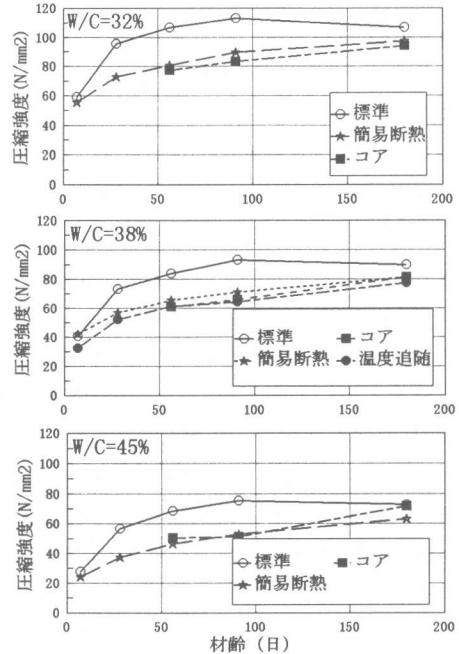


図-3 強度発現性状（冬期）

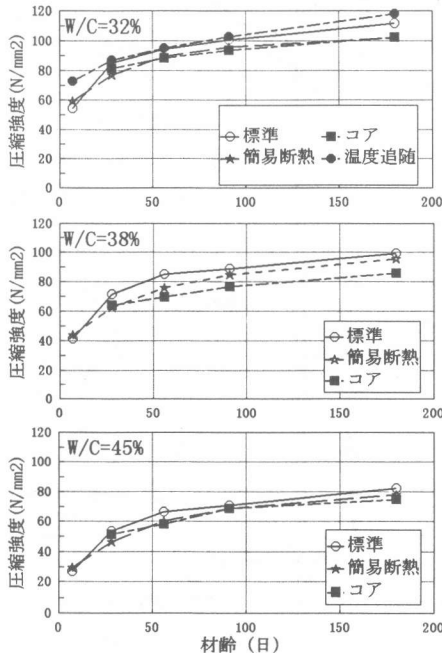


図-4 強度発現性状（標準期）

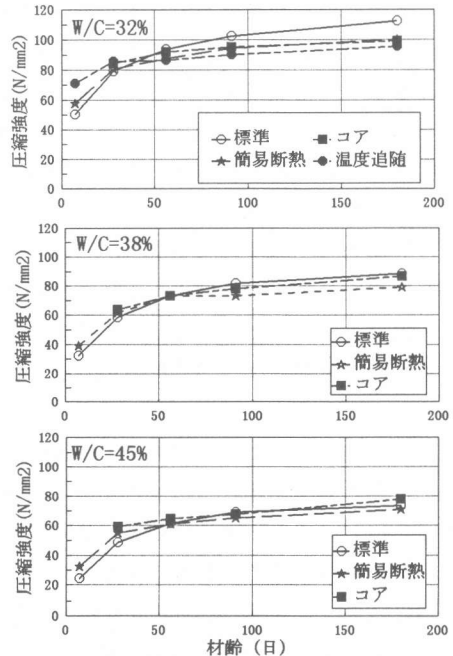


図-5 強度発現性状（夏期）

(7) 断熱温度上昇試験

φ400×H400mmの鋼製容器にコンクリートを密閉し、コンクリート用断熱温度上昇測定装置（空気循環式）により、温度測定を材齢14日まで行った。

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度

各試験期ごと、W/Cごとの圧縮強度を図-3~5に示す。

高ビーライト系セメントを用いた高強度コンクリートは長期強度性状に優れていることが確認された。ただし、冬期の標準養生では、初期の強度発現が著しく高く、長期では頭打ちとなった。すなわち、コア供試体の材齢28日から91日の間の強度増加は、平均14.9%となり、New RC実大施工実験における普通ポルトランドセメントを使用した60N/mm²の柱型供試体の強度増加率5.5%を大幅に上回った [1]。コア供試体材齢91日から180日の強度増加は、冬期で20%以上、標準期、夏期で10%以上であった。標準養生、簡易断熱養生、温度追随養生においてもほぼ同様の強度の伸びを示している。図-6に示すように、コア180日強度は、打設時期にかかわらずほぼW/Cごとに一定となり長期強度は打設温度の影響をあまり受けないことがわかる。

図-7は、標準養生供試体の材齢を28日、構造体コンクリート強度の管理材齢を91日として、JASS 5における強度補正值Sを求めたものである。S値は強度の増加にともなって増加しており、たとえば品質基準強度(Fq)を60N/mm²として、 $Fq + 2\sigma$ ($\sigma = 0.1Fq + S$ を使用)の強度補正值Sを検討すると、標準期では-11N/mm²、夏期においては-19N/mm²となっている。冬期においては、10N/mm²程度となる。これは高ビーライト系セメントの初期強度発現におよぼす温度依存性のためと思われる。調査上使用する強度補正值Sは安全を見て正の値とするため夏期および標準期は0N/mm²、冬期は10N/mm²となる。

図-8は、コア強度と簡易断熱養生供試体、温度追随養生供試体の強度を比較したものである。極めて良好な相関を示しており、構造体強度の推定に簡易断熱養生、および温度追随養生が有効であると考えられる。

図-9は91日コア強度と28日簡易断熱養生強度および温度追随養生強度を比べたものである。簡易断熱養生では15N/mm²、温度追随養生では10N/mm²の差となりそ

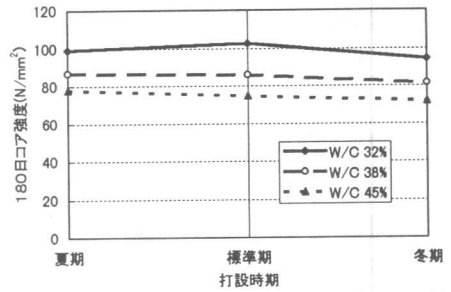


図-6 打設時期とコア180日強度の関係

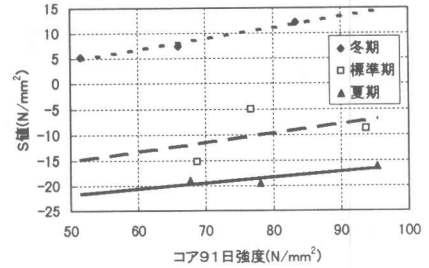


図-7 コア91日強度とS値の関係

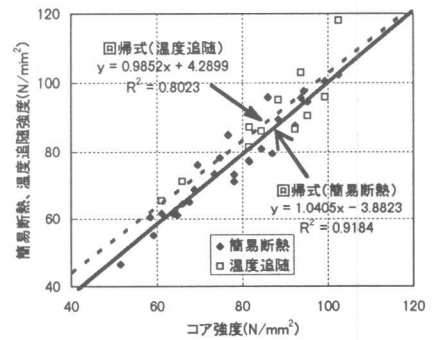


図-8 コア強度と簡易断熱養生および温度追随養生の関係

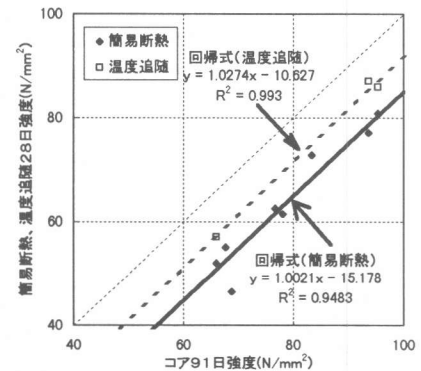


図-9 コア91日強度と簡易断熱養生および温度追随養生28日強度の関係

の値は強度によらずほぼ一定であった。

3. 2 ヤング係数

図-10に、ヤング係数と圧縮強度の関係を示す。ヤング係数と圧縮強度の関係はNew RC 施工標準で次式が推定式として提案されている [2]。

$$E = K_1 \times K_2 \times 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{2.4} \right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60} \right)^{1/3} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

K_1 、 K_2 ：骨材および混和剤の種類により
定まる修正係数 $K_1=1.0$ 、 $K_2=1.0$

γ ：コンクリートの気乾単位容積質量
 σ_B ：コンクリートの圧縮強度

また今回の結果を、

$$E = K \times 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{2.4} \right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60} \right)^{1/3} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (2)$$

の形式で最小二乗法により回帰して係数Kを求めると、コア供試体で1.00、管理用供試体で1.05であった。

3. 3 凍結融解抵抗性

相対動弾性係数は、300サイクル時点で88%と良好な結果を示した(図-11)。

日本建築学会の高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)における300サイクルにおける相対動弾性係数の85%以上を満足しており十分に高耐久といえる。

3. 4 乾燥収縮試験

26週での長さ変化率は 6.92×10^{-4} であった(図-12)。日本建築学会の高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)における目標品質 7×10^{-4} を満足している。

3. 5 自己収縮

自己収縮量は材齢28日で 114×10^{-6} 、材齢56日で 125×10^{-6} であった(図-13)。日本建築学会・高流動コンクリート小委員会の実験結果[3]では、W/C=35%の普通ポルトランドセメントを用いたものの材齢28日の値は 205×10^{-6} である。今回の高ビーライト系セメントを使用した調査は、JCIの委員会報告書[4]にあるとおり、自己収縮を抑制するのに効果があること

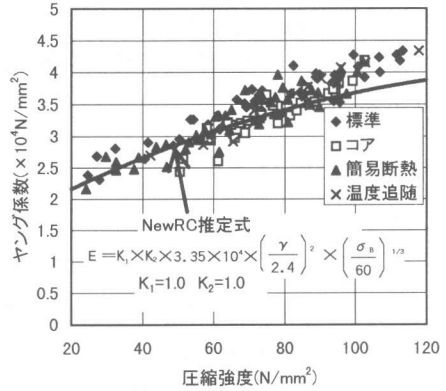


図-10 圧縮強度とヤング係数の関係

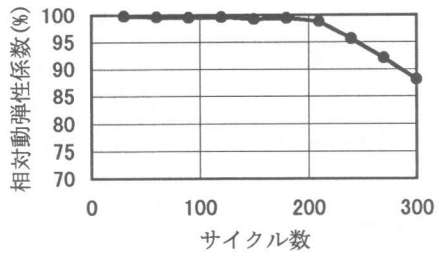


図-11 凍結融解試験結果

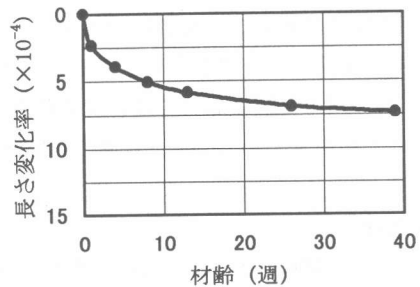


図-12 長さ変化試験結果

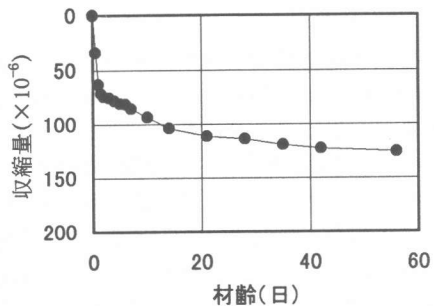


図-13 自己収縮試験結果

が確認された。

3. 6 断熱温度上昇

コンクリートの断熱温度上昇は一般に次式により示される。

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-rt}) \quad (3)$$

ここに、

t : 材齢 (日)、

$Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量、

r : 温度上昇速度に関する定数

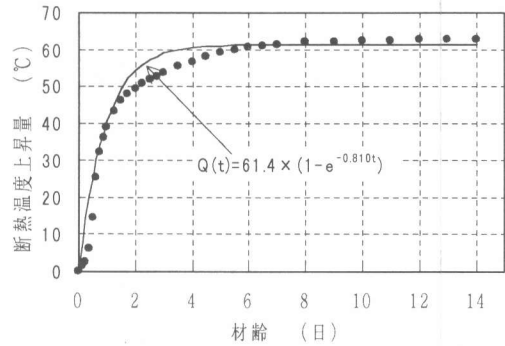


図-14 断熱温度上昇試験結果

今回の実験の結果では $Q_{\infty}=61.4^{\circ}\text{C}$ 、 $r=0.810$ となった。土木学会のコンクリート標準示方書 [5] により、単位セメント量が等しく、普通ポルトランドセメントを用いた場合の断熱温度上昇を計算すると、 $Q_{\infty}=71.4^{\circ}\text{C}$ 、 $r=1.982$ となる。また、普通ポルトランドセメントを550Kg用いたコンクリートを測定し、 $Q_{\infty}=72.7^{\circ}\text{C}$ 、 $r=1.40$ となったという報告がある [6]。高ビーライト系セメントを使用することにより、かなり発熱速度を遅く、かつ、温度上昇量も低減できることから、ひび割れの抑制に効果があると考えられる。

4. まとめ

以上の結果をまとめると、

(1)高ビーライト系セメントを用いた高強度・高流動コンクリートは長期の強度の伸びが大きい。

(2)簡易断熱養生、温度追従養生はコア強度と良い相関を示し、簡易断熱養生、および温度追従養生強度により構造体強度を精度良く推定する事が出来る。

(3)今回の実験においては、構造体強度と標準養生強度との補正値 S は品質基準強度 60N/mm^2 において標準期で -11N/mm^2 、夏期で -19N/mm^2 、冬期では 10N/mm^2 となった。

[謝辞]

今回の実験を行うに当たり、多大なるご協力を頂きました、秩父生コン(株) (狭山工場)、秩父小野田セメント(株)中央研究所ならびに関東支店、竹本油脂(株)の関係者のみなさまに感謝いたします。

参考文献

- [1]建設省建築研究所ほか：New RC高強度コンクリート実大施工実験報告書、1992.10
- [2](財)国土開発技術センター：New RC 高強度コンクリート分科会報告書、1993.3
- [3]桃谷智樹ほか：高流動コンクリートの力学特性・耐久性に関する研究 (その9.自己収縮とひび割れに関する試験)、日本建築学会1995年度大会学術講演概要集、A-1、pp297-298、1995.7
- [4]日本コンクリート工学協会：自己収縮委員会報告書、1996.11
- [5]土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]、土木学会、185、1996.3
- [6]水越陸視ほか：高強度コンクリート(設計基準強度60MPa)の実構造物への適用に関する研究(その3:基礎物性試験におけるコンクリートの耐久性)、日本建築学会1995年度大会学術講演概要集、A-1、pp575-576、1995.7