

論文

[1221] ビーライト高含有セメントを用いた高強度コンクリートの高温履歴下での強度発現性状

青木 茂*¹・三浦律彦*²・竹田宣典*²・十河茂幸*³

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の大型化や高性能化に伴い、設計基準強度が600kgf/cm²以上の高強度コンクリートが適用されるようになってきた^{[1]・[2]}。この種の高強度コンクリートは、単位セメント量が多くなり、実構造物においては水和発熱に伴う温度上昇が増大し、場合によっては、高温履歴の影響による長期強度の低下が問題となることがある。この影響はマスコンクリート構造物で顕著に現れるが^{[3]・[4]}、暑中施工においては一般の高強度コンクリート構造物においても認められ、標準養生供試体と実構造物の強度差がかなり大きくなる場合があるようである。従って、実構造物でより高い強度を達成するためには、より低発熱でしかも高温履歴下での強度発現性に優れた高性能なコンクリートが求められることになる。

一方、ビーライト(C₂S)含有量の多い低熱ポルトランドセメント^[5](以下ビーライト高含有セメントと略称)が開発され、従来の低発熱性混合セメント以上に低発熱が達成できるとして、近年注目を集めている。そこで、このビーライト高含有セメントを採り上げ、設計基準強度が600kgf/cm²以上の高強度コンクリートへの適用を想定し、従来の低熱型混合セメントと比較検討を行った。検討方法としては、高強度コンクリートの断熱温度上昇試験を行い、それと同じ温度履歴を供試体に与えてその後の強度発現への影響を調査した。

表-1 使用材料

種類	略称	名称	比重	物性、その他
セメント	ビーライト 50	ビーライト高含有ポルトランドセメント	3.22	比表面積、3.420cm ² /g C ₂ S=53%、C ₃ S=29%
	ビーライト 70	ビーライト高含有ポルトランドセメント	3.24	比表面積、3.400cm ² /g C ₂ S=72%、C ₃ S=9%
	3成分系	フライアッシュ10%混入マスコン型高炉セメント	2.89	比表面積、3.900cm ² /g スラグ量50%、フライアッシュ量10%
細骨材	S	君津産山砂	2.60	粗粒率：2.95 吸水率：1.80%
粗骨材	G	青梅産碎石	2.64	粗粒率：6.69 吸水率：0.57%
混和剤	SP	高性能AE減水剤	—	ポリカルボン酸系

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

コンクリートの使用材料を表-1に示す。セメントには、ビーライト含有量が約50%(以下ビーライト50と略称)と約70%(以下ビーライト70と略称)の2種類のビーライト高含有セメントと、高炉スラグやフライアッシュを混合した3成分系の低発熱セメントを用いた。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。

コンクリートの配合を表-2に示す。水セメント比は28%、目標空気量は3%と一定にした。なお、ビーライト70では同一水量で混和剤量がかなり多くなり、単位水量を10kg/m³増加させた。

表-2 コンクリートの配合

NO	セメントの種類	目標スラグフロー(cm)	目標空気量(%)	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	SP
1	ビーライト 50	55±5	3±1	28	43.0	160	571	707	952	12.0
2	ビーライト 70	55±5	3±1	28	44.0	170	607	701	906	16.4
3	3成分系	55±5	3±1	28	41.1	160	571	655	952	10.3

*1 株式会社大林組技術研究所 土木第三研究室 主任研究員(正会員)
 *2 株式会社大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員, 工修(正会員)
 *3 株式会社大林組技術研究所 土木第三研究室 主任研究員, 工博(正会員)

2. 2 試験項目と練混ぜ条件

(1) コンクリートの物性試験

練上り後のフレッシュコンクリートの試験として、スランプフローや、空気量および凝結時間の測定の外に粘性評価の目的でOロート流下時間の測定を行った。硬化コンクリートの試験としては、標準養生供試体で圧縮強度 ($\phi 10 \times h20$), 単位体積質量 (同), 静弾性係数 (同), 割裂引張強度 ($\phi 15 \times h15$) の測定を7日, 28日, 91日の3材齢で実施した。

(2) 断熱温度上昇試験

コンクリートの断熱温度上昇試験は空気循環型の試験機を用いて行なった。コンクリート試験体は $\phi 40 \times h40\text{cm}$ (容量約50ℓ) の円筒形のものを用い, 3層に分けて打設した。なお, コンクリートの練上り温度は 21 ± 1.5 °Cとなるように調整した。

(3) 高温履歴実験とその試験項目

高温履歴実験は以下の手法で行った。供試体はフレッシュな状態でモールド採取後, 上面を解放状態のまま温度追従槽 (湿度約100%) に入れ, それぞれの配合の断熱温度上昇量と同じ温度履歴を与えた。高温履歴の持続時間は, 断熱温度上昇量が一定となったビーライト50と3成分系のセメントでは材齢14日までとし温度上昇量が漸増したビーライト70では材齢22日までとした。

高温履歴を受けたコンクリートの試験として, 一定材齢経過ごとに追従槽から取り出して, 乾燥を受けないように室温まで冷却した後, 標準養生供試体と同様な試験を実施した。試験材齢は7日, 14日, 22日 (ビーライト70のみ) と, それ以降標準養生に切り替えて28日, 91日とした。なお, 湿潤養生の影響を調べるために, 標準養生の材齢7日以降気中 (20°C) に放置した供試体についても, 材齢28日と91日で標準養生供試体と同様な試験を実施した。

(4) コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜは容量 100ℓの2軸強制練りミキサで1バッチ60ℓとし, 練混ぜ時間はセメントと細骨材, 粗骨材を投入して30秒, さらに水と混和剤を投入して3分とした。各配合とも3バッチずつ練混ぜ, 1バッチ目で断熱試験体と凝結試験体を採取し, 2, 3バッチ目で圧縮および引張強度試験用供試体を採取した。

3. 実験結果と考察

3. 1 フレッシュコンクリートの試験結果

各種セメントを用いた高強度コンクリートのフレッシュ性状と凝結試験結果を表-3に示す。練上り時のスランプフローは, ビーライト50で目標より若干小さく, ビーライト70で若干大きくなった。

表-3 フレッシュコンクリートの試験結果

種類	単位セメント量 (kg/m ³)	混和剤 (%)	スランプフロー (mm)	Oロート 時間 (sec)	空気 量 (%)	練上り 温度 (°C)	凝結 (時-分)	
							始 発	終 結
ビーライト50	571	Cx2.1	490x475	19.5	2.9	22.7	10-11	11-51
ビーライト70	607	Cx2.7	660x670	14.8	3.3	20.0	20-24	24-10
3成分系	571	Cx1.8	570x570	17.0	2.8	19.3	11-43	14-10

凝結時間はビーライト50が最も早く、次いで3成分系、ビーライト70の順に遅くなる結果となった。ビーライト70の凝結時間は混和剤添加量が多くなったため遅延が著しく、始発は20時間半、終結は約24時間となった。したがって、ビーライト70のみ供試体の脱型を1日遅らせ、材齢2日で実施した。

3. 2 断熱温度上昇試験結果

各種セメントを用いた高強度コンクリートの断熱温度上昇試験結果を図-1に、また、温度上昇曲線の近似式および温度上昇量の比較を表-4にそれぞれ示す。

材齢1日程度までの温度上昇はビーライト50が最も大きくなったが、それ以降の材齢では3成分系が最も高くなった。ビーライト70の温度上昇曲線は他と異なっており、材齢1日後にやや急激な上昇を示した後はかなり緩やかな増加が材齢22日まで継続した、その結果、終局温度上昇量は最も高くなった。

これは発熱速度が従来のセメントに比べて極端に遅いため、断熱試験機の温度制御が難しくなったためと思われる。

温度上昇曲線の近似式は、3成分系にはII式が、ビーライト50にはI式が適当と思われる。(表-4参照)。ビーライト70では何れの近似式も適合性が低く、発熱速度が極端に遅いセメントの場合には別の近似式が必要と判断された。

なお、単位セメント量当りの温度上昇量や、高温履歴を受けた供試体の材齢14日または22日における単位強度当りの温度上昇量は、表-4に示すようにビーライト50が最も小さい値となった。

3. 3 高温履歴が強度発現に及ぼす影響の検討

(1) 高温履歴が圧縮強度に及ぼす影響

各種セメントを用いた配合の材齢と圧縮強度の関係を図-2に示す。標準養生供試体では、材齢28日までの圧縮強度はビーライト50が最も大きく、次いで3成分系およびビーライト70の順となった。

これに対し、材齢91日での圧縮強度はビー

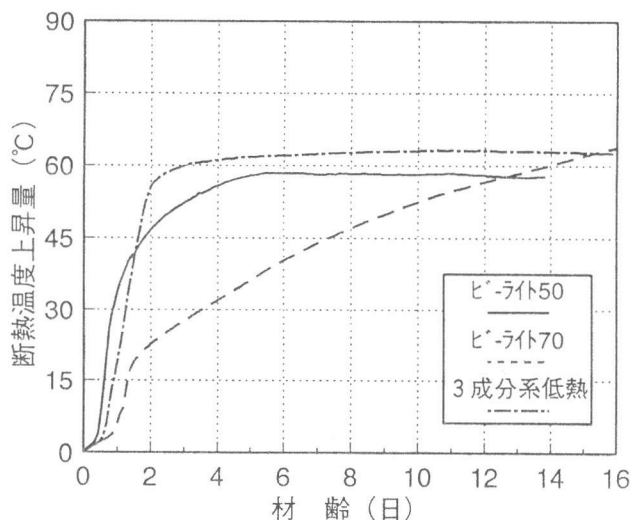


図-1 断熱温度上昇試験結果

表-4 曲線の近似式と温度上昇量の比較

セメントの種類	I式の場合		II式の場合		単位セメント量 100kg/m ³ 当りの 温度上昇量 K/C	単位強度 100kgf/cm ² 当りの 温度上昇量 K/f'c
	K (°C)	α	K (°C)	α		
3成分系	63.6	0.67	62.9	1.49	11.14	7.73
ビーライト50	58.5	0.78	57.9	1.64	10.25	5.89
ビーライト70	74.7	0.11	72.4	0.24	12.31	6.67

(注) I式 $T=K(1-e^{-\alpha t})$
 II式 $T=K\{1-(1+\alpha t)e^{-\alpha t}\}$
 f'c: 高温履歴を受けた供試体の圧縮強度

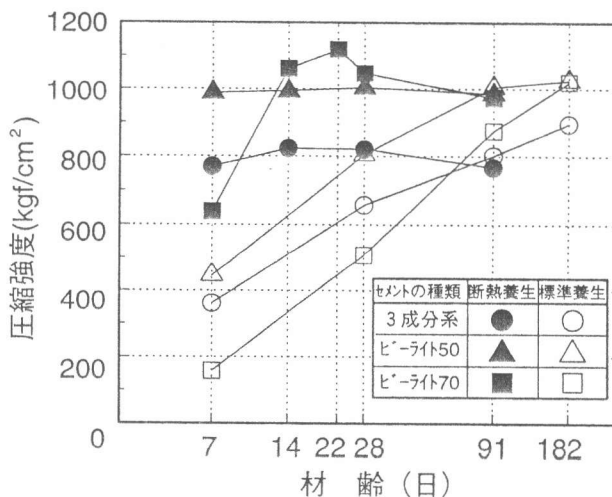


図-2 圧縮強度の発現性状

ライト50が最も大きく、次いでビーライト70、3成分系の順となった。高温履歴を受けた供試体の圧縮強度は、ビーライト50や3成分系では材齢7日以降ほぼ一定で、標準養生供試体の材齢91日の強度にほぼ等しくなった。これに対し、ビーライト70では材齢22日までの圧縮強度は著しく増加の傾向を示し、標準養生供試体の材令6ヶ月の強度より高い値となった。また、高温履歴下の強度増進は、ビーライト含有量が多く発熱速度が遅いセメントほど大きくなる傾向が認められた。

セメントの種類ごとに温度履歴の条件が異なるため、横軸を積算温度で整理したものを図-3に示す。この結果より、ビーライト高含有セメントは同一積算温度での強度発現性に優れ、さらにビーライト含有量が多いほど標準養生供試体に比べてより高い強度増加が期待できることが明らかとなった。

(2) 高温履歴が引張強度に及ぼす影響

各種配合の材齢と引張強度の関係を図-4に示す。標準養生供試体の材齢28日までの引張強度の発現は、3成分系とビーライト50がほぼ同様で、ビーライト70は若干低い値を示した。しかし、材齢91日ではビーライト70が3成分系を上回る結果となった。

また、高温履歴を受けた供試体の引張強度は、何れのセメントも長期材齢においては若干増加の傾向を示したが、材齢7日を基準とした強度増加の程度はビーライト70が最も高い値を示した。

圧縮強度と引張強度の関係を図-5に示す。標準養生供試体の圧縮強度と引張強度の関係に比べると、高温履歴を受けた供試体の引張強度はビーライト高含有セメントでは若干低くなり、3成分系では若干高くなった。この理由として、ビーライト高含有セメントでは高温履歴を受けた後の圧縮強度の増加が著しい反面、引張強度の増加が比較的少ないのに対し、3成分系ではフライアッシュの反応により、高温履歴を受けた後の引張強度の増進が期待できることなどが考えられる。

(3) 高温履歴が静弾性係数に及ぼす影響

各種配合の圧縮強度と静弾性係数の関係を図-6に示す。標準養生供試体の圧縮強度と静弾性係数の関係式に比べると、高温履歴を

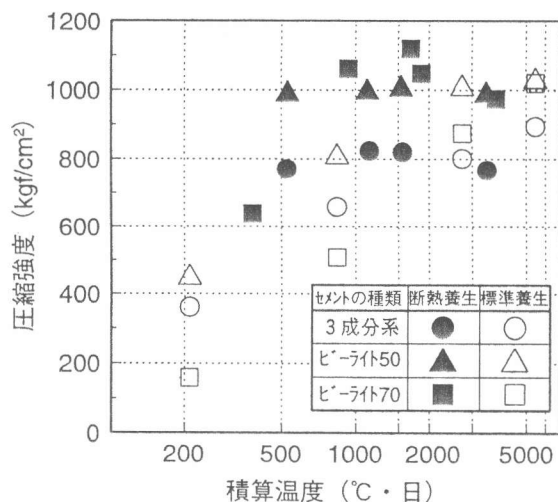


図-3 積算温度と圧縮強度の関係

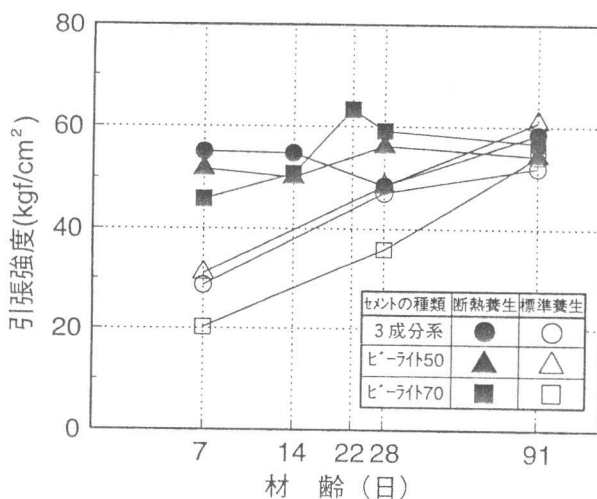


図-4 引張強度の発現性状

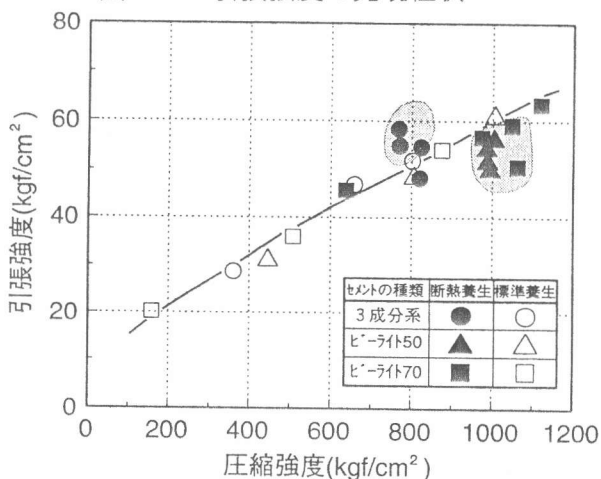


図-5 圧縮強度と引張強度の関係

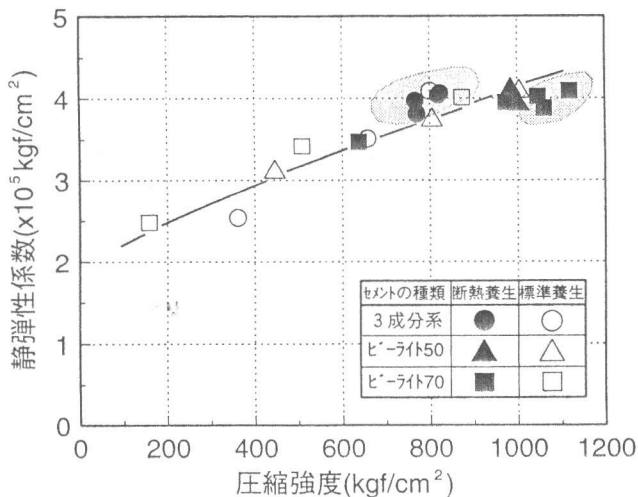


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

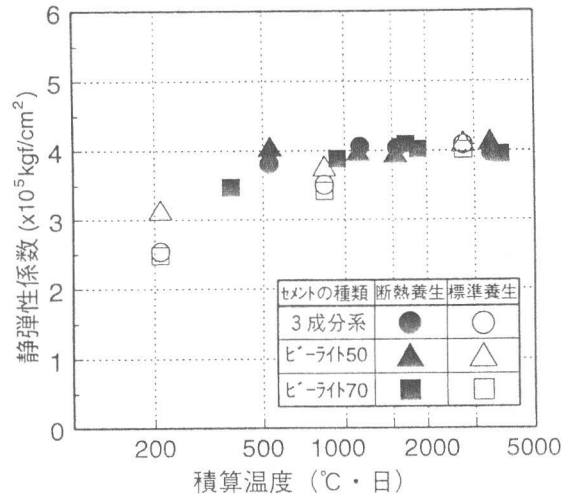


図-7 積算温度と静弾性係数の関係

受けた供試体の弾性係数は、圧縮強度が最も高くなったビーライト70では若干低くなり、3成分系でほぼ同等か若干高くなった。しかし、その変化の程度は引張強度にくらべ小さいといえる。

積算温度と静弾性係数の関係を図-7に示す。この結果より、何れのセメントにおいても、高温履歴を受けた供試体の静弾性係数は積算温度が500°C・日以上の状態では、標準養生供試体の材齢91日の値に近い値（ 4×10^5 kgf/cm²程度）となることが認められる。

3.4 湿潤養生の期間が強度発現に及ぼす影響の検討

筆者らのこれまでの研究結果^[6]によると、ビーライト高含有セメントは従来のセメントに比べて水和速度が遅いため、普通強度の配合では、比較的早期に湿潤養生を打ち切ると強度発現や耐久性に悪影響があることが確認されている。そこで、高強度コンクリートの配合について影響の程度を検討した。

材令7日以降20°C、相対湿度60%の気中で自然乾燥した供試体の圧縮強度および静弾性係数の発現状況を、標準養生供試体と対比して図-8、9に示す。

圧縮強度の低下の程度は、材齢28日においてはビーライト高含有セメントで約100kgf/cm²、3成分系で約50kgf/cm²であるのに対し、材齢91

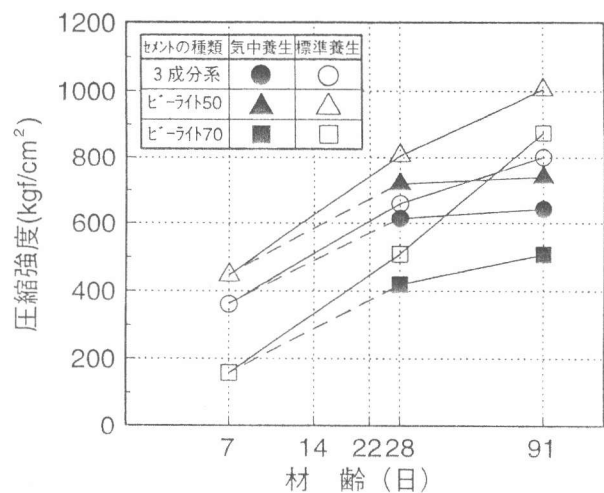


図-8 圧縮強度に及ぼす乾燥の影響

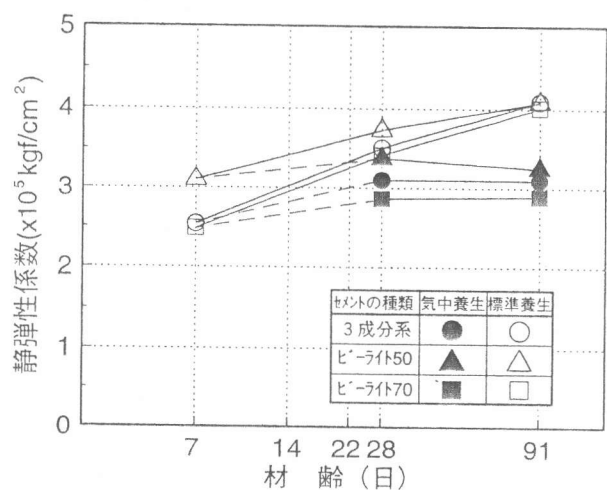


図-9 静弾性係数に及ぼす乾燥の影響

日では3成分系で150kgf/cm²、ビーライト50で260kgf/cm²、ビーライト70で370kgf/cm²の低下を示し、ビーライト含有率が高いセメントほど影響が大きくなった。なお、引張強度においてもほぼ同様な影響が認められた。一方、静弾性係数への影響については、材齢91日ではセメントの種類によらずほぼ同程度の低下を示し、圧縮強度に比べると乾燥の影響は少ないように思われる。

4. ま と め

これまでに示した結果をまとめると以下のようになる。

- (1) ビーライト高含有セメントは、コンクリートの温度上昇に伴う高温履歴を受けた時の強度発現性状が従来の低発熱型混合セメントに比べて良好であり、マスコンクリート構造物や高強度コンクリート構造物への適用性が高い。
- (2) 標準養生下においては、ビーライトの含有率が高くなるほど材齢28日までの強度発現は遅くなるが、高温履歴下の強度増進はより大きくなり、標準養生の材齢91日の強度より高い強度が得られる。
- (3) ビーライトの含有率が高くなるほど乾燥による強度発現の低下が大きくなるため、比較的薄い部材への適用においては長期間の湿潤養生が保てるよう、型枠等に留意しなければならない。

以上に示したように、ビーライト高含有セメントが十分な性能を発揮するためには、水和反応を長期間持続させるよう、十分な養生が必要と思われる。養生の期間は使用するセメントのビーライト含有率や粉末度などによってかなり異なると思われるため、適用に際しては使用環境条件を考慮した強度発現性状の事前確認が必要と考える。

なお、低温下での使用に際してはまだ不明の点も多く、今後はこの種のデータを整備する必要があると思われる。

【参考文献】

- [1] 石橋・藤森・大庭・津吉：P C斜張橋上部工の設計と施工—青森ベイブリッジ—，コンクリート工学，Vol.29，No.12，pp.33-42，1991.12
- [2] 久保田，中根，田中，深谷，名和：低熱セメントを用いた高強度コンクリートの実大施工実験（その1～5），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.673-682，1993.9
- [3] 青木・十河・三浦・芳賀：高流動化した水中コンクリートの品質，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.277-280，1986.6
- [4] 三浦・十河・芳賀：超微細な高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの凝結硬化性状と環境温度の影響，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.11，No.1，pp.349-354，1989.6
- [5] 例えば田中，原田，名和，栩木：高ビーライト系ポルトランドセメント—セメントの性質と低熱，高流動，高強度コンクリートへの適用—，コンクリート工学，Vol.31，No.9，pp.18-27，1993.9
- [6] 栗原・竹田・十河：ビーライト系低発熱性コンクリートの強度および耐久性に及ぼす養生の影響，セメント・コンクリート論文集，No.47，1993，pp.154-159