

報告 高強度・高流動コンクリートの暑中環境下における強度発現性状の検討

一瀬賢一*¹・瀧田安浩*²・中根 淳*³

要旨：本報告では、暑中環境下で模擬柱部材に打設した圧縮強度60～100MPa程度の高強度かつ高流動なコンクリートのフレッシュおよび強度発現性状等について試験・検討し、以下のことがわかった。(1) 高強度(コア強度：75～110MPa)かつ高流動(スランプフロー：60cm)なコンクリートを暑中環境下において製造・施工できる。(2) 本ビーライト系セメントは、普通セメントに比べ4～5%大きな水セメント比で同一強度のコンクリートを造れる。(3) W/C=25%、30%において標準水中、簡易断熱および温度追従養生供試体強度により、材齢28日以前において材齢91日の構造体コンクリート強度の推定が可能である。

キーワード：高強度コンクリート、暑中環境、高流動、低発熱、温度履歴

1. はじめに

近年RC構造物の高層化、大型化、多機能化に伴い、コンクリートの高強度化が進められ、設計基準強度(以下 F_c)60MPa級のコンクリートが実用化されている。高強度コンクリートは、単位セメント量が多くなることから、部材内の水和発熱による温度上昇が普通強度のコンクリートに比べ、きわめて大きくなる。特に、夏季において柱や梁部材に打設する場合、 F_c 60MPa級のコンクリートで内部温度が90℃以上になることも確認されている[1]。このためマスコンクリート同様、構造体強度発現の停滞や温度ひび割れの発生が懸念される。また60MPaを超える高強度コンクリートになると、JASS 5で規定しているスランプの範囲では、超高層RC部材など鉄筋量の高い配筋を有する部材の施工は困難となる。このため、骨材分離を生じない範囲で、できるだけ流動性の高いコンクリートを製造することが必要となる。今後高強度コンクリートは、単に強度が高いだけでなく、流動性に優れ、低発熱なものが要求されると予想される。しかしながら、高強度・高流動・低発熱という多機能なコンクリートに関する研究は、まだ多くなされておらずデータ数も乏しい。

本報告は、上述の多機能コンクリートの性能把握を目的として、構造体コンクリートの強度発現において問題となる暑中環境下で模擬柱部材を用いて実施した圧縮強度60～100MPa程度の高強度かつ高流動なコンクリートのフレッシュ性状および強度発現性状等について試験・検討した結果を示す。

2. 試験の概要

2.1 試験の組合せ

試験の因子と組合せを表-1に示す。試験の組合せは4組で、セメントとして高強度・高流動コンクリートセメント(以下HLセメント)と普通セメント(以下Nセメント)、水セメント比を25、30%とした。

表-1 試験の因子と組合せ

試験因子		記号
セメントの種類	水セメント比(%)	
高強度・高流動 コンクリート用セメント (HL)	25	HL25
	30	HL30
普通 ポルトランドセメント (N)	25	N25
	30	N30

*1 (株)大林組技術研究所 建築第二研究室 副主任研究員、工修(正会員)

*2 同研究員、工修(正会員) *3 同室長、工修(正会員)

表-2 各セメントの品質

種別	比重	比表面積 (cm ² /g)	鉱物組成 (%)				圧縮強度 (MPa)	
			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	7日	28日
HL	3.20	4250	33	46	4	11	13.5	37.3
N	3.15	3200	55	18	10	9	26.2	41.8

表-3 骨材の品質

記号	骨材の種類	表乾比重	粗粒率	吸水率 (%)
S1	香川県室木海砂 80%	2.56	2.64	1.64
S2	兵庫県西島砕砂 20%	2.58		1.58
G	兵庫県西島碎石	2.63	6.92	0.71

2. 2 使用材料および調合

使用した各セメントの品質を表-2に示す。今回の試験で使用した高強度・高流動コンクリート用セメントは、ビーライト系ポルトランドセメントクリンカーをベースにして製造したセメントで有り、高性能AE減水剤との組合せにより高強度・高流動かつ低発熱のコンクリートを製造することができるものである。骨材の品質を表-3に示す。混和剤は、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤を用いた。コンクリートの調合は、表-4に示す調合条件に基づき材料分離を生じない範囲で、できるだけ流動性を高めるよう、高性能AE減水剤の添加量の調整を行い、表-5のように定めた。N30については、「New RC施工標準」[2]に基づいて60MPa級のコンクリートに対して規定しているスランプ23cm, スランプフロー50cmを目標値とした。

2. 3 測定項目および測定方法

測定項目および測定方法を表-6に示す。管理用履歴養生供試体のうち温度追隨養生は、打設から3~4時間後に軽量型枠ごとビニール袋で封かんし、ヒーターと冷却器を備えた養生水槽に養生した。簡易断熱養生は、図-1に示す断熱材に打設直後養生し、所定の材齢時に試験を行った。

2. 4 模擬柱部材の形状および寸法

模擬柱部材は、1000×1000×2000mmとし、図-2に示す位置で温度測定およびコアの抜き取りを

表-4 調合条件

項目	条件および管理範囲
単位水量	175kg/m ³ 以下
単位セメント量	700kg/m ³ 以下
フロー値	60±5cm (N30の場合のみ50±5cm)
空気量	2.0±0.5%
練り上がり温度	30℃以上

表-5 コンクリートの調合

記号	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S1	S2	G
HL25	45.7	175	700	548	137	839
HL30	49.6	170	567	643	163	839
N25	45.6	175	700	540	137	839
N30	49.4	170	567	637	160	839

表-6 測定項目および測定方法

項目	種類	測定方法等
フレッシュコンクリートの性質	スランプ、フロー値、空気量、単位容積質量、フロー50cm時間等	JIS等に基づく
温度履歴測定	柱模擬部材中央部	熱電対
管理用圧縮強度	標準水中、現場水中、現場封かん、現場気中	材齢3日、1週、2週、4週、8週、13週
管理用履歴養生供試体強度	簡易断熱養生、温度追隨養生	材齢1日、2日、3日、1週、2週、4週、8週、13週
コア圧縮強度	柱模擬部材中心部、外周部	材齢4週、8週、13週
乾燥収縮	各種類3体 (10×10×40cm)	JIS A 1129に基づく
中性化促進試験	各種類3体 (10×10×40cm)	高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)付録に基づく

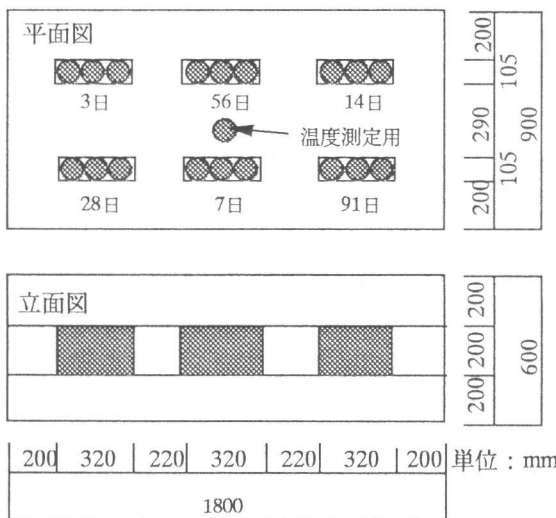


図-1 簡易断熱養生供試体の養生方法

行った。コア供試体は、中心部と外周部から垂直方向に各材齢1本ずつ抜き取った。

2. 5 模擬柱部材の作成方法

コンクリートは、2.5m³練り傾胴型ミキサで1.25m³×2バッチとした。練混ぜ時間は、モルタルで2分、コンクリートとして3～5分とした。練り上がり直後および30分後にフレッシュコンクリートの試験を行い、その後バケツで模擬柱部材を打設した。打設後は、柱天端のコテ均し終了後シートで養生した。脱型は材齢3日で行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 フレッシュコンクリートの性質

フレッシュコンクリートの性質を表-7および図-3に示す。

各測定結果は、当初の目標値を全て満足した。練り上がり直後と30分後を比較するとN30以外は、スランプフロー値が約5cm程度大きくなった。これは、使用した高性能AE減水剤の特性によるものと考えられる。N30の場合は、スランプフローが約2cm小さくなった。これは目標スランプフロー値を小さくしたため高性能AE減水剤の使用量が若干少なかったためと推察する。また模擬柱部材の打設では、粘性が高くなりバケツに付着し、他のコンクリートに比べ打設時間が長かかった。このように目標スランプフローを50cmとした場合、W/C=30%以下のコンクリートでは、打設に手間がかかり、むしろコンクリートの品質も低下することもある。一方、目標スランプフローを60cmとしたコンクリートでは、材料分離もなく、打設も良好であった。今回の調合における材料分離が生じる限界としては、事前の試験練り結果からスランプフロー70cmが限界と推察する。フロー50cm時間は、練り上がり直後に比べて30分後の方が短くなった。これは、練り上がり直後に比べ30分後の方がスランプフローが大きくなることとリンクしている。空気量は、HLでは若干増加する傾向にあるが、問題にならない範囲であった。コンクリートの練り上がり温度は、HLセメントで約35℃、Nセメントで約40℃となった。HLセメントとNセメントで練り上がり温度に5℃の差が生じたのは、コンクリート練混ぜ時のセメント温度差による。このようにセメント量の多い高強度コンクリートを暑中に製造する場合、練り上がり温度をJASS 5等で管理値としている35℃以下を遵守するには、材料やコンクリートを冷却するなど何らかの工夫が必要といえる。

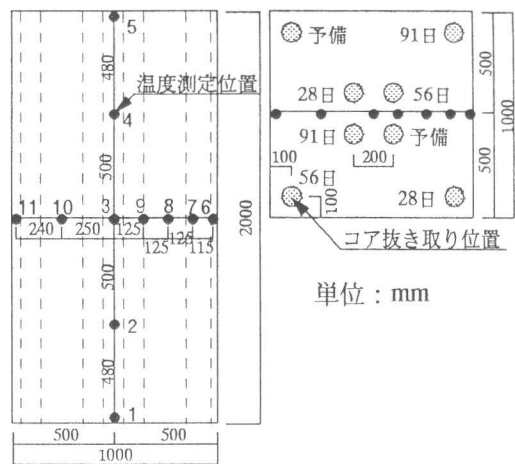


図-2 温度測定およびコア抜き取り位置

表-7 フレッシュコンクリートの性質

記号	スランプ (cm)	スランプフロー値 (cm)	フロー50cm時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	単位容積質量 (kg/m ³)
HL25	.....	58.5 × 59.0	5.56	1.7	36.0	2434
	.....	63.0 × 64.0	4.67	2.2	35.0	2424
HL30	.....	56.0 × 54.5	9.28	2.0	35.0	2410
	.....	59.5 × 61.5	6.03	2.2	34.0	2405
N25	.....	55.0 × 55.0	6.60	1.7	40.0	2431
	.....	60.5 × 61.5	4.31	1.6	39.0	2432
N30	24.3	49.0 × 47.5	.....	1.9	39.0	2395
	23.2	45.5 × 46.5	.....	2.1	39.5	2393

上段：練り上がり直後、下段：30分後

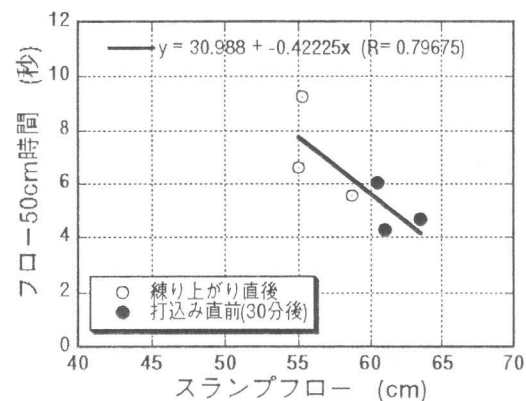


図-3 スランプフローとフロー時間

3. 2 部材の温度履歴

部材内部の温度履歴および部材中心部の温度追従養生等の測定結果を図-4、5に示す。部材温度は、コンクリート打設後Nでは16~18時間、HLでは24~28時間で最高温度に達した。NではW/C=25%,30%ともに部材内部温度が100℃以上に達し、N25では113.3℃を記録した。HLの温度履歴は、Nに比べて低く、中心部の温度で22~24℃、表層部の温度で15~16℃の差が生じた。また、部材の中心部と表層部の温度差もNの方が大きく、7~9℃の差が生じた。部材温度は、材齢5日で外気温とほぼ同温度となった。部材中心部の温度追従養生は、100℃を超えた部分では、追従が不可能であったが100℃以下の部分では、ほぼ温度を追従できた。また、今回用いた簡易断熱養生では、柱部材の表層部の温度履歴と同程度であった。

3. 3 圧縮強度

(1) 管理用供試体の強度

管理用供試体の圧縮強度を図-6、7に示す。標準水中養生では、材齢28日でHL25が101.0MPa、HL30が80.1MPa、N25が90.6MPa、N30が83.9MPaを示した。また材齢7日までの強度発現は、Nに比べHLがかなり低く、材齢28日に対する7日強度の割合は、HLでは約65%、Nでは約85%となった。しかしW/C=25%では材齢28日、W/C=30%では材齢56日でHLがNよりも高い強度となった。材齢91日では、W/C=25%で6.7MPa、W/C=30%で4.8MPaだけHLが高い強度を示した。

現場水中養生では、若材齢において標準養生よりも高い強度を示し、HLでは材齢91日、Nでは材齢56日で標準水中養生と同じ強度となった。現場封かん養生では、HLとN双方とも標準水中養生と同程度の強度発現を示した。材齢91日に比べ材齢56日の強度が高いデータがあるが、この原因の一つとして、材齢28日までと56日、91日における試験機が各々異なったことも影響していると推察する。

現場気中養生では、材齢28日においてN25,N30共に標準水中養生の93%以上の強度発現があるのに対し、HL25,HL30では約80%の強度発現であり、強度もNに比べW/C=25%で8.3MPa、W/C=30%で

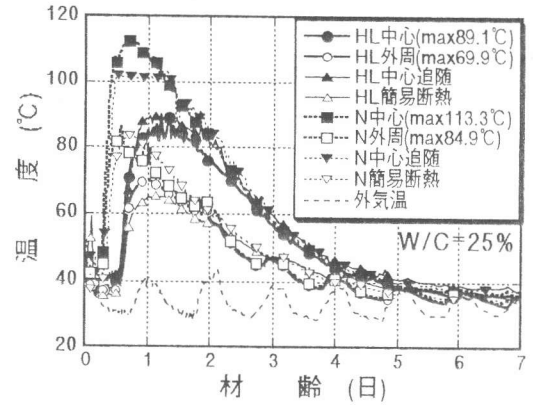


図-4 温度履歴曲線 (W/C=25%)

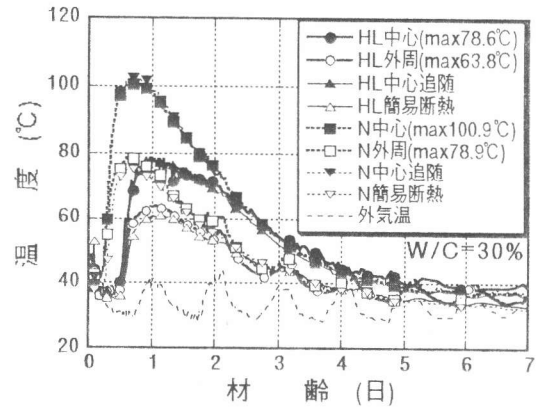


図-5 温度履歴曲線 (W/C=30%)

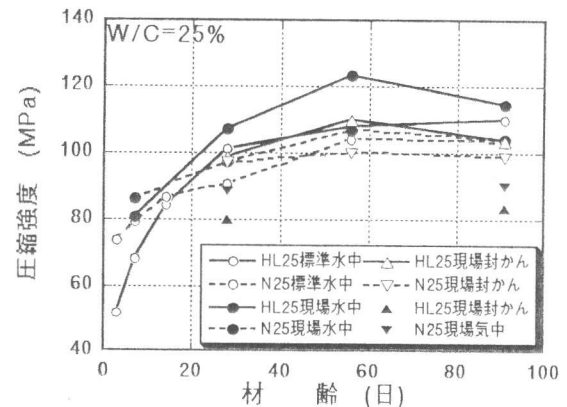


図-6 管理用供試体強度 (W/C=25%)

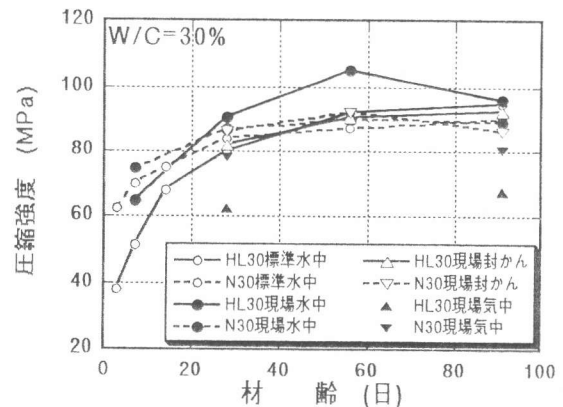


図-7 管理用供試体強度 (W/C=30%)

15.5MPa低くなった。この結果から、HLセメントを用いたコンクリートでは、乾燥状態におかれた場合かなり強度発現が悪くなるといえ、養生の影響については、さらに検討する必要がある。

(2) コア強度

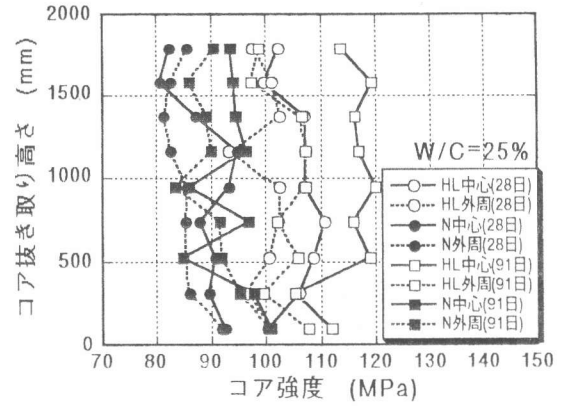
材齢28日と91日のコア強度を図一8、9に示す。中心部と外周部から抜き取ったコア強度を比較するとN30を除いて中心部の方が若干高いか同程度の強度を示した。特にHL25の材齢91日の場合が顕著である。このことから、HLセメントが若材齢時の高温履歴の影響を受けにくいことがわかる。また、中心部の強度が高くなった原因としては、中心部が100℃を超える温度で養生され、一種のオートクレーブ状態になったものと推察する。材齢28日における平均コア強度は、HL25で102.5MPa、N25で87.0MPa、HL30で85.2MPa、N30で73.1MPaとなり、W/C=25%、30%ともにHLの方が高い強度を示した。NがHLに比べ強度発現が悪いのは、3.2で示したように部材内の水和発熱温度の差がおよびセメントの特性の違いが影響したものと推察する。HLセメントは、同一強度を得るためにNセメントよりも4~5%大きな水セメント比を選ぶことができ、しかも製造および施工性のよい高強度コンクリートとすることができる。

標準偏差は、4.5MPa~7.4MPa、変動係数は4.4~8.2%の範囲を示し、NとHLとの差異はなかった。材齢28日から91日までのコア強度の伸びは、3.8~6.9%でHLの方がやや高い。ビーライト系セメントでは、長期強度の伸びが期待されるが、今回のように暑中に打設した高強度コンクリートではあまり期待できないといえる。

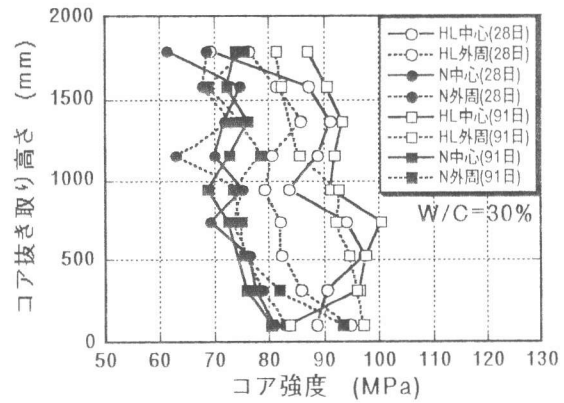
(3) コア強度と管理用温度履歴養生強度の関係

コア強度と管理用温度履歴養生強度との関係を図一10、11に示す。温度追隨養生では、材齢28日においてHLでは9.5~14.1MPa、Nでは5.4~5.5MPaコア強度よりも高い。またこの強度は、既に材齢91日のコア強度よりも高い。簡易断熱養生では、温度追隨養生に比べ、HLは低くなり、Nは高くなった。

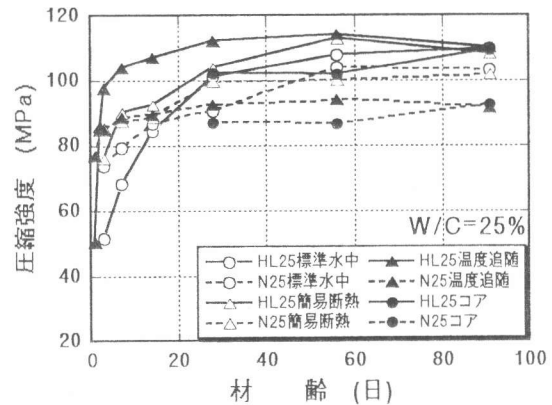
また、簡易断熱養生の結果は、HLではコア強度



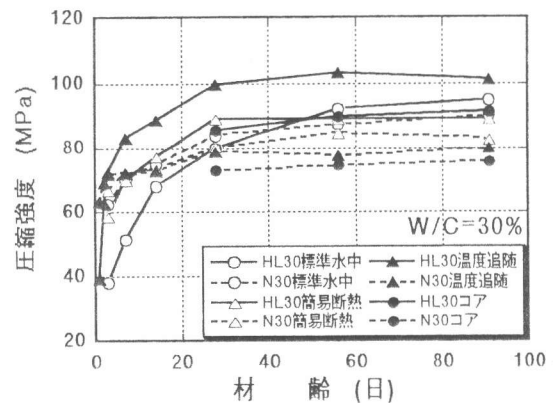
図一8 コア強度 (W/C=25%)



図一9 コア強度 (W/C=30%)

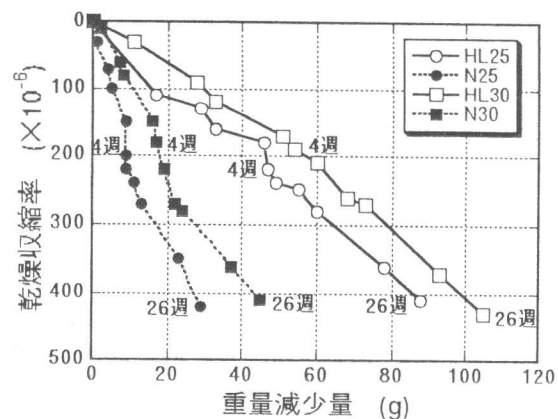


図一10 コア強度と管理用供試体強度



図一11 コア強度と管理用供試体強度

に近くなり、Nでは差が大きくなった。今回の試験結果から材齢28日の時点で、材齢91日のコア強度を推定してみると、HLでは材齢28日の標準水中養生、簡易断熱養生による強度、材齢14日までの温度追随養生による強度で推定可能となる。またNでは、材齢28日の標準水中養生による強度では、材齢91日のコア強度よりも高いので、10MPa程度低く評価しておく必要がある。また簡易断熱養生および温度追随養生では、材齢14日までの強度により推定可能となる。



図一 1 2 乾燥収縮率と重量減少率の関係

3. 4 乾燥収縮および中性化促進試験

材齢26週までの乾燥収縮率と供試体の重量減少量の関係を図一 1 2 に示す。この結果から、重量減少量は、同一材齢において水セメント比30%、HLの方が多くなり、乾燥しやすいといえる。またHLの場合、この乾燥のしやすさが、気中養生した供試体の強度発現が悪いことと関連しているものと推察する。一方乾燥収縮率は、セメントの種類、水セメント比に関係なく材齢26週で400~430 × 10⁻⁶の範囲にあり、重量減少量に影響されなかった。

中性化促進試験は、現在材齢18週まで実施しているが、すべてのコンクリートについての中性化深さは0mmで、中性化は全く進行していない。中性化は、水セメント比の影響が大きいが、本HLセメントを使用したコンクリートも耐久性上優れていることを確認できた。

4. まとめ

暑中環境下で模擬柱部材 (1000 × 1000 × 2000mm) に打設した圧縮強度60~100MPa程度の高強度かつ高流動なコンクリートのフレッシュおよび強度発現性状等について試験・検討し、以下のことがわかった。

- (1) 高強度 (コア強度 : 75~110MPa) かつ高流動 (スランプフロー : 60cm) なコンクリートを暑中環境下においても製造・施工できる。
- (2) 本ビーライト系セメントを使用したコンクリートは、普通セメントに比べ4~5%大きな水セメント比で同一強度を得ることができ、製造しやすく、施工性もよい高強度コンクリートとなる。
- (3) 本ビーライト系セメントを使用することにより、W/C=25%でFc100MPa級、W/C=30%でFc80MPa級のコンクリートが製造できる。
- (4) W/C=25%、30%において、両セメントともに標準水中養生、簡易断熱養生、温度履歴追随養生した供試体強度に基づき、材齢28日以前において材齢91日の構造体コンクリート強度推定が可能である。
- (5) 本ビーライト系セメント使用のコンクリートは、W/C=25%、30%において普通セメント使用と同様、乾燥収縮は約400~430 × 10⁻⁶ (材齢26週) と小さく、中性化の進行も遅い。

[参考文献]

- [1]久保田昌吾他:低熱セメントを用いた高強度コンクリートの施工性および強度発現性状に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16,No.1,pp.277-282,1994.
- [2] (財)国土開発技術センター、平成4年度 New RC 工法分科会報告書、1993.3