

論文 超高強度・低発熱連壁コンクリートの実施工における壁体の硬化特性

青木 茂^{*1}・三浦律彦^{*2}・神代泰道^{*3}・長谷川宏^{*4}

要旨：硬質砂岩系の骨材を用い、高ビーライトセメントと高性能AE減水剤を併用し、水セメント比22%でかつ高流動性の連壁コンクリートを打込んだ。壁体の硬化後、鉛直方向に連続コアボーリングを行い、コア供試体の圧縮強度試験を実施した。その結果、コア全数の平均値で130 N/mm²、統計処理による保証強度で115 N/mm²の超高強度な壁体の築造が確認できた。このとき、壁体の保証強度と、打込み前に採取した標準養生供試体での保証強度との比は、1.0以上となることが判明した。また、壁体の温度に履歴養生させた供試体強度は、同一積算温度でも標準養生供試体強度と異なることを確認した。
 キーワード：超高強度コンクリート、地下連続壁、コア強度、温度履歴養生、保証強度、高ビーライトセメント

1. はじめに

地下構造物の大型化に伴い、土留め・止水壁に利用される連続地中壁コンクリート（連壁コンクリートと略記する）の超高強度化が求められている。シリカフェーム等の混和材を用いたコンクリートの超高強度化技術は建築分野において実績があり、連壁コンクリートにおいても応用研究がなされてきた[1]。しかし、筆者らは、超高強度連壁コンクリートのコストメリットを活かし、実用化、汎用化を図るためには、鉱物質微粉末を用いずトレミ打設が可能な材料および配合を用いた連壁コンクリートが必要と考えてきた。このような観点から、今回、一般の骨材と高ビーライトセメントを用いた低水セメント比のコンクリートを市中の生コン工場において製造し[2]、基礎壁に適用するとともに壁体の超高強度化を検証した。

2. 連壁コンクリートの概要

2.1 連壁パネルの形状寸法と測定概要

基礎壁となる連壁パネルの形状寸法と各種測定概要を図-1に示す。幅2.4m、壁厚0.9m、深さ33mの壁体を水セメント比の水準（W/C=22%、

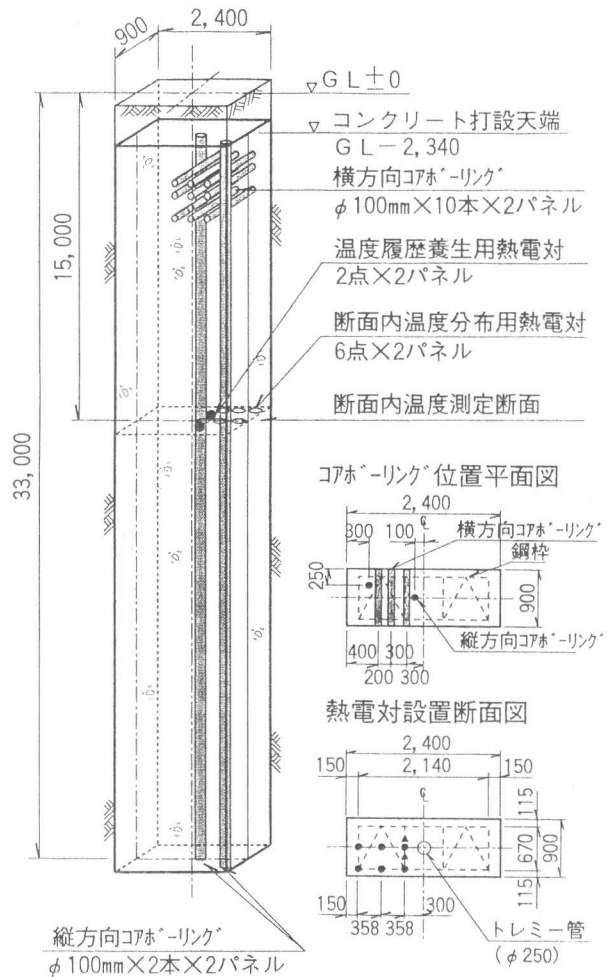


図-1 連壁パネルの形状寸法と各種測定概要

*1 (株)大林組 土木技術本部 技術第五部 技術課長 (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 土木第三研究室 副主任研究員、工修 (正会員)

*3 (株)大林組 技術研究所 建築第二研究室 研究員、工修 (正会員)

*4 (株)大林組 土木技術本部 設計第二部、工修 (正会員)

表一 2 連壁コンクリートの配合

種類	目標スランプ高 (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³) [下段は(ℓ/m³)]				S.P.A (C×wt%)
				W	C	S	G	
A配合	60~73	30.0	45.7	165 (165)	550 (171)	771 (294)	928 (350)	11.0 (2.0)
B配合	65~75	22.0	40.0	175 (175)	795 (247)	584 (223)	888 (335)	21.5 (2.7)

30%) に応じて2体施工した。地盤面以下 15mの位置において、壁体コンクリートの硬化過程での温度履歴を熱電対により測定した。また、この熱電対を用い、壁体の温度履歴を供試体に与え養生させるシステム(温度履歴養生システムと呼ぶ)により、壁体と同一積算温度での強度特性を調査した。壁体の硬化後、材齢12週から13週にかけて、連続コアボーリング(コア径φ100mm)を行い、材齢91日のコア強度を測定した。なお、連壁コンクリートの打設には、φ250mmのトレミ管(パネル中央に1本)を用いた。鉄筋籠の配筋は、縦筋D29、25cm²ッち、横筋D16、30cm²ッちとした。

2. 2 材料および配合

使用材料の性質を表一 1 に示す。細骨材および粗骨材とも、今回使用した生コン工場で通常の出荷品に使われているものである。ここで使用した高ビークライトセメントは、JIS R 5210 の中庸熱ポルトランドセメントの規格を満足している。

連壁コンクリートの配合を表一 2 に示す。ここで示すA配合(W/C=30%)とB配合(W/C=22%)のコンクリートを各々1体ずつのパネル(Aパネル、Bパネルと呼ぶ)に打込んだ。なお、O漏斗流下試験における流下時間はA配合で10~17秒、B配合で22~30秒であった。

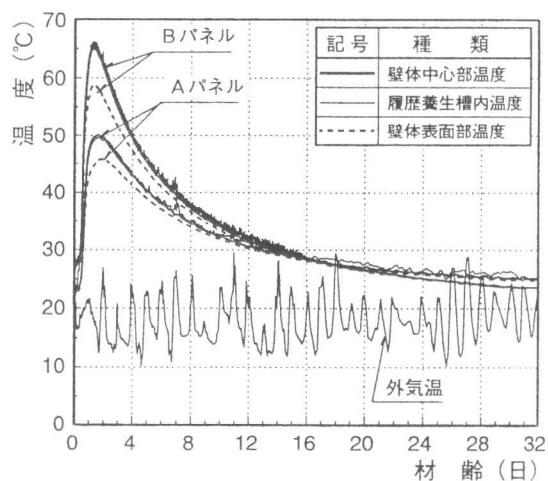
3. 壁体温度と温度履歴養生強度

3. 1 壁体の温度履歴

壁体温度の履歴を図一 2 に示す。Aパネルの最高温度は50℃、このときの温度上昇量は28℃(打込み温度22℃)であり、Bパネルの最高温度は65℃、このときの温度上昇量は39℃(打込み温度26℃)であった。一方、A配合およびB配合での断熱温度上昇試験結果を表一 3 に示す。A配合とB配合での最高温度上昇量の差(約12℃)は、壁体レベルでの差(11℃)とほぼ一致している。断熱温度上昇試験結果より、単位セメント量10kg/m³の増減で、K値は約0.5℃の増減となっている。

表一 1 使用材料の性質

区分	種類	記号	物性・主成分など
セメント	高ビークライトセメント	C	比重 3.22, 比表面積 3340 cm ² /g 凝結: 水量27.5%, 始発2h-40min, 終結3h-55min 圧縮強さ (N/mm ²): 8.1(3日), 12.4(7日), 34.9(28日) 水和熱 (cal/g): 51.7(7日), 65.8(28日) 組成 (%): C ₃ S 29, C ₂ S 54, C ₃ A 3, C ₄ AF 8
細骨材	山砂	S	鹿島産粗砂 比重 2.61, 吸水率 0.77% 粗粒率 2.80, 実積率 65.8%
粗骨材	碎石	G	笠間産碎石, 岩質: 硬質砂岩 比重 2.65, 吸水率 0.70% 粗粒率 6.58, 実積率 60.0%
混和剤	高性能 A E 減水剤	S.P.A	主成分: ポリカルボン酸塩系, pH 8±1 比重 (20℃) 1.07±0.02



図一 2 壁体温度の履歴

表一 3 断熱温度上昇試験結果

配合区分	$T=K(1-e^{-\alpha t})$		$T=K\{1-e^{-\alpha(t-t_0)}\}$		
	K	α	K	α	t_0
A	58.46	0.81	57.79	1.00	0.21
B	69.54	0.94	69.87	1.11	0.38

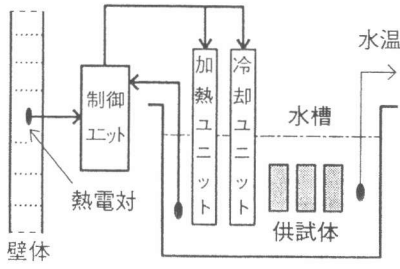


図-3 温度履歴養生システム

3. 2 温度履歴養生強度

温度履歴養生システムを図-3に示す。これは、壁体中心部（深さ15m）に設置した熱電対により、壁体温度の履歴（図-2）を加熱・冷却ユニットを介して水槽の水温に与えるものである。水槽の水温と壁体中心部の温度差は測定期間を通じ、最大1℃未満であった。供試体の養生は湿潤養生の他に、封緘養生も行った。これは、地中構造物であってもマスの壁体の中央部は封緘養生に近い養生状態と考えたためである。所定の材齢において、供試体を取り出し、強度試験を行った。

このシステムを用いた温度履歴養生下での圧縮強度と積算温度の関係を図-4に示す。図中には、同一バッチで採取し20℃で標準水中養生（以下、標準養生と略記する）させた場合の供試体強度も示した。これより、AパネルおよびBパネルとも、同一積算温度であっても温度履歴養生供試体強度と標準養生供試体強度が異なることが認められる。なお、温度履歴養生供試体で湿潤養生と封緘養生での有意な強度差は認められなかった。また、Aパネルにおいては積算温度が1000(D・D)を境に、Bパネルにおいては積算温度が1500(D・D)を境に、温度履歴養生供試体強度と標準養生供試体強度の大小関係が逆転している。これは材齢初期に高温履歴を受けた場合の硬化体の細孔構造の変化[3]が、高ビーライトセメントを用いた低水セメント比の領域においても生じたためと思われる。

温度履歴養生と標準養生での引張強度と圧縮強度との関係を図-5に示す。引張強度はφ

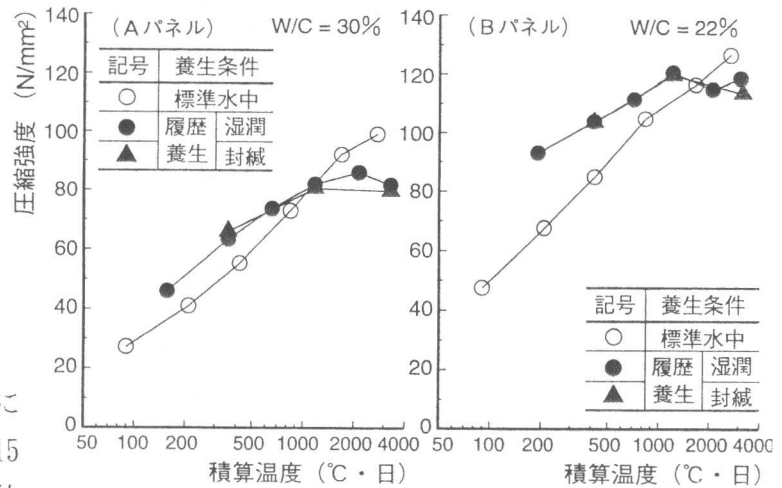


図-4 温度履歴養生下での圧縮強度と積算温度の関係

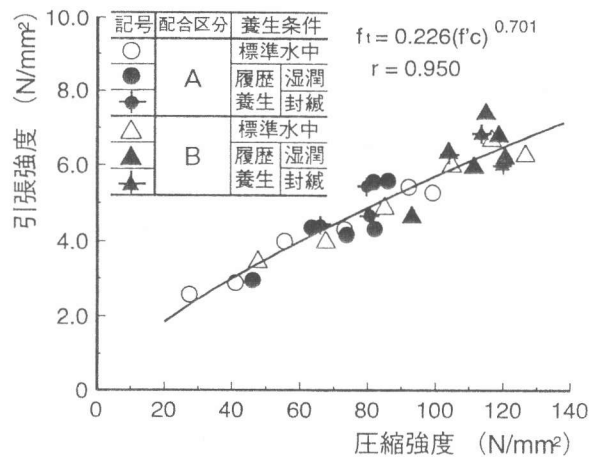


図-5 温度履歴養生下での引張強度と圧縮強度の関係

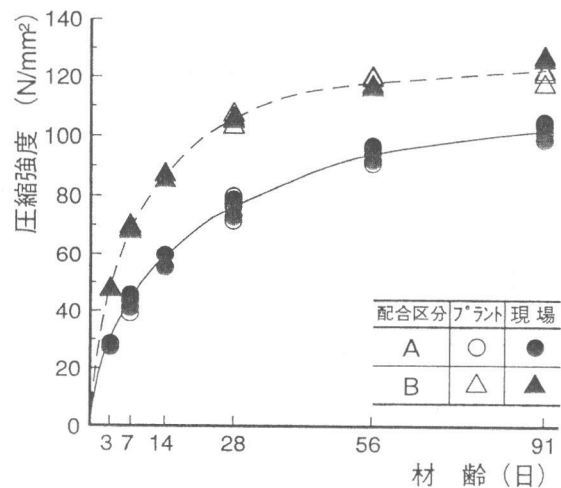


図-6 圧縮強度と材齢の関係

100mm×200mmの供試体を割裂試験により求めたものである。図-5より、引張強度と圧縮強度の関係は、温度履歴養生および標準養生とも同一の関係式で整理できることが認められる。引張強度の圧縮強度に対する強度比は1/14~1/19であり、圧縮強度が大きくなるに従い、強度比は小さくなる傾向を示している。

4. 標準養生供試体の各種強度特性

圧縮強度と材齢の関係を図-6に示す。図-6は、生コンプラントおよび現場で採取した標準養生供試体全数について整理したものである。A配合(W/C=30%)、B配合(W/C=22%)とも圧縮強度が95 N/mm²~100 N/mm²までは材齢の経過に伴い圧縮強度は漸次増加している。しかし、圧縮強度がこの値を越えると、材齢の経過に伴う強度増加の程度は鈍くなり、特にB配合において顕著である。長期材齢での強度増加が比較的大きい高ビークライトセメントを使用してもこの現象が起きるのは、粗骨材として用いた碎石の強度に起因したものである。

静弾性係数と圧縮強度の関係を図-7に示す。静弾性係数と圧縮強度の関係は、A配合(W/C=30%)およびB配合(W/C=22%)とも同一の関係式で近似できる結果を得た。なお、図中にNew RCでの提案式[4]（ここでは、コンクリートの単位容積質量2.4t/m³、粗骨材の種類により定まる補正係数K₁:1.0、混和材の種類により定まる補正係数K₂:1.0と仮定）を示した。今回の配合で得られた近似式と、New RC式では若干異なる結果となった。

曲げ強度と圧縮強度の関係を図-8に示す。曲げ強度の圧縮強度に対する強度比は1/9~1/14となった。

せん断強度と圧縮強度の関係を図-9に示す。せん断強度は、100mm×100mm×400mmの角柱供試体を用いた直接2面せん断試験の結果である。せん断強度の圧縮強度に対する強度比は1/2~1/3であり高い値を示している。図中に、圧縮強度と引張強度から、モールの応力円の式($F_s = (F_c \cdot F_t)^{0.5} / 2$)を用いて間接的に求めたせん断強度と圧縮強度の関係を示した。直接2面せん断試験はせん断破壊とは別の形態で破壊を生ずる場合もあり、断面設計での特性値としては、モールの応力円で間接的に求めたせん断強度を用いるのが安全側と思われる。

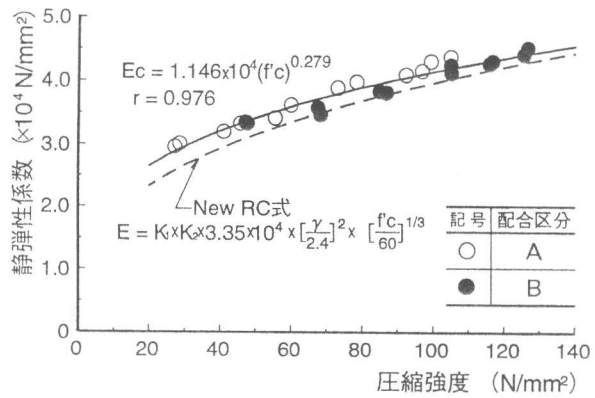


図-7 静弾性係数と圧縮強度の関係

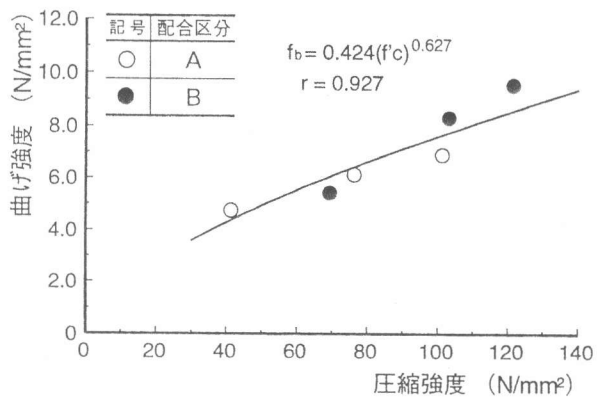


図-8 曲げ強度と圧縮強度の関係

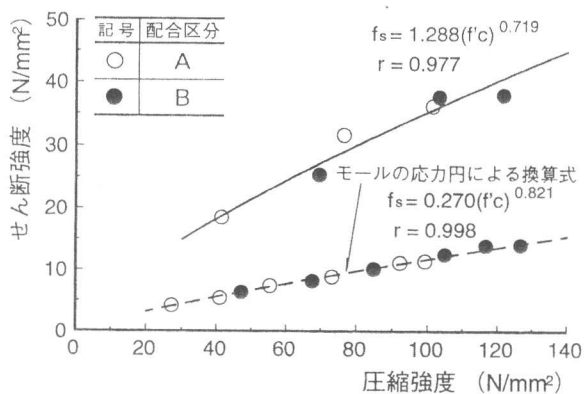


図-9 せん断強度と圧縮強度の関係

5. コア供試体の圧縮強度

Aパネル (W/C=30%) から採取したコア供試体の圧縮強度 (コア強度と略記する) の深さ方向の分布を図-10 に、Bパネル (W/C=22%) のコア強度の深さ方向の分布を図-11に示す。コア供試体は、連続して採取されたものを約3m毎に3本切り出しφ100mm×200mmに成形したものである。図-10より、Aパネルの中央部および端部において、コア強度が深さ方向に増大する傾向が認められる。深さ30mでの地表面部 (深さ3m) に対する強度の増加割合は中央部で約10%、端部で約20%となっている。なお、図-11に示したBパネルにおいては、Aパネルに比べ深さ方向の強度増加は小さいが、中央部の深さ5m~15mの区間で強度増加が認められる。このような深さ方向での強度増加は、コンクリートの自重加圧による硬化組織の緻密化によるものと考えられる。硬化組織の緻密化は、図-12に示したコアの単位体積質量の深さ方向の分布にも現れている。深さ30mでの地表面部に対する単位体積質量の増加割合はAパネルで約1%、Bパネルで約2%となっている。いずれにしろ、深さ方向で地表部付近の品質を上回る結果が得られた。

6. 壁体の保証強度

標準養生供試体およびコア供試体の圧縮強度の統計処理結果を表-4に示す。標準養生供試体においては、A配合 (W/C=30%) およびB配合 (W/C=22%) とともに変動係数は3~5%の範囲にある。今回のような超高強度なコンクリートでも、市中の生コンプラントで品質変動を小さく製造できることが確認できた。一方、コア供試体の変動係数は6~7%の範囲にあるが、安定液中に打設された壁体のコアであることを考慮すると、強度の変動は比較的小さいものと思われる。

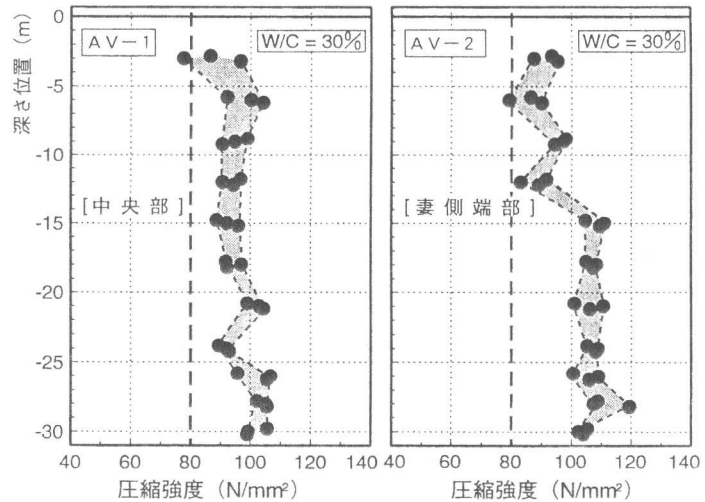


図-10 コア強度の深さ方向の分布 (Aパネル)

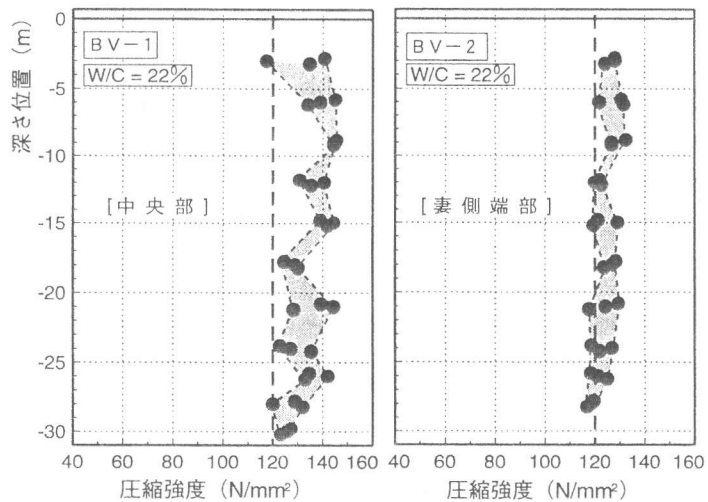


図-11 コア強度の深さ方向の分布 (Bパネル)

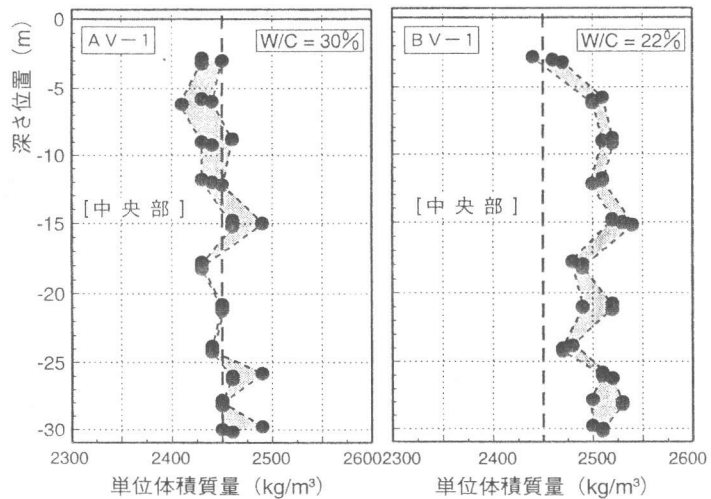


図-12 コアの単位体積質量の深さ方向の分布

統計処理結果をもとに、標準養生供試体およびコア供試体の保証強度を換算したものを表-5に示す。保証強度は、不良率を4%以下として換算した。コア供試体の換算保証強度は、Aパネルで87 N/mm²、Bパネルで115 N/mm²であり、この値を壁体の保証強度として採り得るものとする。また、標準養生供試体とコア供試体での換算保証強度の比は、水セメント比が22%のBパネルにおいては1.0以上となる結果が得られた。この結果は、水セメント比22%の領域においては設計基準強度と品質管理上での呼び強度を同一と評価できることを示唆している。

7. まとめ

硬質砂岩系の骨材と高ビーライトセメントを用いた水セメント比が30%と22%の連壁コンクリートを打設し、超高強度連壁コンクリートの実用化を試みた。壁体の硬化特性に関して得られた主な事項を以下に示す。

- ①壁体の温度に履歴養生させた供試体の圧縮強度と標準養生させた供試体強度とは同一積算温度で異なり、水セメント比22%の場合で最大20 N/mm²程度の差がある。
- ②温度履歴養生させた供試体の引張強度と圧縮強度の関係は、標準養生での引張強度と圧縮強度の関係式で評価できる。
- ③標準養生供試体における静弾性係数と圧縮強度の関係は、水セメント比が30%と22%の配合で単位セメント量に250kg/m³程度の差があるが、両配合とも同一の関係式で整理できる。
- ④コア供試体の圧縮強度を統計処理した結果、壁体の保証強度として、水セメント比が30%の配合で87 N/mm²、水セメント比が22%の配合で115 N/mm²の値が確認できた。
- ⑤水セメント比が22%の壁体では、標準養生供試体に対するコア供試体での換算保証強度比は1.0以上となることが確認できた。

なお、本研究の実施過程で、適切なご指導を賜りました東北大学 三浦 尚教授に深謝致します。

[参考文献]

- [1]青木 茂, 三浦律彦, 十河茂幸: 各種鉱物質微粉末を用いた低発熱超高強度連壁コンクリートに関する基礎研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 1、1993
- [2]三浦, 青木, 神代, 河村: 超高強度・低発熱型連壁コンクリートの配合選定と施工時のフレッシュ性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18、No. 1、1996、(投稿中)
- [3]森本丈太郎, 魚本健人: 初期高温養生したセメントの細孔構造に関する研究、土木学会第50回年次学術講演会、V-11、1995.9
- [4](財)国土開発技術センター: 平成4年度NewR C研究開発概要報告書、高強度コンクリート分科会性能評価WG、ヤング係数の評価式、3-1-54、1993.3

表-4 圧縮強度の統計処理結果

	標準養生供試体		コア供試体	
	A配合	B配合	Aパネル	Bパネル
個数 n (個)	21	21	66	63
最大値 (N/mm ²)	107	131	119	146
最小値 (N/mm ²)	96.8	107	79.2	117
平均値 m (N/mm ²)	102	122	98.8	129
標準偏差 σ (N/mm ²)	3.11	5.62	6.71	8.21
変動係数 (%)	3.05	4.59	6.83	6.35

表-5 統計処理結果による換算保証強度

種別	パネル 区分	換算保証強度	
		記号	Fci (N/mm ²)
コア 供試体	A	Fcc	87.2
	B		115
標準 養生 供試体	A	Fcm	96.3
	B		113
換算 保証 強度比	A	Fcc/ Fcm	0.91
	B		1.02

* 不良率4%以下 (Fci=m-1.73σ)