

[1043] 高ビーライトセメントの高強度地下連続壁コンクリートへの適用性に関する基礎的研究

三浦 律彦^{*1}・峯岸 孝二^{*2}・関 晃一^{*3}・岩井 稔^{*4}

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の大型化や高機能化に伴い、比較的マッシブなコンクリート構造物にも高強度コンクリートが適用されるようになってきた。大型地下構造物の仮設土留め壁や本体壁の一部として使用される地下連続壁も、掘削土量の低減、工期短縮および設計の合理化などの観点から薄肉化、高強度化が進められるようになってきた[1]。一方、地下連続壁においては止水性の向上も重要な品質となるため、セメント量の増加に伴う温度ひび割れの増大や、低水セメント比域での高粘性化による充填性の低下が問題とされ、より低発熱で施工性に優れた高性能な高強度コンクリートが求められている。

そこで、従来の低発熱型混合セメント以上に低発熱で注目されているビーライト成分(C_2S)の多いポルトランドセメント[2]（以下高ビーライトセメントと略称）を探り上げ、設計基準強度が 700kgf/cm^2 以上の高強度地下連続壁への適用を想定し、従来の混合セメントとの対比を行う配合実験を実施した。検討項目は、経時変化を含むフレッシュコンクリートの性状や、凝結・強度発現性状、断熱温度上昇量、耐凍結融解抵抗性である。

2. 実験概要

2. 1 対象構造物と設計条件

適用の対象とした構造物は、大型円筒形の仮設土留め壁を想定した設計基準強度 700kgf/cm^2 の高強度地下連続壁で、レディーミクストコンクリート工場での製造時の品質変動（変動係数10%）や泥水中での打設に伴う強度低減（低減率0.9）を考慮した割増を行い、配合強度を 930kgf/cm^2 とした（表-1）。

目標スランプフローは充填性を考慮して $60 \pm 5\text{cm}$ とし、施工条件を考慮して 20°C で90分以上保持することとした。目標空気量は高強度を考慮して $3 \pm 1\%$ とした。

2. 2 使用材料と配合

コンクリートの使用材料を表-2に示す。セメントとしては、ビーライト含有量の異なる高ビーライトセメントを2種類と、2成分

表-1 目標品質

項目	目標値	備考
スランプフロー	$60 \pm 5\text{cm}$	90分以上保持
空気量	$3 \pm 1\%$	高強度を考慮
設計基準強度	700kgf/cm^2	材齢91日の圧縮強度
配合強度	930kgf/cm^2	水中打設の割増考慮

表-2 使用材料

種類	略称	名称	比重	摘要
セメント	ビーライト1	高ビーライト系低熱ポルトランド-1	3.22	比表面積=3,420cm ² /g $C_2S = 53\%$, $C_3S = 29\%$
	ビーライト2	高ビーライト系低熱ポルトランド-2	3.24	比表面積=3,390cm ² /g $C_2S = 72\%$, $C_3S = 9\%$
トントン	2成分系	マスコン型高炉セメントB種	3.00	比表面積=4,070cm ² /g 高炉スラグ56%混入
	3成分系	フライアッシュ混入マスコン型高炉B種	2.89	比表面積=3,910cm ² /g スラグ50%, フライアッシュ10%混入
粗骨材	G	石灰岩碎石	2.70	$G_{max.}=25\text{mm}$, 吸水率=0.31%
細骨材	S	山砂(君津産)	2.60	$FM=2.53$, 吸水率=1.53%
混和剤	SP	高性能AE減水剤	—	ポリカルボン酸系

*1 個大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員, 工修(正会員)

*2 東京ガス個生産技術部 工場建設G 土木建築設計技術チーム 課長, *3 同チーム

*4 個鹿島技術研究所 第二研究部第二研究室 研究員(正会員)

系・3成分系の混合セメントを1種類ずつ、計4種類を使用した。また、混和剤にはポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を用いた。なお、粗骨材は京浜地区の工場で比較的入手が容易で良質の石灰岩碎石を使用した。

配合上の検討要因としては、セメントの種類の他、単位水量、細骨材率、水セメント比を表-3に示す範囲で3~4水準に変化させ、フレッシュ性状や強度発現性状などに及ぼす影響を比較検討した。

2.3 試験項目と練混ぜ条件

フレッシュコンクリートの試験として、スランプフロー・空気量試験の他、フロー速度（スランプフロー50cmまでの平均広がり速度）及びロート流下時間（Oロート[3]、Vロート[4]）を計測し、粘性の違いが流動性に及ぼす影響を検討した。

硬化コンクリートの試験として、圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度の測定を4材齢（3日、7日、28日、91日）でそれぞれ実施した。また、温度ひび割れや耐久性に関する試験項目として、断熱温度上昇量の測定と凍結融解試験（急速水中凍結融解法）を実施した。

コンクリートの練混ぜは100ℓ容量の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秒間、水と混和剤を投入して3分間と一定にした。

3. 実験結果と考察

3.1 練上り時のフレッシュ性状

(1) 単位水量とフレッシュ性状の関係

水セメント比が28%で、単位水量が160kg/m³の配合でそれぞれ目標スランプフローが得られる混和剤添加率を保った時の、単位水量とスランプフロー、50cmフロー速度およびOロート流下時間の関係を図-1～3に示す。なお、Vロート流下時間はOロート流下時間とほぼ同じ傾向を示した。

単位水量が増加するとスランプフローや50cmフロー速度は増大し、Oロート流下時間は減少したが、その変化の程度はセメントの種類や混和剤添加率の違いでやや異った。セメントの種類については、何れの単位水量においても、ビーライト1やビーライト2の流下時間は2成分系より短くなり、粘性がかなり異なることが確認された。

表-3 検討した配合要因

配合要因	比較水準
セメント種類	2, 3成分系、ビーライト1, 2
単位水量	140, 150, 160, 170kg/m ³ (150, 160, 170, 180kg/m ³) ^{*1}
細骨材率	34.0, 37.0, 40.0, 43.0 % (38.5, 41.5, 44.5, 47.5 %) ^{*2}
水セメント比	25.0, 28.0, 31.0 %

*1) ビーライト2の場合、*2) ビーライト1の場合

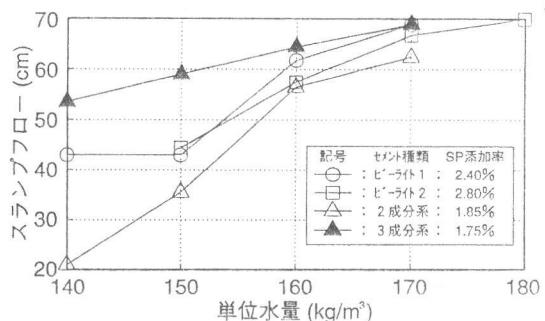


図-1 単位水量とスランプフロー

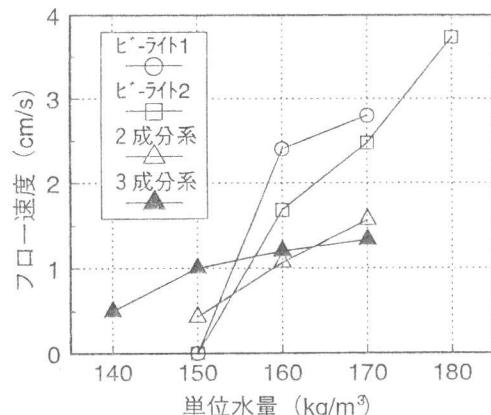


図-2 単位水量と50cmフロー速度

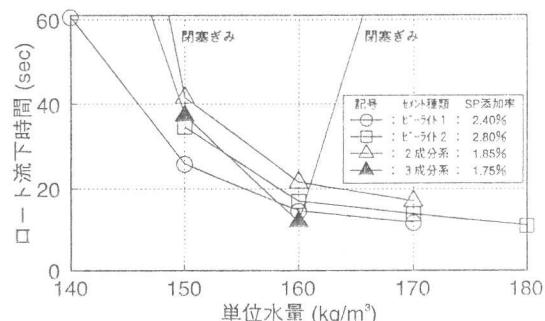


図-3 単位水量とOロート流下時間

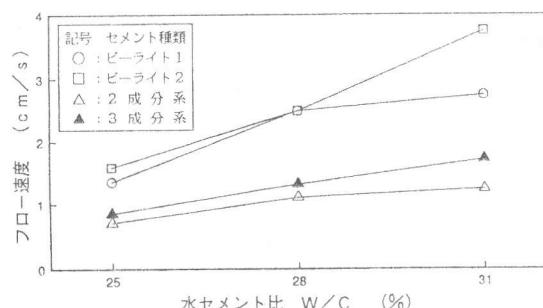


図-4 水セメント比と50cmフロー速度

(2) 水セメント比とフレッシュ性状の関係

単位水量、細骨材率、スランプフローを一定とした時の、水セメント比と50cmフロー速度、Oロート流下時間の関係を図-4、5に示す。Vロート流下時間もOロートとほぼ同様な結果であった。

何れのセメントにおいても、水セメント比が小さくなるほど粘性が増大し、フロー速度は減少、ロート流下時間は増加する傾向が認められたが、変化の程度はセメントの種類によってかなり異なった。なお、単位水量が150kg/m³と少なく粗骨材量が最も多くなった2成分系のロート流下時間では、水セメントが31%の場合に骨材粒子のかみあいによる流下時間の増大が認められた。

同一スランプフロー($60 \pm 5\text{cm}$)の配合におけるOロート流下時間と50cmフロー速度の関係を図-6に示す。セメントの種類や単位水量、水セメント比、混和剤添加率の違いによらず、両者の間に比較的高い相関が認められた。さらに、同一スランプフローであっても、セメントの種類や水セメント比によってコンクリートの粘性の程度がかなり異なり、高ビーライト系のセメントは2成分系のセメントに比べて粘性が低くなり、流動性状がかなり改善できることが確認された。

3. 2 フレッシュ性状の経時変化

(1) スランプフロー、フロー速度の経時変化

各種セメントを用いたコンクリートのスランプフローの経時変化を水セメント比別にして図-7に示す。混和剤添加率が比較的多くなった水セメント比25%の場合では、何れのセメントも緩やかな変化を示し、90分後でも良好なスランプフローを示した。水セメント比28%の場合では、ビーライト1($C_2S=50\%$ 程度)がやや大きなスランプフローの低下を示した。水セメント比31%の場合では、2成分系のセメントの60分以降のスランプフローの低下が大きくなかった。

50cmまでのフロー速度の経時変化を水セメント別にして図-8に示す。水セメント比25%の場合では、スランプフローが少し小さかったビーライト2($C_2S=70\%$ 程度)が少し大きなフロー速度の低下を示した。水セメント比28%の場合では、スランプフローの低下が大きかったビーライト1が少し大きなフロー速度の低下を示した。水セメント比31%の場合でも、スランプフローの低下が大きい2成分系のセメントが少し大きなフロー速度の低下を示した。このように、50cmフロー速度はスランプフローの大小の影響も受けることが確認された。

(2) Oロート流下時間の経時変化

各種セメントを用いた配合のOロート流下時間の経時変化を水セメント比別にして図-9に示す。なお、Vロート流下時間の経時変化も同様な結果であった。

水セメント比が25%の場合では、2成分系のセメントがかなり大きな増加を示し、ビーライト2の変化が最も少なくなった。水セメント比が28%の場合では、スランプフローの低下が大きかったビーライト1や、2成分系のセメントが比較的大きな流下時間の増加を示した。水セメント比が31%の場合では、2成分系や3成分系のセメントがかなり大きな流下時間の増加を示した。全般に、混和剤添加率が最も多くなったビーライト2では流下時間の増加が少なく、90分程度ま

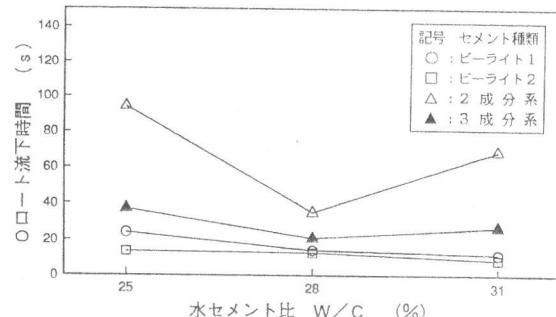


図-5 水セメント比とOロート流下時間

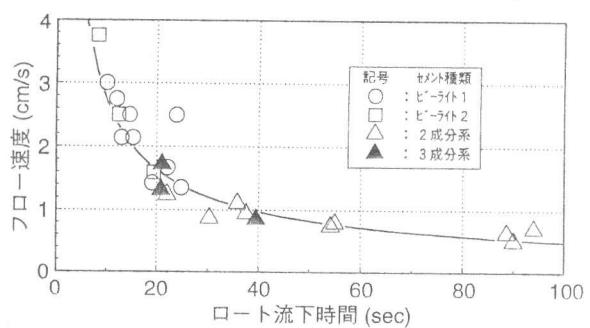


図-6 Oロート流下時間と50cmフロー速度

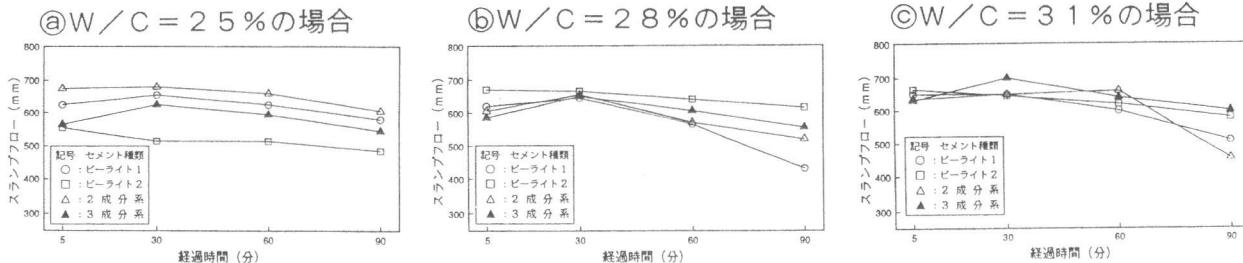


図-7 スランプフローの経時変化

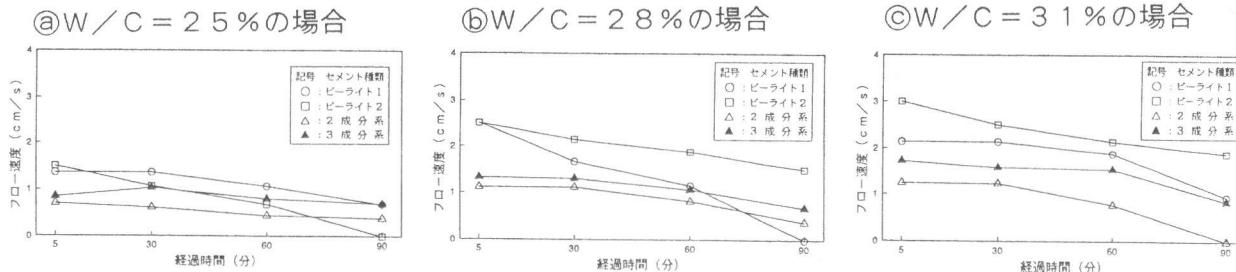


図-8 50cmフロー速度の経時変化

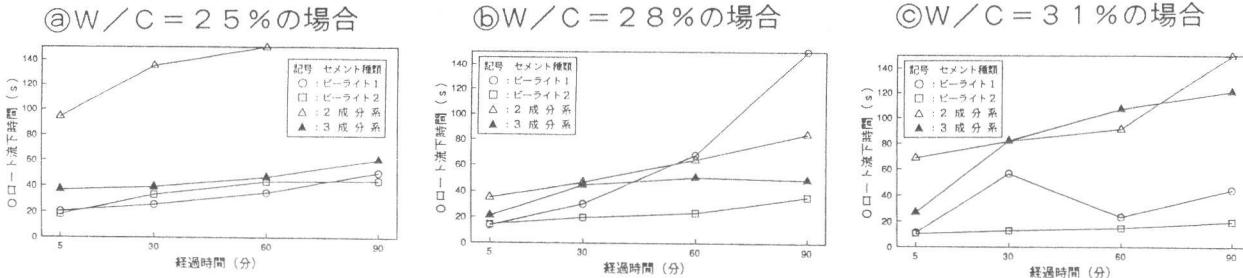


図-9 O-Ringト流下時間の経時変化

で粘性の低い良好な状態を保つことが確認された。

3. 3 凝結時間

各種セメントを用いた配合の凝結試験結果を表-4に示す。何れのセメントにおいても、水セメント比が小さくなるほど混和剤添加率が増加し、凝結時間は少し長くなった。同一水セメント比で比較すると、ビーライト1の凝結が最も早く、次いで2成分系、3成分系の順で、混和剤添加率が最も多くなったビーライト2は凝結が最も遅くなつた（始発で14～17時間程度）。また始発から終結までの時間も、始発の遅れに伴い長くなり、ビーライト2では3.5～5時間程度と最も長くなつた。

3. 4 強度および弾性の発現性状

(1) 圧縮強度の発現性状

圧縮強度の発現性状をセメントの種類別に図-10に示す。材齢を対数で表示した場合、従来の2成分系、3成分系混合セメントの強度発現が上に凸の曲線となり、特に材齢3日から7日の初期の強度増進が大きいのに対し、ビーライト1は直線的、ビーライト2は下に凸の曲線となり、7日あるいは28日以降の長期の強度増進が大きいことが確認された。さらに、ビーライト2は他のセメントに比べて材齢28日までの圧縮強度がかなり低くなることが判明した。

表-4 コンクリートの凝結試験結果

No.	セメントの種類	水セメント比W/C(%)	単位水量W(kg/m³)	混和剤添加量(%)	凝結時間(時間一分)	
					始発	終結
1	2成分系	25	150	2.50	11-45	15-00
		28	150	2.30	10-30	13-50
		31	150	2.20	7-30	10-25
2	3成分系	25	160	2.10	12-00	15-30
		28	160	1.90	11-10	14-30
		31	160	1.75	10-15	13-15
3	ビーライト1	25	160	2.55	9-05	10-55
		28	160	2.40	9-00	10-50
		31	160	2.25	8-50	10-30
4	ビーライト2	25	170	3.20	17-30	22-25
		28	170	2.80	17-15	20-50
		31	170	2.35	13-40	17-00

(2) 引張強度の発現性状
各種セメントを用いた配合の引張強度の発現は圧縮の場合とほぼ同様であった。

2成分系とビーライト1の圧縮強度と引張強度の関係を図-11に示す。ビーライト1の引張強度は圧縮強度が400~800 kgf/cm²では2成分系より若干小さな値となった。

(3) 弹性係数の発現性状

各種セメントを用いた配合の静弾性係数の発現は圧縮強度の場合とほぼ同様で、高ビーライト系のセメントではほぼ直線的に増加し、セメントの種類の差は圧縮強度や引張強度に比べて小さくなつた。

2成分系とビーライト1の圧縮強度と静弾性係数の関係を図-12に示す。同一の強度レベルで比較すると、ビーライト1の静弾性係数は2成分系より若干小さな値となつた。ビーライト2もほぼ同様であった。

3.5 各種セメントにおける代表配合

フレッシュコンクリートの練上り性状や経時変化性状から選定された単位水量、細骨材率、混和剤添加率と、圧縮強度から定まる水セメント比をもとに、配合強度930kgf/cm²の配合を選定した(表-5)。以下に示す断熱試験や凍結融解試験においてはこれらの代表配合を適用し、比較を行つた。

3.6 各種配合の断熱温度上昇量の検討

(1) 各種セメントの断熱温度上昇量の比較

練上り温度を20±1℃とした場合の断熱温度上昇試験結果を図-13に示す。高ビーライト系のセメントは材齢1日程度までの温度上昇が混合セメントに比べてやや急激となるものの、それ以降はかなり緩やかな温度上昇

となった。また、終局温度上昇量は2成分系が64℃程度、3成分系が59℃程度となつたのに対し、C₂Sが50%程度のビーライト1が52℃程度、C₂Sが70%程度のビーライト2が51℃程度で、高ビーライト系のセメントが予想通り低くなつた。

(2) 低発熱高強度コンクリートの検討 セメントの種類により単位セメント量

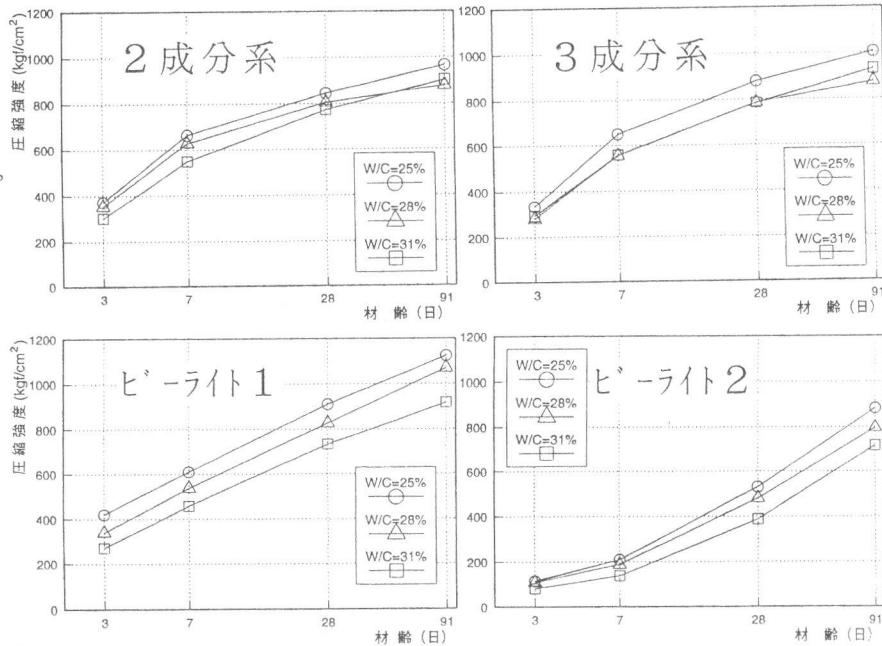


図-10 圧縮強度の発現性状

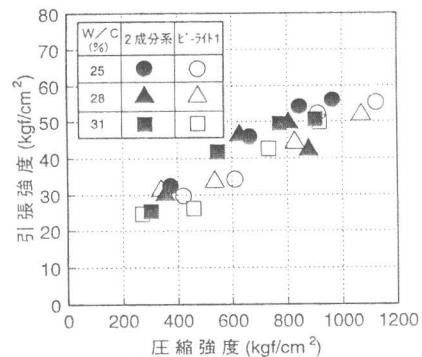


図-11 圧縮強度と引張強度

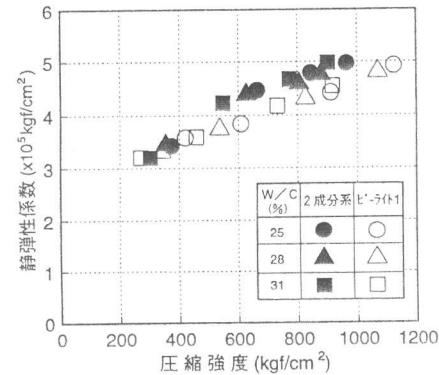


図-12 圧縮強度と静弾性係数

表-5 各種セメントの代表配合

配合No.	セメント	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)				SP (C×%)
					W	C	S	G	
1	2成分系	25.0	40.0	3±1	150	600	645	1004	2.3
2	3成分系	25.0	40.0	3±1	160	640	612	953	1.8
3	ビーライト1	28.0	44.5	3±1	160	571	732	948	1.975
4	ビーライト2	25.0	43.0	3±1	170	680	660	907	3.6

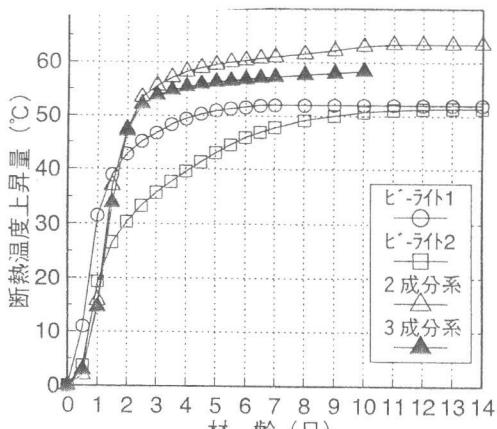


図-13 断熱温度上昇試験結果

表-6 代表配合の温度上昇量の比較

No.	セメントの種類	水セメント比 W/C (%)	単位セメント量 C (kg/m³)	材齢91日の圧縮強度 f'c (kgf/cm²)	終局温度上昇量 K (°C)	単位セメント量 100kg/m³ 当りの温度上昇量 K/C	単位強度 100kgf/cm² 当りの温度上昇量 K/f'c
1	2成分系	25	600	965	64	10.7	6.63
2	3成分系	25	640	1005	59	9.2	5.87
3	ビーライト1	28	571	1070	52	9.1	4.86
4	ビーライト2	25	680	938	51	7.5	5.44

がかなり異なっているため、単位セメント量100kg/m³当りの温度上昇量と単位強度100kgf/cm²当りの温度上昇量を求めて比較を行った。表-6にその結果を示す。

単位セメント量当りの温度上昇量はビーライト2が最も小さく、最も大きい2成分系の7割程度の値となった。単位強度当りの温度上昇量はビーライト1が最も小さく、最も大きい2成分系の3/4程度の値となった。以上の結果より、フレッシュ性状や発熱性状、強度発現性状等を総合すると、高ビーライトセメントは高強度地下連続壁用コンクリートに適用性が高いセメントと判断された。

3.7 耐凍結融解抵抗性の検討

空気量を2%と4%にした場合の、2成分系とビーライト1の凍結融解試験結果を図-14に示す。セメントの種類の影響は少なく、空気量が2%の配合では210サイクルを過ぎたころから若干以下の傾向が認められたが、耐久性指数は90以上で、いずれも良好な結果となった。

このように900kgf/cm²以上の高強度コンクリートの場合には、空気量が2%程度であっても十分な耐凍結融解抵抗性が得られることが確認された。

4.まとめ

以上の結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) 高ビーライトセメントを用いることにより、流動性、凝結性状、低発熱性、強度発現性、耐凍結融解抵抗性に優れた高性能な高強度地下連続壁用コンクリートが達成できる。
 - (2) ビーライト含有量や他の成分などの違いにより、単位水量や混和剤添加量等の配合要因がかなり異なり、上記の性状も大きく変化するので、セメントの選定には注意を要する。
- 今後はさらに、実際の工事への適用性の検討や実機での品質確認を進める予定である。

最後に、本研究は東京ガス、鹿島建設、清水建設、大成建設、三井建設と大林組の6社共同研究の成果をまとめものである。末筆ながら、関係者各位に深く感謝の意を表する次第である。

【参考文献】

- 1) 青木 茂ほか：白鳥大橋における施工結果、土木学会第46回年次講演会V-316, 1991.9
- 2) 羽原・飛内：低発熱セメント、セメントコンクリート No. 535, pp. 12-24, 1991.7
- 3) 芳賀孝成ほか：地下連続壁コンクリートの超高強度化、土木学会第46回年次講演会V-317, 1991.9
- 4) 坂田 昇ほか：フレッシュコンクリートの充填性評価のためのロート試験、土木学会第47回講演会V-268, 1992.9

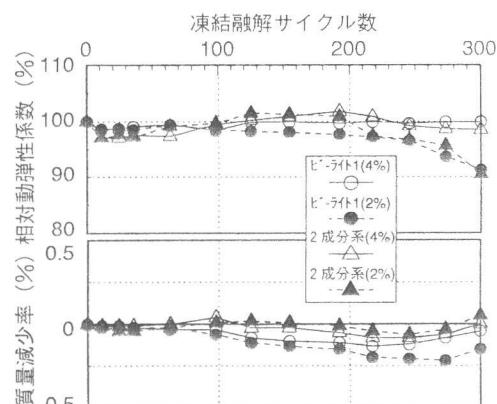


図-14 凍結融解試験結果