

[70] 高流動化した水中コンクリートの品質

正会員 ○青木 茂 (大林組技術研究所)
 正会員 十河茂幸 (大林組技術研究所)
 正会員 三浦律彦 (大林組技術研究所)
 芳賀孝成 (大林組技術研究所)

1. ま え が き

地下連続壁や場所打ち杭に使用される水中コンクリートは、水中打設時の分離を少なくし硬化後に十分な品質を確保する目的で、一般に単位セメント量 $370\text{kg}/\text{m}^3$ 以上の富配合のものが用いられることが多い。しかし、近年、構造物の大型化に伴い連壁コンクリートの部材厚も大きくなり、水和熱による温度ひびわれの問題が生じる場合もある。この対策として低発熱セメントの使用や単位セメント量の低減が有効と思われるが、反面、水中打設時の分離による品質低下が懸念される。

以上の観点から、この研究では ①低発熱セメントの使用、②流動化剤の使用による単位セメント量の低減、③低発熱セメントを用いた高強度の流動化コンクリートの適用、④分離低減剤の使用による単位セメント量の低減などの水中コンクリートとしての有利性を調べる目的で、水中打設実験を実施した。この報告はこれらの実験のうち、各種配合の水和熱低減効果とこれらを水中打設した際の品質変動について検討したものである。

2. 実 験 概 要

2.1 水中打設実験

(1) 実験施設および水中打設試験体の概要 図-1に示すように屋外水槽(平面寸法 $6\text{m} \times 5\text{m}$ 、深さ 2.55m)内に6つの木製型枠を設置して管径8インチのトレミー管を用いて配合の異なるコンクリートをそれぞれ水中打設し、硬化過程の温度上昇、下降時の挙動(温度分布、ひずみ、有効応力)の測定、および硬化コンクリートの品質(分離状況、圧縮強度、静弾性係数など)を調査した。

試験体の寸法は、図-2に示すように平面寸法が $1.0\text{m} \times 1.8\text{m}$ 、高さが約 2.5m で、鉄筋まわりの流動性を調べる目的で鉄筋籠を設置した。なお、No.6のみ平面寸法を約半分にした。

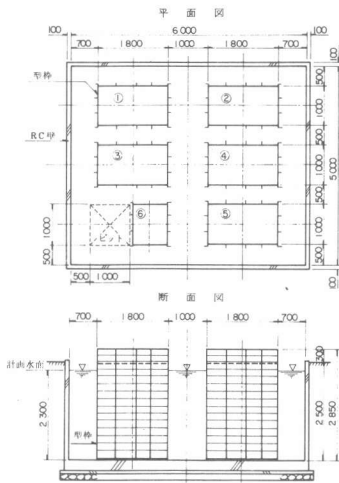


図-1 実験水槽および試験体配置の概要

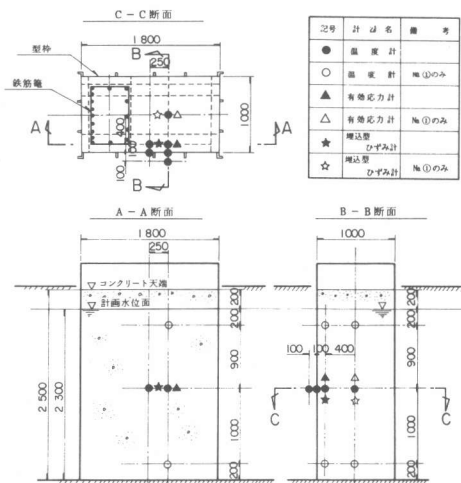


図-2 試験体の概要および計器設置位置

(2) コンクリートの製造、運搬、打設方法 コンクリートの混練りは半自動式パッチャプラント（容量 330ℓ の横軸強制練りミキサ）を用いて 1 バッチ 300ℓ と一定にした。混練り時間は注水後 2 分 30 秒と一定にし、流動化コンクリートの場合はベースコンクリートで 1 分 30 秒、流動化剤添加後 1 分とした。

練上ったコンクリートはバケット式フォークリフトで運搬し、水槽横に仮置きしたグランドホッパ（容量 2 m³）に投入し、最初の 6 バッチ分、次の 5 バッチ分、最後の 5 バッチ分が貯ったらクレーンで吊上げ、型枠中央に設置したトレミー管上部のホッパ内に放出した。なお、最初の打設時には通常のゴム製ブランジャを使用した。また、トレミー管は下から 2 m + 1 m + 1 m の合計 4 m で、コンクリートの打上りに伴って 1 m ずつ切離した。

(3) 計測および試験項目 コンクリートの温度変化時の挙動を把握する目的で、図-2 に示すような位置に Cu-Co 熱電対、埋込み型ひずみ計、および有効応力計を設置し、温度が外気温に近くなるまで測定を継続した。

また、フレッシュコンクリートの試験として 4 ~ 5 バッチに 1 度ずつ温度測定、スランブ試験、空気量試験を実施した。硬化コンクリートの試験は、標準養生 φ10cm 供試体の圧縮試験と静弾性係数の測定（材令 3.7.28.56.91日）、水中打設試験体から採取した φ10cm コア試験体の目視観察と圧縮試験、静弾性係数の測定（材令 28.91日）を実施した。なお、コアは試験体中央部と長辺部付近、それに鉄筋籠内の短辺部付近（図-5 参照）から各試験材令直前に深さ方向にそれぞれ 1 本ずつ、合計 6 本採取した。

2.2 使用材料および配合

(1) 使用材料 セメントは普通ポルトランドセメント（NP）の他に、高炉セメント B 種（BB）とマスコン型高炉セメント B 種（MKB）の 2 種類の低発熱セメントを用いた。表-1 にこれらの性状の概要を示す。

粗骨材は最大寸法 20 mm の秩父産砕石（FM671、比重 2.71、吸水率 0.77%）、細骨材は木更津産山砂（FM269、比重 2.57、吸水率 2.44%）をそれぞれ使用した。

混和剤として以下のものを使用した。減水剤は、リグニスルホン酸誘導体を主成分とする遅延型の AE 減水剤（R）と、ナフタレンスルホン酸と変性リグニンの共縮合物に特殊リグニンを配合したスランブロス低減型の高性能減水剤（HR）、および高縮合トリアジン系化合物を主成分とする高性能減水剤（HN）をそれぞれ用いた。また、流動化剤はスランブロス低減型のもの（FR：主成分は HR とほぼ同様）を使用し、空気量調整用に特殊アニオン系 AE 助剤を併用した。さらに、分離低減剤（SCA）としてセルロースエーテルを主成分とするものを使用した。

(2) コンクリートの配合 コンクリートの配合は表-2 に示す 6 種類とした。このうち、No. 1 ~ No. 4 は水セメント比が従来の地下連続壁と同程度で 45%、No. 5 は高強度配合で 30%、また No. 6 はセメント量の低減を目指して 60% とした。さらに、No. 1 と No. 3 は従来の軟練りコンクリートであるのに対し、No. 2, 4, 5 は流動化コンクリートである。なお、No. 5 と No. 6 は比較的高粘性のため、施工性を考慮して目標スランブを 2.2 cm、2.3 cm と若干大きくした。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-3 に示す。

3.1 フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-3 に示す。

試験は各配合とも 3 ~ 4 回ずつ実施したが、その変動は練り上がり温度で約 0.3℃、スランブで約 2 cm、空気量で約 0.5% で、製造時の品質変動は比較的少ないことが確認された。

表-1 セメントの物理性状および化学成分

種別	比重	比表面積 (cm ² /g)	スラグ量 (%)	フロー値 (mm)	始発 (h-min)	終結 (h-min)	酸化マグネシウム (%)	三酸化イオウ (%)	強熱減量 (%)
NP	3.16	3,170	—	258	2-29	3-47	1.3	2.0	0.6
BB	3.05	3,580	40	268	3-02	4-30	3.8	1.5	0.9
MKB	3.00	3,750	56	269	3-43	4-56	4.1	1.1	1.0

表-2 コンクリートの種類および配合

配合 No.	セメントの種類	目標値				W/C	S/C	配合				配合				
		スランブ (cm)		空気量 (%)				単位量 (kg/m ³)	セメント	細骨材	粗骨材	水和剤	分母	分子	配合	
		ベース	流動化	ベース	流動化 (%)											基本型 C×%
1	NP	19	—	5	—	45	167	371	780	1017	R	0.25	—	—		
2	NP	8	19	5	5	45	49	151	336	884	981	R	0.25	FR	1.0	
3	BB	19	—	5	—	45	162	360	785	1023	R	0.25	—	—		
4	BB	8	19	5	5	45	148	329	884	984	R	0.25	FR	1.0		
5	MKB	9	22	5	5	30	42	120	400	762	1123	HR	1.5	FR	1.0	
6	NP	23	—	5	—	60	45	192	320	806	1050	HN	1.0	—	SCA	225

表-3 フレッシュコンクリートの試験結果

配合No.	セメントの種類	フレッシュコンクリートの試験結果					
		温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	流動化	ベース	流動化
1	NP	29.0	—	20.0	—	3.5	—
2	NP	—	27.8	12.0	21.5	5.5	5.0
3	BB	28.0	—	20.5	—	3.5	—
4	BB	28.0	28.3	8.5	20.0	5.0	5.1
5	MKB	28.5	28.5	11.0	21.5	4.2	3.4
6	NP	27.9	—	23.0	—	3.6	—

各種コンクリートの標準養生条件下での圧縮強度の発現状況は図-3に示す通りで、NPに比べてBBやMKBを使用したものの7日以降の強度発現が大きい。また、図-4に示す様に、セメントの種類や水セメント比にかかわらず、静弾性係数と圧縮強度の関係はほとんど変らない傾向が認められた。

3.2 水中打設に伴うコンクリートの品質変動

(1) 採取コアの外観からみたコンクリートの品質

コンクリートを水中に打設する場合、トレミー管を使用しても最初のコンクリートは直接水に接することになり、品質の変動が生じ易い。図-5に、コア抜き時の破損状況および採取したコア表面の観察結果からみた各試験体の品質変動を示す。トレミー管を設置した中央部(A)付近のコンクリートは配合の種類によらずほぼ下端まで良好な品質である。長辺部(B)や短辺部(C)付近のコンクリートでは、配合No.6を除き、下端付近で品質変動が認められる。その程度は、配合No.1～No.4ではセメントの種類やセメント量の違いの影響は認められずほぼ同様で、No.5では変動する部分は他より少なかった。No.5の品質変動が少なかったのは、単位セメント量が 400 kg/m^3 と多く、低水セメント比で高性能減水

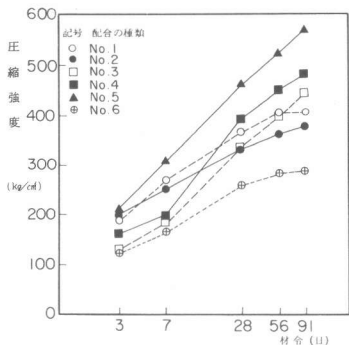


図-3 各種コンクリートの強度発現性状 (標準養生)

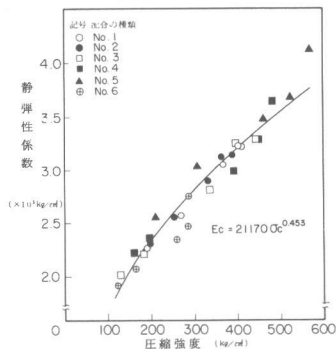


図-4 圧縮強度と静弾性係数

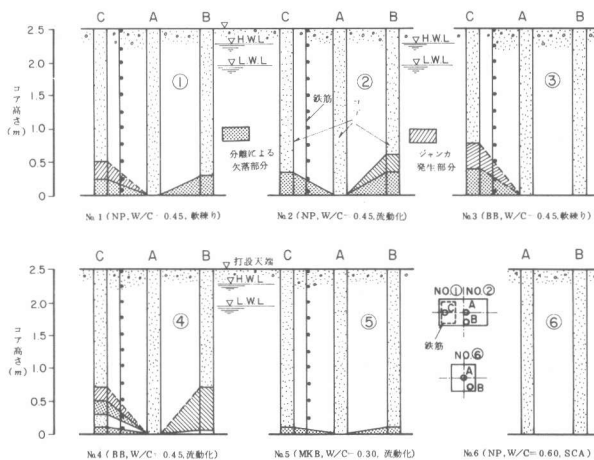


図-5 採取コアの外観から見たコンクリートの品質

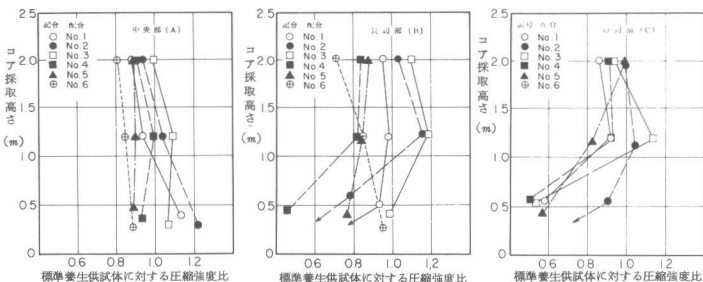


図-6 各種コンクリート試験体の上下方向の品質変動 (コア強度)

剤や流動化剤を多量使用したため粘性が増加し、分離抵抗性が幾分高まったためと思われる。なお分離低減剤を使用したNo.6では単位セメント量が 320 kg/m^3 と少ないにもかかわらず品質は良好であった。

(2) コアの圧縮強度

各種コンクリートの水中打設試験体から採取したコアの長さ方向の強度変動を図-6に示す。これは、長さ約2.5mのコアを上、中、下段に3分割して各段での平均強度を求め、標準養生供試体に対する強度比で示したもので、コアの採取位置別にまとめ、その違いを各配合で比較したものである。この結果より、中央部(A)では水中打設時の分離の影響は見られず、逆に下段ほど強度が高くなる傾向が認められる。

この傾向はNo 1, 2の配合で著しいが、これはブリージングや自重の圧密作用の影響と思われる、ブリージングのほとんど生じない配合No 5, 6では下部の強度増も少ない。

しかし、長辺部(B)や短辺部(C)の下端付近では図-5の結果と同様に、配合によっては下端部において強度低下が認められ、長辺部(B)ではNo 1, 2, 4の下端から約50cm以下の部分で、また短辺部(鉄筋籠内のC)ではNo 6以外のすべての配合の下端から60cm程度までの部分で約4割の低下が認められた。これは、①直接水中を流動することによる分離、②鉄筋による流動性の障害、などの影響を受けたためと思われる。また、No 5のような高強度で粘性の高いコンクリートでも、水中での流動性が鉄筋により障害される場合には品質変動が生じるものと思われる。ところが、分離低減剤を使用したNo 6はほとんど分離の影響を受けず、水中コンクリートの下端部の品質確保上大変有効と思われる。

3.3 低発熱セメントによる水中コンクリートの温度ひびわれ低減効果

各試験体の中心温度の変化を図-7に示す。打設後の温度上昇量はNo 1が最も高く約3.7℃であるのに対し、低発熱セメントを用いたNo 3～No 5では約2.0℃と低く、また、流動化コンクリートの方が軟練りコンクリートより温度上昇量が低くなる傾向が認められる。断熱温度上昇試験より得られる発熱速度係数 α と試験体の温度上昇との関係を図-8に示す。低発熱セメントを用いたコンクリートの発熱速度は普通セメントより低く、放熱条件下での温度上昇量は発熱速度の影響を大きく受けることが認められる。図-9は単位強度や単位セメント量当りの温度上昇量を示したもので、MKBおよびBBを用いたものは、NPに比べ温度上昇量が5割程度低くなっており、温度ひびわれの低減上これらの低発熱セメントの使用が有効と思われる。最後に、コンクリートの有効応力の測定結果の一例を図-10に示したが、部材内外の温度差により、温度上昇時には表面部に約2 kg/cm²、下降時には中心部に約9 kg/cm²の引張応力が生じている。

4. まとめ

この研究で明らかになったことをまとめると以下の通りである。

- (1) 水中打設時のコンクリート下端部付近の強度の変動はトレミー管の先端から離れた所で生じるが、流動化コンクリートとしてセメント量を減少させたものや低発熱セメントを用いたものでも、普通セメントを用いた軟練りコンクリートに比べて、その程度はほとんど変わらない。
- (2) 分離低減剤を使用したコンクリートは水中流動時の品質変動がほとんどない。
- (3) 低発熱セメントを用いた水中コンクリートは温度上昇量も低く、温度ひびわれの低減上有効である。

これらの結果より、温度ひびわれを抑制した高品質の水中コンクリートを施工する1つの方法として、水中打込み開始時のコンクリートを分離低減コンクリートとし、そのあとに低発熱セメントを用いた流動化コンクリートを打設することが合理的、かつ経済的と思われる。なお、実施工に際しては、今後さらに詳細な検討が必要であると思われる。

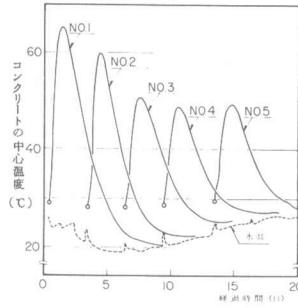


図-7 各種試験体の中心の温度上昇

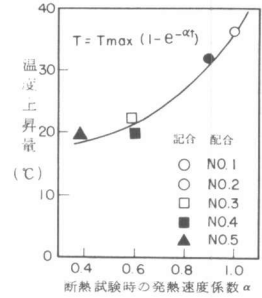


図-8 温度上昇と断熱試験結果の関係

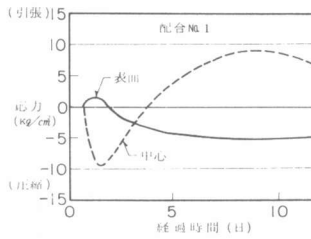


図-10 コンクリート応力の測定結果

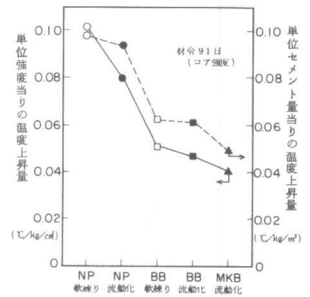


図-9 単位強度、単位セメント量当りの温度上昇量