

論文 超高強度・低発熱連壁コンクリートの配合選定と実施工時のフレッシュ性状

三浦 律彦*1・青木 茂 *2・神代 泰道*3・河村 秀紀*4

要旨：大規模地下構造物への適用を想定し，低発熱で流動性の高い超高強度連壁コンクリートの配合の限界を検討した。その結果，高ビーライト系の低熱ポルトランドセメントを使用して水セメント比を22%とし，製造方法を工夫することで，通常のトレミー工法で十分施工できる超高強度連壁コンクリートが製造できることが判明した。次に，施工性と壁体強度の把握の目的で深さ約33mの基礎壁2体の施工を行い，躯体の保証強度で110N/mm²以上の超高強度が達成された。さらに，トレミー打設時の打上り速度は，漏斗流下時間で示されるコンクリートの粘性の違いで概略判定できることが判明した。

キーワード：超高強度コンクリート，地下連続壁，配合選定，フレッシュ性状，施工

1. はじめに

近年，地下構造物の大型化や大深度化が進むとともに，基礎構造物としての耐震性向上や本体壁への利用等の観点から，地下連続壁の高強度化（設計基準強度で45～60N/mm²）[1]，[2]，超高強度化（同70～100N/mm²）[3]，[4]が進められるようになってきた。地下連続壁の高強度化が進むと，水セメント比の低減やセメント量の増加に伴うコンクリートの粘性の増大がトレミー工法での施工性や溝壁内での充填性の低下を招き，また発熱量の増大による温度ひび割れの危険性が高まることになる。このため，実施工に際しては，流動性が高く，より低発熱性の高強度コンクリートが要求されることになる。筆者らは，これまでに設計基準強度が70～120N/mm²程度の超高強度連壁コンクリートの施工性改善，発熱特性，強度発現性状に関する実験検討 [3]～[5] を進めてきたが，実工事におけるコンクリートの製造方法，トレミーでの施工性の良否，壁体の強度発現等に関してまだ課題が残されていた。そこで今回，仮設構造物の基礎壁を利用して，これまでにない超高強度の地下連続壁コンクリートの施工を行い，残された課題の検討を行った。ここではそのうち，①配合選定に関する室内実験，②実機ミキサによる製造試験，③実施工におけるフレッシュコンクリートの物性試験，④トレミーでの施工速度等の結果について考察を加える。

表-1 配合選定試験における使用材料

2. 配合選定試験

2.1 試験ミキサによる配合試験

(1) 使用材料，配合の検討

コンクリートの使用材料を表-1に示す。比較の意味で，C₂S含有量や粉末度の異なる2種類の低熱ポルトランドセメントと，岩質の異なる2種類の砕石を使用した。高性能AE減水剤はポリカルボン酸系のものを使用した。

種類	略称	名称	比重	摘要
セメント	ビーライトA	高ビーライト系 低熱ポルトランドA	3.22	比表面積 3,440 cm ² /g， C ₂ S=54%，C ₃ S=29%，C ₃ A= 3%
	ビーライトB	高ビーライト系 低熱ポルトランドB	3.20	比表面積 4,080 cm ² /g， C ₂ S=46%，C ₃ S=35%，C ₃ A= 3%
粗骨材	粗骨材A	硬質砂岩砕石 2005	2.65	吸水率 0.70%，粗粒率 6.58， 実積率 60.0%
	粗骨材B	石灰岩砕石 2005	2.77	吸水率 0.53%，粗粒率 6.57， 実積率 63.2%
細骨材	S	鹿島産山砂（粗目）	2.61	吸水率 0.77%，粗粒率 2.80， 実積率 65.8%
減水剤	SP	高性能AE減水剤	—	ポリカルボン酸系化合物

*1 ㈱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）

*2 ㈱大林組 土木技術本部 技術第五部 課長（正会員）

*3 ㈱大林組 技術研究所 建築第二研究室 研究員，工修（正会員）

*4 ㈱大林組 土木技術本部 設計第二部 課長，工修（正会員）

配合における検討要因と水準を表-2に示す。水セメント比は超高強度を想定して20, 22, 25, 30%の4段階とした。単位水量は160, 165, 170, 175 kg/m³のいずれかとなるよう2~3段階に変化させた。細骨材率は、水セメント比が30%で単位粗骨材容積を335, 350, 365 l/m³の3段階となるように変化させて試験を行い、各々最適なものを選定した。

(2) 品質試験項目、練混ぜ方法

コンクリートの試験項目を表-3に示す。フレッシュ性状の試験として、スランプフロー試験の他にコンクリートの粘性を評価するためのO漏斗流下試験[3]と、間隙通過性を評価するためのU型充填試験(鉄筋障害:U1 [6])を実施した。また、練上り後90分までの経時変化も測定した。

コンクリートの練混ぜは容量50lの二軸強制練りミキサを使用して1バッチ35lで行った。モルタル先練り方式で50~90秒練り混ぜた後、粗骨材を投入してさらに60~100秒程度練り混ぜた。この場合、練混ぜ水はモルタルに9割、残りをコンクリートに、高性能AE減水剤はモルタルとコンクリートで半分づつに分割して投入するようにした。

(3) 単位水量の検討

単位水量が変化した場合のフレッシュ性状の変化を図-1に示す。スランプフローが70cmと一定となるように減水剤添加率を変化させた場合、フロー時間、漏斗流下時間、U型充填時間は単位水量が多くなるほど短くなる傾向を示した。練上り時の目視観察やセメント量低減の観点から、単位水量はW/C=30%で165kg/m³以下が妥当と判断した。W/C 25%以下では練混ぜ時間を考慮して5~10kg/m³程度増量させた。

(4) 粗骨材量の検討

粗骨材量が変わった場合のフレッシュ性状への影響の一例を図-2に示す。スランプフローやフ

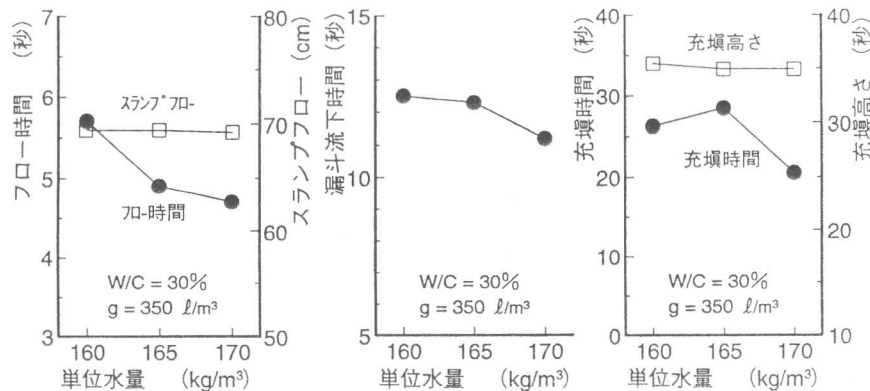
表-2 検討した配合要因

配合要因	比較水準
セメント種類	ビ-ライトA, ビ-ライトB
粗骨材種類	硬質砂岩碎石, 石灰碎石
単位水量	160, 165, 170 kg/m ³ *1 (170 kg/m ³) *2 (170, 175 kg/m ³) *3
単位粗骨材量	335, 350, 365 l/m ³ *1
水セメント比	20, 22, 25, 30 %

*1) W/C=30%, *2) W/C=20, 25%, *3) W/C=22%

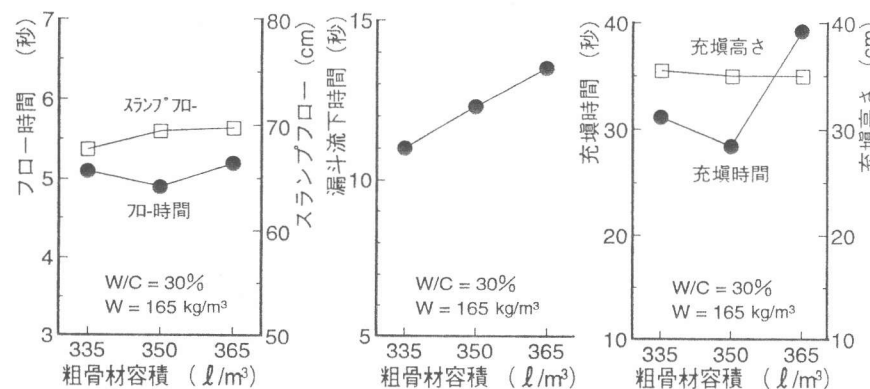
表-3 品質試験項目

分類	試験項目	試験方法
フレッシュ性状	スランプ	JIS A 1101
	スランプフロー	土木学会規準
	50cmフロー時間	土木学会規準(案)
	空気量	JIS A 1128
	単位容積質量	JIS A 1116
	練上り温度	棒状アルコール温度計
硬化性状	O漏斗流下時間	文献[3] 参照
	U型間隙通過性	文献[6] 参照(U1)
	経時変化性状	30分毎に90分まで計測
	圧縮強度	JIS A 1108, A 1132 材齢 3, 7, 28, 56, 91 日



(a) スランプ試験 (b) 漏斗流下試験 (c) U型充填性試験

図-1 単位水量がフレッシュ性状に及ぼす影響



(a) スランプ試験 (b) 漏斗流下試験 (c) U型充填性試験

図-2 単位粗骨材容積がフレッシュ性状に及ぼす影響

ロー時間はほぼ一定であったが、漏斗流下時間は粗骨材量が多いほど長くなり、U型充填時間は粗骨材量 365 l/m^3 の場合に増大した。この結果から、 $W/C=30\%$ では 350 l/m^3 以下が適当と判断された。 W/C 25%以下では若干の低減を実施した。

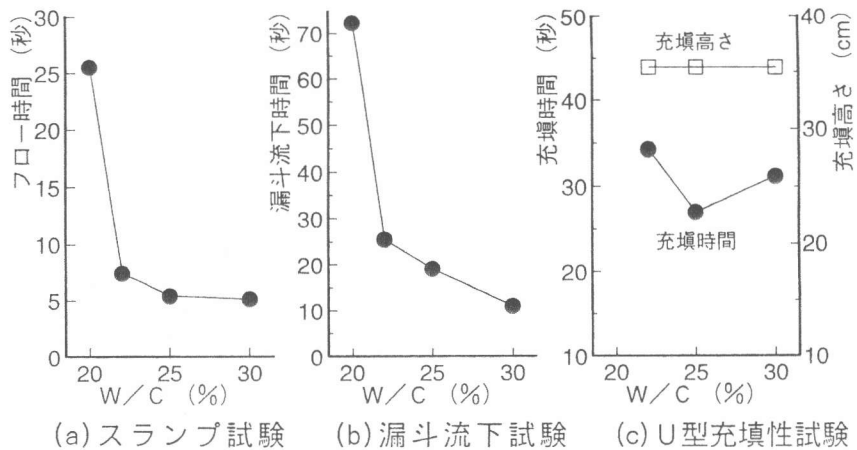


図-3 水セメント比がフレッシュ性状に及ぼす影響

(5) 最適W/Cの検討

水セメント比が変化した場合のフレッシュ性状への影響の一例を図-3に示す。水セメント比が22%から20%に低下すると、フロー時間や漏斗流下時間は著しく長くなり粘性が急激に上昇する結果となった。また、水セメント比が20%では減水剤添加率を30%の2倍程度と多くしても目標フローは得られなかった。このことから、今回の使用材料では、実施工に適した水セメント比の最小値を22%程度と判断した。

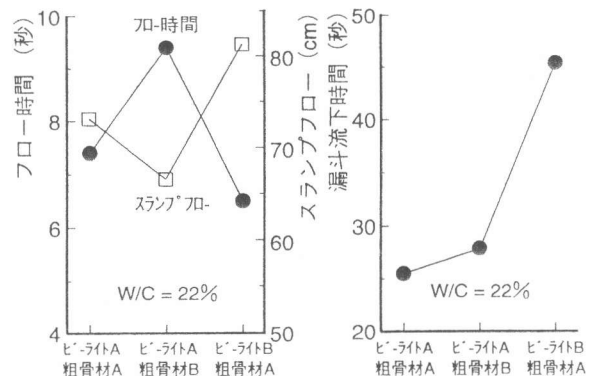


図-4 セメント、粗骨材の種類の影響

(6) セメント及び粗骨材の種類の見直し

セメント及び粗骨材の種類がフレッシュ性状に及ぼす影響を調べた結果を図-4に示す。セメントの種類では、ビーライトBのスランプフローは大きくなり、漏斗流下時間はかなり長くなった。これは、粉末度や C_2S 含有量の違いでペーストの粘性および流動性が増加したためと思われる。

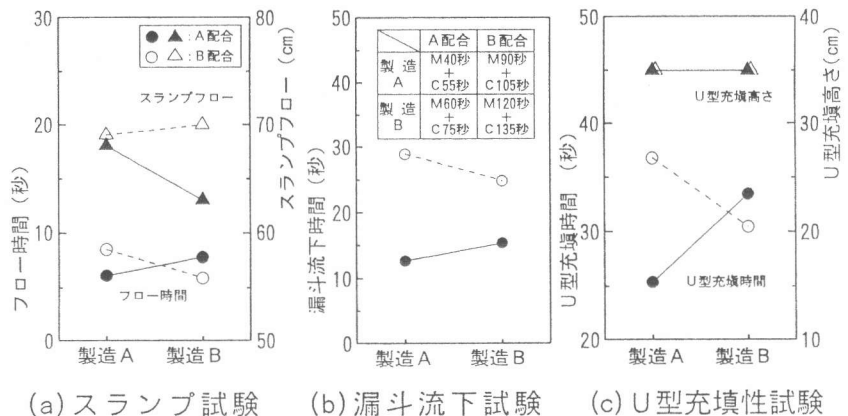


図-5 実機での練混ぜ時間がフレッシュ性状に及ぼす影響

粗骨材の種類では、粗骨材Bを用いた時にスランプフローが低下し、流下時間等も長くなった。これは形状や微粒分の量などが影響したと思われる。以上の結果から、セメントはビーライトA、粗骨材は粗骨材Aが適当と判断された。

2.2 実機ミキサによる製造試験

(1) 実機ミキサの概要

コンクリートの製造に用いた実機ミキサは二軸強制練りタイプの2段ミキサで、上段のモルタルミキサが容量 1.75 m^3 、回転数 37.4 rpm 、下段のコンクリートミキサが容量 3.00 m^3 、回転数 29.1 rpm である。製造は余裕と実際の出荷量を見込んで、コンクリート容量で 1.83 m^3 と一定にした。

(2) 練混ぜ時間の検討

実施工に適用が予定されるW/C=30% (A配合) とW/C=22% (B配合) の2配合について、実機製造における練混ぜ時間の検討を実施した。結果の一例を図-5に示す。この結果より、A配合では練混ぜ時間の短い製造時間A, またB配合では練混ぜ時間の長い製造時間Bの方が流動性が高く、粘性が低く、それぞれ適当な練混ぜ時間であると判断された。ミキサ消費電流の記録や次に示す経時変化性状の安定性などからもこれらの妥当性が確認された。

(3) 経時変化性状の検討

水セメント比や練混ぜ時間を変化させた場合のスランプフロー、フロー時間、漏斗流下時間、空気量の経時変化を図-6に示す。一般に、スランプフローは練上り後30分までは少し増大する傾向を示し、それ以降90分まではほぼ一定となった。フロー時間はスランプフロー増大の影響を強く受けて30~60分までは減少し、それ以降は若干増加する傾向を示した。

漏斗流下時間は、A配合ではほぼ一定であったが、B配合では60分までは時間経過に伴い若干増加する傾向が認められた。超高強度コンクリートの施工ではこのような粘性の経時変化の管理も重要になるとと思われる。

空気量はスランプフローの増加に伴い30分までは減少し、それ以降は(粘性増大の影響か)若干増加する傾向を示した。

3. 実施工におけるフレッシュコンクリートの品質

3.1 施工概要

(1) 打設パネルの種類, 寸法, 配筋条件

壁体の目標強度として80N/mm²以上(A配合)および100N/mm²以上(B配合)となる2種類の配合をそれぞれ打設して、2つの基礎壁を施工した。コンクリートの配合を表-4に示す。

基礎壁の形状は、幅:2.4m, 厚さ:0.9mの矩形で、削孔の深さは32.6mである。配筋条件は、主筋(鉛直筋 D29)が25~30cmピッチで22本, 横筋(帯筋 D16)が30cmピッチであった。

(2) 連壁パネルの施工方法

直径25cm(10B)のトレミー管を断面中央に設置し、粘性の高さを考慮して上部に通常より少し大きめ(容量約1.5倍)のホッパを設置した。また、排出速度を上げる目的で生コン車の後部レベルの嵩上げ(約40cm)を実施した。コンクリートの製造は実機試験と同じプラントで同様に行い、平均30~35分で現場まで運搬し、連続してトレミーによる打設を行った。

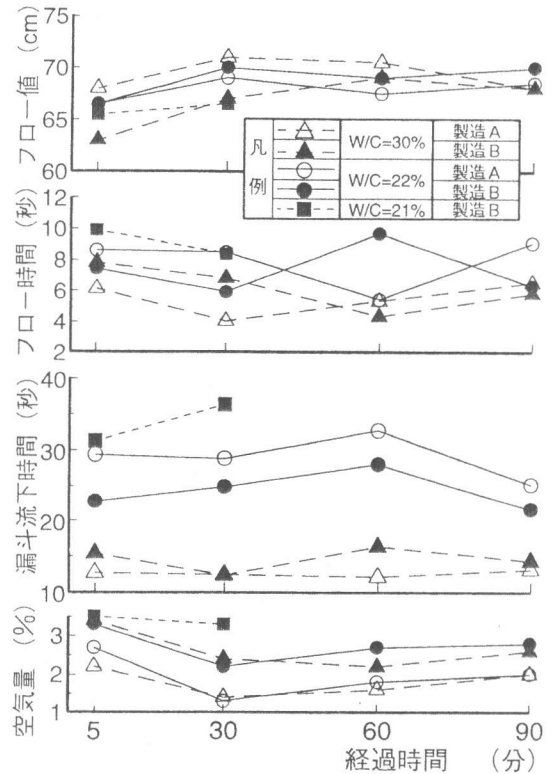


図-6 アジテータ車による経時変化試験結果

表-4 打設したコンクリートの配合

配合	目標スランプフロー (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³) (*下段 \varnothing /m ³)				
					W	C	S	G	SP
A	60~73	2	30	45.7	165	550	771	928	11.0 (2.0%)
					*165	*171	*294	*350	
B	65~75	2	22	40.0	175	795	584	888	21.5 (2.7%)
					*175	*247	*223	*335	

3. 2 コンクリートの品質試験結果

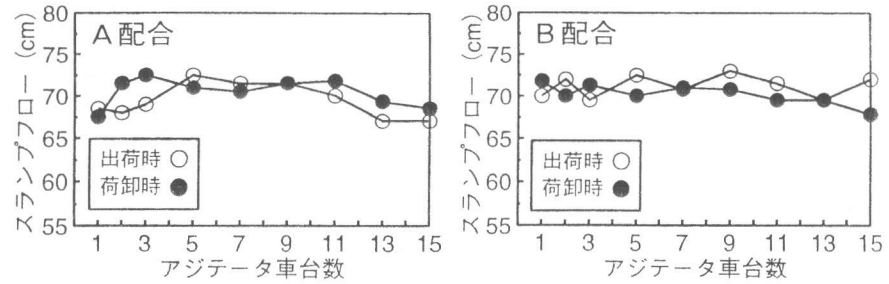
(1) 温度と空気量

荷卸時のコンクリート温度はA配合で21~22℃, B配合で25~27℃, 外気温は15~18℃であった。

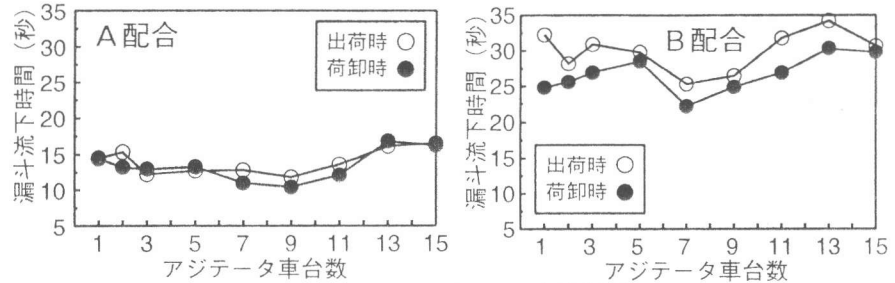
空気量は1.7~2.1%とかなり安定していた。

(2) スランプフローと漏斗流下時間

出荷時および荷卸時におけるスランプフロー, 漏斗流下時間の試験結果を図-7に示す。スランプフローは, A配合では



(a) スランプフローの試験結果



(b) 漏斗流下時間の試験結果

図-7 コンクリートの品質管理試験結果

出荷時よりも荷卸時で若干増加, B配合では若干減少する傾向が認められた。荷卸時のスランプフローはA配合で68~73cm, B配合で68~72cmと安定していた。漏斗流下時間は, 両配合とも荷卸時で若干減少する傾向が認められた。荷卸時の漏斗流下時間はA配合10~17秒, B配合22~30秒であった。

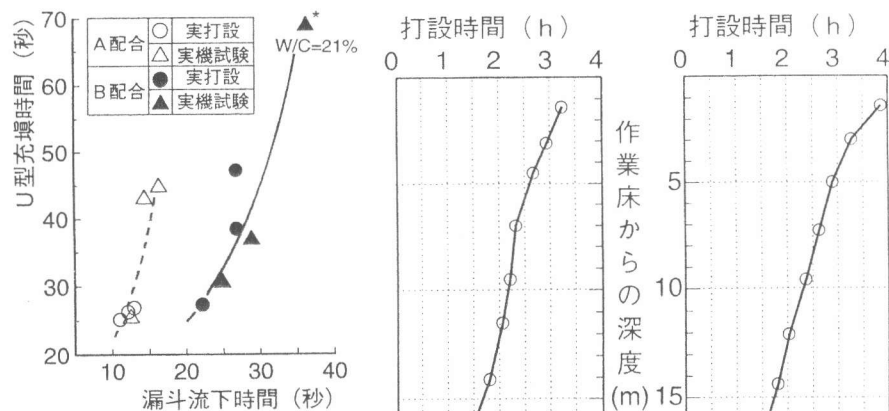


図-8 充填時間と流下時間

(3) U型充填時間と漏斗流下時間の関係

U型充填性試験における充填時間と漏斗流下時間の関係を図-8に示す。充填時間は漏斗流下時間の長いものほど長くなり, 粗骨材量の違い (A配合:350ℓ/m³, B配合:335ℓ/m³)の影響も受けることが確認された。この場合の充填高さはいずれも34~35.5cmと良好であった。

3. 3 トレミー施工時の打上り速度

溝壁内のコンクリートの打上り記録を図-9に示す。

開始から打終わりまでの平均的な打設速度はA配合で20.6m³/h, B配合で19.8m³/hで, 平均打上り速度はA配合で9.5m/h, B配合で9.2m/hであった。これらは, 当社の過去の施工事例 (10~18m/h [1])に比べて幾分小さ目となった。トレミーの施工時間には, 打設時間の他にトレミーの切断や, 生コン車の入替え, 待ち時間等を含む。今回の施工では, 後述するように粘性の増大で実質の打設時間が増加したことや, 通常より長い製造時間や狭い場内導入路が原因で生コン車の待ち時間が幾分長くなったことなどが影響したものと思われる。

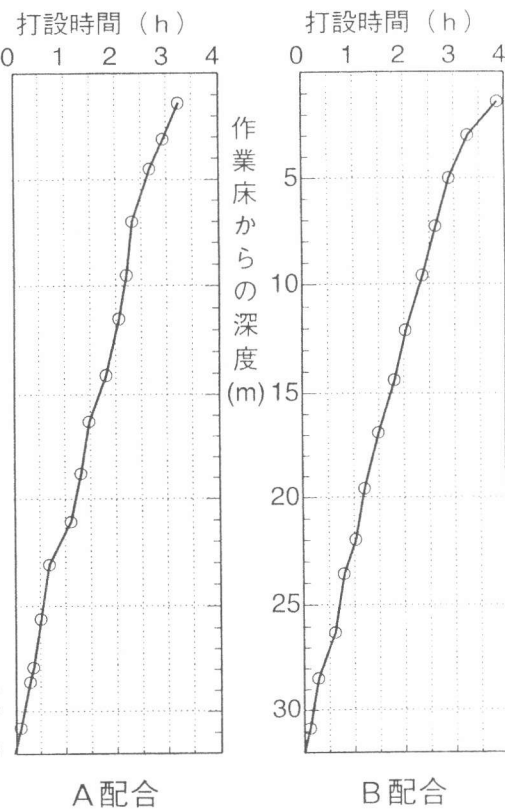


図-9 連壁パネルの打設管理結果

3. 4 粘性が超高強度連壁コンクリートの施工性に及ぼす影響

連壁コンクリートの施工性を評価する一手法として打上り速度で比較する方法がある。この場合、生コン車の待ちが無い状態（トレミ切断有）での連続打上り時の速度で比較すればコンクリートの物性の違いの影響を概略評価することができる。図-10はその一例として、今回の打設結果を従来の連壁コンクリートの連続打上り速度と対比したもので、トレミー管径が20cm(8B)で1本当りの打設面積が1.80m²の場合に面積比換算した結果である。

打設深度が25~40mの条件で比較すると、A配合の打上り速度は高炉セメントB種を用いた配合強度60N/mm²の超高強度連壁コンクリートの95%とほぼ等しくなった。一方、超高強度のB配合はその3/4程度と遅くなった。

図-10の打上り速度とO漏斗の平均流下速度との関係を図-11に示す。この結果から、連壁コンクリートの連続打上り時の打上り速度は漏斗流下速度との関係が深く、漏斗流下試験で施工性を評価できることが判明した。

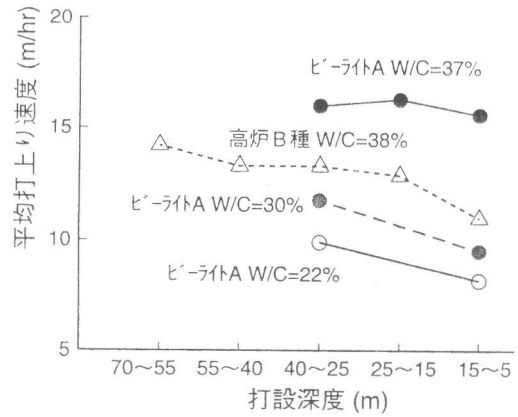


図-10 各種配合の連続打上り速度

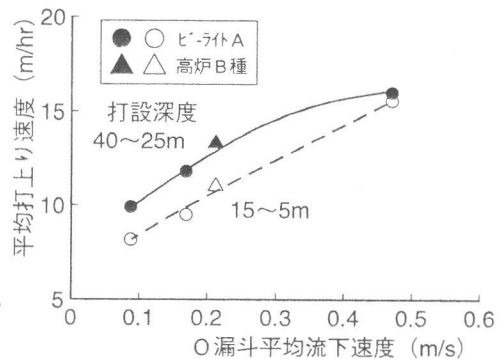


図-11 打上り速度と漏斗流下速度

4. ま と め

今回の超高強度連壁コンクリートの施工において、フレッシュコンクリートの性状および施工性に関して明らかになったことは以下のとおりである。

- (1) 高ビーライト系のセメントとポリカルボン酸系の高性能AE減水剤の組合せと、配合選定や練混ぜ方法の改善により、110N/mm²以上の超高強度コンクリートが実機でも製造できた。
- (2) 水セメント比が22%の超高強度コンクリートでも、粘性の管理を十分に行い、十分な排出速度を保つことで、従来のトレミー工法をそのまま用いて地下連続壁の施工が可能となった。
- (3) トレミーでの打上り速度はコンクリートの粘性との関係が深く、超高強度壁コンクリートの場合には、漏斗の平均流下速度の低下にほぼ比例して実質の打上り速度は遅くなる。

末筆ながら、今回の室内実験、実機試験および実施工において多大のご協力を頂いた秩父小野田(株)、サンフロー(株)ほか関係者の皆様方に深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- [1] 三浦, 青木, 吉野, 谷口: 高ビーライトセメントを用いた高強度連壁コンクリートの実施工におけるフレッシュ性状, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, V-61, pp.122-123, 1995.9
- [2] 楠木, 坪根, 横井, 堤: 高強度・高流動コンクリートの地下連続壁への適用, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, V-576, pp.1152-1153, 1995.9.
- [3] 青木, 近松, 芳賀: 超高強度連壁コンクリートの基礎的性質, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.493-498, 1992.6
- [4] 三浦, 峯岸, 関, 岩井: 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: コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.271-276, 1994.6
- [5] 青木, 三浦, 竹田, 十河: 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: コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.1317-1322, 1994.6
- [6] 横田, 松岡, 坂本, 稲葉: 高流動コンクリートにおける分離低減剤の効果について, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, V-147, pp.294-295, 1994.9