

報告 暑中環境下を考慮した粉体系高流動コンクリートの実用化

江口健治*¹・中嶋健治*²・加藤康司*³・村上幸治*⁴

要旨: 本報告は、今後、多くのコンクリート構造物へ高炉スラグ微粉末を混入した粉体系高流動コンクリートの実用化を図るために、暑中環境下での最適な混和剤の選定とその配合、耐久性を加味したコンクリートの基礎的な性能評価、実施工におけるポンプ圧送・流動勾配・側圧・高充填性によるコンクリート表面仕上り度と施工性の評価、およびモデル構造体のコンクリートコアによる圧縮強度・粗骨材面積率・単位容積質量の品質評価などを調査・実施した。その結果、高炉スラグ粉体系高流動コンクリートの配合・基礎的な性状・製造・施工・品質管理の一貫した品質保証が確認できたことについて述べる。

キーワード: 高炉スラグ微粉末、粉体系高流動コンクリート、暑中環境、品質評価

1. はじめに

高流動コンクリートの適用分野は、自己充填が要求される鋼コンクリートサンドイッチ方式の沈埋トンネル函体用(1)・鋼管充填コンクリート用、騒音・振動防止が要求されるプレキャスト二次製品用および高密度鉄筋が配置されるLNGタンク躯体用などへと適用が着実に用途拡大してゆく様相がある。今後も、高流動コンクリートの実用化が多方面に使用されることを考えるならば、フレッシュコンクリートの流動性・充填性・粘性・材料分離抵抗性のみならず耐久性を加味した硬化コンクリートの性状、レディーミクストコンクリートの製造管理手法および実施工での施工・品質管理手法などを拡充する必要がある。

そこで、本報告は、暑中環境下で高い止水性が要求される防火水槽工事へ適用する高炉スラグ粉体系高流動コンクリートの最適な配合選定、フレッシュおよび硬化したコンクリートの基本性能評価、レディーミクストコンクリートの製造管理手法、実施工を通じた施工性の評価、およびモデル構造体のコンクリートコアによる品質評価などを検証した。

2. 使用材料

表-1に、コンクリートの使用材料を示す。特に、高性能AE減水剤は、標準型A、遅延型Bおよび遅延型Cの3種類を使用した。また、高炉スラグ粉体系高流動コンクリート(以下、高流動コンクリートと記す)の配合条件としてはスランプフロー値 65.0 ± 5.0 cmおよび空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ を設定した。

表-1 使用材料

材料名	種類		特徴(主成分)
セメント	普通ポルトランドセメント		比重=3.16、比表面積=3480cm ² /g
細骨材	山砂(万田野産)		表乾比重=2.59、F.M=2.75
粗骨材	砕石2005(葛生産)		表乾比重=2.71、F.M=6.69
混和剤	高性能AE減水剤(SP)	標準型 A	ポリカルボン酸エーテル系
		遅延型 B	ポリカルボン酸エーテル系 と架橋ポリマーの複合体
混和材	高炉スラグ微粉末(Sg)		比重=2.89、比表面積=5990cm ² /g

- * 1. 不動建設(株) 土木技術本部 計画部(正会員)
- * 2. 不動建設(株) 中央研究所 建材研究室、工修(正会員)
- * 3. 不動建設(株) 技術開発本部 土木技術開発部
- * 4. 不動建設(株) 技術開発本部 土木技術開発部、工修

3. 施工概要

3. 1 室内および実機配合確認試験

表-2に、室内および実機配合における検証項目一覧を示す。コンクリートの室内配合試験は、レディーミクストコンクリート工場のみキサが重力式傾胴みキサ（以下、可傾みキサと記す）であったことから、最大容量85lの可傾みキサを使用し、練混ぜ時間の決定、最適な配合選定、高性能AE減水剤・細骨材の表面水率の変動によるスランプフローの変動などのフレッシュコンクリートの性状、および圧縮強度・長さ変化・自己収縮などの硬化したコンクリートの性状の検証を実施した。同様に、コンクリートの実機配合試験は、最大容量2.5m³の可傾みキサを使用し、室内で選定された配合を確認決定した。

表-2 室内および実機配合における検証項目一覧

検証項目	水結合材比			高性能AE減水剤			練混ぜ時間(秒)				気温(℃)		圧縮強度(材齢)		長さ変化 自己収縮 凍結融解
	30	33	37	標準型		遅延型	150	180	210	240	20	30	標準養生	現封養生	
				A	B	C									
①練混ぜ時間の決定	-	○	-	-	○	-	○	○	○	○	-	○	○	-	—
②最適な配合選定(30℃)	○	○	○	○	○	○	-	-	○	-	-	○	○	-	—
③SP添加率の変動	-	○	-	-	○	-	-	-	○	-	-	○	-	-	—
④細骨材の表面水率変動	-	○	-	-	○	-	-	-	○	-	-	○	-	-	—
⑤断熱温度上昇	-	○	-	-	○	-	-	-	○	-	-	○	-	-	—
⑥硬化したコンクリートの性状	○	-	-	-	○	-	-	-	○	-	-	○	○	-	○

3. 2 コンクリートの施工

3. 2. 1 対象構造物

図-1・a示すように、高止水性を要求される防火水槽（4.1×4.0×5.1m、1基）を対象として側圧・流動勾配・ポンプ圧送性などのフレッシュコンクリートの性能評価および圧縮強度・静弾性係数・コンクリートの表面仕上り度の硬化したコンクリートの性能評価を行った。さらに、図-1・bに示すように、防火水槽と同一な高流動コンクリートでモデル構造体を製作し、所要の材齢でコンクリートコアを採取し、圧縮強度・粗骨材面積率などを検証した。

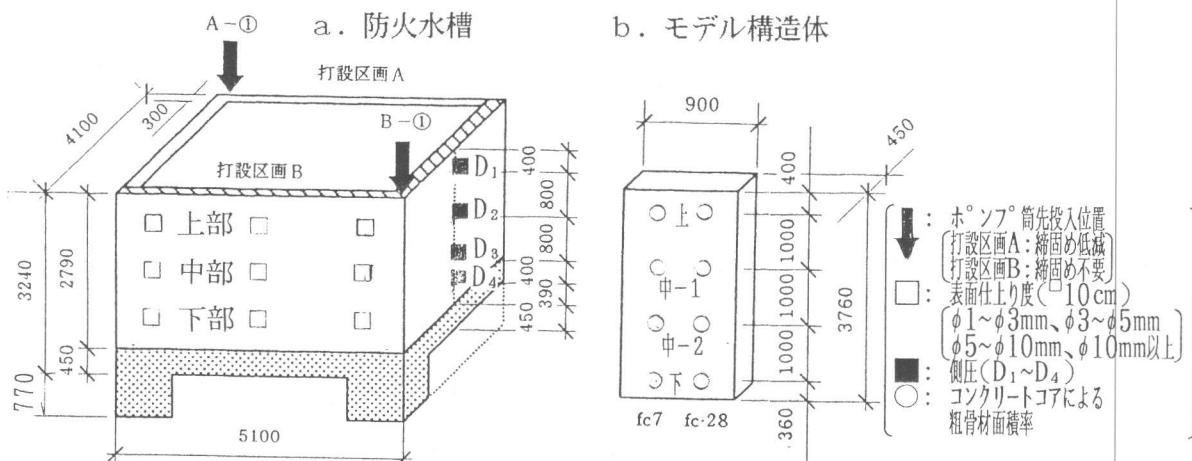


図-1 対象構造物および調査状況

3. 2. 2 コンクリートの製造、打設および養生

コンクリートの製造は、実機プラントと同一な設備・方法を使用し、運搬は3バッチ4.5m³を10t大型アジテータ車に積載し、施工現場までの平均所要時間は20分であった。

本打設は、ロングブーム付き大型コンクリートポンプ車（スライズ式、最大吐出量100m³/hr）を使用し、締固め方法は打設区画A（軽量化した棒状バイブレータ）および打設区画B（締固め不要）に分割し、その総打設量は31.5m³であった。

打設後の初期養生は、高い止水性を要求されることから、養生マットを用いて散水・湿潤養生7日間実施し、耐ひび割れ対策を行った。

4. 結果および考察

4. 1 室内および実機配合確認試験

4. 1. 1 練混ぜ時間の決定

練混ぜ時間の決定は、図-2および図-3に示すように、フロー停止後の目視観察による水・ペースト・粗骨材の偏在状況、均一な練り混ぜを考慮して30秒間を加えたミキサ負荷値および圧縮強度の経時変化から総合的に比較検証した結果180秒とした。

4. 1. 2 夏季(30℃)での最適な配合選定

図-4に示すように、冬季・標準季の配合は、SP-標準型Aを用いた配合で良好な結果を示しているが、夏季(30℃)では、練混ぜ後45分経過時点で、所要スランプフローの目標管理下限値60.0cmを下回った。よって、暑中環境下のなかでも練混ぜ後90分経過のスランプフロー目標管理下限値60.0cmを満足し、加えて、初期材齢1日圧縮強度14.7N/mm²以上の発現を考慮し、暑中環境下での最適な配合は、SP-遅延型Bを用いた配合表-3を決定した。

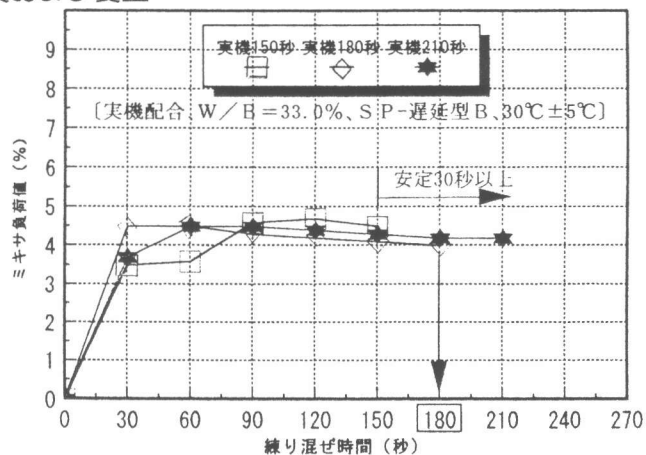


図-2 ミキサ負荷値と練混ぜ時間との関係

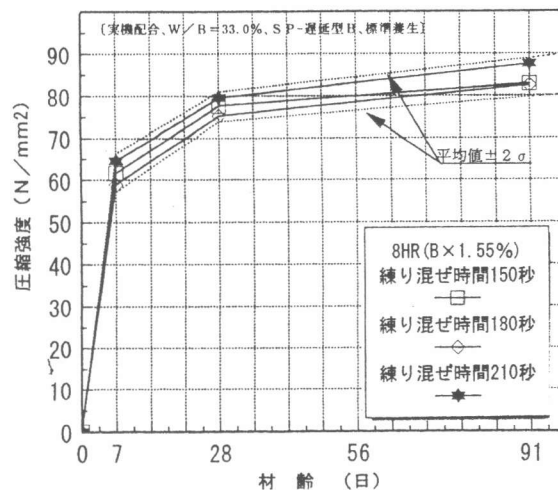


図-3 練混ぜ時間の相違による圧縮強度の経時変化

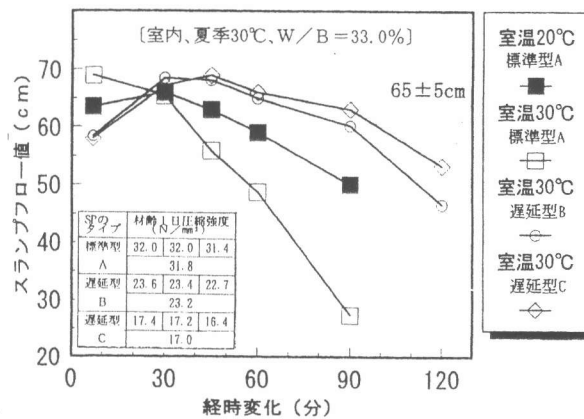


図-4 SPの違いによるスランプフローの経時変化

表-3 高流動コンクリートの配合

種別	W/B (%)	S/a (%)	単位量 (kgf/cm ²)					SP-B
			W	C	Sg	S	G	
室内	33.0	53.5	165	150	350	896	810	Bx1.40%
実機(本施工)	33.0	53.5	165	150	350	896	810	Bx1.44%

4. 1. 3 高性能AE減水剤の添加率および細骨材の表面水率の変動

図-5の結果より、スランプフローの目標管理範囲65.0±5.0cmを維持するためには、高性能AE減水剤および細骨材の表面水率の変動範囲を中心値±0.05%および中心値±0.40%程度でそれぞれの変動範囲内に収まるように厳しく管理した。

4. 1. 4 断熱温度上昇

断熱温度上昇試験は、外部空気を断熱箱で遮断し、その中の内部熱遮断箱（密封缶）にフレッシュな高流動コンクリート（W/B=33%）を内蔵させ、供試体中心温度に試験槽内温度を追従・保持させた。同時に、普通コンクリート（W/C=40%）についても行い、比較検証した。

その断熱温度上昇試験の結果を図-6に示す。高流動コンクリートの断熱温度上昇量の経時変化は、普通コンクリートに比較して初期材齢における温度上昇速度が小さく、最終的な断熱温度上昇量も普通コンクリートの62℃に対して51℃と11℃低減し、高炉スラグ微粉末の混入による水和熱の低減効果が顕著に認められた。

4. 1. 5 硬化コンクリートの性能評価

(1) 圧縮強度および静弾性係数(Ec)

図-7に示すように30℃水中および30℃現場封緘養生の強度発現性は、同程度を示し、20℃水中養生の強度発現性に比べて一様に上回る傾向を示した。W/B=33.0%において、養生方法の相違(20℃水中・30℃水中・30℃現封)による静弾性係数の実測値4.37~4.62×10⁴N/mm²は、日本建築学会式(1)と同等以上の値を示した。

$$E_c = 0.098 \left\{ 2.1 \times 10^5 \left(\frac{\gamma_c}{2.3} \right)^{1.5} \sqrt{f_c / 200} \right\} \quad (1)$$

(2) 長さ変化および自己収縮(2)

図-8に示すように、91日経過した時点の高流動コンクリートの長さ変化は、収縮ひずみ208~302×10⁻⁶の範囲

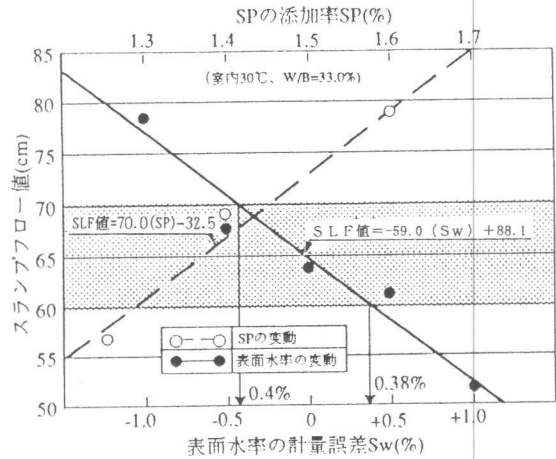


図-5 SPの添加率・表面水率とSFL値との関係

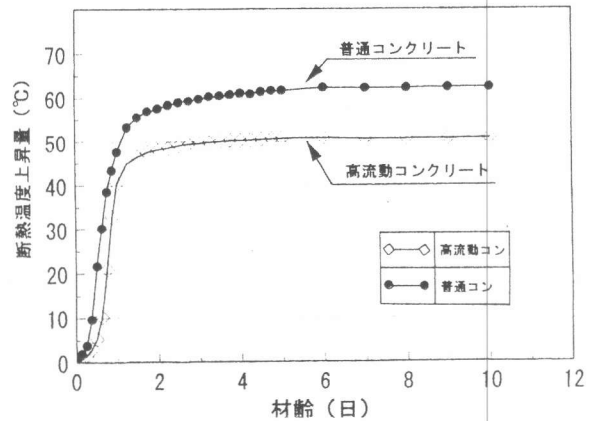


図-6 断熱温度上昇量の経時変化

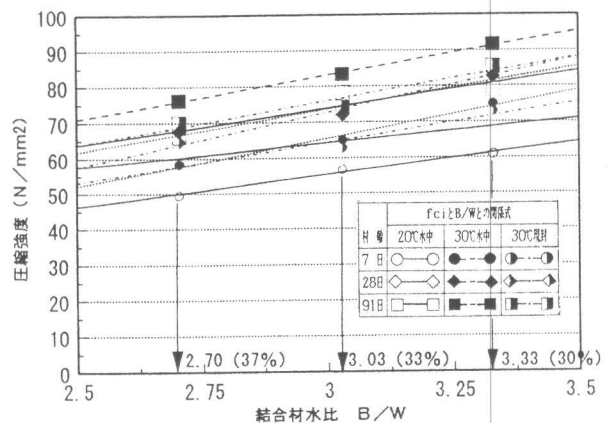


図-7 結合材水比と圧縮強度との関係

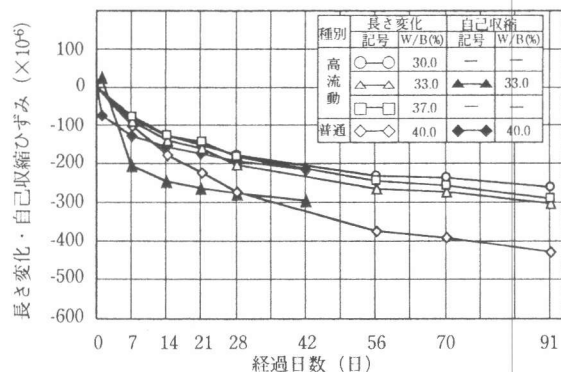


図-8 長さ変化および自己収縮ひずみの経時変化

にあり、普通コンクリートの収縮ひずみ 402×10^{-6} より小さな収縮ひずみ値を示した。しかしながら、高流動コンクリートの自己収縮は、初期材齢1日程度において膨張が 27×10^{-6} でピークに達し、その後徐々に収縮し、材齢42日での自己収縮ひずみは 294×10^{-6} を示した。一方、普通コンクリートの自己収縮は、初期材齢1時間から収縮を始め、材齢15日での自己収縮ひずみは 150×10^{-6} を示した。

このように、高炉スラグを混入した高流動コンクリートの自己収縮ひずみは、通常の普通コンクリートのそれに比べて材齢42日で 79×10^{-6} 大きな値を示した。その原因は水結合材比の低下、単位結合材量の多さおよびセメントペースト細孔が小さくなることなどが挙げられる[3]。

(3) 凍結融解抵抗性

図-9に示すように、300サイクル時における高流動コンクリートの相対動弾性係数は96.7~99.3%を示し、80%以上を満足した。普通コンクリート(W/C=40%)の300サイクル時の相対動弾性係数は82.1%を示し、高流動コンクリートとともに良好な結果を示した。

4. 2 コンクリートの施工性

4. 2. 1 ポンプ打設による施工性とその流動勾配・側圧

ポンプ打設による施工性は、図-10で示すアジテータ車5台のすべてが側壁・上床版の出荷時・現着時のスラン

プフロー 65.0 ± 5.0 cmと空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ の目標管理範囲内を満足し、大型ポンプ車が閉塞することなく打設速度 $15 \sim 30 \text{ m}^3/\text{hr}$ と円滑かつ、良好であった。ポンプ圧送後のスランプフローは3~5cm低下したが、空気量に変化は認められなかった。その流動勾配は、全面に透明FRP型枠を採用・調査したことから、ポンプ投入位置から4m~5mまでは3.9~5.6%、ポンプ投入位置から5m~9mまでは1.3~1.4%であった。実測したコンクリートの側圧は、図-11に示すような高さに比例したコンクリート液圧を示さずに、高さ1.6mの位置で最大側圧 3.6 tf/m^2 を示した。

4. 2. 2 コンクリート表面仕上り度

図-1に示す要領で気泡の発生状況と締固めの有無による差異を観察した結果、その有無に関わらず10mm以上の気泡・アバタの発生は0~4個/10cmの範囲内で良好であった。また、気泡の発

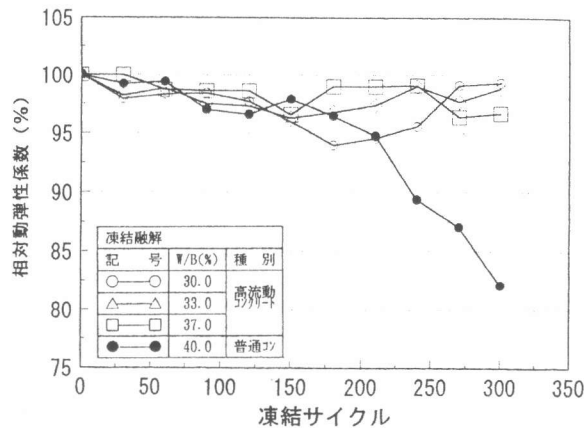


図-9 相対動弾性係数の経時変化

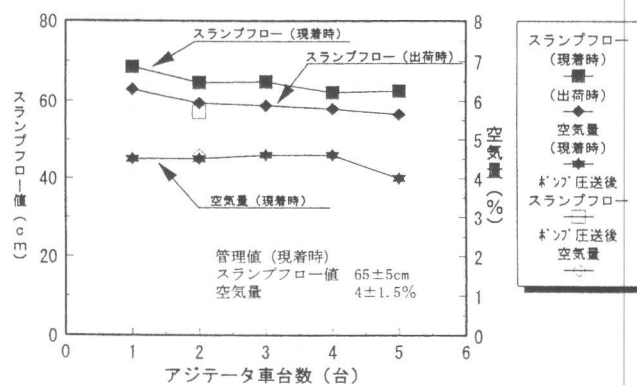


図-10 スランプフローおよび空気量の品質管理結果

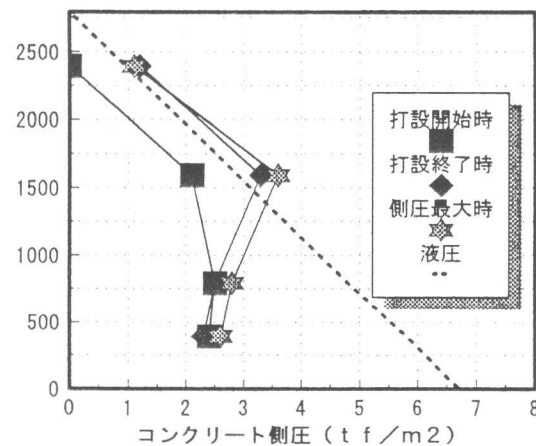


図-11 コンクリートの側圧

生傾向として、中部における3~5mmの気泡発生数は4~15個/□10cmの範囲にあり、上部および下部における3~5mmの気泡発生数3~30個/□10cmに比べて若干少なめであった。いずれにせよ構造体としては何等問題のない良好なコンクリート表面仕上り度と判断できる。ひび割れについては目視により観測した結果、外面および内面とも認められなかった。

4. 2. 3 モデル構造体による充填度の確認

図-12に、コンクリートコア(φ100×200mm)による単位容積質量、圧縮強度および粗骨材面積率の測定結果は、それぞれの変動係数が1.39%、2.52%および10.4%で良好な変動範囲内にあった。また、粗骨材面積率と単位容積質量・圧縮強度との直線回帰による相関係数は、いずれも正相関を示し、単位容積質量0.598、圧縮強度で0.703を示した。よって、モデル構造体の充填度の確認は、これらの結果より均一な品質のコンクリートが打設できたものとする。

5. まとめ

暑中環境下の本施工で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 暑中環境下(30℃)での最適な配合は、高性能AE減水剤の遅延型Bの配合が有効であった。
 - (2) 高流動コンクリートのフレッシュコンクリートの性能評価のみならず、高流動コンクリート凍結融解、長さ変化および自己収縮など良好な耐久性の評価をも検証できた。
 - (3) コンクリートの製造、ポンプ打設による施工性、流動勾配、表面仕上り度およびモデル構造体のコンクリートコアによる良好な充填度の品質確認など一貫性を持った検証ができた。
- 以上のことから、暑中環境下における高流動コンクリート構造体の品質保証体制が確立できたものとする。

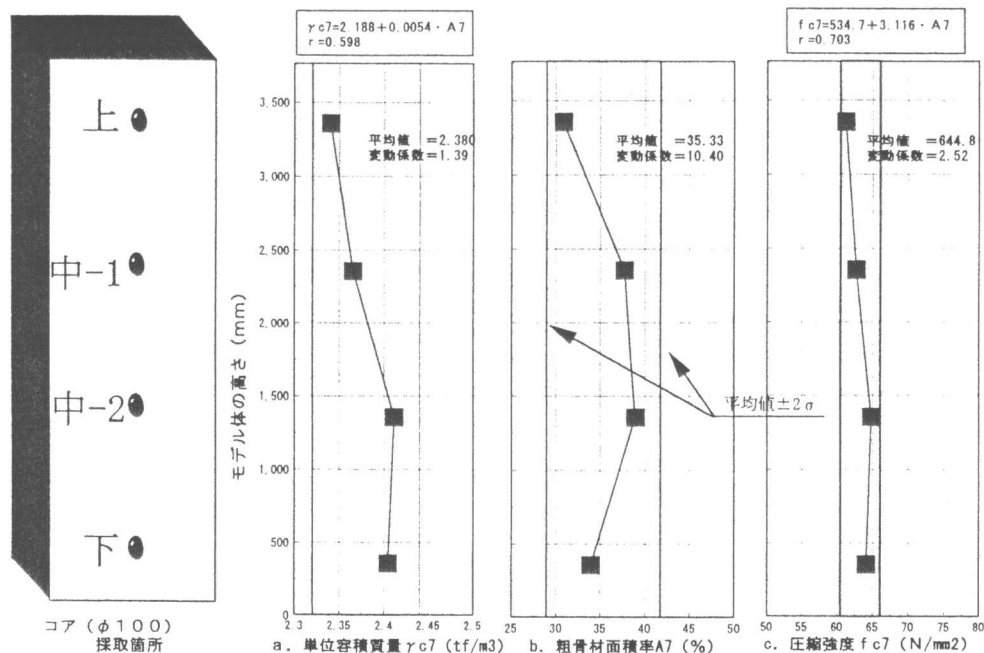


図-12 単位容積重量、圧縮強度および粗骨材面積率 (コンクリートコア材齢7日)

[参考文献]

- [1] 横山柄川、田中他2名：鋼殻構造の沈埋トンネル最終継手部への超流動コンクリートの適用性検討、土木学会第48回年次学術講演会、IV-157、pp. 334~335、1993. 9
- [2] 超流動コンクリート研究委員会報告集II(付録-1)：(社)日本コンクリート工学協会、1994. 5
- [3] 橋本聖三、田澤栄一他1名：セメントペーストの自己収縮に及ぼす高炉スラック微粉末の影響、土木学会第48回年次学術講演会、pp. 424~425、1993. 9