

ハイパフォーマンスコンクリートの施工実験

Experimental Execution of High Performance Concrete

西山 直洋*	大矢 一夫**
Naohiro Nishiyama	Kazuo Oya
荒木 一広***	高橋 秀樹****
Kazuhiro Araki	Hideki Takahashi
宮下 剛士*****	春口 義男*****
Takeshi Miyashita	Yoshio Haruguchi

要 約

近年、コンクリート構造物の耐久性向上に関する技術開発や研究が、多くの機関で盛んに行われている。

ハイパフォーマンスコンクリートは、このような状況の中で研究開発されたコンクリートで、高い耐久性と分離抵抗性および流動性に優れるために、締固めしなくても施工が可能とされている。このコンクリートについては、施工実験を含めた研究は各所で実施されているが、実際の構造物への適用実績は極めて少ない。

施工および実験の結果、ハイパフォーマンスコンクリートを使用する場合には、よりきめの細かいコンクリート打込み計画が必要であること、コンクリートの製造および品質管理手法の問題点、およびポンプ圧送や型枠に掛かる圧力など、従来のコンクリート施工とは異なる。今後の施工に対する多くの重要な知見を得ることができた。

本文は、麻生セメント株式会社中央研究所と共同で実施した、同所新築工事において、このコンクリートを実際に使用した状況と、併せて実施した実験の結果について報告するものである。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 施工および実験方法の概要
- §3. 試験結果および考察
- §4. まとめ
- §5. おわりに

§1. はじめに

ハイパフォーマンスコンクリート(以下 HPC と称す)とは、コンクリート構造物の耐久性向上を目的とした技術開発や研究の中で、東京大学工学部土木工学科岡村研究室で研究開発されたもので、コンクリート工事の施工そのものを根本的に変えていくものと、多くの点で注目を集めている。

HPC は、フレッシュの状態では高い流動性と分離抵抗性に優れ、締固めをしなくても十分な充填が可能であり、また硬化に伴う発熱や乾燥収縮が小さいためひび割れが少なく構造物の耐久性向上に非常に有効といわれている。

このコンクリートは基本的には、セメント、フライア

*技術研究所建築技術課係長
 **技術研究所研究部長
 ***九州(支)粕屋(出)所長
 ****技術研究所地質研究課係長
 *****技術研究所原子力課係長
 *****九州(支)延岡(出)工事係長

ッシュ、高炉スラグ微粉末、高性能 AE 減水剤、骨材および水によって作られており、材料の種類が多いことも影響して、各材料の品質の変化や、コンクリートの製造および施工方法の変化により、コンクリートの物性や施工性に大きく影響を与えることが知られている。

このために実際の施工では、使用材料に見合った適切な配合の選定、綿密な施工計画の立案などが要求されるが、これらに関する資料が少ないのも実情である。

麻生セメント(株)中央研究所新築工事において、将来性のある HPC を工事の一部に使用することを計画し、同時に工事における様々の問題点の抽出と、それらに対する対策を把握することを目的とした、一連の実験を同社中央研究所と当社柏屋出張所、および技術研究所で共同で実施することとなった。

本文は、これら施工および実験について報告するものである。

§ 2. 施工および実験方法の概要

2-1 工事概要

建 物 名：麻生セメント(株)中央研究所内車庫
 施 工 場 所：福岡県柏屋郡柏屋町大字仲原
 企 業 先：麻生セメント株式会社
 設 計 ・ 監 理：広岡建築事務所
 施 工：西松建設(株)九州支店
 構 造 ・ 規 模：鉄筋コンクリート造地上1階
 床 面 積：57.06㎡
 コンクリート打設量：40㎡
 建屋平面・断面図：Fig. 1, Fig. 2

2-2 実験項目

前述のように HPC 施工における技術的なデータを得るために、次のような実験を併せて計画した。

- ① HPC の物性および品質試験
- ② HPC 施工における型枠に掛かる側圧および温度測定試験
- ③ HPC のポンプ圧送による管内抵抗測定試験
- ④ HPC の施工性試験

これらの実験を実施し資料を得るために、建屋工事では次のような条件で施工している。

- ①コンクリートの打込みはポンプを使用し、地上配管部分を設けた。
- ②コンクリートの流動性および施工性を確認するために、壁の天端に段差(上型枠使用)を付け、コンクリートの流れの障害部を作った。また、壁の一部にパイプを多数埋込み、それら障害物の影響を確認できる構

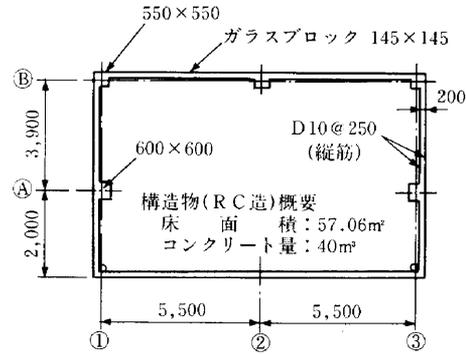


Fig.1 平面図

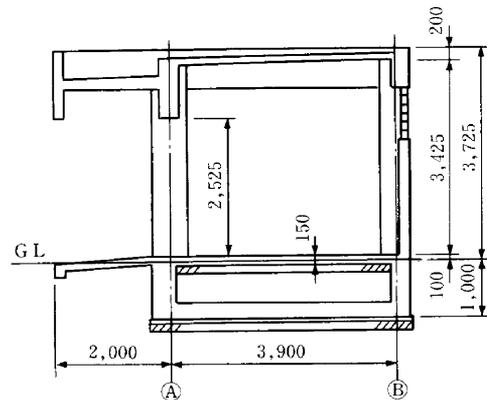


Fig.2 断面図

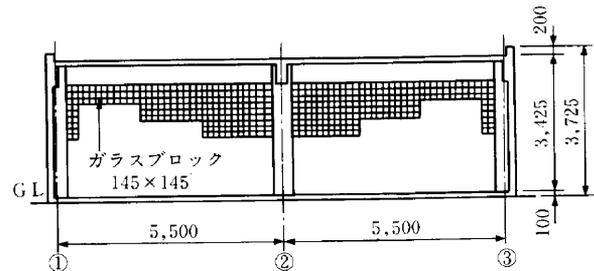


Fig.3 ③通り壁展開図

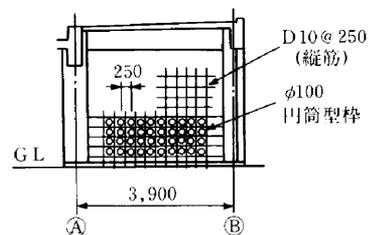


Fig.4 ①通り壁展開図

造とした (Fig. 3, Fig. 4)。

- ③ポンプの圧送性を確認するために、吐出量および圧送圧力を変化させて施工した。

2-3 実験概要

- ①使用材料および配合

工事に用いた各材料および、これを用いて試験により選定した HPC の配合は Table 1, Table 2 に示すとおりである。

なお、コンクリートのスランプフロー値は、 55 ± 5 cm、空気量は $2 \pm 1\%$ として配合を設定した。

② HPC の品質および物性試験

施工におけるコンクリートの品質を確認するために、Table 3 に示す試験を実施した。

なお、高流動性コンクリートのコンシステンシー試験としては、スランプフロー試験（スランプ試験における広がり（程度）を測定）が一般に用いられているが、HPC のコンシステンシーやワーカビリティを適切に評価するためには十分であるとは言い難い。そこで、HPC と同様に流動性に富む水中不分離性コンクリート等の品質判定に適用されている、O ロート試験やボックス試験をも併せて実施した。

③ 側圧および温度測定試験

型枠にかかる側圧測定は、2 ケースについて実施した。ケース 1 は、構造物の柱部分で、型枠の側面に土圧計を底面より 50 cm 間隔で 6 箇所設置した。ケース 2 では、本体構造物とは別に、断面 80 cm × 80 cm、高さ 300 cm の柱試験体を作成し、50 cm 間隔で合計 6 箇所に土圧計を設置した (Fig. 5)。本構造物では、コンクリートの打上り速度が一定とならず硬化の影響などが考えられるため、上述のような 2 ケースの側圧測定を行った。

Table 1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (比重 3.16 比表面積 3,320 cm ² /g)
高炉スラグ	(比重 2.89 比表面積 4,040 cm ² /g)
フライアッシュ	(比重 2.30 比表面積 4,500 cm ² /g)
細骨材	海砂 (比重 2.58 FM2.63)
粗骨材	砕石 2005 (比重 2.66 FM6.66)
混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)

Table 2 コンクリートの調合

粗骨材の最大寸法 mm	水結合材比 W/P (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				混和剤 (P × 0.8%)		
			水	結 合 材 (P)					
				セメント	スラグ	フライアッシュ			
20	29.9	51.0	160	156	177	203	816	810	4.29

※ P は、セメント + スラグ + フライアッシュを表わす。

温度測定は、ケース 2 の試験体で上面より 1 m の位置の中心、型枠内面および外気中に温度計（ひずみゲージ式）を設置し、7 日間の温度測定を実施した。

④ ポンプ圧送試験

ポンプ配管の状況は Fig. 6 に示すとおりであり、配管の水平換算長さは 150.4 m であった。

また、使用ポンプは、性能および仕様を Table 4 に示す高性能ピストン式であった。

ポンプ圧送試験は、圧送速度（吐出量）を 20, 40, 60 (m³/h) と変化させ、それぞれについて管内の圧力を測定することにより実施した。

また、ポンプストローク当たりの圧送コンクリート量を計測し、容積効率も算出した。

§ 3 . 試験結果および考察

3-1 コンクリートの品質および物性

① フレッシュコンクリート

まだ固まらないコンクリートの品質試験結果を Table 5 に示す。

各アジテータ車の混和剤添加量、スランプフロー値、空気量およびコンクリート温度の測定結果を Table 6

Table 3 物性試験一覧

分類	試験項目	試験方法
フレッシュコンクリート	スランプ・フロー値	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1118
	単位容積重量	JIS A 1116
	O ロート試験	径 7.5 cm, 高さ 15 cm, 容量 10 ℓ
	ボックス試験	開口高さ 7.5 cm
	V F 試験	土木学会基準準用
硬化コンクリート	ブリージング試験	JIS A 1123
	断熱温度上昇試験	JIS 案
	凝結試験	JIS A 5308 に準ずる
	圧縮強度 (標準)	JIS A 1108
硬化コンクリート	同 (現水)	同上
	同 (気中)	同上
	同 (コア抜き)	JIS A 1107
	長さ変化	JIS A 1107 準用
	凍結融解	土木学会基準
	透水試験	JIS A 1107

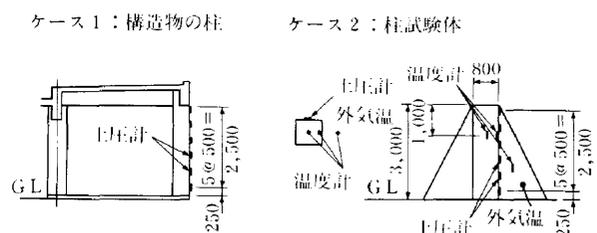


Fig.5 測定器取付け位置

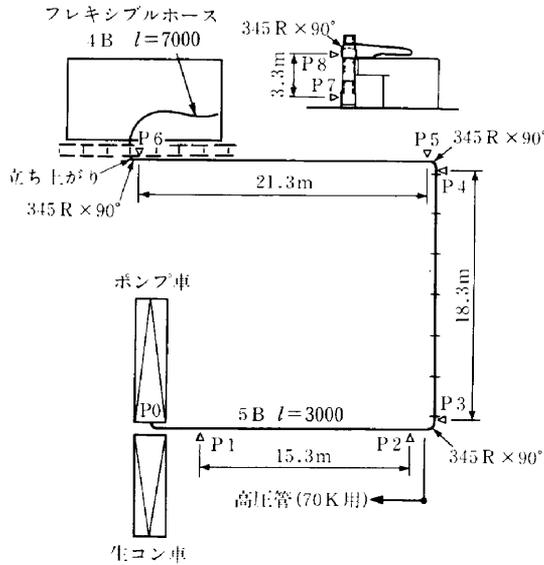


Fig.6 配管形状および管内圧力計測位置図

Table 4 コンクリートポンプの仕様

輸送シリンダ径 (mm)	φ205 (高圧時)	
吐出量 (m³/h)	10~68	
コンクリートピストン 全面圧 (kgf/cm²)	82.6	
輸送距離 垂直×水平 (m)	6 B 管	240×1330
	5 B 管	210×920
	4 B 管	165×560

に示す。

また、同一アジテータ車において積置きしたコンクリートの、スランプフロー値、空気量および温度の経時変化の関係を Table 7 に、工場、荷取り、筒先においてのコンクリートの性状を Table 8 に示す。

コンクリートの断熱温度上昇試験の結果は Fig. 7 に示すとおりである。以上の結果より下記の事項が確認された。

イ) 混和剤添加量の微妙な変化がスランプフロー値に影響を与えている。また同一混和剤添加量においてもスランプフロー値が変化している。これは、コンシス

Table 5 フレッシュコンクリートの性状

経時変化測定用コンクリート

車番	採取時間 (分)	コンクリート温度 (°C)	スランプフロー値 (cm)	空気量 (%)	ロータリ通過時間 (秒)	ボックス沈下量 (cm)
0	0	30.0	62.0	1.5	10.6	24.2
	15	30.0	59.5	1.4	12.0	—
	30	29.5	59.0	1.4	14.3	21.0
	60	27.0	56.0	1.6	27.3	11.7
	90	29.0	54.5	1.6	13.0	23.0
	120	30.5	51.0	1.8	68.0	23.0

打設コンクリート

車番	採取場所	コンクリート温度 (°C)	スランプフロー値 (cm)	空気量 (%)	ロータリ通過時間 (秒)	ボックス沈下量 (cm)
3	荷取	28.0	61.0	1.8	10.4	24.0
4	荷取	—	60.0	1.7	11.0	23.6
5	工場	29.5	55.5	1.7	11.2	23.8
	荷取	30.0	51.5	1.8	21.0	20.0
	筒先	30.0	45.0	2.4	11.2	20.0
6	荷取*	30.0	53.5	1.5	15.0	22.5
7	工場	30.5	54.0	2.3	14.2	22.0
	荷取	30.0	47.5	2.4	10.0	22.0
	筒先	29.5	42.0	2.5	10.2	20.5
8	荷取	29.0	54.0	1.8	14.0	22.0
9	荷取	30.0	51.5	2.1	15.3	22.5
10	荷取	29.0	52.5	1.7	31.0	22.0
12	荷取	29.0	62.5	0.7	10.7	23.5

* 荷取は練り上がり後直ちに荷取

テンシーに及ぼす練り混ぜ性能の影響が鋭敏であるためと考えられる (Table 6)。

ロ) スランプフロー値の、荷取りから筒先までの変化は、練り置き経時変化 (30分) よりも大きく、圧送による影響が、他に比較して大きいことを示している (Table 7, 8)。

ハ) 空気量は普通コンクリートとは逆に、経時とともに若干増加する傾向にある (Table 7)。

Table 6 各アジテータ車の混和剤添加量、スランプフロー値、空気量およびコンクリート温度

車番	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
混和剤添加量 (%)	0.85	0.82	0.80	0.80	0.80	0.80	0.85	0.85	0.80	0.80
スランプフロー (cm)	61	60	51	54	48	54	51	52	—	62
空気量 (%)	1.8	1.7	1.8	1.5	2.4	1.8	2.1	1.7	—	0.8
コンクリート温度 (°C)	28	—	30	30	30	29	30	29	—	29

Table 7 スランプフロー値, 空気量および
コンクリート温度の経時変化

経過時間(分)	0	15	30	60	90	120
スランプフロー(cm)	62	60	59	56	54	42
空気量(%)	1.5	1.4	1.4	1.6	1.6	2.5
コンクリート温度(℃)	30	30	29	27	29	30

Table 8 各サンプリング箇所のスランプフロー値,
空気量およびコンクリート温度

採取場所	5号車			7号車		
	工場	荷取	筒先	工場	荷取	筒先
スランプフロー(cm)	56	51	45	55	48	42
空気量(%)	1.7	1.8	2.4	2.3	2.4	2.5
コンクリート温度(℃)	29	30	30	30	30	30

ニ) HPCは、アジテータ内での品質の変化は比較的少ない。

ホ) スランプフロー値, Oロート値およびボックス値の関係は、データが少ないこともあり、相関性が明確でなかった。しかし、HPCのコンシステンシーの評価方法が確立されていない現在、今後も検討していく必要がある (Table 5)。

②硬化コンクリート

圧縮強度試験結果を Fig. 8, Fig. 9 に、凍結融解試験結果を Fig. 10 に、透水試験結果を Table 9 に示す。以上の試験結果より下記の項目を確認した。

イ) 3日, 7日強度は標準養生より現場水中養生の方が高い値を示しているが, 28日強度ではほぼ同じ値となっている。これは, 実験が7月に行われたため, 初期の養生温度の差によるものと考えられる。

ロ) 試料採取位置による強度の差はない。

ハ) 28日強度の平均は, ほぼ550 kg/cm² (53.9MPa) でバラツキも少なく品質管理は良好であった。

ニ) 凍結融解試験結果は, 100サイクル程度で規準値(300サイクルで相対動弾性係数が60%)を下まわっているが, 空気量を2%で管理しているため, 十分予想される値であった。したがって, HPCの凍結融解抵抗性を向上させるには, AE剤を加えて空気量を増やすなどの対策が必要である。

ホ) 透水試験の結果は, 拡散係数で9.2 (×10⁻⁴cm²/sec) となっており, 普通コンクリートで15~25 (×10⁻⁴cm²/sec) であることから, HPCは, 耐透水性に優れた十分緻密なコンクリートと言える。

3-2 側圧および温度測定

実構造物で測定した側圧測定結果を Fig. 11 に, 独立

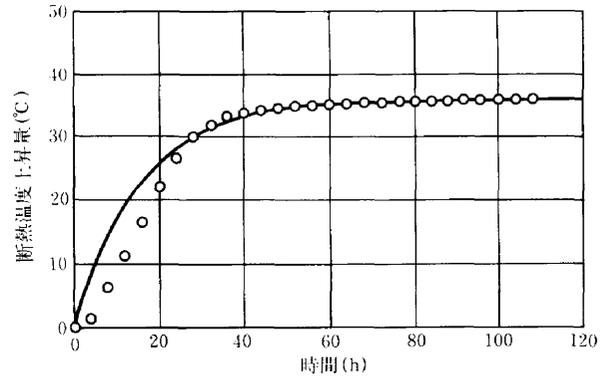


Fig.7 断熱温度上昇試験結果

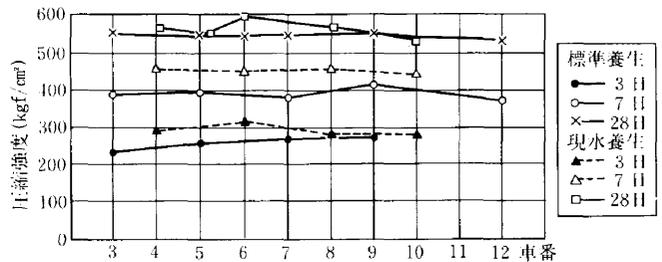


Fig.8 荷取における供試体強度

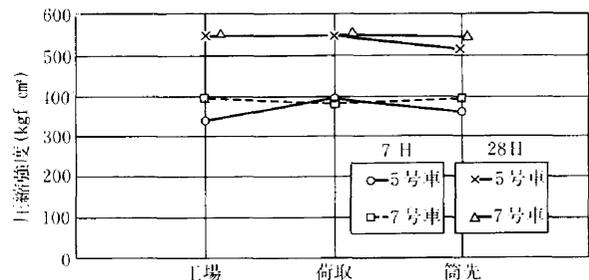


Fig.9 各サンプリング箇所の供試体強度(標準養生)

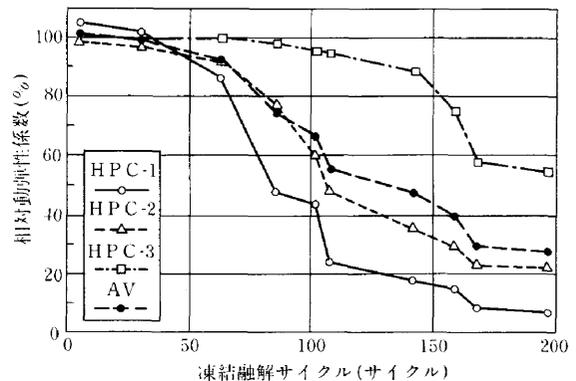


Fig.10 HPC凍結融解試験結果

柱で測定した結果を Fig. 12 に, また温度測定結果を Fig. 13 に示す。

以上の結果より下記の事項を確認した。

イ) 実構造物の側圧は, 液圧のように直線的に作用せ

Table 9 透水試験結果

項目	浸透深さ (mm)	拡散係数 ($\times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$)
No. 1	41.0	8.93
No. 2	48.0	10.46
No. 3	38.0	8.28
平均	42.3	9.22

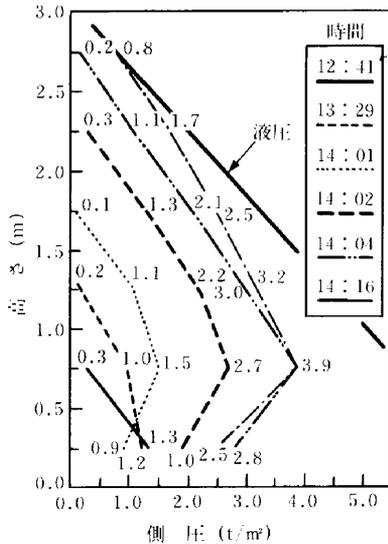


Fig.11 構造物の柱の側圧

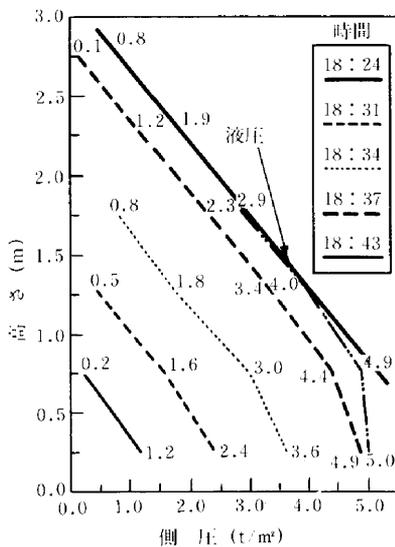


Fig.12 柱試験体の側圧

ず、柱下部で折れている。これは、打上り速度が柱下半分までは1m/h、柱上半分では6m/hと異なったために、柱下部では硬化の影響が現れ、この部分の側圧が減少したためと考えられる。

ロ) 独立柱のように打上り速度が速く(9m/h)急速に

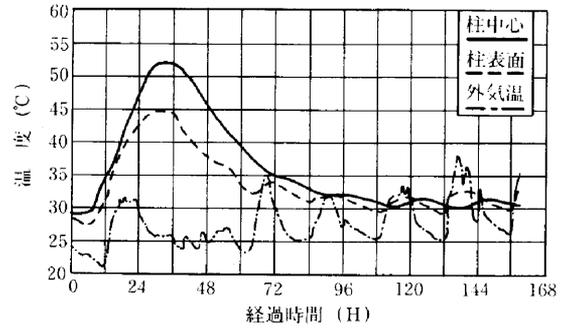


Fig.13 コンクリート温度の履歴

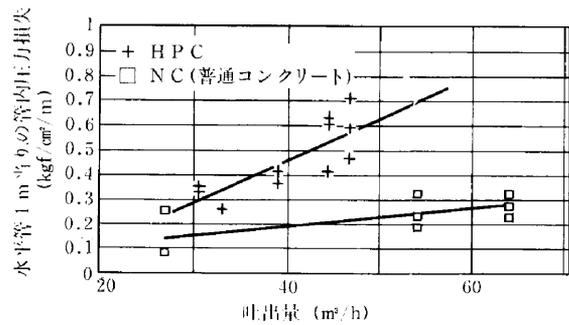


Fig.14 吐出量と管内圧力損失

打上げる場合の側圧は、液体圧と同程度となっている。
ハ) コンクリートの温度は、中心部で打設後34時間で最高53°Cに達し、打設時(28°C)よりの上昇温度は25°Cとなっている。通常の高強度コンクリート等と比較すれば低発熱の効果が十分現れていると考えられる。

3-3 ポンプ圧送試験

管内圧力損失の結果を Fig. 14 に示す。

試験結果より下記の事項を確認した。

- イ) HPCの圧送では、普通コンクリートの2~3倍(吐出量によって異なる)の圧力を要する。これはHPC特有の粘性があるためと考える。
- ロ) 容積効率については、約90%(吐出量60m³/h)と通常のコンクリートと同程度の値を示し、粘性があるHPCとしては好結果と言える。

3-4 打設されたHPCの状況

①充填性

コンクリートの充填性については、型枠脱型後に、以下の項目について確認した。

- イ) 躯体コンクリートにジャンカ、巣などの欠陥はなく、型枠のすみずみまで完全充填されていた。
- ロ) 壁部表面に、比較的大きな気泡(直径0.5~1cm)が部分的に見られた。

②流動勾配

(B)-②~③壁面および①通壁面のアクリル型枠部

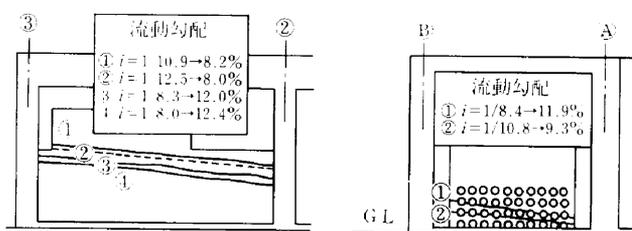


Fig.15 流動勾配図

分の、打設中の流動勾配を Fig. 15 に示す。

なお、打設中はコンクリートヘッドは上昇するが、打設中断中は、10cm程度の下がりが生じ、勾配は緩くなる傾向を示した。このことは、HPCの流動性がよく、持続性のあることを示すものと考えられる。

③その他

- イ) 壁面、柱など立上り部は、コンクリートを自由落下させ、バイブレータを使用しなかったが、コールドジョイントは認められなかった。
- ロ) 床表面における HPC の引き均しは、普通コンクリートに比べ数倍の力を要する。

§ 4. まとめ

施工および実験の結果をまとめると次のようである。

- ①コンクリートの品質性状は、材料の品質および配合の変化に、より鋭敏に影響を受ける。とくに、練り混ぜの影響は大きい。練り上がり温度の影響については、今後検討を要する。
- ②コンシステンシーやワーカビリティの管理は、スランプフロー試験で可能と考えられるが、さらに検討が必要である。

- ③コンクリートの圧縮強度は、所要の強度を大幅に上回るものが得られた。このことは、HPCでは強度より施工性を考慮して配合を選定するためである。
- ④透水試験の結果は、通常のコンクリートに比較して、拡散係数が1/1.5~1/2.7になっており、より緻密である。
- ⑤ HPC のポンプ圧送圧力は、通常のコンクリートの2~3倍を要する。ポンプの能力に余裕を持った計画が必要である。
- ⑥型枠に掛かる側圧は、液体として考慮する必要がある。
- ⑦コンクリートの温度上昇は、通常の高強度コンクリートに比べ40%程度少ない。
- ⑧壁、柱などの部分ではバイブレータなしで高品質の構造物の施工が十分可能であった。しかし、スラブでは、表面の引き均し作業に、より多くの労力が必要であった。
- ⑨ HPC の効力をより一層発揮させるためには、荷降ろしの場所、量、時間など、綿密な打ち込み計画が必要である。

§ 5. おわりに

本実験を行うにあたり、計画、工事の全般にわたり御指導をいただいた東京大学工学部土木工学科の小沢先生、また広岡建築事務所および福岡コンクリート工業(株)、サンフロー(株)の方々の御協力に対し、紙面を借りて深く感謝いたします。