

論文

[1014] 逆打ち用ハイパフォーマンスコンクリートに関する基礎研究

正会員○北村八朗 (大阪ガス技術部)
 正会員 西崎丈能 (大阪ガス技術部)
 正会員 鎌田文男 (大林組本店土木部)
 正会員 十河茂幸 (大林組技術研究所)

1. 序

施工システムの合理化、省力化をはかり、建設工事の近代化を推進させるコンクリート技術として、全く締固めを要しないで型わくの隅々まで充填され、材令初期における収縮が少なく、硬化後の性質も良好な信頼性の高い「ハイパフォーマンスコンクリート」が東京大学土木工学科コンクリート研究室において研究・開発されている[1]。

大阪ガス泉北製造所第二工場において現在建設中のPCLNGタンク[2]の防液堤には、内槽工事のために仮設開口部が設けられ、この開口部の閉塞は逆打ちコンクリート施工となる。また、コンクリートの打設に先立って内面が鋼製ライナにより締切られること、さらに、配筋が比較的密な上、円周・鉛直方向のPC tendon用シースも配置されていることから、十分な締固めを行うことが困難な条件にある。

そこで、筆者らは、このような施工条件下で信頼性の高いコンクリートを打設するために、ハイパフォーマンスコンクリートの適用を計画し、逆打ちコンクリートとして適切な収縮補償性能を付与し、逆打ち水平打継目の一体化が図れるハイパフォーマンスコンクリートを目指して実験的研究を行った。本報告は、その基礎的実験結果についてとりまとめたものである。

2. 実験概要

コンクリートの配合条件を表-1に、実験に用いた各種材料の品質を表-2～表-5に示す。実験には、低発熱型高炉セメントB種(スラグ55%混入)を用い、セメント以外の微粉末材料として、石灰石微粉末(以下、石粉と呼称)およびフライアッシュを使用した。骨材の最大寸法は20mmとし、主成分の異なる2種類の高性能AE減水剤を用いた。また、収縮補償を目的として、3種類の混和材料(発泡剤、膨張材、収縮低減剤)を単独あるいは組合せて用いた。

コンクリートの製造には、パグミル型二軸強制練りミキサを用い、練りませ量を100ℓとした。練りませ方法は、

表-1 コンクリートの配合条件

骨材最大寸法(mm)	単位セメント量(kg/m ³)	スランブフロー(cm)	空気量(%)	練上り温度(°C)
20	400	60±5	4.5±1	10~15

表-2 実験に用いたセメントの物性

比重	ブレン比表面積(cm ² /g)	圧縮強さ(kgf/cm ²)			水和熱(cal/g)		
		7日	28日	91日	7日	28日	91日
3.04	4250	171	363	467	47.8	54.7	62.9

表-3 実験に用いた混和材の品質

種類	略号	比重	ブレン比表面積(cm ² /g)	備考
石灰石微粉末	LF	2.71	5500	石灰純度:95%
フライアッシュ	FA	2.27	3760	SiO ₂ :53.4%
膨張材(CSA系)	EX	2.73	3150	水和熱抑制型

各種微粉末および骨材を投入して30秒間空練りし、練りませ水を加えて120秒間練りませた。

本研究では、まず、骨材寸法に対する開口間隔の割合が小さい過密配筋下においても、十分な充填性を有する配合について検討した。次いで、配合中の水量の変動が各種流動特性に及ぼす影響を調べた。さらに、硬化コンクリートの膨張特性に及ぼす各種混和材料の使用効果について検討した。

流動特性のうち、水平方向の広がり能力（変形ポテンシャル）および変形速度の評価は、それぞれスランプフローおよび σ_{75} ロート流下時間（図-1参照）[3]を指標とし、充填性の評価には、図-2に示す各種鉄筋メッシュ通過試験装置[1]を用いた（表-6参照）。コンクリートの膨張特性については、 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の型わくを用いた鉛直方向の自由膨張率の測定と、鋼管（内径300mm、高さ600mm、肉厚1.6mm）内に膨張コンクリートを充填して密封養生し、鋼管側面中央部に貼付したひずみゲージより膨張量を測定する多軸拘束膨張試験を実施した[4]。その他の各種試験は、それぞれのJISに準拠した。ただし、各試験用試料は、突き棒を用いず、木づちで軽くたたいて作製した。また、A ℓ 粉末を混入した場合の強度試験用供試体は、型わく上面に0.2kgf/cm²の上載荷重をかけ、脱型時まで拘束した。なお、実施工が冬期となることを考慮して、コンクリートの目標練上り温度を10~15℃とした。

表-4 実験に用いた混和剤の品質

種類	略号	比重	主成分・その他
発泡剤	A ℓ	-	アルミニウム、反応遅延型
収縮低減剤	Te	0.99	低級アルコールアルキルシリンド付加物
高性能	SPA ₁	1.04	ポリカルボン酸エーテル系複合物
A E 減水剤 (SPA)	SPA ₂	1.15	変性リグニン、アルキルアルシル酸と活性持続リマーの複合物

表-5 実験に用いた骨材の物性

種類	分類	比重	吸水率 (%)	粗粒率 (F.M.)	実積率 (%)
細骨材	海砂	2.54	2.02	2.52	60.8
粗骨材	碎石2005	2.63	0.75	6.63	60.5

表-6 各種鉄筋メッシュ通過試験装置の諸元

試験装置の名称	試料量 (ϕ)	開口数	開口部有効径 (mm)	開口率 (%)
\square_{50-25} メッシュ	30	25	50	69
\square_{50-16} メッシュ	30	16	50	44

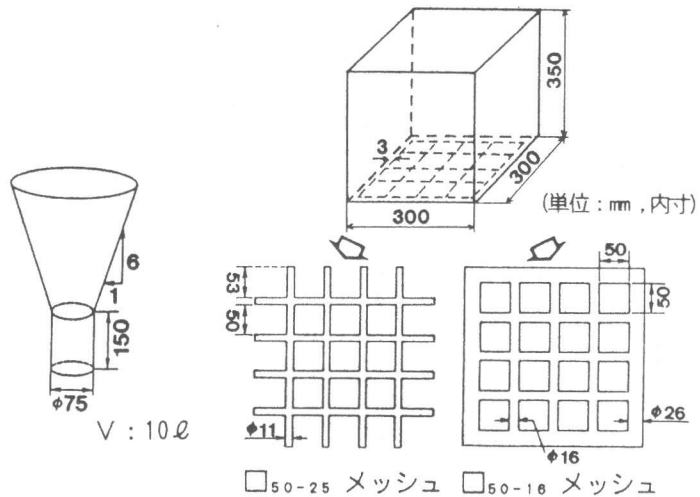


図-1 σ_{75} ロート

図-2 鉄筋メッシュ通過試験装置

表-7 実験に用いたコンクリートの配合

w/p	単位容積 (ℓ/m^3)			W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)			
	w	p	g			W	P		SPA ₁ (P%)
							C	LF	
0.85	178	210	265	29.1	53.3	178	211	2.0	
0.95	180	190	295	32.4	49.5	180	157		
1.05	179	171		35.6	51.2	179	106		
0.85	172	202	325	29.2	44.2	172	190		
0.95	172	181		32.6	46.0	172	133		
0.95	165	172	354	32.5	42.7	165	108		

3. 実験結果および考察

3. 1 各種配合要因がコンクリートの流動特性に及ぼす影響

単位微粉末量に対する高性能AE減水剤の添加率を一定とし、所定のスランプフローが得られるように単位水量を調整して、単位粗骨材容積を変化させた配合を表-7に示す。図-3は、これらの配合のコンクリートについて、2種類の鉄筋メッシュ通過試験を実施した結果を示したものである。

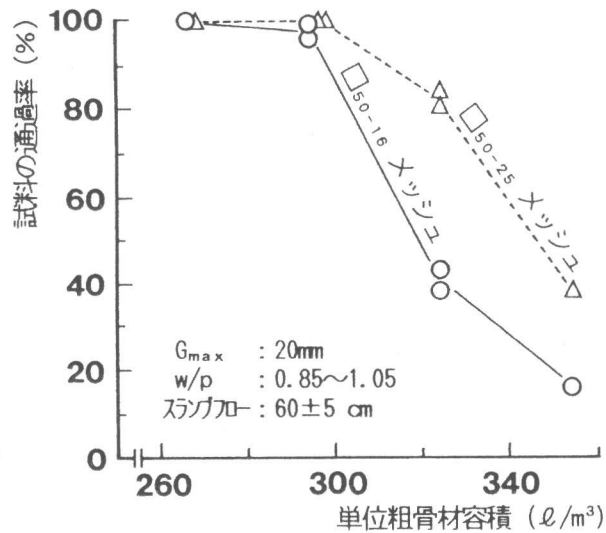


図-3 単位粗骨材容積と試料の通過率

鉄筋メッシュを通過する試料の割合（以下、通過率と呼称）は、配合中の粗骨材量によって相違し、単位粗骨材容積が 300 l/m^3 程度以下では、いずれの試験装置を用いた場合も

試料のほぼ全量が通過したのに対し、この値を越えた場合には、粗骨材容積の増大に伴って通過率が急激に低下する傾向が認められる。また、両者の関係には、試験装置の諸元による差異が認められ、開口率が小さい試験装置ほど鉄筋メッシュを通過する試料の量が減少する結果となった。

この結果は、骨材寸法に対して部材寸法や鉄筋のあきが小さい箇所にコンクリートを充填させるためには、開口間隔や開口率に対応した配合上の粗骨材量の限界値が存在することを示すものといえる。ただし、この場合の限界値に関しては、用いる粗骨材の物性（形状、粒度および実積率等）によっても左右されるものと思われる。なお、以下の実験では、上記の結果をもとに、配合上の単位粗骨材容積を約 300 l/m^3 の一定として配合設計を行った。

配合中の微粉末の種類、単位量および高性能AE減水剤の種類を変化させたコンクリートの配合および各種試験結果を表-8に示す。低温下（ 10°C ）におけるブリージング・凝結性状に関しては、混和材料による差異が認められ、フライアッシュを混和した場合には、ブリージングが増大し、また、ナフタリン系の高性能AE減水剤を用いた場合には、凝結が著しく遅延する結果となった。

図-4～図-6は、表-8に示す3種類の配合について、配合中の水量の変動がコンクリートの各種流動特性に及ぼす影響を調べた結果を示したものである。基準配合に対する水量の変動値（ $\pm 5 \text{ kg/m}^3$ ）は、実際の製造管理を想定した細骨材の表面水率による変動（約 $\pm 0.6\%$ ）を考慮したものである。いずれの配合についても、水量の増減（ $\pm 5 \text{ kg/m}^3$ ）に対して、スランプフロー

表-8 実験に用いたコンクリートの配合

配合種類	混和材料		W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						ガング率 (%)	凝結時間 (hr:min)		
					W	P			S	G		SPA (Px%)	始発	終結
						C	LF	FA						
A	LF	SPA ₁	30.0	47.8	175	400	184	—	704	797	2.0	0.00	17:30	22:30
B			33.8	49.9			117	—	767			0.19	18:00	24:00
C	FA	35.1	—	98			—	—	1.7		2.85	30:00	38:00	
D	LF	SPA ₂	34.8	49.5			180	117	—		754	2.35	1.02	40:00

は約±5cm 増減する結果となった。また、 ϕ_{75} ロート流下時間は、±5sec程度変化し、水量の増大とともにコンクリートの粘性が低下する傾向が認められた。また、 \square_{50-16} メッシュの通過率は、水量を減少させた場合には、若干低下する傾向が認められるものの、水量増大による分離抵抗性の低下による通過率への悪影響は認められなかった。

3. 2 各種混和材料がコンクリートの膨張特性に及ぼす影響

逆打ち水平打継目の一体性を向上させるために、各種の混和材料を用いたコンクリートの膨張特性について検討した。実験に用いたコンクリートは、表-8中のB配合を基本配合とし、これにAの粉末、膨張材(30kg/m³)、収縮低減剤(10kg/m³)を単独あるいは組合せて用いた。

各配合のコンクリートの流動特性は、いずれも基本配合と同様な結果となった。なお、比較のために、高性能AE減水剤の種類が異なるD配合に膨張材を混入した場合には、練りませ直後より急激にスランブフローが低下する現象が認められ、高性能AE減水剤量を増大させても所要の流動性が確保できなかった。

凝結性状に関しては、膨張材および収縮低減剤の使用により遅延する傾向が認められた(図-7参照)。一方、上記の配合ではブリージングの発生は認められなかった

Aの粉末の発泡作用による自由膨張率の測定結果を図-8および図-9に示す。Aの粉末を混入しない場合には、成型後0.5%程度収縮する結果が得られ、逆打ち水平打継目の一体化には、この極く初期の収縮をAの粉末によって補償する必要があると考えられる。また、Aの粉末を膨張材や収縮低減剤と併用した場合には、単独で用いた場合よりも、発泡の開始が早く、最終膨張率も増大する結果となった。

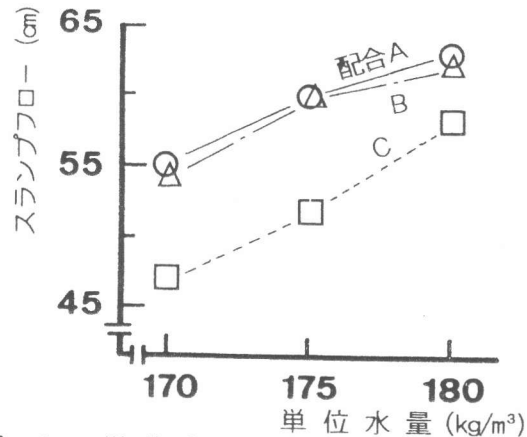


図-4 単位水量とスランブフロー

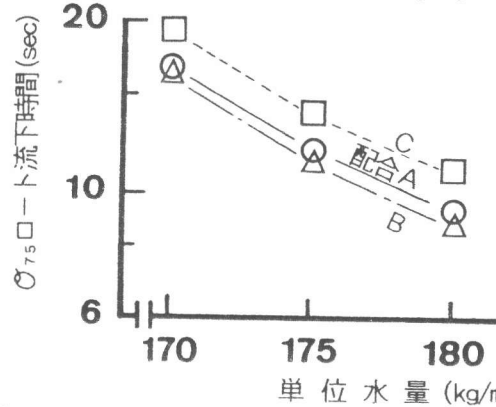


図-5 単位水量と ϕ_{75} ロート流下時間

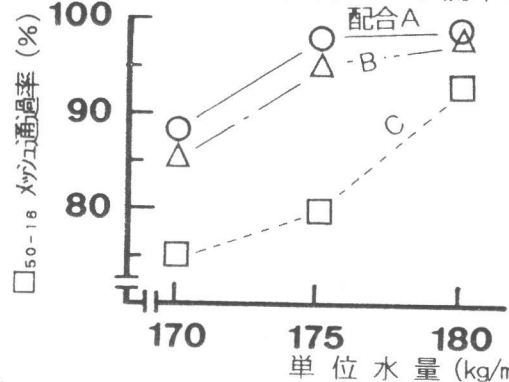


図-6 単位水量と \square_{50-16} メッシュ通過率

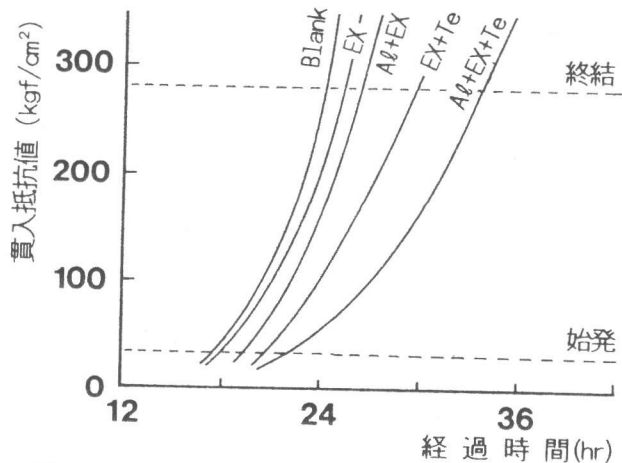


図-7 コンクリートの凝結試験結果

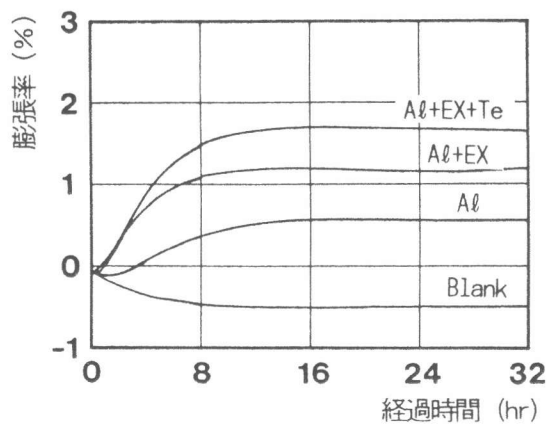


図-8 自由膨張率の経時変化

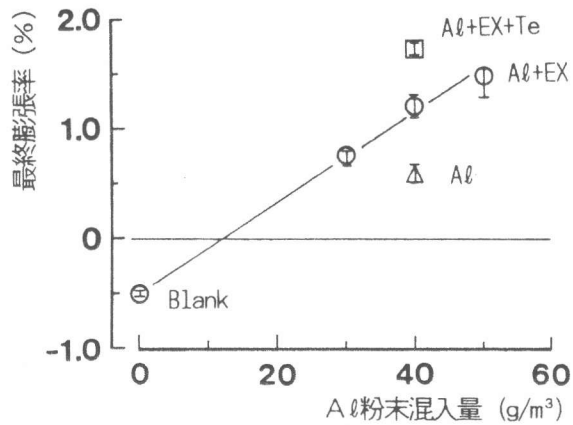


図-9 Al粉末混入量と最終膨張率

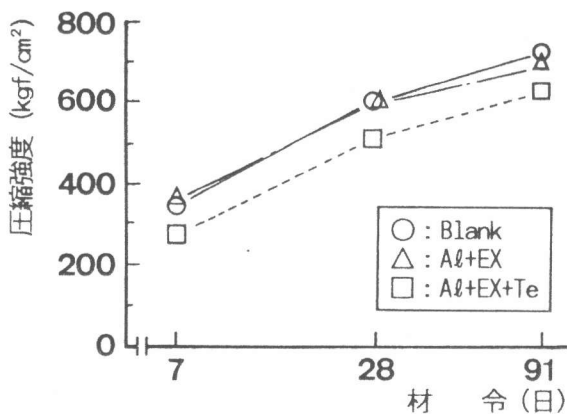


図-10 材令と圧縮強度

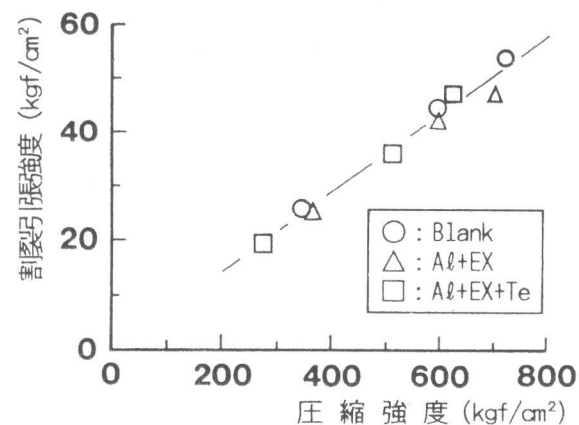


図-11 圧縮強度と割裂引張強度

各種強度試験結果を図-10および図-11に示す。収縮低減剤を混入することにより、強度が約10%程度低下する傾向が認められた。

多軸拘束膨張試験結果を図-12に示す。膨張材の使用による膨張発現効果は、Al粉末や収縮低減剤との併用により増大する結果が得られた。また、いずれの場合も材令3日程度で膨張が最大となった後、材令の経過とともに膨張率が低下する現象が認められ、特に、膨張材を単独あるいは

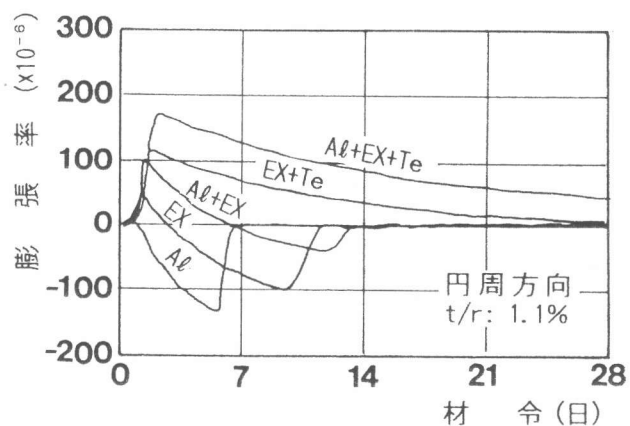


図-12 多軸拘束膨張試験結果

Al粉末と併用した場合には、コンクリートの収縮作用により鋼管と内部のコンクリートとの付着が切れるまで、鋼管のひずみが収縮側へ大きく移行する結果となった。一方、収縮低減剤を併用した系では、材令の経過に伴う膨張率の低下割合が比較的小さくなる傾向が認められた。

外部への水分の逸散がない密封状態において、膨張率が材令の経過に伴って低下する現象に関しては、膨張セメントの膨張圧に及ぼす諸要因の影響について検討した小林らの研究[5]においても同様の報告がなされている。また、小林らは、乾湿条件による膨張圧の変化がエトリン

ガイトの生成量に起因することを実験的に明らかにし、このメカニズムに関しては、近藤ら[6]が指摘するように、乾燥によってエトリンガイトの結晶水の一部が失われることによるものと推察している。したがって、上記の現象は、クリープ効果だけでなく、エトリンガイトの生成量が経時的に減少したことに起因する可能性が極めて高いものと考えられる。ただし、これらについては今後さらに詳細に検討する必要がある。

4. まとめ

現在、乾燥収縮特性をはじめ耐久性に関する各種データを集積中であり、今後は、これらの結果も踏まえて、信頼性の高い逆打ちコンクリートの材料・配合を選定する予定である。本論文の範囲内で明らかになった事項を以下に示す。

- 1) 鉄筋が密に配置された状況下において、コンクリートの充填性を確保するためには、鉄筋のあきに対応した配合上の粗骨材量の限界値が存在する。最大寸法が20mmの骨材を用い、単位微粉末量 170 l/m^3 以上、スランプフロー55cm以上とした場合、あきが50×50mmの鉄筋メッシュを完全に通過させるための単位粗骨材容積の上限値は約 300 l/m^3 程度である。
- 2) 開口間隔や開口率を考慮した鉄筋メッシュ通過試験は、コンクリートの充填性の評価管理手法として十分に適用できる。
- 3) 逆打ち水平打継目の一体性を確保・向上させるためには、極く初期の収縮を補償する目的でA ℓ 粉末の使用が望ましい。
- 4) 収縮補償により打継目の付着を改善するためには、膨張材および収縮低減剤の併用が望ましい。ただし、この場合、外部への水分の逸散がない密封状態においても、材令の経過に伴って膨張率が低下する傾向が認められ、この点に関してはさらに検討する必要がある。

【謝辞】

本研究の実施にあたり、東京大学土木工学科岡村甫教授ならびに小沢一雅講師には多大なるご指導ならびにご助言を賜りました。ここに、深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 小沢一雅・前川宏一・岡村 甫：ハイパフォーマンスコンクリートの開発、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11-1、pp. 699-704、1989
- 2) 中島一夫・西崎丈能：液化天然ガスのPC製貯槽の開発、土木学会誌、Vol. 75、pp. 14-16、1990. 10
- 3) 近松竜一・竹田宣典・平田隆祥・十河茂幸：コンクリートの流下速度試験による打込みやすさの一評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13-1、pp. 887-892、1991
- 4) 辻幸和・落合光雄・武知勉：膨張コンクリートが外側に配置された鋼管に対してなす仕事量、セメント技術年報、Vol. 42、pp. 447-450、1988
- 5) 小林一輔・伊藤利治：膨張セメントの膨張圧に影響をおよぼす諸要因、土木学会論文報告集、Vol. 226、pp. 67-72、1974. 6
- 6) 近藤連一・中川晃次・磯貝純：セメント硬化体の細孔構造と水和膨張機構に関する考察、窯業協会誌、Vol. 77、pp. 238-248、1969