

PC 橋を対象とした高強度コンクリートの打上り面の表面仕上げ方法に関する検討

三井住友建設(株) 正会員 修士(工学) ○谷口 秀明
 三井住友建設(株) 正会員 博士(工学) 藤田 学

1. はじめに

高強度コンクリートは、土木、建築を問わず、様々な構造物の建設に使用されているが、コンクリートの条件や施工・供用環境の条件は対象構造物によって異なる点も多い。例えば、PC 橋ではプレストレス導入時の強度を確保するために早強ポルトランドセメントを使用することや、建築工事に比べて単位水量が少ない硬練りコンクリートを使用することが多い。また、建築物での適用の多くが柱部材で、コンクリート表面は意匠材等で被覆された状態であるのに対し、PC 橋では体積に比べて表面積が大きく、かつ打放し状態となる部材(床版等)にも使用するため、部材は打込み直後から長期にわたって環境変化の影響を受けやすい。ひび割れ等を抑制するためには、そのような特異性を十分に考慮した、適切な施工方法を事前に検討することが重要である。

筆者らは、PC 橋に使用される高強度コンクリートのブリーディングが極めて少なく、施工時のコンクリート表面からの水分の蒸発と相俟ってコンクリート表面の仕上げが難しいことに着目した。一般に、示方書¹⁾等の仕上げに関する記載は、ブリーディングが多い普通コンクリートを中心としている。また、2002年の示方書改訂により高強度コンクリートの仕上げ時に適量な水分を加えることが追記されたが、設計基準強度 60~100N/mm²程度を対象とし、PC 橋で多用される 40N/mm²程度の高強度コンクリートの仕上げ方法は依然として曖昧な状態である。このような状況から、表面仕上げを補助する材料(以下、仕上げ補助剤と称す)の使用も広まりつつあるが、その品質規格等は明確に定まっていないのが現状である。そこで、筆者らは、PC 橋を対象とし、仕上げ時期、施工環境の乾燥速度、仕上げ補助剤等が高強度コンクリートの品質に及ぼす影響について実験的な検討を行った。

2. 実験内容

2.1 コンクリートの条件

コンクリートの使用材料および配合を、表-1、表-2に示す。早強ポルトランドセメントを使用した、水セメント比 40%の配合 H40 を基準とし、単位粗骨材量(または単位モルタル量)を一定で、単位水量・単位セ

表-1 使用材料

材料名	種類	産地, 物性, 成分	密度	記号
水	水道水		1.00	W
セメント	早強ポルトランドセメント	比表面積4610cm ² /g	3.13	H
	普通ポルトランドセメント	比表面積3310cm ² /g	3.15	N
細骨材	川砂	鬼怒川産, 吸水率1.66%, F. M2. 71	2.58	S1
	砕砂	葛生産(硬質砂岩), 吸水率0.9%, F. M2. 96	2.64	S2
粗骨材	碎石2005	葛生産(硬質砂岩), 粒径判定実積率59.7%, F. M6. 66	2.65	G
化学混和剤	高性能 AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系と分子内架橋ポリマーの複合体(消泡タイプ)		SP
	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体		WAE
	AE剤	変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤		AE

(密度:単位: g/cm³, 骨材の値は表乾密度を指す)

表-2 コンクリートの配合

記号	目的	Cの種類	質量容積表示	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³ , リットル/m ³)							試験結果			
						W	C	S		G	air	種類		Cx(%)	スランプ(cm)	空気量(%)
								S1	S2							
H40	BASE	H	質量	40	170	425	341	348	1020			SP	0.70	10.5	4.0	
			容積		40.7	170	136	132	132	385	45					
H40 U	W, Cの増加	H	質量	40	185	463	307	312	1020			WA E	0.30	8.0	4.0	
			容積		38.1	185	148	119	118	385	45					
H40 D	W, Cの減少	H	質量	40	150	375	387	396	1020			SP	1.50	10~16*	4.7	
			容積		43.8	150	120	150	150	385	45					
H30	W/Cの低下	H	質量	30	150	500	335	343	1020			SP	1.50	17.0	4.1	
			容積		40.3	150	160	130	130	385	45					
H55	高W/C	H	質量	55	170	309	390	399	1020			SP	0.60	8.0	4.7	
			容積		44.0	170	98	151	151	385	45					
N40	基準の普通C	N	質量	40	170	425	343	348	1020			SP	0.45	12.0	4.6	
			容積		40.8	170	135	133	132	385	45					

*: 砂利っぽく、片崩れ等を示し、スランプは安定せず。

メント量、水セメント比およびセメントの種類を変化させた。スランブは8~12cm(水セメント比30%を除く)、空気量は4.5±0.5%の範囲で調整した。

2.2 実験方法

(1)コンクリートのフレッシュ性状

スランブ試験(JISA 1101)及び空気量試験(JISA 1128)により、コンクリートのフレッシュ性状を確認した。測定結果は、表-2に示すとおりである。コンクリートの練上り温度(棒状温度計で測定)は、18.0~20.5℃の範囲であった。また、打上り面の表面仕上げには、ブリーディング水や固まるまでの時期と関連があること¹⁾から、ブリーディング試験(JISA 1123)と凝結試験(JISA 1147)を行った。

(2)表面仕上げ方法に関する検討

表面仕上げ方法に関する実験には、既製のプラスチック製コンテナボックスを型枠の代わりに用いた。仕上げ面以外の乾燥及び熱の伝達を抑制し、また、できる限り外部拘束を受けない状態に得るため、型枠内側の側面と底面は断熱材及びビニル袋で覆った。試験体は、仕上げ方法の違いが確認できる範囲で、ブリーディング試験の容器に近い大きさを想定し、約0.35×0.35×0.25(m)とした。

本実験では、まず、表-2に示した6配合に対し、打込み直後に木コテによる荒仕上げと金コテによる平滑仕上げを行い、20℃、無風の養生室で存置させた場合のコンクリート打上り面の状態を観察した。その後、表-3、表-4に示した環境温度(温度センサによる測定)、風速(風速計による測定)、仕上げ時期及び仕上げ方法の条件で実験を行った。試験体と同じ場所には水を入れた皿(面積550cm²)を置き、水の蒸発量を測定することで乾燥条件を確認した。表-4に記載したFAとは仕上げ補助剤(パラフィン系)を指すが、本材料は仕上げ終了後のコンクリート面に対する表面養生剤としても使用されている。メーカ推奨値(標準量)150mL/m²を霧吹きを用いてコンクリート面に噴霧した。使用量は噴霧前後の質量変化で管理した。

(3)仕上げ補助剤の混入がモルタルの性状に及ぼす影響

コテや仕上げ機械での仕上げ方法が不適切な場合、仕上げ補助剤がコンクリート表面近くのモルタル(ペースト)に混入する可能性がある。また、均し面の凹凸、散布の不均一等により、仕上げ補助剤の塗布量は局所的には標準使用量よりも多い状態も考えられる。そこで、仕上げ補助剤のモルタルへの混入比率を0~10%の範囲で変化させ、仕上げ補助剤がモルタル中に混入した場合の影響を確認することとした。実験には、表-2に示した配合H40のコンクリートから粗骨材の容積を除いたモルタルを用いた。ただし、材料分離を考慮し、高性能AE減水剤の使用量を0.4%に減じた。仕上げ補助剤(FA)の添加量は、モルタルの1m³当りの計算に含めないこと(外割)とし、ミキサ内の練り上がったモルタルに仕上げ補助剤を後添加し、再度練混ぜを行った。比較として、仕上げ補助剤と同量の水(ΔW)を後添加した場合の影響も確認した。実験では、モルタルの空気量、ブリーディング量、凝結時間、圧縮強度(φ50×100mm、気中養生、材齢3,7,28日)及び収縮量を測定した。収縮量は、埋込みゲージ法(試験体寸法:100×100×400mm、気中養生)とコンタクトゲージ法(試験体寸法:40×40×160mm、打込み後湿潤養生、材齢1日以降気中養生)の2通りで測定した。

表-3 環境温度・風速と仕上げ時期の条件

条件名	配合名	仕上げ時の環境条件		仕上げ後翌日までの環境条件		打込み後の経過時間(h)	
		室温(℃)	風速(m/s)	室温(℃)	風速(m/s)	2回目	3回目
a	H40	20	0	20	0	2.5	5.0
	H40U	20	0	20	0	4.0	7.0
	H40D	20	0	20	0	3.0	6.0
	H30	20	0	20	0	1.0	3.0
b	H40	20	1	20	0	2.5	5.0
	H40U	20	1	20	0	4.0	7.0
c	H40	35	1.5	30	0	2.5	5.0
	H40U	35	1.5	30	0	4.0	7.0
d	H40	35	1.5	30	0	1.0	2.0
	H40U	35	1.5	30	0	2.0	3.5

表-4 仕上げ方法に関する条件

方法名	1回目(打込み終了直後)	2回目	3回目			
A	木コテ均し→金コテ均し	→	存置			
B	木コテ均し→FA塗布→金コテ均し	→	存置			
C	木コテ均し	→	金コテ均し	→	存置	
D	木コテ均し	→	FA塗布→金コテ均し	→	存置	
E	木コテ均し	→	金コテ均し	→	金コテ均し	→ 存置
F	木コテ均し	→	金コテ均し	→	FA塗布→金コテ均し	→ 存置
G	木コテ均し→FA塗布→金コテ均し	→	FA塗布→金コテ均し	→	FA塗布→金コテ均し	→ 存置

3. 実験結果および考察

3.1 ブリーディング性状及び凝結性状の把握

図-1は、コンクリートのブリーディング試験、並びに表-3に示した環境条件下で蒸発した水量(We)の結果である。なお、水の蒸発量に関する考察は3.2で記載する。使用したコンクリートのブリーディング量は、水セメント比が小さくなるほど少なくなり、30%では $0\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であった。また、H40とN40を比較すれば、PCで多用される早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートのブリーディング量が少なく、最終値は普通ポルトランドセメントを使用した場合の1/3未満であることがわかる。N40の値は水セメント比55%のH55と概ね一致している。単位水量が少なくなるほど、ブリーディング量も少ないが、初期段階ではH40とH40Uの大小関係が逆転している結果も見られる。

凝結時間は、H40, H30, H55とH40U, H40D, N40に大別され、前者は後者よりも1~2時間早い。ただし、今回の結果には使用した高性能AE減水剤の凝結遅延作用が小さいこと、H40, H55は高性能AE減水剤の標準使用量よりもやや少ない配合であることも影響している。H40はN40よりも高性能AE減水剤の使用量が0.25%多いにもかかわらず、凝結時間は1.5時間早くっており、早強ポルトランドセメント

の使用が凝結時間に及ぼす影響は大きい。

以上のように、PC橋で使用される早強ポルトランドセメントを使用した高強度コンクリートは、ブリーディングが極めて少なく、凝結硬化時間も早いという特徴がある。

3.2 仕上げ方法に関する検討

仕上げ方法に関する実験結果を、表-5

及び表-6に示す。表-5では、試験面の一部にコテ均しを行った状況も併記した。限られた実験で仕上げ方法の影響を定量的に評価することは難しいが、配合、乾燥、仕上げ方法、仕上げ補助剤の有無の影響が実験結果に現れていることがわかる。まず、表-5に示すように、打込み直後に仕上げを行って存置した場合には、示方書¹⁾に記載されるようにブリーディング水を除去しないと微細なひび割れを生じるだけでなく、形成さ

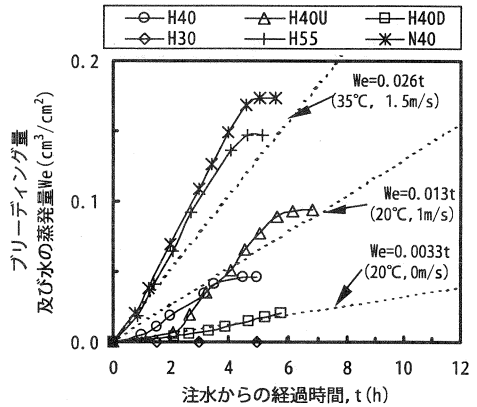


図-1 ブリーディング量及び水の蒸発量の測定結果

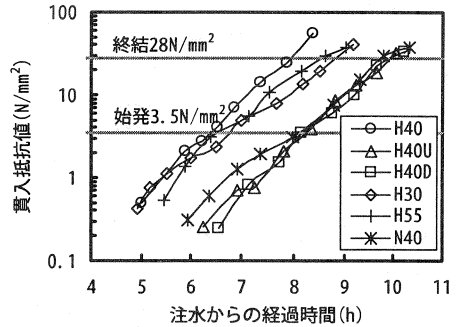


図-2 凝結試験の結果

表-5 打込み直後に仕上げを行った後、存置した場合のコンクリート表面状態の経時変化

配合名	経過時間 (h)	コンクリート表面の状態観察	配合名	経過時間 (h)	コンクリート表面の状態観察
H40	0.0	金ゴテ仕上げ。	H30	0.0	金ゴテ仕上げ。
	0.5	ひび割れ発生。		0.2	ひび割れ発生。
	1.0	ひび割れ幅0.2mm程度。		1.5	水の浮上がないので、コテで触れるとモルタルを引っ張り、ひび割れを多数発生。
	3.5	均し可能。		2.8	表面が乾燥し、白くなった。
	4.2	コテで触れると、表面の薄い膜がひび割れ。直下の水が浮き、均し可能。		24.0	0.2h時のひび割れが残存。剥離はなし。
H40U	5.0	均し可能な限界に近い。	H55	0.0	金ゴテ仕上げ
	24.0	0.5h時に発生ひび割れが残存。剥離はなし。		0.3	ひび割れ発生
	0.0	金ゴテ仕上げ。		0.5	コテで表面を触れると水が浮上。
	0.6	ひび割れ発生。		0.9	薄膜を乱した箇所に水溜まりを多量に発生。
	1.4	コテでならずと水が浮いてくる。		1.5	仕上げには水を除去が必要。
H40D	以降、同様		2.7	浮上した水で表面を被覆。	
	7.3	均し可能な限界に近い。	4.2	浮上した水でならし可能。	
	24.0	表面の薄膜がひび割れ、剥離を発生。	24.0	表面の薄膜がひび割れ、剥離を発生。	
	0.0	金ゴテ仕上げ。	N40	0.0	金ゴテ仕上げ。
	0.2	ひび割れ発生。		0.8	薄い膜を形成。
0.4	微細気泡が浮き、白い斑点模様 (過剰減水の影響)。	1.3		膜の小孔から多量の水が浮上。	
1.1	コテで触れるとモルタルが付着、均しにくい。	2.3		浮き水が多量。水の除去なしに均し不可能。	
2.1	均しは可能。	以降、同様			
2.3	最初ひび割れを発生、数回行えば均し可能。	H40D	24.0	表面の薄膜がひび割れ、剥離を発生。	
4.8	数回行えば均し可能。				
6.5	均し可能な限界に近い。				
24.0	発生した多量の気泡部分が細かく剥離。				

表-6 仕上げ方法に関する実験結果

配合	仕上げ、作業環境条件	仕上げ作業時の状況			打込み翌日の仕上げ状況
		1回目	2回目	3回目	
H40	A	0.5h後ひび割れ発生。			初期ひび割れ残存。
	B				
	C,D				
	E		金コテにペーストが付き、除去しないと平坦に均せない。	均し可能。	
	F			均せるが、コテが滑るので押えをしない。	
	G			FA、水、ペーストが混合。除去が必要。	
	H40 U	A	0.6h後ひび割れ発生。		
B					
C			コテ押え、均し可能。		
D			コテが滑るので押えをしない。		
E			コテ押え、均し可能。	均し可能。	
F				均せるが、コテが滑るので押えをしない。	
G			コテが滑るので押えをしない。	コテが滑りすぎてかえって均しにくい。	
H40 D	a	A	0.2h後ひび割れ発生。		気泡の膜が細かく剥離。
	B				
	C,D				
	E		均す回数を増やすほど水が浮いてくる。	かるうじてならし可能。	
	F			均せるが、コテが滑るので押えをしない。	
	G			FA、水、ペーストが混合。除去が必要。	
	H30	A	0.2h後ひび割れ発生。		
B					
C			タンピング必要。過剰に行くとコテに粘り着く。完全な均しは不可能。		
D			均すことが可能。		
E			タンピング必要。過剰に行くとコテに粘り着く。完全な均しは不可能。	均し不可能。	
F				コテは滑るが、表面を引っ張り、ひび割れる。多少のタンピングが必要。	
G			均すことが可能。	均すことが可能。	
H55	A	0.3h後ひび割れ発生。			表層のひび割れ、剥離。
H40	A				表層のひび割れ、剥離。
	B				
	C,E,F		表面が完全に乾燥し、入念なタンピングを行わないと均せない。		
	D		表面を滑るが、乾燥しているためひび割れ発生。タンピングが必要。		
	G		均すことが可能。		
H40 U	B				
	C,D,E,F		均すことが可能。		
H40	G		表面がひび割れ、水が浮上。コテが滑りすぎて均しにくい。	均し可能。	
	A				ひび割れ発生。 ひび割れ発生。
	B				
	C				
	D		均し時にひび割れ発生。強引なタンピングで中央部のみ均し可能。		
	E,F			強引なタンピングで中央部のみ均し可能。	
	G		タンピングなしで均し可能。	コテが表面を滑り、ペーストが剥離。FAとペーストの混合物を表面に塗り込む感覚。	
H40 U	A				
	B	1.5h後ひび割れ発生。			
	C,D		均し時にひび割れを発生。強引なタンピングで均し可能。		
	E,F			均し不可能。	
	G		タンピング無しで均し可能。		
H40	C		均し時にひび割れを発生。入念なタンピングで均し可能。		ひび割れ発生。
	D		数回のタンピングで均し可能。		
	E		均し時にひび割れを発生。入念なタンピングで均し可能。	入念なタンピングで均し可能。	
	F		均し時にひび割れを発生。入念なタンピングで均し可能。		
	G		タンピング無しで均し可能。	タンピング無しで均し可能。	
H40 U	C		均し時にひび割れを発生。入念なタンピングで均し可能。		
	D		数回のタンピングで均し可能。		
	E,F		均し時にひび割れを発生。入念なタンピングで均し可能。		
	G		タンピング無しで均し可能。		

れた脆弱な膜が、打込み翌日に剥離する現象が見られた。また、同示方書では、ブリーディング水が消失する頃に乾燥等でひび割れを生じやすいとしているが、ブリーディング水が発生していない、もしくは極めて少ないH30等では、20℃、60%、無風の条件でも、打込み後から短時間でひび割れを生じ、硬化後も残存しており、PC用高強度コンクリートでは打込み直後から水分蒸発の影響を考慮する必要がある。

仕上げ方法A以外でひび割れを生じた条件とひび割れ時期を表-6より抜粋すると、H40U-a-B,C(翌日)、H40-c-B,D(翌日)、H40U-c-B(1.5h後)、H40-d-G(翌日)の6条件である。H40U-a-B,Cの結果より、20℃、60%、無風の条件下では最終ブリーディング量の1/2段階で仕上げを終えると、その後のブリーディング水がひび割れの発生に影響する。ただし、H40U-a-Dの条件でひび割れを生じていないことから、その時点での仕上げ補助剤の使用がひび割れ抑制に何らかの効果を与えているようである。他の条件はいずれも35℃、風速1.5m/sの環境で、かつ、仕上げ補助剤を使用したものである。すなわち、コンクリート内部のブリーディングが終了していない状態で仕上り面のみの乾燥が促進された場合に、仕上げ補助剤を使用すると、仕上り面にひび割れを発生する可能性が高いと言える。

戸川ら²⁾、ACI302³⁾の床版の施工に対する見解によれば、1時間当たりの蒸発量が $1.0\text{kg/m}^2 (=0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2)$ 程度になると、初期収縮ひび割れを発生する危険性が高くなるとしている。ACI305⁴⁾に掲載された蒸発量の換算図表で計算すると、その量は、気温20℃、湿度50%で風速6m/sの強風を与えた場合に相当する。今回の実験で与えた乾燥条件に伴う蒸発量は、図-1中の点線が示すように既往の見解の値よりも遙かに少ないにもかかわらず、仕上り面にひび割れを発生した。すなわち、既往の見解は、ブリーディングが多い普通コンクリートの目安を示すものであって、使用するコンクリートのブリーディング量と乾燥条件によってひび割れを発生する危険が高くなる蒸発量は異なるものと考えられる。今回の実験では、20℃、無風の条件で配合H40D及びH40Uの2時間まで、20℃、風速1m/sの条件で配合H40、H40U、30℃、風速1.5m/sの条件では配合H55、N40のブリーディング量の変化が蒸発量とほぼ一致している。

示方書¹⁾では設計基準強度60~100N/mm²程度の高強度コンクリートには乾燥の防止とともに適量の水分供給を記載している。今回の実験結果によれば、60N/mm²未満の高強度コンクリートについても、ブリーディング量と蒸発量の関係から判断し、同様な対策の実施を検討する必要がある。また、ブリーディング水が極めて少ない場合には仕上げ補助剤が必要になる場合もあるが、表-6のとおり、滑りが良すぎて押さえ作業が不十分になりがちであることや、水、ペーストの混合物が表面に蓄積すること等にも注意する必要がある。

3.3 仕上げ補助剤の混入がモルタルの物性に及ぼす影響

図-3及び図-4は、仕上げ補助剤の混入がモルタルのブリーディング量及び凝結時間に及ぼす影響を示したものである。図中には参考としてコンクリートの結果(Con)、

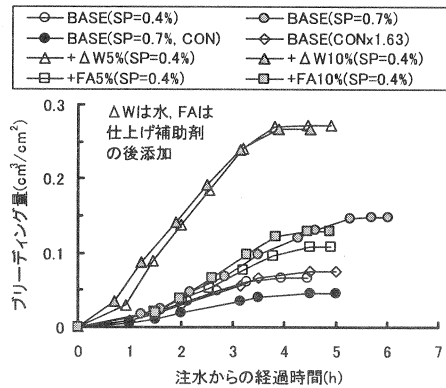


図-3 仕上げ補助剤の混入がブリーディング量に及ぼす影響

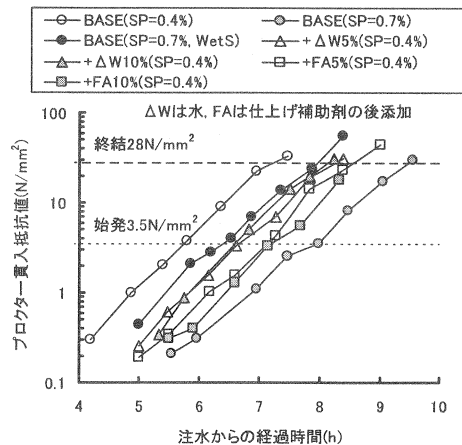


図-4 仕上げ補助剤の混入が凝結時間に及ぼす影響

粗骨材量の比率で割増したもの(Con×1.63), 並びにウェットスクリーニングモルタルの結果(WetS)を示した。仕上げ補助剤の混入(FA)により, 最終ブリーディング量は2倍程度に増加し, BASEの高性能AE減水剤使用量を0.7%とした状態に近いが, 水の添加(ΔW)とは大幅に異なる。凝結時間についても仕上げ補助剤の混入によって約1時間の遅延傾向があるが, 水の添加よりは凝結時間への影響は小さい。

しかし, 圧縮強度に関しては, 図-5に示すとおり, 混入比率5%では水の添加と同等, 混入比率10%の場合では空気量の変化も考慮すると, 水の添加よりも影響は小さいものの, 仕上げ補助剤の混入によって明確に低下を生じている。そのため, コンクリート(表層のモルタル)中に仕上げ補助剤を練り込まないように仕上げを行う必要がある。一方, 自己収縮を含む乾燥収縮ひずみは, 図-6に示すとおり, 測定方法によって多少異なる結果が見られるが, 圧縮強度の結果とは異なり, 少なくとも仕上げ補助剤の混入による収縮量の増加はなく, 埋込みゲージ法の材齢14日では 200×10^{-6} 程度低減されている。ただし, 仕上り面のひび割れを抑制するためには, モルタルの収縮量は仕上げ補助剤の混入の有無に関わらず, 極めて大きいことから, 仕上り面近くにモルタル層を形成するような施工方法(過剰な締めめや仕上げ等)を行わないことが重要である。

4. おわりに

PC橋を対象にした高強度コンクリートの表面仕上げ方法に関する実験結果から, 以下のことが言える。

- (1) 早強ポルトランドセメントを使用した高強度コンクリートは, ブリーディングが極めて少ない。そのため, 一般のコンクリートの表面仕上げよりも, ブリーディング量と乾燥に伴う蒸発量に配慮した施工を行う必要がある。
- (2) 水の蒸発量がコンクリートのブリーディング量に比べて多い場合には, 仕上げ補助剤の使用によって仕上がり面のひび割れの発生を助長する可能性がある。
- (3) 仕上げ補助剤の混入により, ブリーディング量の増加, 凝結時間の遅延及び圧縮強度の低下を生じる。収縮量は, 混入によって初期材齢では若干小さくなる場合があるが, 長期的には差異は認められない。

参考文献

- 1) 土木学会: コンクリート標準示方書, 施工編, 2002.
- 2) 戸川他: コンクリートの初期収縮ひび割れと水分蒸発速度との関係, セメント技術年報, 28, pp.314-317, 1974.
- 3) ACI 302.1R-96: Guide for Concrete Floor and Slab Construction.
- 4) ACI 305R-99: Hot Weather Concreting.

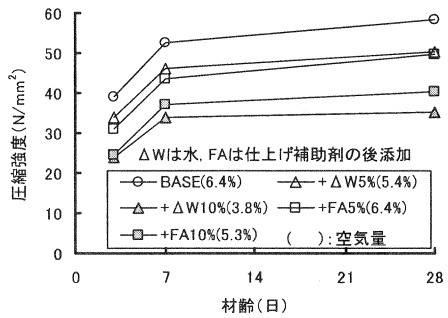


図-5 仕上げ補助剤の混入が圧縮強度に及ぼす影響

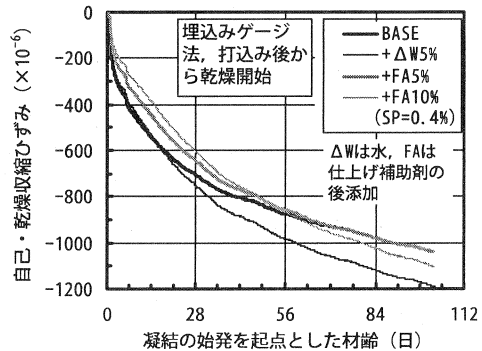
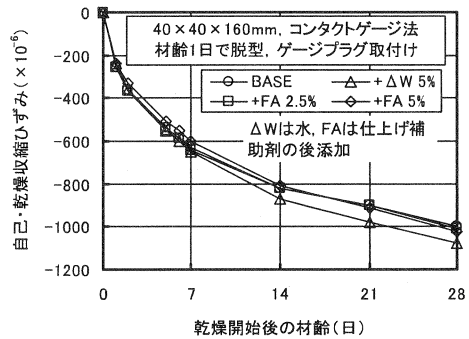


図-6 仕上げ補助剤の混入が収縮量に及ぼす影響