

報告 スリップフォーム工法適用のためのコンクリートの若材齢強度の制御に関する検討

谷口 修*1・正木 徹*2・水野 剣一*3・阿部 哲良*4

要旨：スリップフォーム工法の型枠脱型時の強度を制御するために気温変動に伴うコンクリートの若材齢強度について検討を行った。混和剤に AE 減水剤のみを使用した場合には気温が高くなるほど強度発現は早くなる傾向にあるが AE 減水剤の添加量やセメントの製造ロットによっても強度発現が影響を受けることが示唆された。硬化促進剤や遅延剤を使用することで若材齢強度発現時間を制御することが可能であるが、配合によってその時間は異なる。圧縮強度 0.1N/mm^2 とブロッカー貫入抵抗の 3.5N/mm^2 は同等とみなすことができる。

キーワード：スリップフォーム、若材齢強度、硬化促進剤、遅延剤

1. はじめに

スリップフォーム工法は、急速施工の代表的な工法であり、煙突や PC タンクなどの搭状構造物に数多く適用されている。港湾施設のケーソン構築に使用された事例は海外ではシンガポールなどで多数の事例が存在するが、国内では白島石油備蓄基地での 1 例のみと推察される。

本検討では、スリップフォーム工法によるケーソンを急速施工するためにコンクリートの若材齢強度把握の基礎検討を行ったものである。

ケーソン製作でのスリップフォーム適用事例の多いシンガポールでは、年間を通して気温が 30°C 前後で一定であることからコンクリートの若材齢強度の発現は 1 年を通して大きな変化がないが、国内で比較的温暖な地域とされるケーソン製作予定地の鹿児島においても、1 日の最高気温と最低気温の差が 10°C 以上となる日数は 2021 年には 81 日となるなど気温の変動が比較的大きい傾向が見られる（図-1）。特に 11 月～3 月の冬場ではその発生頻度が多い。そのため、環境温度によるコンクリート脱枠時の強度の管理が重要となり、気温変化にともなう強度発現時間の制御が必要となる。

そこで本検討では通年施工で 7 か所のプラントの使用が想定されたことから、セメントや骨材が異なる場合や減水剤の添加量、遅延剤・硬化促進剤の添加量に伴う若材齢強度発現性状について検討したものである。

2. 既往の事例

白島洋上石油基地における事例では、高炉 B 種セメントを使用して水セメント比 51%、スランプ 12cm のコンクリートを使用しているが、遅延剤や硬化促進剤などの添加剤は使用されていなかった¹⁾。

ケーソン以外では、PC タンクや煙突などの施工にスリ

ップフォーム工法が多数適用されており、大西ら²⁾は PC 防液堤にスリップフォーム工法を適用するために 30-50-20BB のコンクリートについて材齢 12 時間で 0.1N/mm^2 程度の強度について遅延剤の添加量の検討を行っている。既往の検討事例の配合は高強度化、高流動化されたものが多く、一般的な土木構造物に適用される呼び強度 30N/mm^2 の配合とは異なる。

3. 実験概要

3.1 要求性能

ケーソンに使用するコンクリートの仕様は 30-12-20BB であり、運搬・施工時のスランプロス 2cm を加えてスランプは $14\text{cm}\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5\pm 1.5\%$ を目標として配合を定めた。

若材齢強度の発現は、練り混ぜから 5.5～7.5 時間後には脱型に必要な $0.06\sim 0.1\text{N/mm}^2$ を確保する必要がある。

3.2 検討概要

標準期 (20°C)、夏期 (30°C)、冬期 (10°C) 環境下における若材齢強度を把握するためにコンクリートの練り

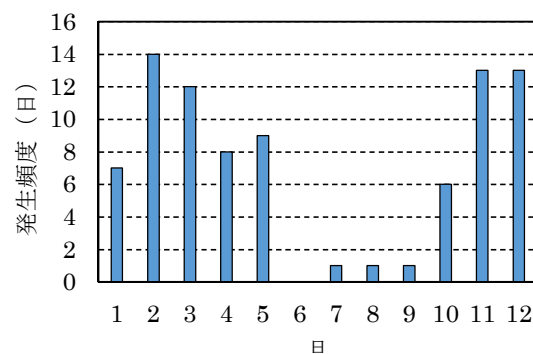


図-1 気温差 10°C 以上の発生日数
(鹿児島市, 2021 年)

*1 五洋建設株式会社 九州支店 南九州建設事業所 専門所長 博士 (工) (正会員)
 *2 五洋建設株式会社 技術研究所 (正会員)
 *3 五洋建設株式会社 技術研究所 係長 修士 (工) (正会員)
 *4 五洋建設株式会社 九州支店 南九州建設事業所 建設部長 修士 (工)

表－2 使用材料一覧

		プラント種別						
	記号	A	B	C	D	E	F	G
セメント 高炉 B 種	C	H 社 3.04g/cm ³	I 社 3.02 g/cm ³	H 社 3.04 g/cm ³	J 社 3.04g/cm ³	K 社 3.04g/cm ³	H 社 3.04g/cm ³	J 社 3.04g/cm ³
細骨材	S1	海砂 阿久根市 2.56g/cm ³	海砂 錦江町 2.56g/cm ³	海砂 指宿市 2.58g/cm ³	砕砂 大分県 津久見市 2.67g/cm ³	海砂 阿久根市 2.55g/cm ³	海砂 指宿市 2.59g/cm ³	海砂 指宿市 2.53g/cm ³
		砕砂 鹿児島市 喜入瀬々 串町 2.63g/cm ³	砕砂 南九州市 川辺町 2.63g/cm ³	砕砂 南九州市 川辺町 2.65g/cm ³	砕砂 日置市 吹上町 2.62g/cm ³	砕砂 大分県 津久見市 2.64g/cm ³	砕砂 南さつま 市 2.58g/cm ³	砕砂 鹿児島市喜入 瀬々串町 2.58g/cm ³
	S2	—	—	—	—	砕砂 南九州市 川辺町 2.68 g/cm ³	—	—
		—	—	—	—	—	—	—
	S3	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—
粗骨材	G1	石灰石 大分県 津久見市 2.70g/cm ³	石灰石 大分県 津久見市 2.70g/cm ³	砕石 20-15 南九州市 川辺町 2.68g/cm ³	砕石 日置市 吹上町 2.64g/cm ³	石灰石 大分県 津久見市 2.70g/cm ³	砕石 南九州市 川辺町 2.65g/cm ³	砕石 鹿児島市喜入 瀬々串町 2.68g/cm ³
	G2	—	—	砕石 15-5 南九州市 川辺町 2.68g/cm ³	石灰石 大分県 津久見市 2.70g/cm ³	砕石 鹿児島市 下福元町 2.64 g/cm ³	—	—
AE 標準型	A	L	M	L	L	N	N	N
減水剤 遅延型	AR	LR	MR	LR	LR	NR	NR	NR
硬化促進剤	AF	P	P	P	P	Q	Q	Q
遅延剤	R	S	S	S	S	T	T	T

L: リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体, M: リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体, N: リグニン酸化合物とオキシカルボン酸塩とポリカルボン酸系化合物の複合体

P: 無機系窒素化合物 (亜硝酸塩, 硝酸塩), Q: 亜硝酸化合物, S: オキシカルボン酸化合物と変性リグニンスルホン酸化合物との複合体, T: オキシカルボン酸塩

表－1 試験ケース

混ぜ、フレッシュ試験および若材齢圧縮強度の試験は雰囲気温度 10℃, 20℃, 30℃環境下で実施した。

検討ケースを表－1 に示す。混和剤として AE 減水剤 (以下主剤と称す) のみを使用した場合の 10℃, 20℃, 30℃環境下での若材齢強度の発現の検討を行った。さらに 20℃環境では主剤の添加量のみが異なる場合とセメントの製造ロットが異なる場合についても検討した。

30℃環境下では標準型または遅延型の主剤に遅延剤を併用した場合について検討を行った。

10℃環境下では練り混ぜ後 5.5～7.5 時間後には脱型強度 0.06～0.1N/mm² を確保するためには、硬化促進剤を添加する必要がある、それらの検討を行った。

3.3 使用材料および配合

検討対象とした 7 つのプラント (A～G) のコンクリートの使用材料を表－2 に示す。セメントは 4 つの異なる製造者の高炉 B 種である。骨材は各プラントで使用されているものを使用し、細骨材は海砂と砕砂の組み合わせが多く、各プラントで異なる産地のものを使用している。粗骨材は石灰石や砕石を使用している。

主剤は銘柄の異なる 3 種類 (L, M, N) を使用し、標準型の使用を基本として 30℃環境では比較のために遅延タイプのものを検討した。硬化促進剤は銘柄の異なる 2 種類を使用し、窒素化合物と亜硝酸系のものである。

	環境	配合条件		
	温度	AE 減水剤	追加混和剤	
1	20℃ (標準期)	標準型	—	—
2	30℃ (夏期)		—	—
3			遅延剤	添加率 1
4			遅延剤	添加率 2
5		遅延型	—	—
6	遅延剤		添加率 1	
7	遅延剤		添加率 2	
8	10℃ (冬期)	標準型	—	—
9			硬化促進剤	添加率 3
10			硬化促進剤	添加率 4

遅延剤・硬化促進剤の添加率は以下を目安に設定した。
 添加率 1 は 0.1N/mm² の発現が 8 時間程度を目標
 添加率 2 は 0.1N/mm² の発現が 6 時間程度を目標
 添加率 3 は 0.1N/mm² の発現が 7 時間程度を目標
 添加率 4 は 0.1N/mm² の発現が 5 時間程度を目標

遅延剤は 2 種類を使用した。いずれも JIS A 6204 に適合するものである。

各プラントのコンクリートの配合を表－3 に示す。水セメント比は 48～49.7%, 単位水量は 170～175kg/m³ とした。AE 減水剤の添加率を表－4 に示す。セメント重量%で表示しており、10℃, 20℃, 30℃環境でスランプの状態が異なるため AE 減水剤の添加量によって調整を行った。

表-3 配合一覧

プラント 種別	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			水 W	セメント C	細骨材 S1	細骨材 S2	細骨材 S3	粗骨材 G1	粗骨材 G2
A	49.7	39.8	170	343	446	247	—	1094	—
B	48.7	45.3	172	353	540	239	—	983	—
C	48.8	44.3	175	359	529	233	—	443	542
D	48.5	46.1	172	355	206	603	—	285	678
E	48.0	41.3	170	354	352	145	222	691	364
F	48.4	42.4	175	361	510	217	—	1010	—
G	49.0	42.8	175	357	373	365	—	1001	—

表-4 AE 減水剤の使用量

	標準型		
	10℃	20℃	30℃
A	0.9	1.0	1.05
B	0.65	0.8	0.9
C	0.7	1.0	1.0
D	0.9	0.85	1.1
E	0.5	0.8	1.0
F	0.8	1.1	1.35
G	0.95	1.3	1.45

単位：セメント重量%

表-5 スランプ

	標準型		
	10℃	20℃	30℃
A	14.5	15.0	14.5
B	14.5	14.5	14.5
C	15.0	14.5	13.0
D	13.5	14.5	13.0
E	14.1	16.0	16.2
F	15.5	12.8	14.6
G	16.2	14.7	13.5

単位：cm

表-6 空気量

	標準型		
	10℃	20℃	30℃
A	5.0	4.6	4.9
B	5.0	4.9	4.9
C	5.7	4.8	5.0
D	5.0	5.4	5.0
E	4.9	5.4	4.3
F	4.6	3.8	3.5
G	5.0	4.4	4.0

単位：%

練混ぜは2軸強制練りミキサ（55L）を用い、モルタル先練り 30 秒、粗骨材投入後 60 秒間練混ぜて排出した。

3.4 試験項目

フレッシュ性状を把握するためにスランプ、空気量、コンクリート温度を測定した。若材齢用の強度試験は土質用の強度試験機を使用した。また、圧縮強度との比較のためにプロクター貫入抵抗試験も実施した。

4. AE 減水剤のみを使用した場合

4.1 フレッシュ性状

各プラント（A～G）の表-3、表-4 に示す配合の 10℃、20℃、30℃環境におけるスランプを表-5、空気量を表-6 に示す。スランプ、空気量ともにプラントごとのばらつきはあるが、管理値としていた 14cm±2.5cm、4.5%±1.5%以内を満足している。

4.2 若材齢強度

10℃、20℃、30℃環境における若材齢強度の測定結果を図-2 に示す。0.1N/mm²に達する材齢は、30℃環境で材齢 4 時間～7 時間、20℃環境では材齢 6 時間～9 時間、10℃環境では 9 時間以上となっており、気温が低くなるにしたがって強度発現は遅くなる傾向にある。セメントや骨材産地、混和剤の相違によってプラントごとの強度発現性状は大きく異なっているが、30℃環境においては AE 減水剤の添加率が大きいプラント F と G の強度発現が特に遅い傾向が見られた。

4.3 混和剤の添加量による若材齢強度への影響

図-3 は、プラント A、D、F の配合での 20℃環境において主剤の添加率のみを変えた配合の若材齢強度を比較したものである。プラント A の配合は、0.1%の添加量の

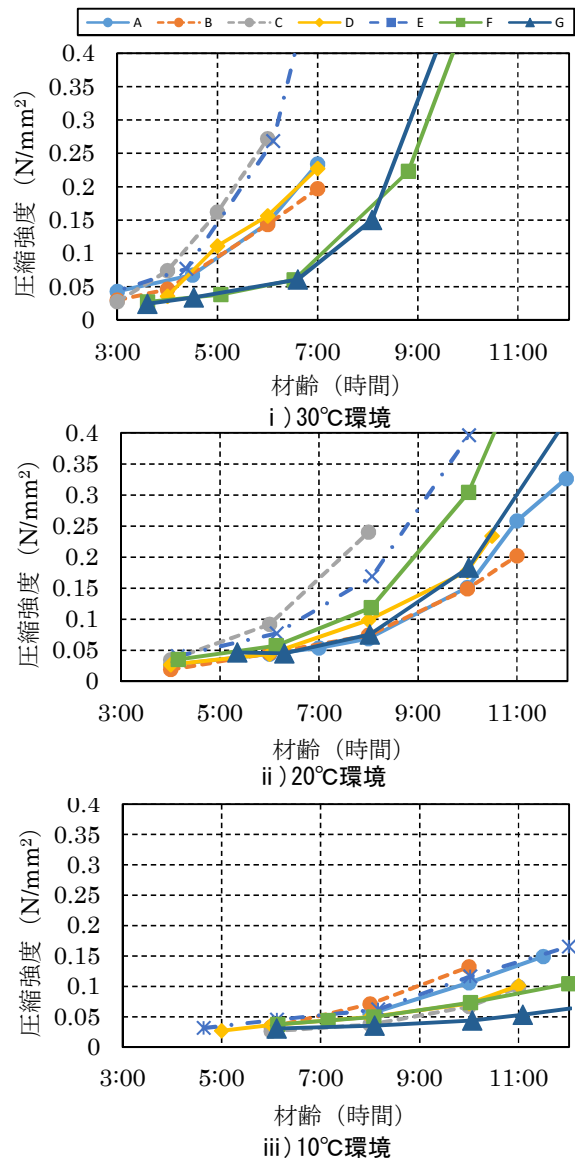
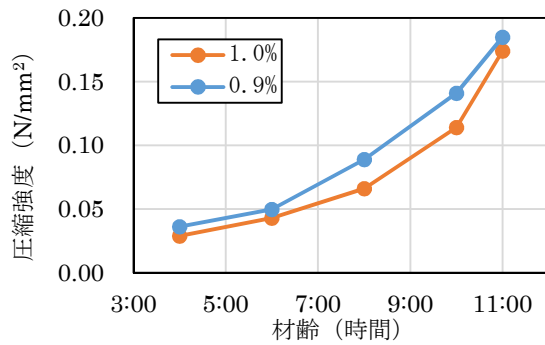


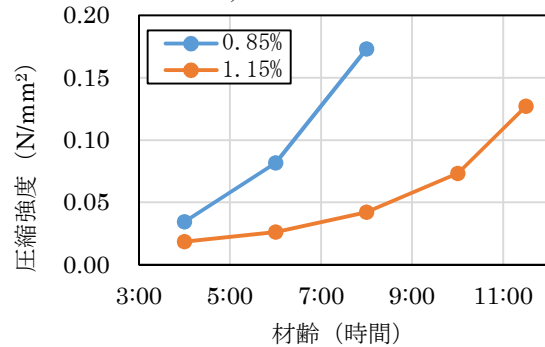
図-2 10℃、20℃、30℃環境での若材齢強度

違いではあるが、0.1N/mm²に達する時間は約 45 分程度の差異が生じている。プラント D の配合は、0.3%の増加により 0.1N/mm²に達する時間は 4 時間以上の遅延が見られた。

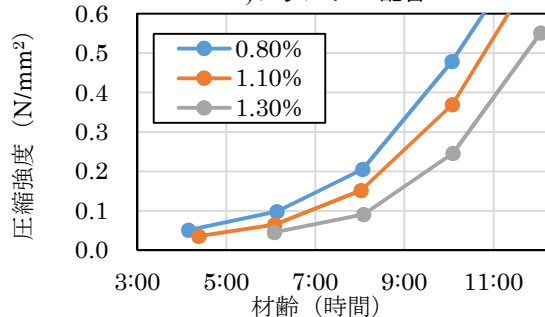
配合 F は 0.5%の違いで約 2 時間程度の差異が生じている。配合 A、D の主剤は同一のものであり、F は異なるものである。それらの要因やセメントの製造者が異なることで強度発現時間は大きく異なり、添加量と強度発



1) プラント A 配合



2) プラント D 配合



3) プラント F 配合

図-3 主剤の添加量と強度発現時間の関係

現時間の関係性がみられないが、いずれも AE 減水剤の添加率を増加させることで若材齢強度の発現が遅くなる傾向が見られる。

4.4 積算温度

積算温度は、以下の式を用いて算定した。

$$M = \sum \theta \cdot \Delta t \quad (1)$$

ここで θ : Δt 時間中のコンクリート温度(°C), Δt : 時間
図-4 はプラント A 配合の積算温度と若材齢強度の関係を示したものである。20°C と 30°C 環境は同様の傾向を示しているが、10°C 環境のみ強度発現が早い傾向が見られ、他のプラント配合でも同様の傾向が見られた。この理由は明確に示すことができないが、環境気温が低いほど表-4 に示す混和剤の添加量が少ないため、上述したように混和剤の影響によりこのような傾向が現れたものと考えられる。

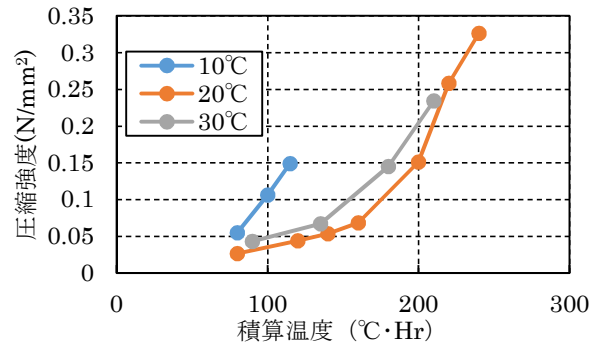


図-4 積算温度と圧縮強度の関係
(プラント A 配合)

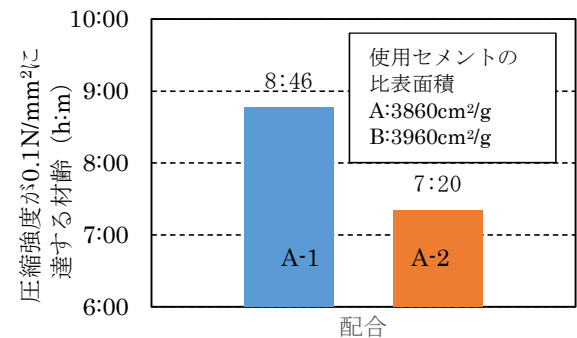


図-5 圧縮強度 0.1N/mm² に達する材齢の違い
(プラント A 配合, 20°C 環境)

4.5 セメント製造ロットの影響

図-5 は、プラント A 配合の 20°C 環境下での 0.1N/mm² に達する材齢を示したものであり、主剤の添加量等の配合は同一でセメントの製造ロットのみが異なるものである。この場合では、セメントの製造ロットが異なることで若材齢強度 0.1N/mm² 達する時間が 1 時間半程度異なる結果となった。

本検討では高炉 B 種セメントを使用しており、セメントの比表面積等の違いから差異が生じた可能性が考えられる。これらの結果より若材齢強度の発現は、主剤の添加量の他にセメントの違いによっても影響を受けることが考えられる。

5. 10°C 環境における硬化促進剤の効果の検討

5.1 検討概要とフレッシュ性

10°C 環境と 20°C 環境では 5.5~7.5 時間で脱型強度 0.06~0.1N/mm² を確保することが難しいため、硬化促進剤の使用について検討を実施した。

AE 減水剤の使用割合と硬化促進剤の使用割合、測定したスランプ、空気量の結果を表-7 に示す。主剤のみの添加率は表-4 と同一である。

5.2 若材齢強度

図-6 は、10°C 環境におけるプラント配合 A~G の 0.1N/mm² の発現時間と硬化促進剤の添加量の関係を示したものである。実線は硬化促進剤 P、点線は硬化促進剤 Q を示している。いずれのケースでも使用量 3 L

表-7 硬化促進剤の使用量と性状

プラント	AE 減水剤 (C×%)	硬化促進剤 (L/C =100kg)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コン温度 (°C)
A	0.9	0	14.5	5.0	10
		2	15.0	5.5	10
		4	15.0	5.2	10
B	0.65	0	14.5	5.0	10
		2	14.5	5.5	10
		4	14.0	5.2	10
C	0.9	0	15.0	5.7	10
		3	14.5	5.5	10
		5	13.5	5.0	10
D	0.9	0	13.5	5.0	10
		2	13.5	5.0	10
		4	13.5	4.8	10
E	0.5	0	14.1	4.9	9
		3	16.0	5.1	9
		5	17.2	5.1	9
F	0.8	0	15.5	4.6	9
		1	16.2	5.2	9
		2	15.9	5.3	9
G	0.95	0	13.5	5.0	9
		3	16.2	5.1	9
		6	15.2	5.5	9

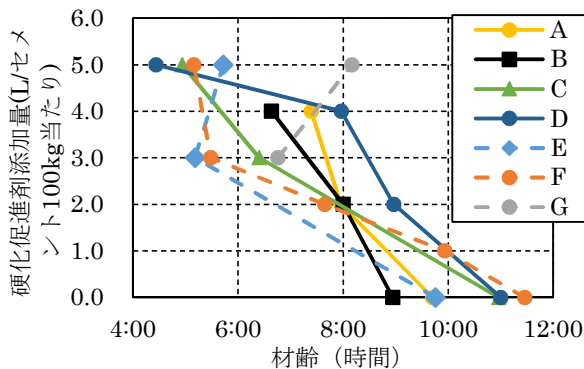


図-6 0.1N/mm²の発現時間と硬化促進剤の添加量の関係 (10°C環境, プラント A-G 配合)

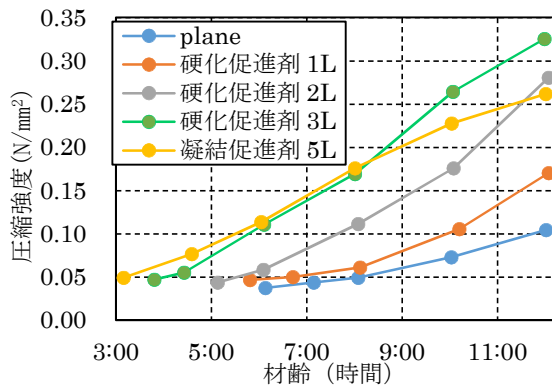


図-7 硬化促進剤の添加量の違い (配合 F)

(L/C=100kg) までは添加量を増やすほど若材齢強度の発現は早くなる傾向がみられるが、硬化促進剤 Q は添加量が 3L を超えると硬化促進の効果が見られないケースも発生している。また同一のセメント、AE 減水硬化促進

表-8 遅延剤の使用量とフレッシュ性状

プラント	AE 減水剤		遅延剤		スランプ (cm)	空気 量 (%)	コン 温度 (℃)
	種別	添加量 (C×%)	種別	添加量 (C×%)			
A	標準型	1.05	S	—	14.5	4.9	31
		0.9		0.20	14.5	5.2	31
		0.8		0.40	14.5	4.3	31
	遅延型	1.05		—	14.5	4.5	31
		0.9		0.15	14.5	4.0	31
		0.8		0.30	15.0	4.0	31
B	標準型	0.9		—	14.5	4.9	31
		0.7		0.20	14.5	5.2	31
		0.6		0.30	14.5	4.3	31
	遅延型	0.95		—	13.5	5.0	31
		0.85		0.10	14.5	5.0	31
		0.8		0.15	15.0	5.0	31
C	標準型	1.0		—	14.0	5.8	30
		0.85		0.15	14.0	5.3	30
		0.75		0.25	14.0	5.3	30
	遅延型	1.0		—	14.5	5.2	31
		0.9		0.10	15.5	5.0	31
		0.8		0.15	14.5	5.8	31
D	標準型	1.1		—	13.0	5.0	30
		0.95		0.25	14.0	5.8	30
		0.85		0.45	14.0	5.3	30
	遅延型	1.1		—	14.0	4.5	31
		0.9		0.15	14.5	5.2	31
		0.8		0.30	14.5	5.1	31
E	標準型	1.0	T	—	16.2	4.3	32
		0.035		18.0	4.0	31	
		0.07		18.5	4.4	31	
	遅延型	0.95		—	16.0	4.6	31
		0.025		17.6	4.3	32	
		0.05		18.2	4.3	32	
F	標準型	1.35		—	14.6	3.5	31
		0.035		15.0	4.3	32	
		0.07		16.4	4.1	32	
	遅延型	1.25		—	14.3	4.6	32
		0.025		15.6	4.5	31	
		0.05		15.8	4.2	31	
G	標準型	1.45		—	16.2	4.0	30
		0.035		16.9	4.4	31	
		0.07		17.2	4.0	31	
	遅延型	1.35		—	15.3	5.4	30
		0.025		15.9	4.8	30	
		0.05		16.5	4.9	30	

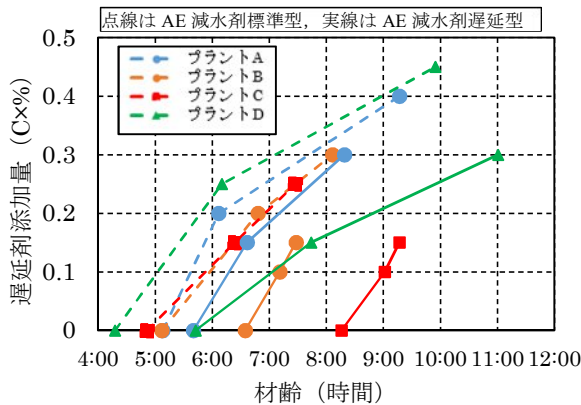
剤を使用した配合 A と C を比較するとその特性は大きく異なっている。この原因として配合 C の単位セメント量が 16kg/m³ 多く、硬化促進剤の効果が現れやすいと考えられる。

図-7 は、配合 F における硬化促進剤の添加量ごとの材齢と圧縮強度の関係を示したものである。3L までは硬化促進剤の添加量が増えるほど強度の発現が早い傾向を示す。添加量が多くなる 3L と 5L ではその促進状況が逆転している箇所も見られ、図-6, 7 の結果から本実験の範囲内では硬化促進剤 Q は添加量 3L が硬化促進効果の上限であると考えられる。

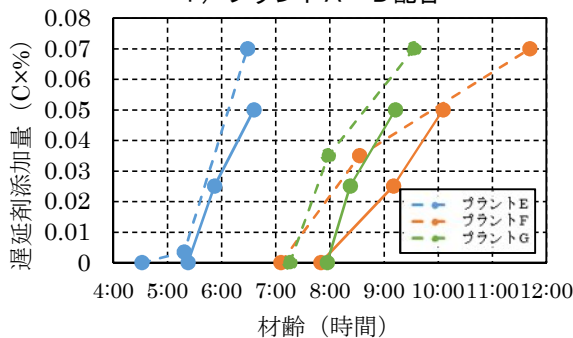
6. 30°C環境における遅延剤の効果の検討

6.1 検討概要とフレッシュ性状

AE 減水剤の使用割合と遅延剤の使用割合、測定したスランプ、空気量の結果を表-8 に示す。主剤のみの添加



1) プラントA～D配合



2) プラントE～G配合

図-8 0.1N/mm²に達する材齢と遅延剤添加 (30℃環境)

率は表-4 と同一である。遅延剤の添加量は表-1 に示すように各プラント2水準として設定した。使用した遅延剤は減水効果も有することからA～D配合は主剤の添加量を減らすことでスランプの増減を無くすようにし、E～G配合では単に遅延剤の添加量を増加させた。

遅延剤は、硬化促進剤に比べ極微量で凝結遅延効果を発揮し、特に遅延剤Tは遅延剤Sに比べ約1/10の添加量で同様の効果を発揮している。

6.2 若材齢強度

図-8は30℃環境下における0.1N/mm²に達する材齢と遅延剤添加量を示しており、点線がAE減水剤標準型、実線がAE減水剤遅延型を併用したものである。上述の結果と同様にプラントごとで強度発現時間は異なっているが、それぞれの傾きは同様の傾向を示しており、添加量による効果は配合が異なっても同程度であると言える。また、AE減水剤遅延型を使用することで標準型に比べ概ね1時間程度強度発現が遅くなっている。

7. プロクター貫入試験と若材齢強度

図-9は凝結の始発となる貫入抵抗3.5N/mm²が測定された材齢と若材齢強度0.1N/mm²が測定された時刻をプロットしたものである。これは72ケースの結果をプロットしたものである。この関係から始発時間と若材齢

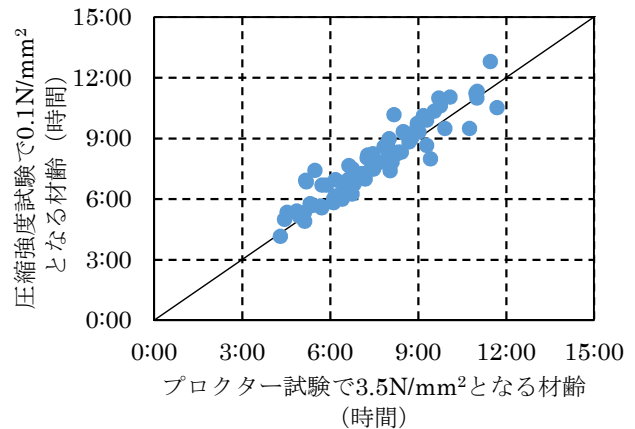


図-9 プロクター貫入試験と圧縮強度の関係

強度0.1N/mm²は同等とみなすことができると考える。

若材齢強度の把握に圧縮強度試験を実施する場合にはテストピースの作成や試験の実施などで手間がかかるが、貫入抵抗試験で強度を把握することができれば、若材齢強度の管理をより簡易的に実施することが可能である。

8. まとめ

- (1) 7つのプラントの配合のコンクリートに対して、若材齢強度0.1N/mm²の測定と混和剤(硬化促進剤、遅延剤)の添加による強度発現の差異について検討を行った結果、各プラントの配合ごと(使用される材料ごと)に若材齢強度の発現時間は異なり、今回のケースでは一律に評価することは難しかった。環境温度が低くなるほど、若材齢強度の発現も低くなる傾向が見られた。
- (2) AE減水剤の添加量が増えるほど圧縮強度0.1N/mm²の発現が遅くなる傾向が見られた。
- (3) 本検討の範囲内では、セメントの製造ロットの違いによって若材齢強度発現に影響が見られた。
- (4) 本検討の範囲内においてプロクター貫入抵抗試験での3.5N/mm²と圧縮強度0.1N/mm²は同等とみなすことができる。

参考文献

- 1) 石塚由郎, 入沢昭吉, 酒井正晴, 後藤貞治: 白島洋上石油基地における大型ケーソンの施工, コンクリート工学, Vol.24, No.5, pp.22-29, 1986.5
- 2) 大西俊輔, 西崎丈能, 近松竜一, 桜井邦昭: スリッブフォーム工法による世界最大級の地上式LNGタンクのPC防液堤コンクリートの建設—大阪ガス 泉北製造所第一工場5号LNGタンカー, コンクリート工学, Vol.52, No.4, pp.323-329, 2014.4