

# 報告 大容量LNG貯槽のPC防液堤を対象としたスリップフォーム工法用コンクリートの基礎的性質

近松 竜一<sup>\*1</sup>・桜井 邦昭<sup>\*2</sup>・大西 俊輔<sup>\*3</sup>・西崎 丈能<sup>\*4</sup>

**要旨:** 大容量LNG貯槽のPC防液堤を対象として、スリップフォーム工法を適用する際に必要なフレッシュコンクリートの品質、強度発現特性および耐久性を付与するためのコンクリートの仕様について実験的に検討した。その結果、セメントや各種混和剤を組み合わせ、配合を適切に選定することで、流動性に優れ、若材齢の強度発現を制御し、早期に脱枠した場合でも所要の耐久性を確保できることが明らかとなった。

**キーワード:** LNG貯槽, PC防液堤, スリップフォーム, 流動性, 強度発現特性, 耐久性

## 1. はじめに

天然ガスを $-162^{\circ}\text{C}$ の極低温で液化したLNGは、クリーンで環境に優しいエネルギーとして都市ガスや発電用に需要が増大している。このLNGを安定的に供給するために、貯蔵施設には高い安全性と信頼性が求められる。

PC LNG貯槽は、金属二重殻式貯槽（内槽）とPC製の防液堤を一体化したもので、万一、内槽からLNGが漏洩しても外側のコンクリートで貯留できる構造となっている。地上式LNG貯槽の標準的な形式として、これまでに数多くの施工実績がある<sup>1)</sup>。

エネルギー需要の増大に伴い、LNG貯槽のさらなる大容量化や運転開始までのリードタイムの短縮が求められている。そこで、LNG貯槽の合理化施工の観点から、PC防液堤の構築においてスリップフォーム工法を適用し、急速化施工を図ることとした。

スリップフォーム工法は、型枠を上昇させながら連続的にコンクリートを打ち込み、構造物を構築する工法である。煙突やタワーなど、縦長で円筒状の構造物を構築する方法として、多くの施工実績がある<sup>2)</sup>。

LNG貯槽の防液堤は環状のコンクリート壁であり、形状的にはスリップフォーム工法の適用が可能である。しかし、防液堤は周長が約280mで、平面的に広い範囲を同時に一定の速さで構築するためには、施工時に高精度の品質管理が必要である。また、打ち込み時の施工性や若材齢時の強度発現特性、耐久性など、コンクリートの品質についても特段の配慮が求められる。

そこで、大容量のLNG貯槽の防液堤をスリップフォーム工法で構築する場合に要求される各種の品質を確保するための使用材料や配合など、コンクリートの仕様に関して実験的に検討した。

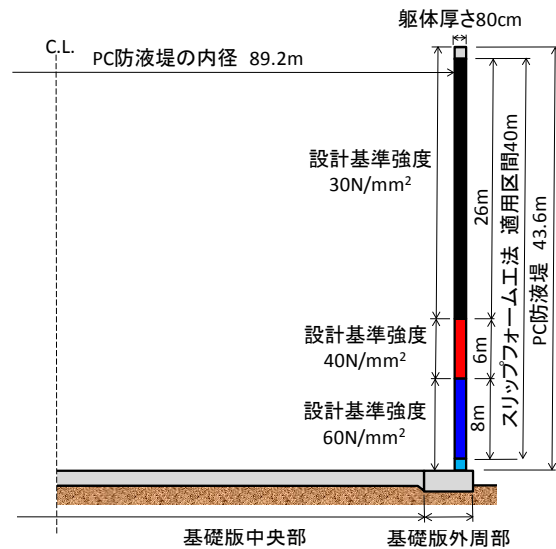


図-1 LNG貯槽のコンクリートの概要

## 2. PC防液堤のコンクリートに要求される品質

### 2.1 PC防液堤の概要

対象とするLNG貯槽の概要を図-1に示す。このLNG貯槽の容量は23万 $\text{m}^3$ である。防液堤は、内径が89.2m、壁厚80cm、高さ43.6mで、コンクリート量は約10,000 $\text{m}^3$ である。防液堤の設計基準強度は、高さ方向に3水準(60, 40, 30 $\text{N/mm}^2$ )に分かれている。

スリップフォーム装置のイメージと断面図を図-2、スリップフォーム工法による防液堤構築のイメージを図-3にそれぞれ示す。

型枠と足場が一体に組み込まれたスリップフォーム装置を防液堤の平面形状に合わせて組み立てる。型枠はジャッキで押し上げ、壁側面を滑らせながら上昇させる。コンクリートは薄層で打ち重ねながら連続して打ち込む。ロッドや鉄筋は、スリップフォーム装置の上昇に合わせて順次継ぎ足していく。以上のように、

\*1 株式会社大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 上席研究員 工博 (正会員)

\*2 株式会社大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 副主任研究員 工修 (正会員)

\*3 大阪ガス(株) エンジニアリング部 副課長 工修 (正会員)

\*4 大阪ガス(株) エンジニアリング部 シニアエンジニア 工博 (正会員)

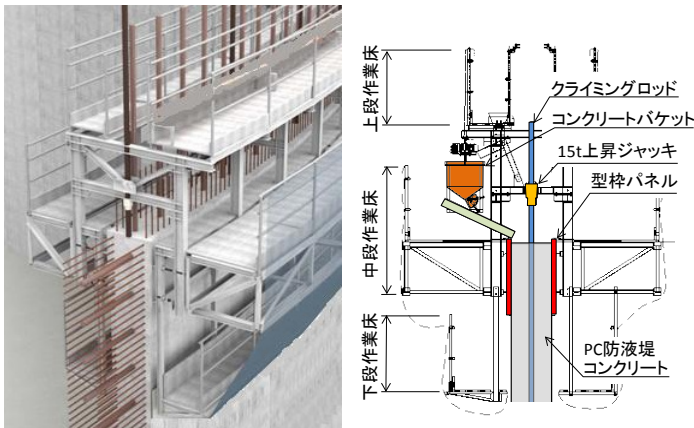


図-2 スリップフォーム装置のイメージと断面図

表-1 コンクリートに要求される品質の特性値と目標範囲

項目	品質の特性値と目標範囲
スランプフロー	50±7.5cm
空気量	4.5±1.5%
圧縮強度	(1) 型枠の取外し時(材齢12時間)に 0.1~0.3N/mm <sup>2</sup> であること (2) 管理材齢(91日)で設計基準強度を 満足すること
中性化速度係数 <sup>*1</sup>	8(mm/√年)以下
塩化物イオン 拡散係数 <sup>*1</sup>	30-50-20BB : 5.0(cm <sup>2</sup> /年)以下 40-50-20M : 2.5(cm <sup>2</sup> /年)以下 60-50-20M : 1.2(cm <sup>2</sup> /年)以下

\*1 本工事の構造条件、環境条件に対し設計耐用期間(50年)の耐久性確保に必要な値

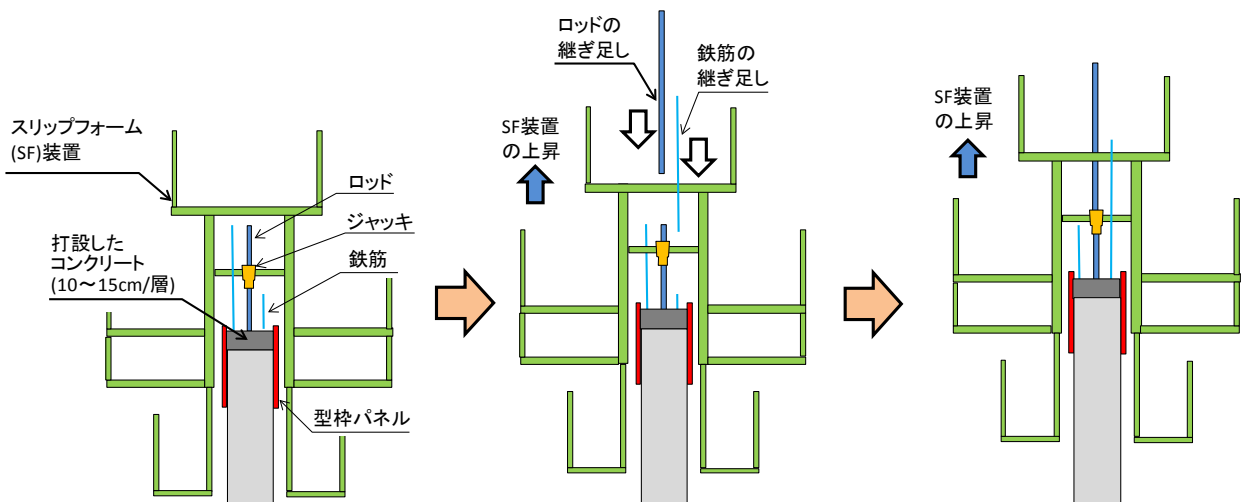


図-3 スリップフォーム工法による防液堤の構築イメージ

各工種を同時に進め、施工途中で足場や型枠の組立や解体が不要となることから急速化施工が図れる。また、精度を確保した円筒形の型枠の形を維持しつつ垂直に上昇させるので躯体を精度良く構築できる。

型枠は1日当たり約2mのペースでほぼ連続的に上昇させ、全高40mを20日間で構築する。なお、コンクリートは昼夜を問わず連続的に供給する必要があることから、現場にバッチャープラントを設置し、コンクリートを供給することとした。

## 2.2 コンクリートに要求される品質

スリップフォーム工法を適用して防液堤を構築する際にコンクリートに要求される品質を表-1に示す。

### (1) フレッシュコンクリートの流動性

防液堤の打上がり高さは1層当たり約10~15cmであり、全周約280mにわたって薄層で均等に打ち上げる必要がある。そこで、コンクリートの流動性はスランプフローで管理することとした。ただし、自己充填性を有する高流動コンクリートの水準にまで流動性を高めると、型枠に作用する側圧の増大や凝結の遅延など、型枠の上昇管理に支障が生じることも想定される。

このため、スランプフローの目標値は50cmとし、打込み時に補助的に内部振動機あるいは突き棒を用いて締固めを行う加振併用型の高流動コンクリートとすることにした。

### (2) 型枠の取外し時におけるコンクリートの強度

スリップフォーム工法では、型枠をスライドさせてコンクリートが型枠の下端から外れた時点でコンクリートが自立できる強度が必要となる。ただし、コンクリートがまだ型枠内にある時点で、硬化が進んで強度が発現すると、型枠をスライドする際にコンクリートとの付着が大きくなり、型枠の滑動に支障が生じる可能性がある。このため、型枠の取外し時点で強度の下限とともに上限についても管理が必要となる。

### (3) 耐久性

LNG貯槽の耐用年数は50年であり、供用期間中は塩害や中性化による鋼材腐食の発生を防止することが求められる。今回対象とするLNG貯槽は、凍害を受ける環境下にはないが、建設場所が海岸に隣接しているため、塩化物イオンの浸透による鋼材腐食に対する配慮が特に重要となる。

表-2 実験に用いた使用材料の概要

分類	記号	種類, 物理的性質など
セメント	BB	高炉セメントB種, 密度3.04g/cm <sup>3</sup>
	M	中庸熱ポルトランドセメント, 密度3.22g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	海砂(除塩対策済み) 表乾密度2.57g/cm <sup>3</sup> , 吸水率2.24%
	S2	砕砂, 表乾密度2.58g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.60% 粗粒率2.87
粗骨材	G1	砕石2010, 表乾密度2.62g/cm <sup>3</sup> 吸水率0.95%, 実積率59.3%
	G2	砕石1505, 表乾密度2.61g/cm <sup>3</sup> 吸水率0.92%, 実積率58.6%
混和剤	SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
	VA	高性能AE減水剤(増粘剤一液タイプ) (減水成分:ポリカルボン酸系, 増粘剤成分:グリコール系)
	R	遅延剤(脱枠時強度調整剤)

表-3 コンクリートの試験項目および方法

試験項目	準拠規準	特記事項
スランプフロー試験	JIS A 1150	-
空気量試験	JIS A 1128	-
コンクリート温度	JIS A 1156	-
充填試験	JSCE-F511	U型試験装置を使用。障害条件:ランク2
漏斗流下試験	JSCE-F512	O漏斗試験装置を使用
ブリーディング試験	JIS A 1123	-
凝結試験	JIS A 1147	-
圧縮強度	JIS A 1108	材齢24h以降20°C水中養生
促進中性化試験	JIS A 1153	CO <sub>2</sub> 濃度5%, 20°C60%RH, 促進期間3ヶ月 測定結果をもとに中性化速度係数を算定
塩分浸漬試験	JSCE-G572 JIS A 1154	NaCl濃度10%水溶液中(20°C)に3ヶ月間浸漬 供試体表面から2cm毎の塩化物イオン濃度を測定 測定結果をもとに塩化物イオン拡散係数を算定

表-4 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの品質

コンクリートの種類	設計基準強度(N/mm <sup>2</sup> )	セメント種類	目標スランプフロー(cm)	目標空気量(%)	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						混和剤(C×%)	フレッシュコンクリートの品質				
							W	C	S1	S2	G1	G2		スランプフロー(cm)	空気量(%)	充填高さ(cm)	漏斗流下時間(秒)	ブリーディング率(%)
30-50-20BB	30	BB	50	4.5	45.0	49.4	175	389	662	166	431	429	0.90(VA)	53.5	4.2	30.0	7.7	1.3
40-50-20M	40	M	50	4.5	40.0	49.5	170	425	664	167	431	429	1.10(SP)	53.5	5.5	31.5	7.4	1.1
60-50-20M	60	M	50	4.5	33.0	47.2	170	515	607	152	431	429	1.05(SP)	54.5	4.4	30.5	10.0	0.8

### 3. 防液堤コンクリートの仕様に関する検討

#### 3.1 実験概要

##### (1) 使用材料

実験に用いた使用材料の概要を表-2に示す。

セメントは、強度の水準および塩化物イオンによる鉄筋腐食に対する抵抗性を考慮し2種類を使用した。60および40N/mm<sup>2</sup>の高強度の部位は中庸熱ポルトランドセメント, 30N/mm<sup>2</sup>の部位は耐久性に優れた高炉セメントB種を用いた。混和剤は、所定の流動性を付与するために、高性能AE減水剤を使用した。ただし、30N/mm<sup>2</sup>の配合の場合は、強度面から所要となる単位セメント量で流動性を増大させると材料分離抵抗性の確保が難しいことが想定されたため、高性能AE減水剤として増粘成分を付与したタイプの製品を使用した。

また、コンクリートの温度が変化した場合でも一定のタイミングで型枠をスライドさせ、型枠を取り外す際の強度を制御できるよう、若材齢時の強度発現特性を調整する目的で遅延剤を併用した。

##### (2) 試験項目および方法

試験項目を表-3に示す。フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性や充填性を評価するために、O漏斗流下時間, U型充填高さ, ブリーディングを測定した。また、若材齢時における硬化特性として、凝結時間および圧縮強度を試験した。なお、耐久性に関する試験

については、次章のモデル試験体から採取したコンクリートコアをもとに評価した。

##### (3) 練混ぜ

コンクリートの練混ぜは強制二軸練りミキサ(公称容量60ℓ)を用い、1バッチの練混ぜ量は50ℓとした。練混ぜ方法は、骨材およびセメントを投入して10秒間練り混ぜた後、混和剤を溶解させた練混ぜ水を投入し90秒間練り混ぜた。練上がり5分後にコンクリートを練り舟上で切り返し、フレッシュコンクリートの品質試験を行い、硬化後の各種供試体を採取した。

#### 3.2 実験結果および考察

コンクリートの試験配合および各種試験結果の一例を表-4に示す。

##### (1) フレッシュコンクリートの流動性

スランプフローの経時変化の一例を図-4に示す。いずれの強度水準の配合についても高性能AE減水剤の種類やその添加量を調整することで、練混ぜ後から静置した状態においても30分間は所定のスランプフロー(50±7.5cm)を確保できることを確認した。

##### (2) 凝結特性および若材齢時の強度発現特性

凝結時間および若材齢時の強度発現特性をそれぞれ図-5および図-6に示す。

凝結や強度発現は、コンクリートの温度や環境温度により相違する。そこで、遅延剤を併用し、添加量を

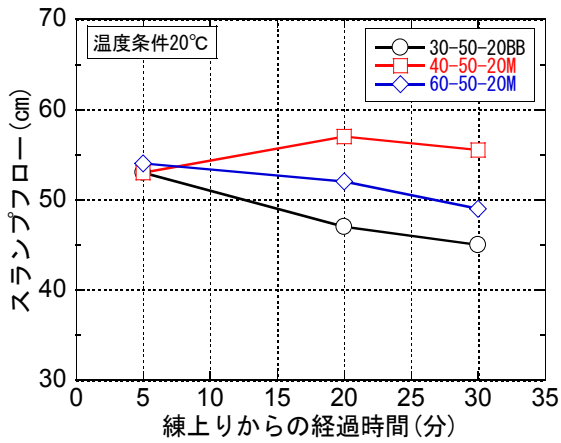


図-4 スランプフローの経時変化

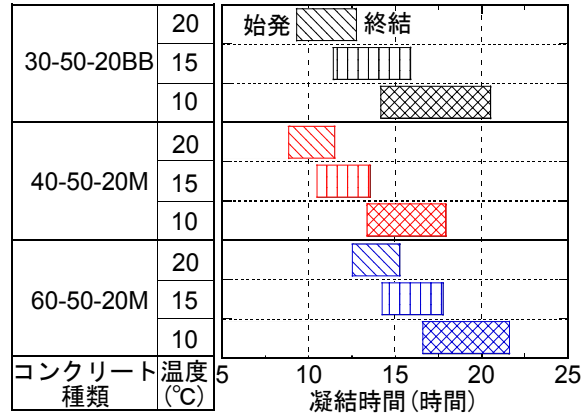


図-5 各種配合の凝結試験結果 (遅延剤未使用時)

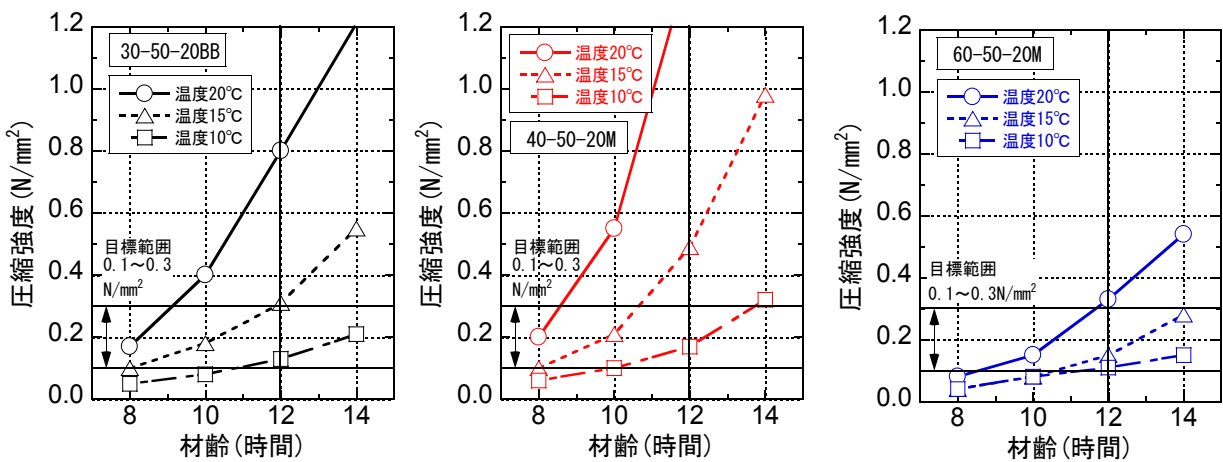


図-6 各種コンクリートの温度ごとの若材齢時の強度発現性 (遅延剤未使用時)

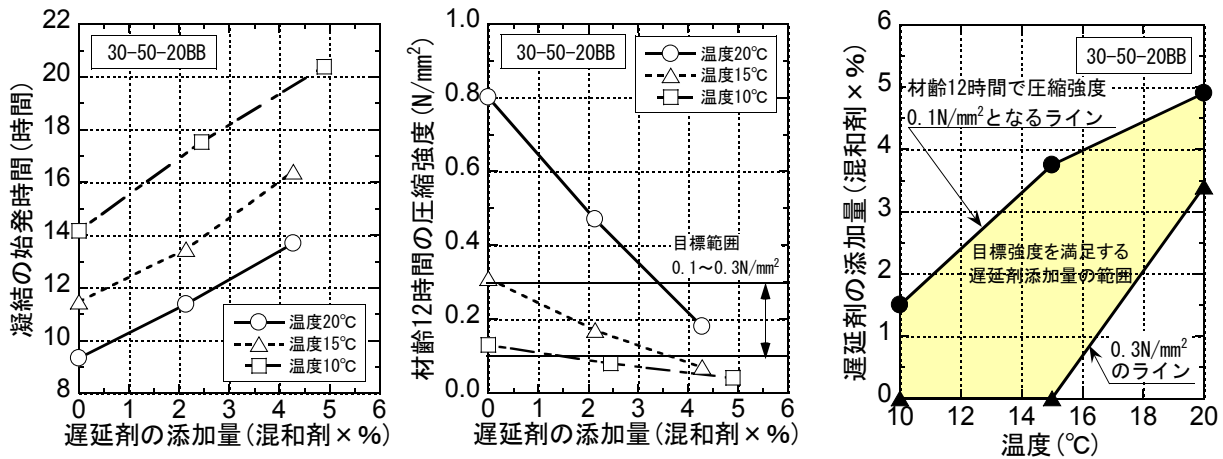


図-7 遅延剤の添加量が凝結時間および強度発現性に及ぼす影響 (30-50-20BB)

調整することで温度条件が変化した場合でも若材齢時の強度発現を一定の時間の範囲で制御できる管理手法について検討した。検討結果の一例として、30N/mm<sup>2</sup>の配合での試験結果を図-7に示す。

遅延剤の添加量と凝結の始発時間および材齢12時間の圧縮強度との間には直線的な関係が認められる。温度条件に応じて遅延剤の添加量を調整することで、目標とする材齢12時間の圧縮強度を0.1~0.3N/mm<sup>2</sup>の範囲内に制御できることが検証できた。

スリップフォーム工法を用いた既往の施工実績<sup>2)</sup>によれば、各種混和剤を用いて温度に応じて凝結および若材齢時の強度発現を調整する事例が報告されている。今回の工事では、現場にバッチャープラントを設置しコンクリートを製造するため、場外運搬時間の制約がなく、練混ぜから打込みまでの可使用時間を短縮できる。このため、打込みまでの流動性を長時間保持する必要がなく、凝結が比較的早いことから、遅延剤を添加することで強度発現を制御できることが明らかになった。

### (3) 強度発現特性

各種配合における圧縮強度試験結果の一例を図-8に示す。今回の工事は、施工時期が3月で、夜間には外気温が低くなること、スリップフォーム工法の適用により、コンクリートの表面が若材齢から外気に曝されること等を勘案し、各配合の水セメント比は、強度をもととして定まる値より約5%程度小さい値を用いた。この結果、3種類の強度水準に対して選定したいずれの配合についても、標準養生した場合の圧縮強度は材齢28日で設計基準強度を十分に上回る結果であった。

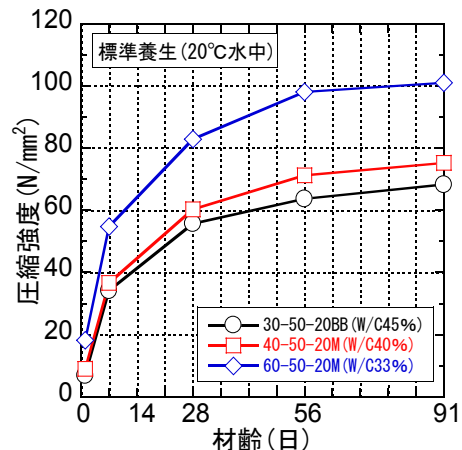


図-8 各種コンクリートの強度発現特性

## 4. モデル試験体による強度、耐久性の検証

### 4.1 実験概要

スリップフォーム工法は、場所打ちコンクリートの施工に比べ、型枠の存置期間が短い。本工事の場合、最短で打込み後12時間でコンクリートの表面が外気に曝されるため、表層部の品質が温度や乾燥などの影響を受ける。そこで、実施工に先立ち、早期に型枠を取り外したモデル試験体を製作し、コンクリートの強度発現特性、中性化の進行や塩化物イオンの浸透など耐久性に関わる影響について実験的に検証した。

モデル試験体の概要を図-9に示す。

試験体の部材厚さは、防液堤の断面厚さと同じ80cmで、高さ0.9m、幅0.9mとした。防液堤の壁面に相当する2つの側面および天端面以外は厚さ10cmの発泡スチロールで覆い、断熱性を高めた。

コンクリートは30-50-20BB配合および40-50-20M配合の2種類(表-4参照)を用いた。

モデル試験体は、実施工と同様の気象条件下で作製した。実際の打込み状況を模擬して1層当り15cmで打ち込み、それぞれの層毎に内部振動機を用いて打ち込み面が平坦になるように締め固め、約1時間の打重ね時間間隔で合計6回に分けて打ち重ねた。

打込み完了から12時間後に防液堤の壁面に相当する2つの側面の型枠を取り外し、気中暴露(脱枠後、特別な養生を施さない)、封かん養生(ポリオレフィン系フィルム貼付)、養生剤A(表面被覆タイプ、グリコール系)塗布、養生剤B(表面含浸タイプ、シラン系)塗布の4種類の養生条件で屋外に暴露した。

材齢3ヶ月でモデル試験体より側面からコアを採取し、圧縮強度、中性化促進および塩分浸漬の各試験を実施した(表-3参照)。なお、モデル試験体の作製に併せて各種供試体を採取し、上記と同じ養生条件で屋外に暴露した場合についても同様の試験を実施した。

### 4.2 実験結果および考察

モデル試験体と同様の条件で屋外に暴露した供試体

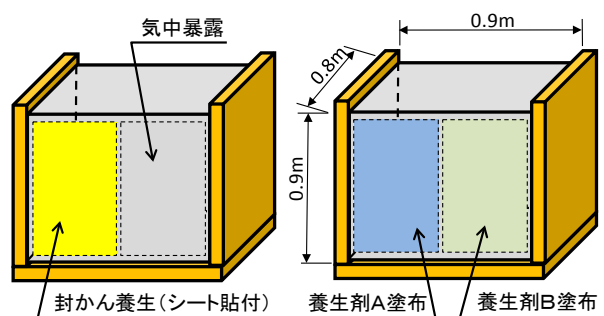


図-9 モデル試験体の概要

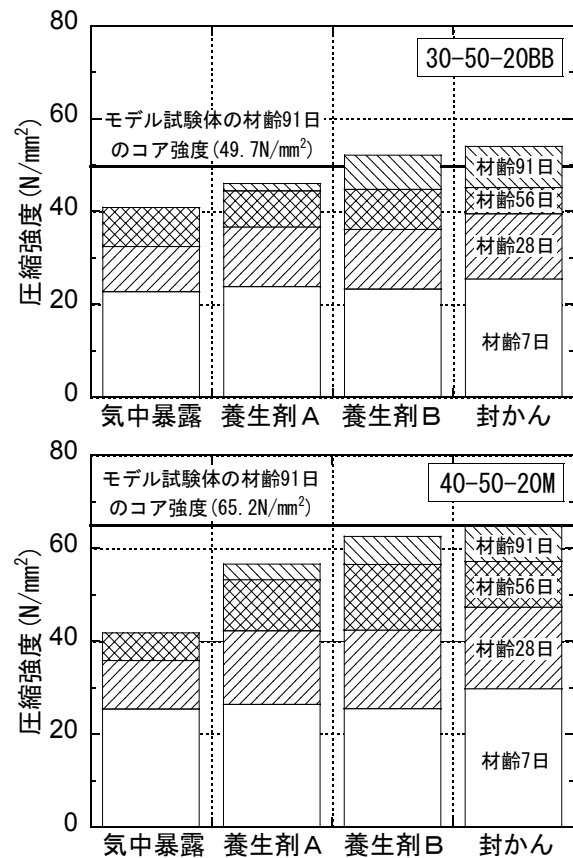


図-10 屋外暴露した供試体の圧縮強度

の圧縮強度を図-10に示す。

モデル試験体の中心部から採取したコア供試体の圧縮強度は、30-50-20BBの配合の場合には約50N/mm<sup>2</sup>、

表-5 中性化速度係数および塩化物イオン拡散係数の検討結果

コンクリートの種類	養生方法	促進中性化試験 (促進期間 3ヶ月)		実環境における 中性化速度係数 (mm/√年)  (左記の試験結果を 文献 <sup>3)</sup> に準じ換算)	塩分浸漬試験 (促進期間 3ヶ月)					塩化物イオン 拡散係数 (cm <sup>2</sup> /年)
		促進中性化深さ (mm)	促進試験における 中性化速度係数 (mm/√週)		塩化物イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )					
					供試体表面からの範囲 (mm)					
					0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	
30-50-20BB	気中暴露	4.7	1.3	0.73	9.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.35
	養生剤A	3.2	0.9	0.50	5.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.13
	養生剤B	12.1	3.4	1.87	5.6	0.2	0.2	0.2	0.1	0.15
	封かん	0.0	0.0	0.00	5.7	0.2	0.2	0.2	0.1	0.16
40-50-20M	気中暴露	2.6	0.7	0.40	10.2	0.5	0.5	0.5	0.4	0.39
	養生剤A	2.0	0.6	0.31	5.0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.13
	養生剤B	11.1	3.1	1.72	2.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.04
	封かん	0.0	0.0	0.00	5.9	0.5	0.4	0.4	0.4	0.15

【参考】

コンクリート標準示方書に準拠して算出した中性化速度係数(mm/√年) 30-50-20BBの場合 1.44, 40-50-20Mの場合 0.04  
 コンクリート標準示方書に準拠して算出した塩化物イオン拡散係数(cm<sup>2</sup>/年) 30-50-20BBの場合 0.42, 40-50-20Mの場合 0.57

40-50-20M の場合が 65N/mm<sup>2</sup> で、いずれも封かん養生とほぼ同等の強度が得られた。

気中暴露した供試体は、断面が小さく、脱枠直後から外気に曝され、乾燥しやすい条件であり、封かん養生に比べ強度の発現は小さいが、40N/mm<sup>2</sup>以上の値が得られている。一方、脱型直後に養生剤を塗布した場合は、材齢初期から強度増進が認められ、封かん養生とほぼ同等の強度が発現している。

モデル試験体からコアを採取し、促進中性化および塩分浸漬試験を行い、中性化速度係数および塩化物イオン拡散係数を算定した。結果を表-5に示す。

中性化速度係数は、いずれの場合も2 (mm/√年)以下であった。防液堤のかぶり(厚さ)は100mmで、耐用期間50年で鋼材腐食発生限界深さに達すると推定される中性化速度係数(8 (mm/√年))に比べて、試験で得られた値は相当に小さい結果であった。

塩分浸漬試験における塩化物イオン濃度は、表面からの深さが20mm以内で養生条件による差異が認められ、脱枠後に気中暴露した場合が最も大きくなった。一方、養生剤を塗布した場合は、封かん養生の場合と同等以下であり、塩化物イオンの浸透に対する抑制効果が確認された。

これらの結果をもとに算定した塩化物イオン拡散係数は、気中暴露の場合は封かん養生の場合よりも2倍以上大きい値(0.4 cm<sup>2</sup>/年)となった。ただし、この値は、構造物に到達する飛来塩分量を考慮し、耐用期間50年で鋼材腐食発生限界濃度(1.2 kg/m<sup>3</sup>)に達する塩化物イオン拡散係数(1.2~5.0 cm<sup>2</sup>/年)より小さい結果であった。これらの結果は、配合や養生面で適切な対策を講じることで、早期に脱枠した場合でも塩化物イオンの浸透による鋼材腐食が生じる可能性は小さいことを示すものといえる。

5. まとめ

本論文の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 水セメント比45%、単位セメント量が約390kg/m<sup>3</sup>の配合でも、増粘型の高性能AE減水剤を用いることで、スランブフローを指標とする高い流動性を付与するとともに材料分離抵抗性を確保できる。
- (2) 高性能AE減水剤と遅延剤を併用し、コンクリートの温度に応じて遅延剤の添加量を調整することで、若材齢時の強度発現を制御し、スリップフォーム工法を適用した際の型枠の取外し時におけるコンクリートの強度を適切に管理できる。
- (3) 降雨の影響を受ける屋外の気中に暴露した場合、早期に脱枠した場合でも、セメントの種類や水セメント比を適切に選定した配合とすることで、本工事の条件では所要の耐用期間(50年)において中性化に伴う鋼材腐食が生じる可能性は小さい。
- (4) 若材齢より屋外に暴露した場合でも、セメントの種類や水セメント比を適切に選定した配合とし、養生面で適切な対策を講じることで、塩化物イオン拡散係数を低減することができる。

参考文献

- 1) 西崎丈能, 岡井大八, 近松竜一, 奥立稔, 鎌田文男; PCLNG貯槽建設工事の合理化研究と実構造物への適用, 土木学会論文集 No.728/VI-58, pp.141-156, 2003.3
- 2) 坂井利光, 矢島雄一, 神代泰道, 江村勝; 東京スカイツリーにおけるスリップフォーム工法による芯柱の構築, コンクリート工学, Vol.50, No.8, pp.677-682, 2012.8
- 3) 日本建築学会; 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説, p.87, 1991.7