

# 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開発と実工事への適用

桜井 邦 昭      近 松 竜 一

## Development of Concrete for Prestressed Concrete Outer Tank for LNG Storage by Slipforming Construction

Kuniaki Sakurai      Ryuichi Chikamatsu

### Abstract

High quality concrete for use as prestressed concrete in the outer tank in the world's largest aboveground liquefied natural gas (LNG) storage by slipforming construction. In order to make smoothly and over a wide area, "Smooth-Crete", which can be filled up by auxiliary compaction, was applied. Through the addition of retarder, the controlling early strength required early removal of formwork was established. The required level of achieved by using normal materials and a mix proportion without any special curing. The concrete was mixed at an onsite batch plant and its quality was found to be stable.

### 概 要

日本最大級の地上式LNG貯槽のPC防液堤をスリップフォーム工法により構築する際に用いる専用のコンクリートを開発し実施工へ適用した。コンクリートを薄層で広範囲に流動させるため、補助的な振動締固めにより充填可能なスムースクリート<sup>®</sup>を適用するとともに、凝結遅延剤を組合せることで若材齢時の脱枠に必要な初期強度発現性を制御する手法を確立した。更に、使用材料や配合を適切に設定することで、若材齢で脱枠して特別な養生を施さずとも所要の耐久性を確保できることを確認した。そして、このコンクリートを現場バッチャープラントで約9,500m<sup>3</sup>製造し、安定的に所要の品質を満足したことを確認した。

## 1. はじめに

天然ガスを-162℃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である。東日本大震災を契機として、火力発電所への電力供給依存が高まっており、LNGに対する需要が今後さらに増大するものと予測される。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。PCLNG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一環として、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、施工の急速化を図ることとなった。本工事の場合、スリップフォーム工法の適用により、PC防液堤の構築に要する日数が、従来工法の8～10ヶ月から20日程度に低減できる。

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込み、躯体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り、近年では東京スカイ

ツリーの芯柱の施工にも適用されている<sup>2), 3)</sup>。

PC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、今回構築するLNG貯槽は容量23万kLの日本最大級のタンクで、防液堤の周長が約280mと長い。このような大口径の構造物にスリップフォーム工法を適用するのは今回が初めてである。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PC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品質（フレッシュコンクリートの品質、強度発現性および耐久性）を整理し、これら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。その後、実際のPC防液堤の構築に適用した。

本稿では、室内試験におけるコンクリートの配合選定や検証実験結果、ならびに現場バッチャープラントで製造したコンクリートの品質や施工結果について報告する。

## 2. PC防液堤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PC防液堤の概要をFig. 1 に示す。防液堤

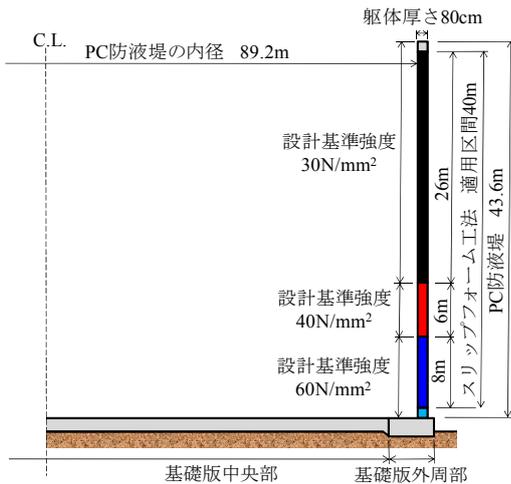


Fig. 1 PC防液堤のコンクリートの概要  
Overview of Concrete of PC Outer Tank

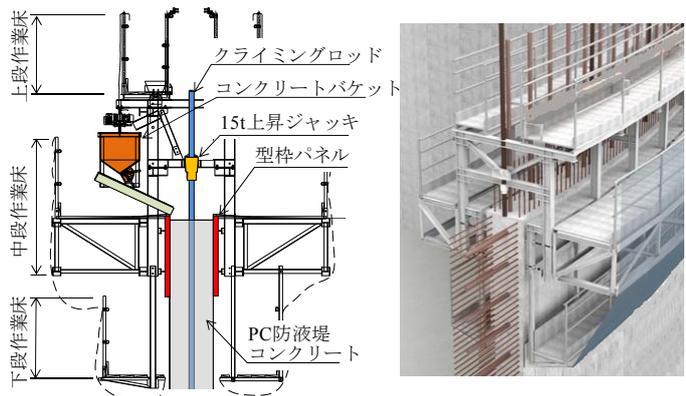


Fig. 2 スリップフォーム装置の断面図とイメージ図  
Cross-section and Perspective view of Slipforming Equipments

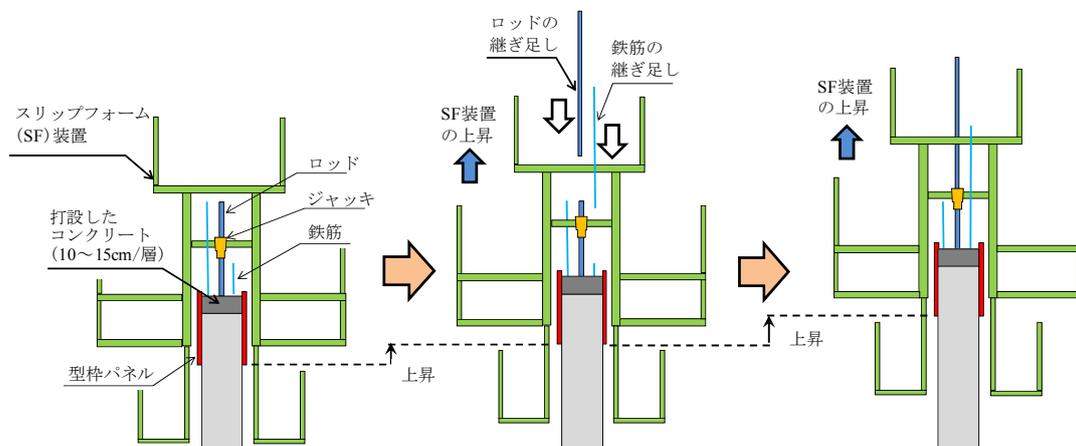


Fig. 3 スリップフォーム工法によるPC防液堤の構築順序図  
Procedures Image of Slipforming Construction of Prestressed Concrete Outer Tank

は、内径が89.2m、壁厚80cm、高さ43.6mで、コンクリート数量は約9,500m<sup>3</sup>である。防液堤の設計基準強度は、高さ方向に3水準（60、40、30N/mm<sup>2</sup>）に分かれている。これは、防液堤の下端部分ほど大きな引張応力が生じるためである。

スリップフォーム装置の断面図とイメージ図をFig. 2に、スリップフォーム工法による防液堤の構築順序をFig. 3に示す。

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。型枠はジャッキで引き上げ、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。このように、各工種を同時に進め、施工途中で足場や型枠の組立・解体が不要となることから施工の急速化が図られる。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時間あたり10～15cm（約2m/日）で連続的に上昇させ、全高40mを20日間で構築する計画とした。な

Table 1 コンクリートの要求品質の特性値と目標範囲  
Required Qualities of Concrete for Prestressed Concrete Outer Tank by Slipforming Construction

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)において0.1N/mm <sup>2</sup> 以上であること (上限値の目安を0.3N/mm <sup>2</sup> とする) (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*1	8 (mm/√年) 以下
塩化物イオン拡散係数*1	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（2007年制定コンクリート標準示方書[設計編]に準じて算出）

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ため、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により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Table 1 に示す。

### 2.2.1 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時間あたり10～15cmで、全周約280mにわたって薄層で均等に打ち上げる必要があり、コンクリートには高い流動性が求められる。ただし、自己充填性を有する高流動コンクリートの水準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、打込み後の型枠の上昇管理に支障が生じることも想定される。そこで、打込み時には補助的に内部振動機あるいは突き棒を用いて締め固めを行う加振併用型の高流動コンクリート「スムースクリート」<sup>4),5)</sup>を用いることにした。なお、スムースクリートの山岳トンネルの覆工コンクリートへの適用では、スランプフローの目標値を40～45cm程度としていたが、本工事では、流動距離がトンネル覆工に比べ長くなることが想定されたため、スランプフロー50cmを目標値に設定した。

### 2.2.2 型枠の取外し時におけるコンクリート強度

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である。本工事では、打込みから12時間後に型枠の下端から外れる計画のため、材齢12時間後に自立に必要な圧縮強度(0.1N/mm<sup>2</sup>以上)を満足させる必要がある。

一方、コンクリートがまだ型枠の中にある時点で、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、型枠を滑动させるのに支障が生じる可能性も想定される。そこで、型枠の取外し時点における圧縮強度の上限値として、これまでの経験を参考に、0.3N/mm<sup>2</sup>程度を目安とすることにした。

### 2.2.3 耐久性

PC防液堤の耐用年数は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PC防液堤は、凍害を受ける環境下にはないものの、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。

## 3. 防液堤コンクリートの仕様に関する検討

前章で掲げたフレッシュコンクリート品質、初期強度発現性および耐久性を満足する配合を検討するため、実工事で使用する材料を用いて、試験室における試験練りを行い、各種の実験を実施した。

### 3.1 実験概要

#### 3.1.1 使用材料

実験に用いた使用材料の概要をTable 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。高強度(40N/mm<sup>2</sup>および60N/mm<sup>2</sup>)の部位は中庸熟ポルトランドセメント、30N/mm<sup>2</sup>の部位は高炉セ

Table 2 使用材料の概要  
Properties of Materials

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	中庸熟ポルトランドセメント, 密度3.22g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	海砂, 表乾密度2.57g/cm <sup>3</sup> , 吸水率2.24% 粗粒率2.60
	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	碎石2010, 表乾密度2.62g/cm <sup>3</sup> 吸水率0.95%, 実積率59.3%
	G2	碎石1505, 表乾密度2.61g/cm <sup>3</sup> 吸水率0.92%, 実積率58.6%
混和剤	SP1	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
	SP2	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)*高強度用
	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)

Table 3 コンクリートの試験項目および方法  
Test Items and Methods of Concrete

試験項目	試験方法	特記事項
スランプフロー	JIS A 1150	—
空気量	JIS A 1128	—
コンクリート温度	JIS A 1156	—
充填高さ	JSCE-F511	U型試験装置を使用。 障害条件:ランク2
漏斗流下時間	JSCE-F512	○漏斗試験装置を使用
ブリーディング率	JIS A 1123	—
凝結時間	JIS A 1147	—
圧縮強度	JIS A 1108	材齢24h以降20℃水中養生
中性化速度係数	JIS A 1153	CO <sub>2</sub> 濃度5%, 20℃60%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
塩化物イオン拡散係数	JSCE-G572 JIS A 1154	NaCl濃度10%水溶液中(20℃)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

メントB種を用いた。

所定の流動性を付与するため、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、強度面から必要となる単位セメント量のまま流動性を増大させると材料分離が生じる可能性があったため、増粘成分を含有した高性能AE減水剤(高性能AE減水剤(増粘剤一液タイプ))を用いることにした。

また、コンクリートの温度が変化した場合において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。

#### 3.1.2 試験項目および方法

試験項目をTable 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、○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

Table 4 検討したコンクリートの配合例ならびにフレッシュコンクリートの試験結果  
Mix Proportion of Concrete and Test Results of Fresh Concrete

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 (SP1)	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 (SP2)	54.5	4.4	30.5	10.0	0.8

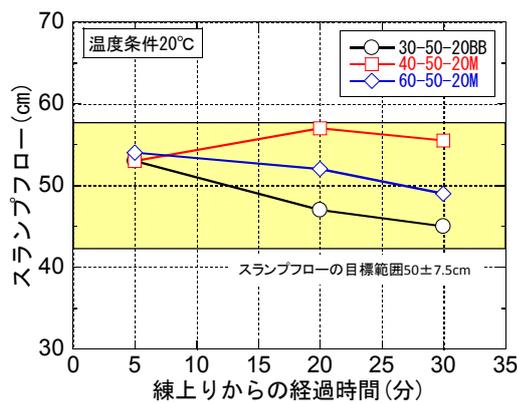


Fig. 4 スランプフローの経時変化  
Variation with Time of Slump Flow

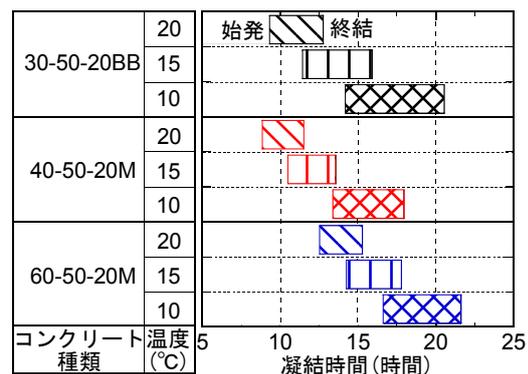


Fig. 5 各種コンクリートの凝結試験結果 (遅延剤未使用時)  
Setting Time Test Results of a Variety of Concrete without Retarder

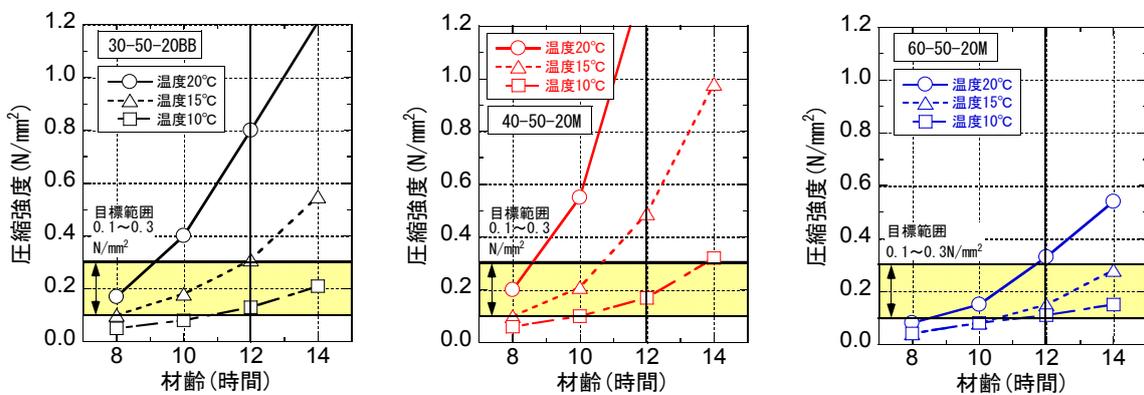


Fig. 6 各種コンクリートの温度ごとの若材齢時の強度発現性 (遅延剤未使用時)  
Compressive Strength at Early Age of a Variety of Concrete without Retarder

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。

3.1.3 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、予め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。練上り5分後にフレッシュコンクリートの品質試験を実施し、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

検討したコンクリートの配合例およびフレッシュコン

クリートの試験結果の一例をTable 4 に示す。

3.2.1 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Fig. 4 に示す。いずれの強度水準の配合も高性能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。

3.2.2 凝結特性および若材齢時の強度発現特性 遅延剤を用いない場合のコンクリートの凝結時間および若材齢時の強度発現特性をそれぞれFig. 5 およびFig. 6 に示す。配合の種類によらず、コンクリート温度が低下するに従い凝結時間は遅延し、同一材齢での圧縮強度は小

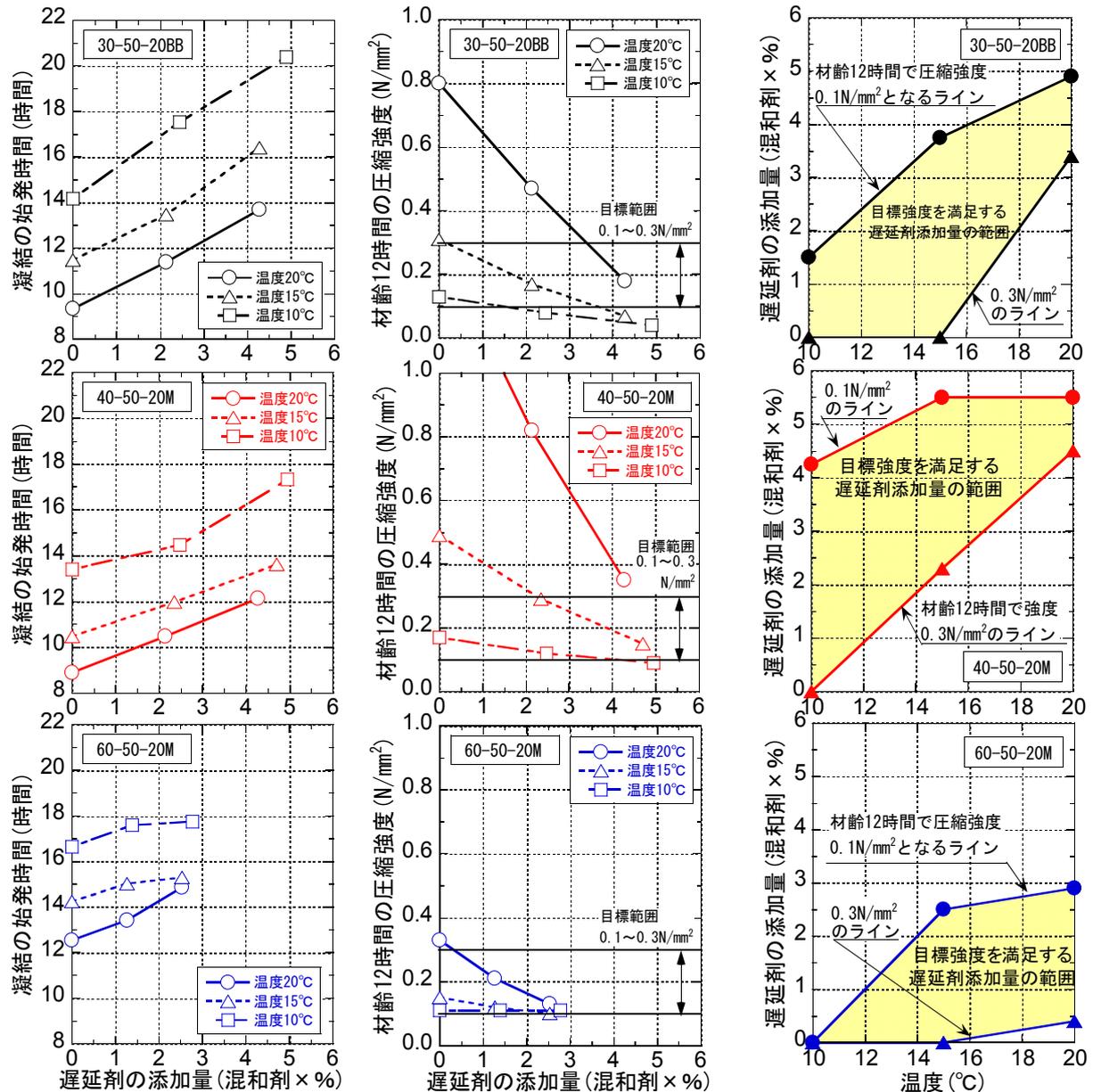


Fig. 7 遅延剤の添加量が凝結時間および強度発現性に及ぼす影響  
Required Content of Retarder to Control the Early Strength of Concrete on Each Temperature

さくなる結果が得られた。なお、60-50-20M配合の初期強度が他の配合に対して小さいのは、使用した高性能AE減水剤の種類による影響と推測される。このため、60-50-20M配合は、凝結の始発時間も他の配合に比べ遅くなったものと考えられる。

そこで、遅延剤を併用し、その添加量を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硬化特性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。試験結果をFig. 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。なお、凝結の始発時間とは、貫入抵抗値が3.5N/mm<sup>2</sup>となる時間のことであり、若材齢時の強度の目安となる。これらの実験結果より、目標とする材齢12時間の圧縮強度を0.1~

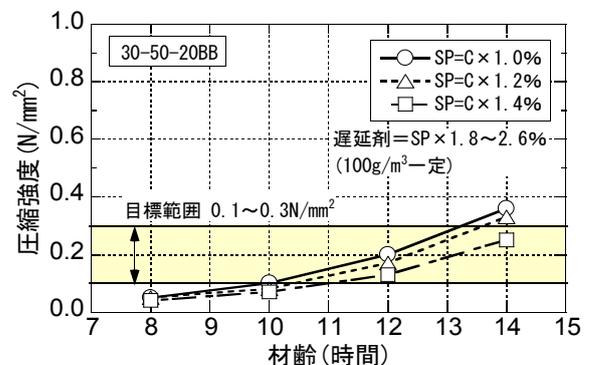


Fig. 8 高性能AE減水剤の添加量が材齢初期の強度発現に及ぼす影響 (30-50-20BB)  
Relationship Super Plasticizer Content and Compressive Strength at Early Age (30-50-20BB)

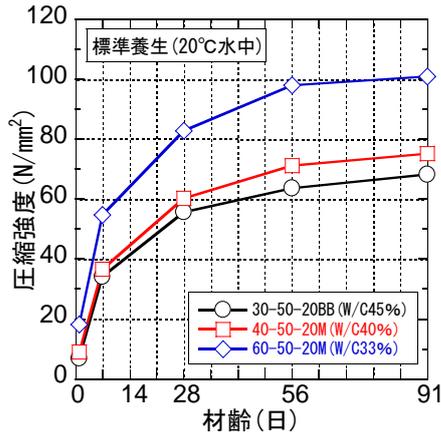


Fig. 9 各種コンクリートの強度発現性  
Compressive Strength Results of Three Type Concrete

0.3N/mm<sup>2</sup>の範囲内に制御するための、温度条件に応じた遅延剤添加量の範囲を定めることができた。

また、実施工では、外気温の変動に伴い、所定の流動性を確保するために、高性能AE減水剤の添加量を調整する必要がある。そこで、高性能AE減水剤の添加量が、若材齢での強度発現性に及ぼす影響について検討した。試験結果の一例をFig. 8 に示す。高性能AE減水剤の添加量を±0.2%変化させても、若材齢での強度発現性はほとんど同じであることを確認した。

**3.2.3 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Fig. 9 に示す。今回の工事は、①施工時期が晩冬から春期で、夜間には外気温が低くなること、②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さら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も約5%程度小さい値を用いることとした。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おいても、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が得られた。

#### 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、一般的な場所打ちコンクリートの施工に比べ、型枠の存置期間が極端に短い。本工事の場合、打込み後12時間でコンクリートの表面が外気にさらされるため、表層部の品質が温度や乾燥などの影響を受けやすいと想定される。そこで、実施工と同様に、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Fig. 10 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。コンクリートは30-50-20BB配合と40-50-20M配合の2種類を用いた。

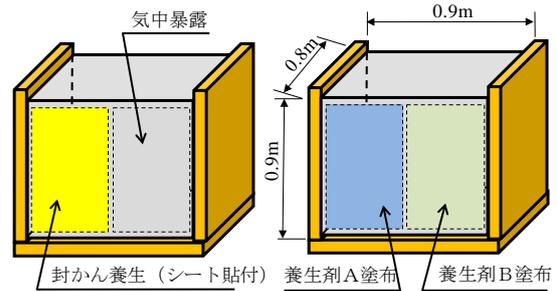


Fig. 10 モデル試験体の概要  
Curing Condition of Wall Block Specimens



Photo 1 コンクリートの打込み状況  
Placing of Concrete for Wall Block Specimens

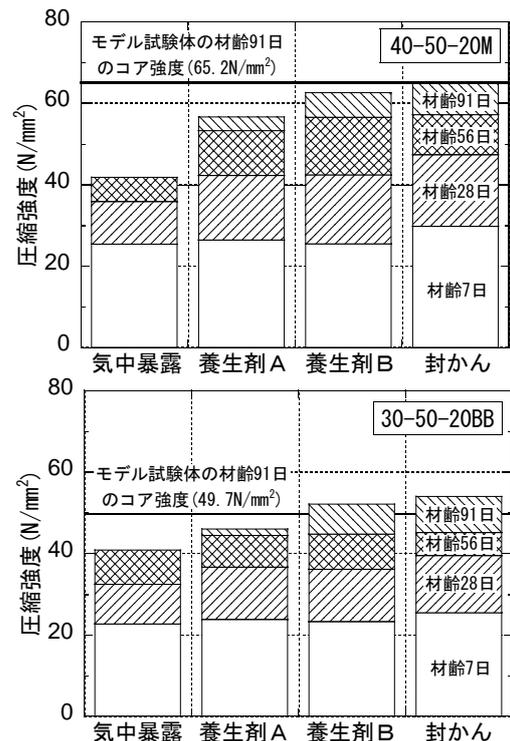


Fig. 11 屋外暴露したコンクリートの圧縮強度  
Difference of Compressive Strength by Curing Condition

モデル試験体は、実施工と同時期に作製した。実際の打込み状況を模擬して1時間ごとに1層15cmで打ち込み、それぞれの層ごとに内部振動機を用いて打込み面が平坦になるように締め固めた。打込み時の状況をPhoto 1 に示す。打込み完了から12時間後に防液堤の壁面に相当する2側面の型枠を取り外し、気中暴露(脱枠後、特別な養

Table 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  
Evaluation of Coefficient of Carbonation Velocity and Diffusion Coefficient of Chloride Ion

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) (左記の結果を文献 <sup>6)</sup> に準じ換算)	所要の耐久性確保に必要な中性化速度係数 (mm/√年)	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)	所要の耐久性確保に必要な塩化物イオン拡散係数 (cm <sup>2</sup> /√年)
		促進中性化深さ (mm)	促進試験での中性化速度係数 (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	8以下	9.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.35	5.0以下
	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	2.5以下
	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】 2007年制定コンクリート標準示方書[設計編]に準拠して求めた各値は以下の通り。  
(1) 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  
(2) 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

生を施さない), 封かん養生(水分が逸散しないようシート貼付), 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ヶ月時点でコンクリートコアを採取し, 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。なお, モデル試験体の作製に併せて各種供試体を採取し, 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

4.2.1 圧縮強度 モデル試験体と同様の条件で屋外に暴露した供試体の圧縮強度をFig. 11 に示す。

採取したコア供試体の圧縮強度は, 30-50-20BB配合の場合が49.7N/mm<sup>2</sup>, 40-50-20Mの場合が65.2N/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の圧縮強度は, いずれも40N/mm<sup>2</sup>以上の値が得られたが, 封かん養生に比べ小さな値となった。脱枠直後から外気にさらされ, 水分が逸散しやすいことによる影響と考えられる。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ことを確認した。

4.2.2 中性化および塩分に対する抵抗性 モデル試験体から採取したコアを対象に促進中性化および塩分浸漬の各種試験を行い, 中性化速度係数および塩化物イオン拡散係数の特性値を算定した。結果をTable 5 に示す。

いずれの養生条件の場合においても, 中性化速度係数は2 (mm/√年) 以下であった。本工事の場合, 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は8 (mm/√年)であり, 試験により得られた値は, 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以内のごく表層部で養生方法による差異が認められ, 脱枠後に気中暴露した場合に塩化物イオン濃度が最も大きかった。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となり, 塩化物イオンの浸透に対する抑制効果が確認された。

試験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2倍以上大きい値(約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(30-50-20BB配合は5.0cm<sup>2</sup>/年, 40-50-20M配合は2.5 cm<sup>2</sup>/年)より十分に小さい値であった。

一連の試験結果から, 今回選定した配合を用いる場合には, 材齢12時間で脱枠し特別な養生を施さなくとも, 設計基準強度を十分に上回る強度が確保できるとともに, 目標とする設計耐用期間(50年)において, 中性化や塩害による鋼材腐食に対して十分な耐久性を有することが確認できた。



Photo 2 現場バッチャープラントの外観  
Batch Plant on Site

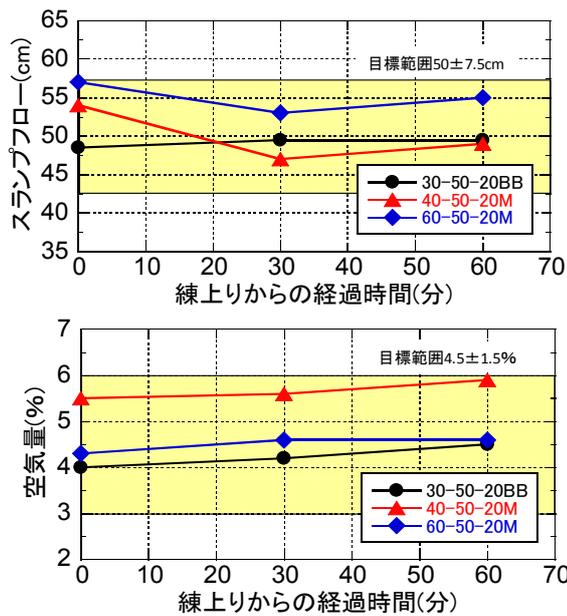


Fig. 12 実機プラントで製造したコンクリートのフレッシュコンクリート品質の経時変化  
Variation with Time of Slump flow and Air Content of Concrete Mixed by Onsite Batch Plant

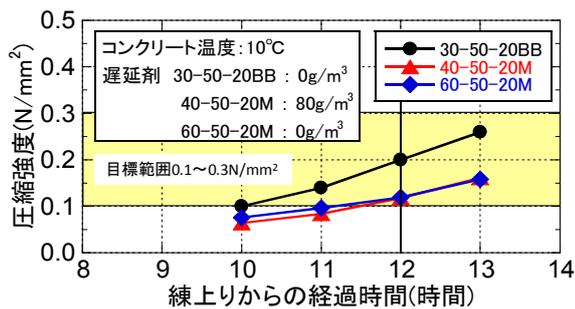


Fig. 13 実機プラントで製造したコンクリートの初期強度試験結果  
Compressive Strength at Early Age of Concrete Mixed by Onsite Batch Plant

## 5. 現場バッチャープラントでの製造実験

スリップフォーム工法による防液堤コンクリートの構築は、24時間連続施工で行うことから、現場内に設置したバッチャープラントでコンクリートを製造する。そこで、施工に先立ち、前章までに検討した配合のコンクリートを、現場バッチャープラントで製造して、その品質を検証した。

バッチャープラントの外観等をPhoto 2 に示す。ミキサは容量2.5m³の強制二軸練りミキサである。実施工時と同様に、1バッチの練混ぜ量は2m³とし、2バッチ製造してアジテータ車に排出した。なお、製造実験に先立ち、現場バッチャープラントの計量設備、練混ぜ性能等の検査を行い、所要の性能を有するプラントであることを検証した。



荷揚げ用バケットへの荷卸し (左) とクレーンによる吊り上げ (右) の状況



搬送用バケットによる運搬 (左) と開閉口からのシュートを介しての打込み (右) の状況

Photo 3 コンクリートの荷揚げ状況  
Unloading of Concrete for Outer Tank

各配合のフレッシュコンクリートの経時変化の一例を Fig. 12, 材齢12時間の圧縮強度試験結果を Fig. 13 に示す。なお、遅延剤の添加量は、前章での検討結果に基づき設定した。

配合の種類によらず、練上りから60分間にわたり、スランプフローおよび空気量の変化は小さく、品質の保持性に優れるコンクリートであることを確認した。現場バッチャープラントから施工現場までの運搬時間は約5分と短く、通常施工時には練上りから30分程度以内に打込みは完了すると想定されたが、今回の試験結果を踏まえれば不測の事態により、多少打込み完了までの時間が遅延した場合においても、十分な流動性を有する状態で打込み作業が行えることが確認できた。また、材齢12時間強度は、事前の検討実験結果に基づき、温度条件に応じて凝結遅延剤を付与することで、目標とする圧縮強度の範囲内に制御できることを確認できた。

更に、製造実験に合わせて許容打重ね時間間隔<sup>7)</sup>を測定したところ、6時間程度となり、暴風や降雨により一時的に施工が中断した場合でも、コールドジョイント等の不具合が生じ難いコンクリートであることも確認した。

## 6. 実施工への適用

### 6.1 コンクリートの打込み状況

コンクリートの施工現場での荷揚げ状況を photo 3 に示す。現場バッチャープラントで製造したコンクリート



コンクリートの流動状況  
Photo 4 コンクリートの施工状況  
Placing of Concrete for Outer Tank

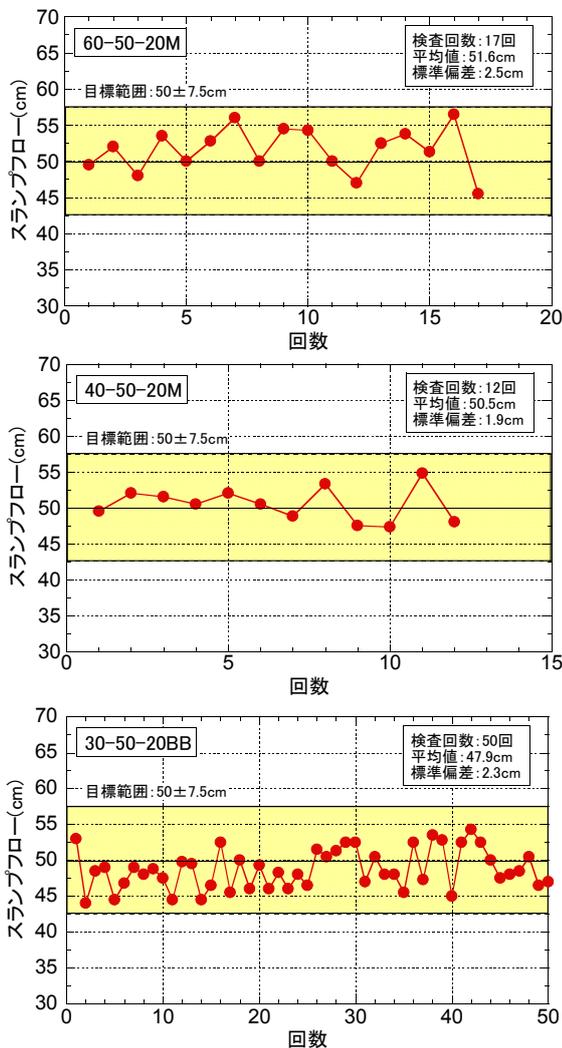


Fig. 14 実施工時のスランプフロー試験結果  
Result of Slump Flow Test for the Construction

は、施工現場までアジテータ車にて運搬(約5分)し、荷揚げ用バケツに荷卸した。荷揚げ用バケツをクレーンにて吊り上げ、スリップフォーム装置に設置した搬送用バケツにコンクリートを移し替え、打込み位置まで運搬した。そして、搬送用バケツの底面に設置した開

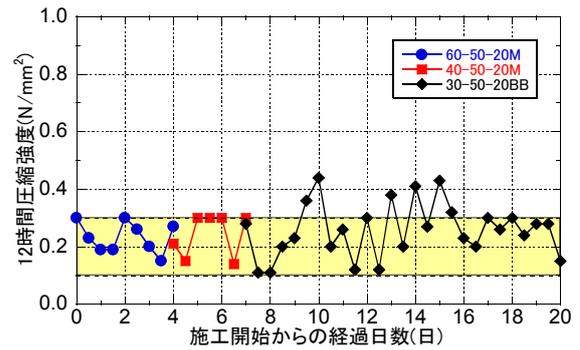


Fig. 15 実施工時の初期強度試験結果の推移  
Results of Compressive Strength at Early Age for the Construction

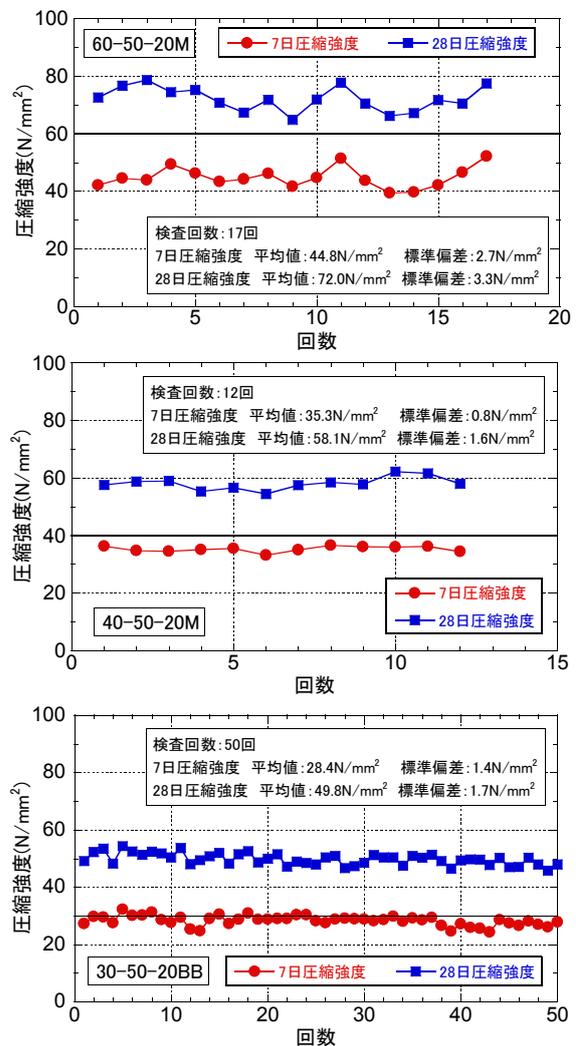


Fig. 16 実施工時の強度試験結果  
Results of Compressive Strength for the Construction

閉口からシュートを介してコンクリートを打ち込んだ。コンクリートの打込み状況をPhoto 4に示す。コンクリート自身の高い流動性により型枠の隅々まで容易に流動した。また、写真に示すように、モルタル分と骨材とが一体で流動し、材料分離は認められなかった。コンク

リートの打込み完了後、上面が平坦になる程度に棒状バイブレータによる締めを行った。

## 6.2 コンクリートの品質試験結果

実施工におけるコンクリートの品質試験結果の一例を Fig. 14 ～Fig. 16 に示す。

フレッシュコンクリートの品質は、いずれの配合のコンクリートでも、目標範囲を満足する結果が得られた。

材齢12時間の圧縮強度は、全ての試験において、コンクリートの自立に必要とされる $0.1\text{N}/\text{mm}^2$ 以上を満足していた。一方、スリップフォーム装置がスムーズに滑動するための目標値として設定した上限値( $0.3\text{N}/\text{mm}^2$ )を若干上回る試験結果も散見されたものの、最大でも $0.4\text{N}/\text{mm}^2$ 程度であり、概ね当初の計画通りに初期強度の発現性を制御することができた。

圧縮強度は、いずれの配合とも材齢28日において設計基準強度を満足する結果が得られた。また、標準偏差は30Nおよび40Nの配合では $1.5\text{N}/\text{mm}^2$ 程度で、高強度の60N配合でも $3\text{N}/\text{mm}^2$ 程度と小さく、ばらつきの小さい安定した品質のコンクリートが製造できた。

スリップフォーム工法による防液堤コンクリートの構築は、2013年4月11日～30日にかけて行なわれ、計画通りの20日間で構築が完了した。構築状況をPhoto 5 に示す。現場パッチャープラントでのコンクリート製造量は約 $9,500\text{m}^3$  (60-50-20M :  $1,818\text{m}^3$ , 40-50-20M :  $1,452\text{m}^3$ , 30-50-20BB :  $6,263\text{m}^3$ ) で、1日の平均製造量は約 $480\text{m}^3$ であった。

## 7. まとめ

工期短縮を目的として、スリップフォーム工法により大容量のLNG貯槽のPC防液堤を構築する際の専用のコンクリートを開発し、実施工に適用した。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 $390\text{kg}/\text{m}^3$ の配合でも、増粘型の高性能AE減水剤を適用することにより、スランプフロー50cmの高い流動性を有するコンクリートを製造できる。
- 2) スランプフロー50cmのコンクリートを用いることで、コンクリートを薄層で広範囲に打ち込むことができ、補助的な締めにより充填できる。
- 3) 高性能AE減水剤と遅延剤を併用し、打ち込む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により、若材齢の強度発現を制御でき、脱枠時のコンクリート強度を適切に管理することができる。
- 4) 早期に脱枠して特別な養生を施さない場合でも、



Photo 5 スリップフォーム工法で構築したPC防液堤  
PC Outer Tank by Slipforming Construction

セメントの種類や水セメント比を適切に選定した配合を用いることで、所要の耐用期間(50年)において中性化や塩害に伴う鋼材腐食の発生を防止できる。

- 5) 現場パッチャープラントにて、所要のフレッシュコンクリート品質および強度発現性を有するスムーズクリートを連続的に製造できる。

## 参考文献

- 1) 西崎丈能, 岡井大八, 近松竜一, 奥立稔, 鎌田文男: P C L N G 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)
- 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)
- 3) 河合勝美, 加藤靖彦, 一瀬賢一, 原田恒則: スリップアップ工法による大規模石炭サイロの施工, コンクリート工学, Vol.41, No.2, pp.32-38, (2003)
- 4) 桜井邦昭, 近松竜一, 秋好賢治: トンネル覆工用「スムーズクリート」の開発, 大林組技術研究所報, No.75, (2011)
- 5) 桜井邦昭, 近松竜一: 加振併用型の高流動コンクリート「スムーズクリート」の適用事例, 大林組技術研究所報, No.76, (2012)
- 6) 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) 土木学会: コンクリートライブラリー103 コンクリート構造物のコールドジョイント問題と対策, pp.7-20, (2000)