

曲面状埋設型枠を用いた床版の施工（塩害に関する検討）

Study on Durability to Salt Attack of Composite Slab with Curve Form

北野勇一*，吉松秀和*，西條龍**，橋吉宏***

Yuichi Kitano, Kazuhiro Yoshimatsu, Ryu Saijyo, Yoshihiro Tachibana

*川田建設株式会社，技術部技術課（〒114-8505 東京都北区滝野川 6-3-1）

** 協立エンジニア株式会社，技術部（〒170-0001 東京都豊島区西巣鴨 3-15-10）

*** 川田工業株式会社，橋梁事業部技術部東京技術部（〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11）

Recently, a new curved form made of cement extrusion form is developed. With this form, the new composite slab which introduces aggressively the arch action in construction and service can be made. This new composite slab was confirmed higher performance (static strength and fatigue durability) than the usual RC slabs. In this study, we focus on the application to areas damaged by seawater, the chloride penetration of this form was determined. In addition, required cover of the new composite slab was calculated by chloride diffusion analysis.

Key Words: cement extrusion form, chloride penetration, chloride diffusion analysis

キーワード：セメント系押出成形材，塩分浸透性，塩分浸透解析

1. はじめに

近年，曲面状に成形されたセメント系押出成形材（写真 - 1 参照）を RC 床版の埋設型枠として利用する施工技術が開発され，実用化に至っている¹⁾。この曲面状埋設型枠を用いることで曲面によるアーチ効果が得られ，施工時は型枠支保工として機能するとともに，完成後はコンクリートとの合成が期待できるアーチ形状のコンクリート系合成床版となる（写真 - 2 参照）。特に，曲面状埋設型枠を用いて施工されたコンクリート系合成床版は，普通の RC 床版よりも床版としての強度や疲労耐久性が向上することが確認されている^{2),3)}。

また，本技術は以下のような理由からコンクリート系床版としての初期品質の向上が図れる技術といえる。

- ・ 曲面状埋設型枠は設備の整った工場で作製されるため，現場打ちコンクリートと比べ品質が安定する。
- ・ 曲面状埋設型枠の曲げ強度は RC 床版に用いられるコンクリートよりも大きく，ひび割れが生じにくい。
- ・ 曲面状埋設型枠はオートクレーブ養生を行って製造されるため，緻密な組織が得られ物質の浸透に対する抵抗性が高い。

一方，床版の中長期的な耐久性に深く関与する本技術の品質特性，特にわが国の国土形成に起因し厳しい塩害を受けることについては，十分な検討がなされていない。

そこで，本研究では塩害に対する耐久性を対象に，平面状に成形されたセメント系押出成形材を用いて塩分浸



写真 - 1 曲面状埋設型枠



写真 - 2 曲面状埋設型枠を用いたコンクリート系合成床版（輪荷重走行試験による疲労耐久性の確認状況）

透性試験を実施し、塩分浸透性の定量化を試みた。また、実構造物の耐久性を照査するためには、コンクリート系合成床版としての検討が必要である。すなわち、塩害地域における必要かぶりは、セメント系押出成形材の塩分浸透性のみでは決定できず、かぶり部がセメント系押出成形材と場所打ちコンクリートの複合材であることを考慮する必要がある。これに対応するため、塩分浸透性が異なる材料で構成された複合材モデルを用いて塩分浸透解析を実施し、必要かぶりの算定を試みた。

なお、本稿では、床版上面側は橋面防水が行われ水を媒体とした塩化物イオンの浸透がないことを前提に、曲面状埋設型枠を適用する RC 床版の下面に着目して検討を進めるものとした。また、炭酸ガスの浸透による中性化や凍結融解作用による複合的な影響についてはセメント系押出成形材がこれによる品質劣化がほぼ生じないことから、本検討では考慮しないものとした。

2. 曲面状埋設型枠を用いた床版の施工について

曲面状埋設型枠は、セメントと珪石粉末を主原料とした押出成形材を曲面状に成形したもので、その形状は幅 450mm、厚さ 25 mm から 35mm、長さ（弧長）最大 3m となっている。適用支間は 1.0m から 2.5m 程度で、プレベーム桁等の比較的支間の短い床版部の埋設型枠として適用されている（写真 - 3 参照）。曲面状埋設型枠を用いた床版の設計は、普通の RC 床版と同様の方法（RC 計算による方法とし、アーチ効果を考慮しない）で行い、曲面状埋設型枠を床版の有効断面として考慮する。また、施工手順は、プレベーム桁床版に適用する場合、以下の通りである（図 - 1 参照）。

- プレベーム桁架設
- 簡易足場設置
- 曲面状埋設型枠の敷設
- モルタル充填（曲面状埋設型枠の端部の固定）
- 鉄筋組立
- コンクリート打設

上記の内、の作業は人手での横持ち運搬で行うことができる（写真 - 4 参照）。また、の作業はコンクリート打設荷重や作業荷重に抵抗するよう曲面状埋設型枠を 2 ヒンジアーチとして挙動させるための重要な作業である。関連して、のコンクリート打設作業中に主桁が変形・移動するとアーチ効果が失われ曲面状埋設型枠の破損につながるおそれがあるので注意を要する。

なお、本技術を用いると型枠解体作業が不要となること等から、床版施工に要する費用は、普通の RC 床版と比べ同等程度かそれ以下となる。

3. セメント系押出成形材の塩分浸透性試験

ここでは、平面状に成形されたセメント系押出成形材



写真 - 3 曲面状埋設型枠の適用例

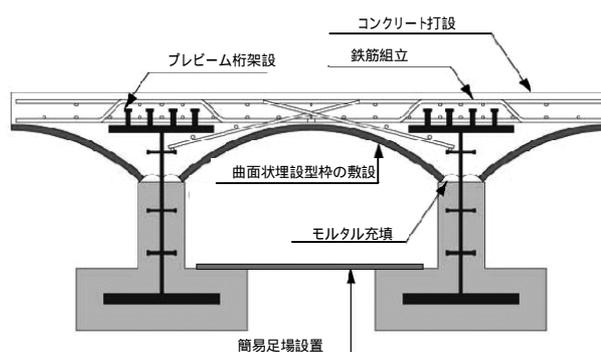


図 - 1 曲面状埋設型枠を用いた床版の施工要領



写真 - 4 曲面状埋設型枠の敷設状況

を用いて実施した塩分浸透性試験を中心に、実験方法とその結果について詳述する。

3.1 実験方法

(1) 使用材料

セメント系押出成形材の原料および製法を表 - 1 に、コンクリート配合を表 - 2 に示す。ここで、コンクリート配合は、道路橋示方書⁴⁾において RC 床版に用いられるコンクリートとして想定している水セメント比が 50%（設計基準強度は 30N/mm²程度）と記述されている

表 - 1 セメント系押出成形材の原料および製法

原料	普通ポルトランドセメント, 珪石粉末, 充填材, ポリプロピレン繊維, 水
成形方法	連続式真空押し出し成形方法
養生	高温高圧蒸気養生 (オートクレーブ養生)

表 - 2 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)				化学混和剤(C×%)	
		W	C	S	G	AE 減	AE 剤
50	47	165	330	831	965	0.15	0.0015

W: 水(水道水), C: 普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³), S: 細骨材(表乾密度 2.58g/cm³), G: 粗骨材(表乾密度 2.65g/cm³, G_{max}: 20mm), AE 減: AE 減水剤

ことから, これと一致させる配合とした.

また, 使用材料の基本性能確認として圧縮強度試験を実施するとともに, EPMA 分析装置にて反射電子像の撮影を行い, 各材料の組織観察を行った.

(2) 試験体の作製

試験体の断面形状を図 - 2 に示す. 試験体は 150 × 150 × 200mm の角柱とし, セメント系押出成形材を底面に設置した上でコンクリートを打設したもの(目地の有無を変えた 2 種類で, 目地が有るものは目地部にシリコンシーリングを充填した, 写真 - 5 参照)と, コンクリートのみを打設したものの計 3 種類について各 1 体ずつ作製した.

試験体はコンクリート打設翌日に脱枠し, 材齢 7 日まで 20 水中にて養生を行い, その後材齢 23 日まで 20 の室内にて保管した. この間に, 試験体の底面(塩分浸透面)を除く 5 面に対しエポキシ樹脂を塗布した.

(3) 試験体の塩水浸せき

試験体は, 材齢 23 日より再び 20 水中にて 5 日間保管した後, JSCE-G572 (浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案))⁵⁾に準拠し, 濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液中に 6 ヶ月間浸せきした.

(4) 塩化物イオン濃度測定

塩水浸せき後の試験体から浸透面中央部の幅 75mm × 浸透面からの深さ 75mm の試料を切り出し, JSCE-G574 (EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法(案))⁵⁾に準拠し, 塩化物イオン濃度を測定した.

3.2 実験結果と考察

(1) セメント系押出成形材の強度および組織構造

セメント系押出成形材の圧縮強度は 55.1N/mm² であり, 水セメント比 50% のコンクリート(材齢 28 日で 48.5N/mm²) と同様に普通の RC 床版の設計基準強度 30N/mm² を確保するものであった.

また, セメント系押出成形材は, 基本的には繊維で補

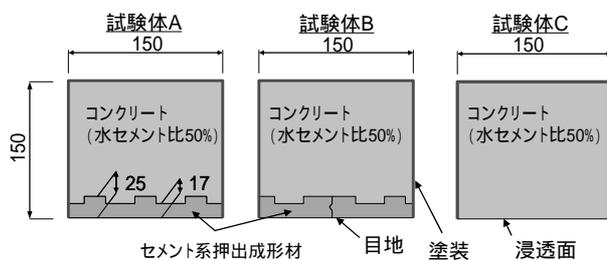


図 - 2 試験体の断面形状

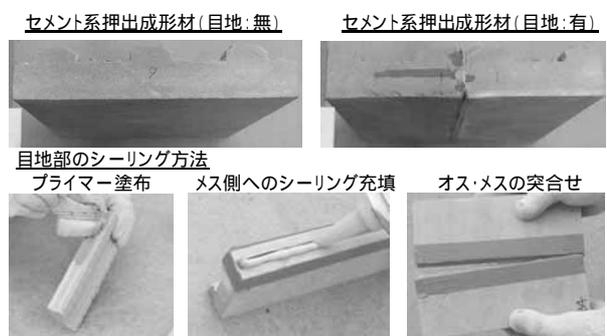
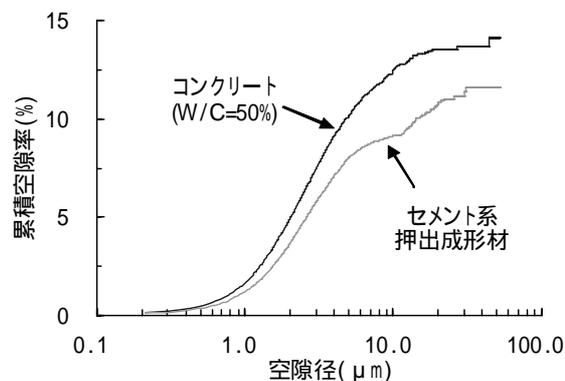


写真 - 5 使用したセメント系押出成形材

表 - 3 反射電子像観察結果

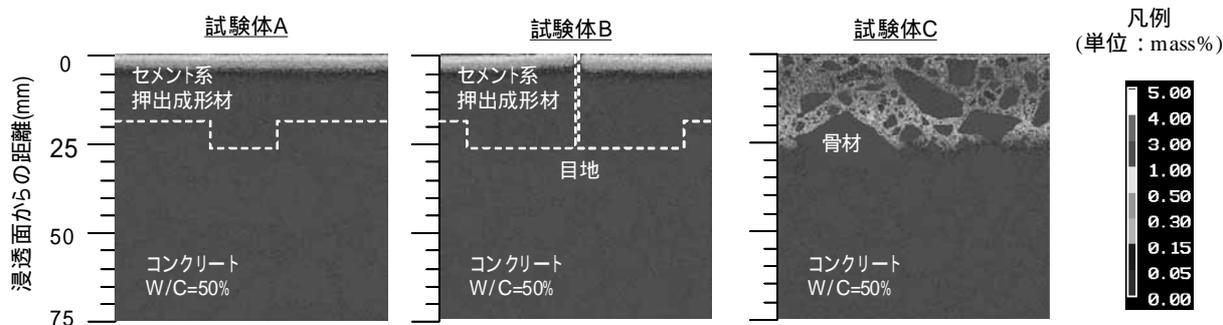
	セメント系押出成形材	コンクリート(W/C=50%)
倍率 50 倍		
倍率 500 倍		

注) セメント系押出成形材の観察位置は厚み中心, コンクリートのそれは試験体 C の中央部とした. また, 倍率 500 倍の反射電子像は, 倍率 50 倍の中心部(枠内)を観察したものである.



注) 反射電子像観察で取得した倍率 500 倍の画像について, 画像解析による空隙量を算出した. この際, 骨材やひび割れは解析の対象外とし, 合計 9 枚の画像の空隙径分布を平均して求めた.

図 - 3 空隙径分布



注) 浸せき期間6ヶ月の試験体の塩分浸透状況であり、上側より塩分を浸透させている。

図 - 4 塩分浸透性試験後の塩分浸透状況

強されたモルタル質のものであり(表 - 3 参照), 水セメント比 50% のコンクリートと比べ, 空隙量の少ない組織となっていることがわかる(図 - 3 参照)。

(2) 塩分浸透状況

各試験体の塩分浸透状況を図 - 4 に示す。セメント系押出成形材を用いた試験体 A および試験体 B と同、塩分の浸透深さは 5mm 程度であり、目地の有無により浸透深さが変化することはなかった。また、コンクリートのみで作製した試験体 C の塩分浸透深さは 25mm 程度以上になっていることから、セメント系押出成形材は RC 床版に用いられるコンクリートよりも塩分の浸透を抑制することが確認された。

(3) 塩化物イオン濃度分布と拡散係数の算出

試験体 A と試験体 C に着目し、塩分浸透面からの深さ方向の塩化物イオン濃度 (mass%) を 0.5mm 間隔毎に平均し、単位容積当たりの重量 (kg/m^3) に換算した結果を図 - 5 に示す。図には、実測された塩化物イオン濃度分布を拡散方程式の解で回帰した結果と見掛けの拡散係数を併せて示した。

これより、試験体 A の見掛けの拡散係数は $0.078\text{cm}^2/\text{年}$ 、試験体 C で $1.875\text{cm}^2/\text{年}$ と算出された。このことから、今回使用したセメント系押出成形材の塩化物イオン拡散係数は、RC 床版に用いられるコンクリートの 1/20 以下になることが確認された。

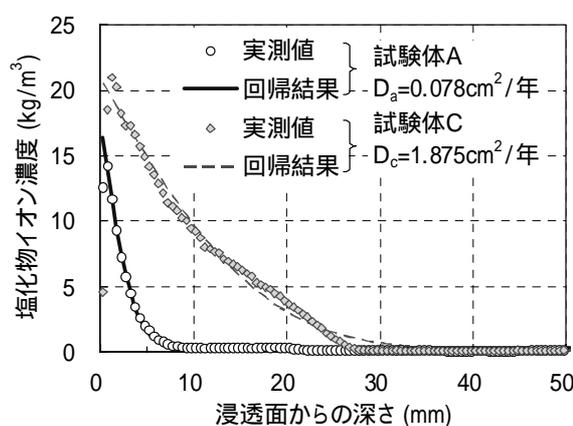


図 - 5 塩化物イオン濃度分布



写真 - 6 曲面状埋設型枠を用いた床版の下面の様子

4. 曲面状埋設型枠を用いた床版に関する塩分浸透解析

ここでは、曲面状埋設型枠を用いて施工された床版の下面側(写真 - 6 参照)を対象として実施した塩分浸透解析を中心に、解析方法とその結果について詳述する。

4.1 塩分浸透解析方法

塩分浸透解析に用いた解析モデルを図 - 6 に示す。前述した通り、ここでは床版下面側の曲面状埋設型枠(セメント系押出成形材)の表面から塩分が浸入し、その表面部と内部との塩化物イオンの濃度差により塩分が浸透する現象が式(1)に示すフィックの第二法則で表されると仮定し、一次元の差分法にて解析した。

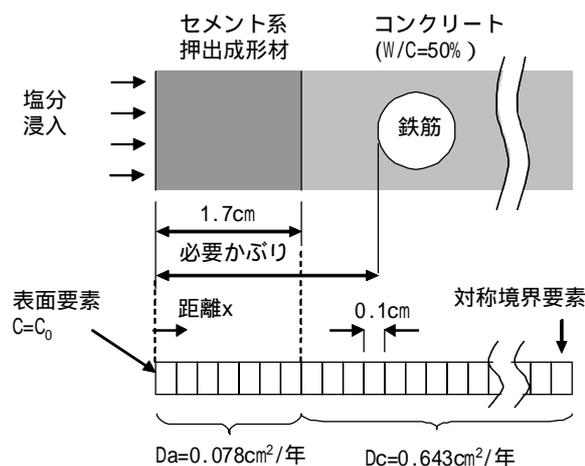


図 - 6 塩分浸透解析に用いた複合材モデル

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (1)$$

C : 塩化物イオン濃度(kg/m³)

x : 塩分浸透面からの距離(cm)

t : 塩化物イオン浸入開始からの経過時間(年)

D : 拡散係数(cm²/年)

ここで、セメント系押出成形材の拡散係数 D_a は実測値を用い、コンクリートの拡散係数 D_c は道路橋示方書の最小かぶりの算出手法と一致させるため、文献 6) に基づき式(2)より算出した。

$$D_c = 86400 \times 365.25 \times (5 \times 10^{-7}) \cdot e^{-1.6(C/W)} \quad (2)$$

C/W : セメント水比 (= 2)

また、初期条件は $C=0(x>0, t=0)$ とし、表面要素の境界条件を $C=C_0$ とした。ここで、 C_0 はセメント系押出成形材の表面の塩化物イオン濃度であり、これについても道路橋示方書の最小かぶりの算出手法と一致させるため、文献 6) に基づき式(3)より算出した各対策区分の中央値(表-4参照)を用いることにした。

$$C_0 = 1.5 \cdot C_{air}^{0.4} = 1.5 \cdot (0.6 \cdot d^{-0.6})^{0.4} \quad (3)$$

C_{air} : 架橋地点における飛来塩分量(mdd), d : 海岸線からの距離(km)

なお、解析モデルは、対称境界の要素に塩分が浸透しないよう十分な距離を確保し(道路橋示方書における最小かぶりの算出の際と同様に床版が無限の厚みを持つものとする)、セメント系押出成形材の厚みは最小となる部位の 17mm を用いた。

4.2 塩分浸透解析結果と考察

(1) 複合材としての塩分浸透特性

対策区分 ($C_0=1.88\text{kg/m}^3$) における経過時間 5 年と 30 年の塩分浸透解析結果を図-7 および図-8 に示す。ここで、結果の表示は、解析値に初期塩分 0.3kg/m^3 を合算したものとした。また、解析ケースは図-6 に示した複合材モデル(ケース1)と、水セメント比 50% のコンクリートおよびセメント系押出成形材のみで構成されたモデル(ケース2およびケース3)の3ケースとした。

経過時間 5 年に着目すると、ケース1とケース3の解析結果はほぼ一致し、塩分の浸透深さはセメント系押出成形材の厚み(17mm)程度となった。一方、経過時間 30 年の解析結果からすると、ケース1の結果はケース3よりもむしろケース2の結果に近づいた。このように、セメント系押出成形材よりも深部まで塩分が浸透する場合には、図-6 に示したような複合材モデルにより検討する必要があることが確認された。

また、他の対策区分の塩分浸透状況は、表面の塩化物イオン濃度が異なるものの、図-7 および図-8 と相似形の解析結果となる。

表-4 解析に用いた表面塩化物イオン濃度 C_0

対策区分	海岸線からの距離	C_0 (kg/m ³)
S	1~100m	4.27
	100~300m	1.88
	300~500m	1.54
	500~700m	1.39

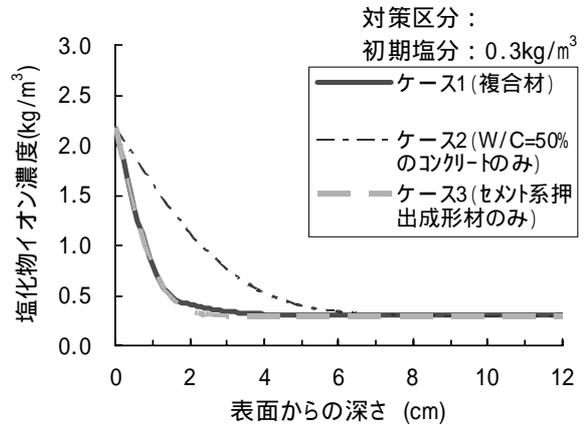


図-7 塩分浸透解析結果(経過時間5年)

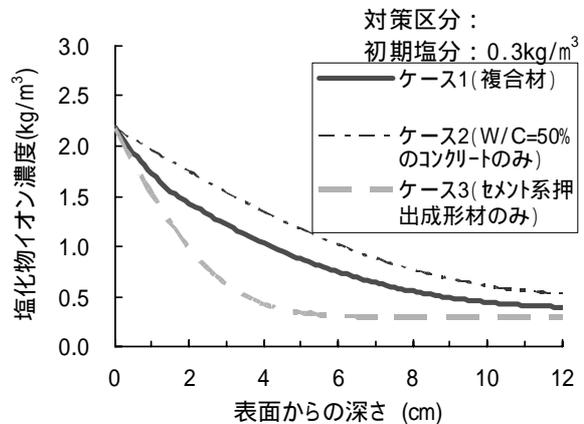


図-8 塩分浸透解析結果(経過時間30年)

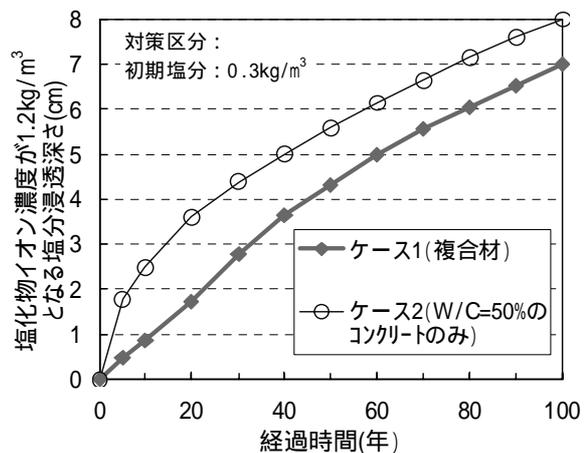


図-9 セメント系押出成形材による塩分浸透抑制効果

(2) セメント系押出成形材による塩分浸透抑制効果

ここでは、対策区分（ $C_0=1.88\text{kg/m}^3$ ）に着目し、解析ケースを前述のケース1およびケース2について塩分浸透解析を行い、塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 になる塩分浸透深さの経年変化を求めた。その結果を図-9に示す。これによると、ケース1の複合材モデルはケース2の $W/C=50\%$ のコンクリートのみモデルと比べ、初期の塩分浸透深さが小さく、その後もケース2とほぼ並行しながらもケース2に近づくことなく塩分が浸透していく傾向となっている。すなわち、複合材の方が時間的に遅れて塩分が浸透し、その程度は経過時間100年までの範囲にておいて、 $W/C=50\%$ のコンクリートに対し10年から15年の遅れであることが解析的に確認された。

また、他の対策区分についても対策区分と同じ傾向となる解析結果が得られている。

(3) 曲面状埋設型枠を用いた床版の必要かぶり

3章に示したセメント系押出成形材の塩分浸透試験および4章のこれまでの塩分浸透解析に基づき、設計上の目標期間を100年と設定して道路橋示方書に示されるRC床版と同等の性能が得られるかぶりを解析的に算出した結果を表-5に示す。表に示す通り、塩害の影響が激しい対策区分SではRC床版と同様な対策を講じる必要があるものの、対策区分で塗装が不要となること、対策区分と対策区分で必要となるかぶりが低減されることが確認された。

5. まとめ

本研究では、曲面状埋設型枠を用いた床版の塩害に関する検討を行った。その結果の要約を以下に示す。

- (1) 曲面状埋設型枠に用いるセメント系押出成形材について塩分浸透性試験を実施した。その結果、RC床版に用いられる水セメント比50%のコンクリートに比べ、見掛けの拡散係数が $1/20$ 以下になることが確認された。
- (2) 床版のかぶり部がセメント系押出成形材とコンクリートの複合材として構成されたモデルを用いて塩分浸透解析を実施した。その結果、RC床版に用いられる水セメント比50%のコンクリートに比べ塩分が

表-5 RC床版と同等の性能が得られるかぶりの解析検討結果 (単位: mm)

塩害の影響の度合い	対策区分	鉄筋コンクリート床版	曲面状埋設型枠を用いた床版
影響が激しい	S	70(要塗装等)	70(要塗装等)
影響を受ける		70(要塗装等)	70
		70	55
		50	45
影響を受けない		30	30

注) 解析の結果、かぶりが70mmを超える場合は「70(要塗装等)」と表記することにした。

10年から15年ほど遅れて浸透し、塩害の影響の度合いによってはRC床版と同等の性能が得られるかぶりが小さくなることが解析的に確認された。

以上より、曲面状埋設型枠を用いた床版は、RC床版と同じかぶりを確保しておけば、RC床版よりも長期的な耐久性が向上するといえる。

参考文献

- 1) 国土交通省新技術情報提供システム: NETIS 登録 No. KK-110019-A (<http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/>)
- 2) 松井繁之, 大西弘志, 徳岡昭夫, 劉新元: 曲面状埋設型枠を用いたRC床版の疲労耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.25, No.2, pp.667-672, 2003.7
- 3) 西條龍, 内田雅人, 大樋邦夫, 徳岡昭夫: 曲面状埋設型枠によるRC床版施工法の開発, 川田技報 Vol.24, pp.26-31, 2005.1
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 編コンクリート橋編, pp.175, 2002.3
- 5) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書【規準編】土木学会規準および関連規準, 2007.5
- 6) 国土交通省土木研究所ほか: ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究報告書() PC橋の塩害対策に関する検討, pp.38-47, 2001.3