

コンクリート構造物の機能保持技術

タフネスコート

興 石 正 己

鉄筋コンクリート構造物（以下、RC という）の衝撃力に対する抵抗性、剥落防止性および耐久性の向上を目指して、ポリウレア樹脂でコンクリート表面を被覆する技術「タフネスコート」（以下「本工法」という）に着目し、平成 24 年より技術開発を行ってきた。本工法は、従来のエポキシ樹脂やポリウレタン樹脂で被覆する工法に比べて、引張強度（ $\sigma_t = 24 \text{ N/mm}^2$ ）と伸び性能（ $\varepsilon_{tu} = 200\%$ ）に優れたポリウレア樹脂を、専用装置で RC 構造物に吹付けることにより一体化（付着強度 $\sigma = 1.5 \text{ N/mm}^2$ ）させ、衝撃力に対する抵抗性能、剥落抵抗性能および耐久性を向上させるものである。本稿では、①本工法に使用するポリウレア樹脂の材料特性、②衝撃性能の検証、③剥落防止性能の検証、④耐久性向上 について紹介する。

キーワード：ポリウレア樹脂、衝撃性能の向上、剥落防止、耐久性向上

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災以降、発生する確率は小さいが地震・津波災害時の大きな作用荷重に対する安全対策が急務となっている。特に防波壁の破壊による津波被害の拡大¹⁾や橋桁や建築物の物的被害などが報告されており、効果的な「防災」「減災」技術の研究開発が望まれている。

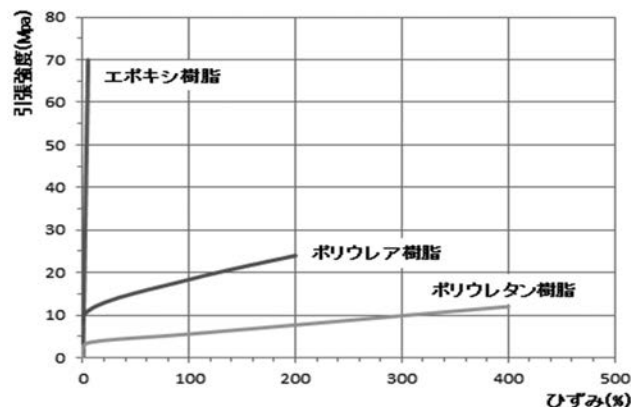
著者らはライニング材料²⁾で RC 構造物を被覆することにより、構造物の崩壊を抑制し大変形しても耐荷力を保持できる本工法を研究開発中である。本報告では、ポリウレア樹脂の特徴、本工法の衝撃性能（実物大の衝撃実験）、コンクリートの剥落防止効果及び耐久性向上に必要なひび割れ追従性、遮塩性に関する知見を紹介する。

2. ライニング樹脂

本工法に使用するライニング材料としては、ポリウレア樹脂²⁾、エポキシ樹脂、ポリウレタン樹脂などがある。図—1 に樹脂材料の力学特性の比較を示す。この図より、ポリウレア樹脂は引張強度が 24 MPa と大きく、破断時のひずみは 200% 程度である。エポキシ樹脂は引張強度 70 MPa と非常に大きいですが、破断時のひずみは 5% 程度と小さい。また、ポリウレタン樹脂は破断時のひずみは 400% 程度と大きいですが、引張強

度は 10 MPa 程度と小さい。そこで今回、引張強度と伸び性能に優れたポリウレア樹脂に着目し研究開発を開始した。ポリウレア樹脂は反応性に富むイソシアネート（ $\text{O}=\text{C}=\text{N}-\text{Q}-\text{N}=\text{C}=\text{O}$ ）とポリアミン（ $\text{NH}_2-\text{R}-\text{NH}_2$ ）を 2 液混合スプレーでウレア結合させ、構造物表面に塗布するものである。その特徴として、①施工直後に瞬間的に硬化する。②早期に強度を発現する。③毒性がない。④耐候性（紫外線）、耐酸性、耐アルカリ性に優れる等が挙げられる。

衝撃力による大きな荷重を受ける RC 構造物のライニング材料としては大きな変形性能とひずみが多い領域での復元力を確保できる強度が必要であり、破断時のひずみが小さいエポキシ樹脂、引張強度が小さいポリウレタン樹脂は適していない。一方、ポリウレア



図—1 樹脂材料の力学特性の比較

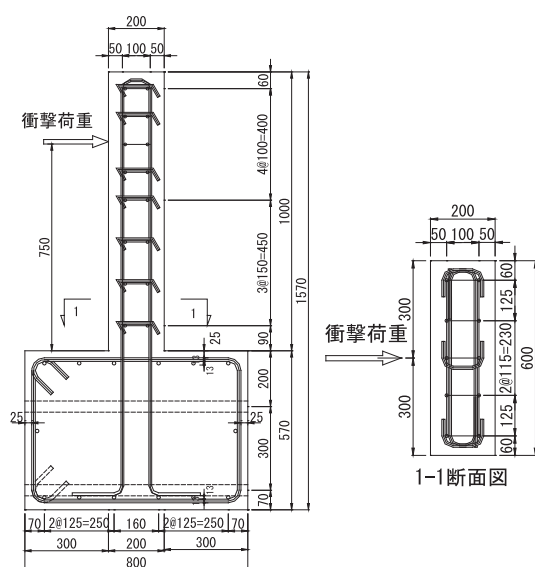
樹脂は従来の樹脂材料になかった引張強度と伸び性能を併せ持った材料であり、本工法はこのポリウレア樹脂の持つ力学特性を利用して、構造物をラッピングし衝撃力に対する安全性向上、剥落防止及び耐久性向上を図る技術である。

3. 衝撃性能の検証（実大衝撃実験）

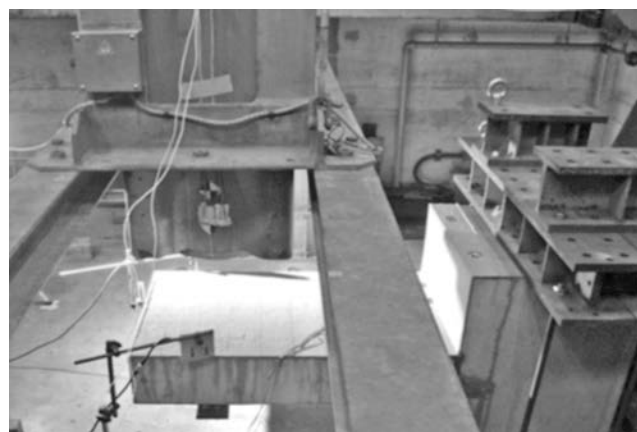
（1）実験概要

本実験では、高速道路の壁高欄を一部切出した RC 片持梁試験体をライニング材料で被覆し、設計荷重の 2.5 倍程度を想定した衝撃载荷を行なった。载荷方法としては、衝撃载荷で損傷した試験体に設計荷重レベルの衝撃力を繰返し作用させることにより崩壊までの挙動を確認した。また、無被覆の RC 片持ち梁試験体と比較検討することにより、本工法の効果を定量的に把握した。図一 2 に衝撃実験試験体の概要を示す。RC 片持ち梁試験体は、幅 600 mm、高さ 200 mm、長さ 1,000 mm で主鉄筋及びせん断補強鉄筋には D10 (SD345) を使用した。RC 片持ち梁の主鉄筋は長さ 570 mm のフーチングに十分定着し、片持ち梁の基部における主鉄筋の拔出しを防止した。ライニング材料は、試験体の梁部の上下面及びフーチングの上面、側面に厚さ 2 mm、4 mm で一様に塗布した。

写真一 1 に衝撃実験装置の概要を示す。せん断スパン長 750 mm で片持ち支持された RC 梁試験体に質量 1,000 kg の重錘を落下高さ 300 mm から自由落下させた。さらに初期衝撃载荷実験後に損傷した RC 片持ち梁試験体の損傷程度（残留耐力）を定量的に評価するために、設計荷重レベルの衝撃力として落下高さ



図一 2 衝撃実験試験体



写真一 1 衝撃実験装置

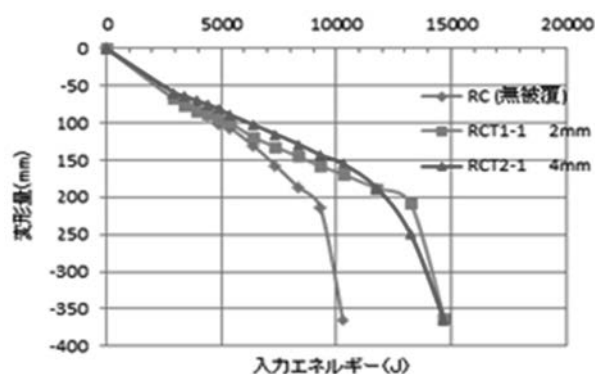
表一 1 衝撃実験試験体の一覧

試験体	初期落下 高さ mm	繰返し落下 高さ mm	入力エネ ルギー J	塗布厚 mm
RC	300	50, 100	10,290	0.0 (無)
RCT1-1	300	50, 100, 150	14,700	2.0
RCT1-2	300	50, 100, 150	17,640	2.0
RCT1-3	300	50, 100, 150	14,700	2.0
RCT2-1	300	50, 100, 150	14,700	4.0
RCT2-2	300	50, 100, 150, 200, 300	19,600	4.0
RCT2-3	300	50, 100, 150	14,700	4.0

50 mm から質量 1,000 kg の重錘を繰返し自由落下させた。表一 1 に実験試験体の一覧を示す。

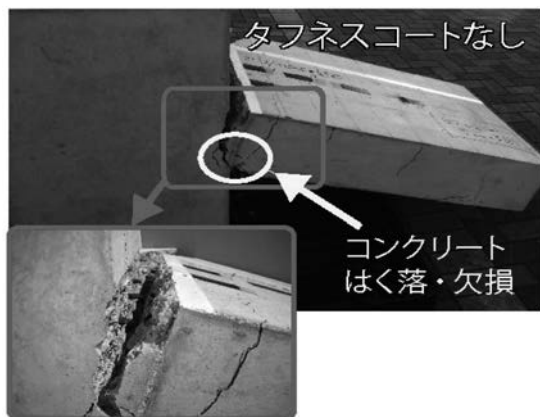
（2）衝撃実験結果

実験にて得られた RC 試験体、RCT1-1 及び RCT2-1 試験体の入力エネルギーと変位の関係を図一 3 に示す。この図より、試験体の崩壊（変形が 350 mm 以上）までに入力したエネルギーの総和はポリウレア樹脂で被覆した場合（吹付厚 2 mm、4 mm）には、無被覆の RC 試験体に比べて 43% 程度増加することが確認



図一 3 入力エネルギーと変位の関係 (H=300)

された。3 試験体の平均値では、2 mm 塗布した試験体が 52%，4 mm 塗布した試験体が 59% の増加となった。写真—2、3 に RC 及び RCT1-1 試験体の崩壊状況を示す。RC 試験体では圧縮側(下面側)のコンクリートが崩落するため、ひび割れがフーチング内部まで進展し引張鉄筋の破断と同時に急激に崩壊した。一方 RCT1-1 試験体はポリウレタ樹脂により圧縮側のコンクリートが保持されるため、ひび割れが壁体基部に留まり引張鉄筋が破断した後に緩やかに崩壊した。



写真—2 RC 試験体の崩壊状況



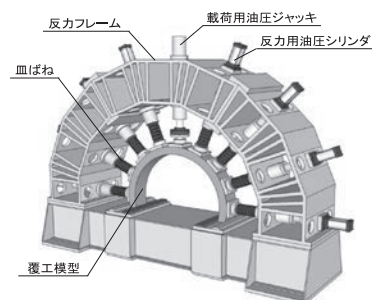
写真—3 RCT1-1 試験体の崩壊状況

4. 剥落防止性能の検証

(1) 実験概要

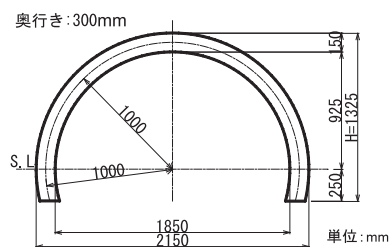
山岳トンネルでは、覆工の剥落を防止するために定期的に検査が行われている。また、予防策として各種の剥落防止対策工が開発されすでに採用されているが、耐久性や施工性に一部課題が残っている。この課題の解決を目標として、大型トンネル覆工模型実験装置を用いた載荷実験を行った。実験装置の縮尺は新幹線複線標準断面の 1/5 相当である。実験装置は、図—4 に示すように載荷用油圧ジャッキ、反力用油圧シリ

ンダ、反力フレーム等で構成され、模型覆工の周囲に取り付けられた皿ばねにより覆工と地盤との相互作用を模擬することができる。



図—4 載荷装置図

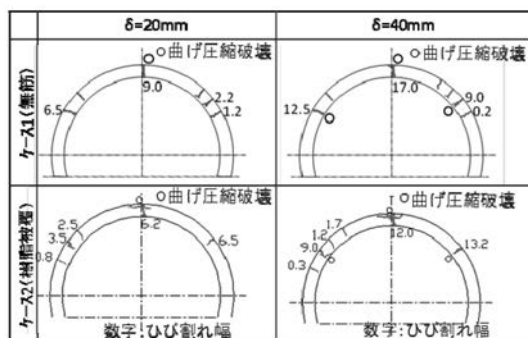
試験体の構造を図—5 に示す。覆工は矢板工法による新幹線トンネル(巻厚 70 cm)を想定し、材料は無筋コンクリートとした。実験ケースはケース 1 (無筋)とケース 2 (樹脂被覆)の 2 ケースとした。ケース 2 (樹脂被覆)は覆工の内面にポリウレタ樹脂を厚さ 1.35 mm で吹付けた。載荷実験は変位制御により、覆工天端を鉛直下向きに最大 70 mm 変位させることにより行なった。この際、破壊状況、載荷重 P 、載荷点変位 δ 、ひび割れ位置、ひび割れ幅の計測を行った。



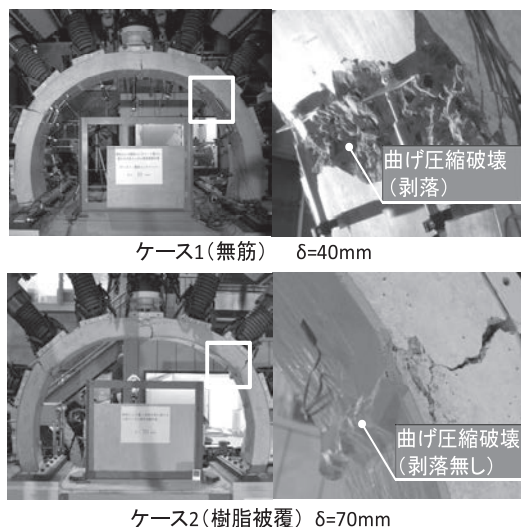
図—5 試験体の構造図

図—6 に覆工天端の鉛直変位が $\delta = 20, 40$ mm 時におけるひび割れ状況を示す。2 ケースとも $\delta = 2$ mm 程度で曲げ引張りひび割れが天端内側及び肩部外側に発生した後、 $\delta = 16$ mm (ケース 1)、 $\delta = 20$ mm (ケース 2) で天端に曲げ圧縮破壊が発生した。

図—7 に天端変位が進んだ後の曲げ圧縮破壊箇所の状況を示す。ケース 1 (無筋)では $\delta = 40$ mm 時点で掌大の塊状剥落が発生しているのに対し、ケース 2 (樹脂被覆)では、 $\delta = 70$ mm に到達しても、曲げ圧縮破壊箇所においては樹脂の表面に凹凸が見られるものの樹脂で被覆されていることにより覆工の剥落はなく、また樹脂自体の剥離や破断が発生することもなかった。

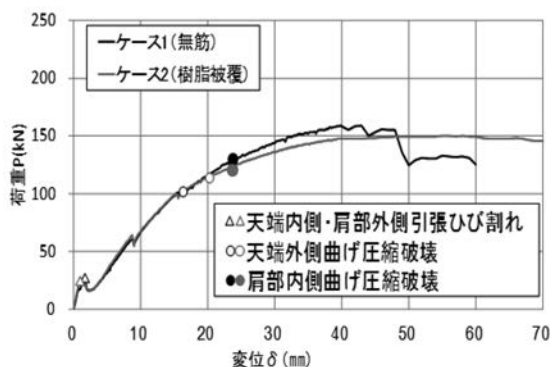


図一六 ひび割れ状況図

ケース2(樹脂被覆) $\delta=70\text{mm}$

図一七 試験体の破壊状況

図一八に各ケースの荷重 P と載荷板の変位 δ の関係を示す。いずれのケースも、 $\delta=2\text{mm}$ 程度で引張ひび割れが発生して3ヒンジアーチ状態となった際に荷重が一旦低下した。その後地盤ばねにより支持されたアーチ構造であるため、 $\delta=16\text{mm}$ (ケース1)、 $\delta=20\text{mm}$ (ケース2) で天端に、 $\delta=23\text{mm}$ 前後(ケース1, 2)で肩部に曲げ圧縮破壊が発生し、トンネルとしての剛性が低下したが、両ケースとも耐力を失うことはなかった。さらに変位を増加させると、ケース1(無筋)は $\delta=48\text{mm}$ で荷重が急激に低下した。こ



図一八 荷重-変位曲線

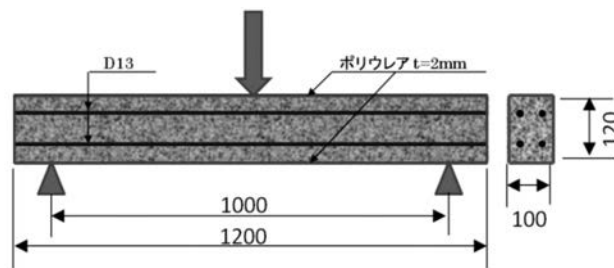
れは、曲げ圧縮破壊箇所でコンクリートが剥落し断面欠損を生じたためと考えられる。ケース2(樹脂被覆)ではこのような荷重の急激な低下は観察されなかった。これは樹脂で被覆された試験体では剥落が生じないため、コンクリートには破壊が生じるものの荷重伝達が行われているためと考えられる。

5. コンクリート構造物の耐久性向上

(1) 曲げ実験概要

コンクリート構造物の劣化現象としては、塩害、中性化、凍害及びアルカリ骨材反応などが報告されている。このようなコンクリート構造物の劣化現象を防止するために、それぞれの劣化要因に対して対策が取られているが、その一つとしてコンクリート表面を樹脂で保護し、ひび割れが発生した後の外部からの水分浸透を防止することは有益な対策と考えられる。

このような状況に鑑み、今回ポリウレタ樹脂、ポリウレタン樹脂及びエポキシ樹脂で4面を被覆した試験体による準静的曲げ試験(載荷速度: 0.1mm/s)を実施し、それぞれの樹脂のひび割れ追従性を確認した。図一九に準静的曲げ試験体の概要を示す。準静的曲げ試験体は、幅 100mm 、高さ 120mm 、長さ $1,200\text{mm}$ で主鉄筋には D13 (SD345) を使用した。表一2に試験体の一覧を示す。



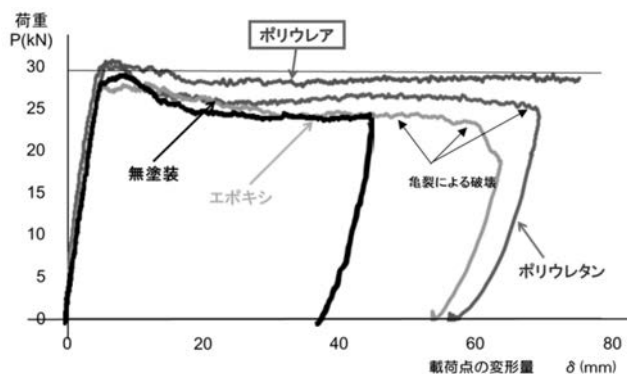
図一九 準静的曲げ試験の試験体

表一2 準静的曲げ試験体の一覧表

試験体	載荷スパン長 mm	被覆材料	被覆厚 mm	被覆面
RC	1,000	—	—	—
RCE	1,000	エポキシ	2.0	4面
RCPU	1,000	ポリウレタン	2.0	4面
RCP	1,000	ポリウレア	2.0	4面

(2) 曲げ実験結果

図一十に示すように、準静的曲げ試験(載荷速度: 0.1mm/s)では、RC試験体は初期降伏後に耐荷力を維持したまま変形量が 46mm まで計測され、RCE及

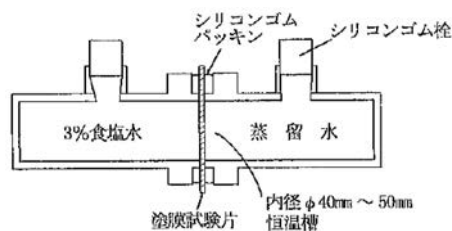


図—10 各試験体の荷重変形量曲線

び RCPU 試験体では同様にそれぞれ 62 mm, 73 mm まで計測された。さらに, RCP 試験体では初期降伏後に耐荷力を維持したまま変形量が増大し最大 75 mm まで計測された。荷重-変形関係において, 荷重が低下し始める変形量は計測器の制限値により計測できなかったが, 他の樹脂に比べて大きな変形特性を有することが確認された。また, ひび割れ性状は, RC 試験体及び RCE 試験体においては, 載荷点直下にひび割れが集中し大きなひび割れ幅が観測されたが, RCPU 及び RCP 試験体では良好な分散性を示し, 破壊時まで樹脂の破断は観測されなかった。

(3) 塩化物イオン浸透試験概要

コンクリート構造物の劣化現象の一つとして, 国内の海岸部及び内陸部でも凍結防止剤を多用する地域においては, 塩害による被害が多数報告されている。この対策としてポリウレタ樹脂の有効性を確認するために, 塩化物イオン透過試験³⁾を実施した。試験方法としては, 図—11 に示すように, 厚さ 1 mm のポリウレタ樹脂で 3% の食塩水と蒸留水を分離し, 一定時間放置した後の透過塩分量をイオンクロマトグラフ法で計測した。



図—11 塩化物イオン浸透試験 模式図

(4) 塩化物イオン浸透試験結果

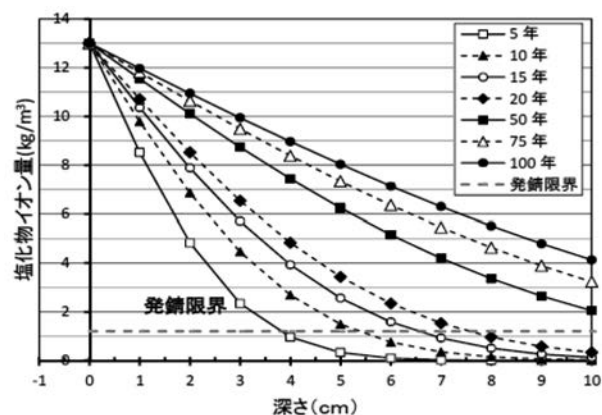
試験結果の一覧を表—3 に示す。計測された塩化物イオン透過度は $0.23 \sim 1.92 \times 10^{-5}$ であり, 一般環境の PC または RC 構造物に対する基準値 1.0×10^{-2} の 1/500 以下, 特に厳しい環境における基準値 $1.0 \times$

表—3 準静的曲げ試験体の一覧表

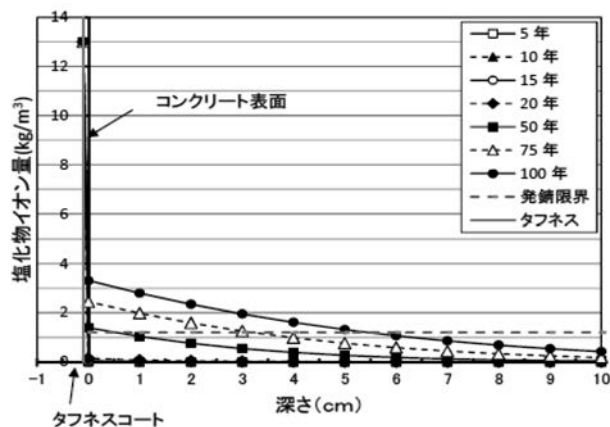
試験期間 (日)	塩化物イオン透過度 ($\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{日}$)	塩化物イオン濃度 (mg/ℓ)
30	ND	ND
90	1.47×10^{-5}	0.13
120	1.01×10^{-5}	0.12
270	1.92×10^{-5}	0.51
300	0.23×10^{-5}	0.07

10^{-3} に対しても 1/50 以下であり, 十分な遮塩効果が確認された。

次に, 今回の塩化物イオン浸透試験結果をもとに, フィックの拡散式を用いて, 塩化物イオン量の深さ方向への浸透状況を確認した。図—12 は, コンクリート表面の塩化物イオン量 C_0 を飛沫帯の $13 \text{ kg}/\text{m}^3$, 普通セメント, 水セメント比 W/C を 50% とした場合の算定結果である。この表より, かぶり 50 mm の位置においては 10 年程度で鉄筋の発生限界値 $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ に到達することが確認された。一方, ポリウレタ 1 mm で表面被覆した場合には, 図—13 に示すように 100 年程度で $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ となっており, 塩害に対す



図—12 塩化物イオン浸透曲線



図—13 塩化物イオン浸透曲線 (表面被覆 1 mm)

る耐久性を大幅に向上することが可能であることが判明した。

6. おわりに

現在までの、研究開発により得られた知見を以下に述べる。

- 1) 実大衝撃実験における初期衝撃载荷では、ポリウレタ樹脂（2 mm, 4 mm）で4面被覆することにより、破壊時における圧縮側（下面側）のコンクリートの剥落を防止できる。
さら RC 壁の基部に発生するひび割れは圧縮側では壁体に留まりフーチング部へは損傷が波及しないことが確認された。
- 2) 実大衝撃実験における初期衝撃载荷では、ポリウレタ樹脂（2 mm, 4 mm）の有無による変形量には有意な差は認められなかった。
- 3) 実大衝撃実験における繰返し衝撃载荷では、ポリウレタ樹脂（2 mm, 4 mm）で被覆することにより試験体への入力エネルギーは3体平均で52%～59%程度増大した。
- 4) トンネル覆工に関しては、ポリウレタ樹脂塗布により曲げ圧縮破壊箇所で剥落が防止でき、この際、樹脂自体の剥離や破断が発生せず覆工へに高い追随性が確認された。
- 5) トンネル覆工において曲げ圧縮破壊が発生した断面におけるコンクリートの剥落を防止できること

より、荷重の急激な低下を防止できることが確認された。

- 6) コンクリート構造物の耐久性向上に必要な樹脂のひび割れ追随性に関しては、ポリウレタ樹脂及びポリウレタン樹脂は終局状態のひび割れ幅まで追随できた。
- 7) ポリウレタ樹脂の塩化物イオン透過度は、 $0.23 \sim 1.92 \times 10^{-5}$ (mg/cm²・日) であり、一般環境における基準値の1/500以下、特に厳しい環境における基準値の1/50以下であることが確認された。
- 8) ポリウレタ樹脂で表面被覆することにより、塩害に対する抵抗性を大幅に向上できることが確認された。

JCMA

《参考文献》

- 1) 中央防災会議：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門委員会（中間とりまとめ），2011年6月26日。
- 2) スワールスプレーシステム（ポリウレタ樹脂防水防食材）スワエール 三井化学産資機技術資料
- 3) 道路橋の塩害対策指針（案）・同解説，日本道路協会

【筆者紹介】

奥石 正己（こしいし まさみ）
清水建設㈱ 土木技術本部 開発機械部
主査

