

コンクリート構造物の機能保持・向上技術(タフネスコート)

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR MAINTAINING AND IMPROVING FUNCTIONS OF CONCRETE STRUCTURES “TOUGHNESS COAT”

奥石 正己*・久保 昌史**・井出 一直***
Masami KOSHIISHI, Masashi KUBO and Kazunao IDE

The “Toughness Coat” coating method is a technology for improving the concrete structure by spraying pure polyurea resin on its surface to individually or simultaneously prevent peeling, secure water storage, improve durability, and improve performance against impact. Characteristic of polyurea resins are high chemical resistance to acids and alkalis as well as high weather resistance to ultraviolet rays. Although this technology has a proven track record as a waterproofing method, we focused on the mechanical properties of polyurea resin, which had not been sufficiently verified, and verified its effects through experiments and analysis. We expect that it will greatly contribute to the realization of a sustainable society through the extension of the life of concrete structures facing Japan today.

Keywords : *Infrastructure reformation, Surface protection Method, Polyurea resin, Anti-peeling performance of concrete, Water storage security, Improvement of durability, Improvement of impact performance*

1. はじめに

我が国では、戦後の高度成長期以降に建設された橋梁、トンネル、港湾岸壁等の社会資本の多くが建設後 30 年から 50 年を経過しており、材料の経年劣化、構造物としての機能低下等に対応すべく大規模な補修・補強および更新事業が必要な時代を迎えている。コンクリート構造物に関しては、従来からその機能保持方法として、構造部材を対象とした補修および補強が行われてきた。補修は、ひび割れ等の不具合が発生した後に行う事後保全が主体であり、補強では大規模地震後等に、部材の耐力を増加させる対策が取られてきた。しかしながら、これらの方法では補修工事は場当り的となり、また補強工事は大がかりとなるため、維持管理コストおよび工期に課題が残されていた。このような状況に鑑み、21 世紀の課題である社会インフラおよび産業インフラにおけるコンクリート構造物の合理的な維持管理、長寿命化を実現する新技術が期待されていた。

2. 技術の概要

(1) 研究開発の目的とコンセプト

本技術は、コンクリート構造物の表面に高ひずみ樹脂を吹付けることにより、構造物に本来必要な機能を保持し合理的な維持管理ならびに長寿命化を図ることを目的としている。

具体的には、社会インフラに関しては①道路および鉄道における高架橋やトンネル覆工の剥落防止、②各自治体が管理する配水池や防火水槽の大規模地震時の貯水性確保、③内陸寒冷地や沿岸部のコンクリート構造物の耐久性確保、④高速道路と鉄道等の重要交差部における壁高欄の衝撃性能向上および、産業インフラにおける、化学コンビナート工場内の爆発に対するコンクリート片の飛散防止である。

本技術の基本コンセプトは、従来の発想を転換し、補修に関しては予防保全、補強に関しては部材の耐力を増加することなく直接的な機能保持を目指したことである。使用するライニング材料としては、防水工法として多くの実績があり、酸・アルカリに対する化学的抵抗性、紫外線に対する耐候性が高いポリウレタ樹脂を採用した。本技術は従来十分に検証されていなかったポリウレタ樹脂の力学特性に初めて着目し、その効果を実験および解析により検証したものである。さらに、施工法としては専用の吹付装置を用いた吹付工法を採用した。

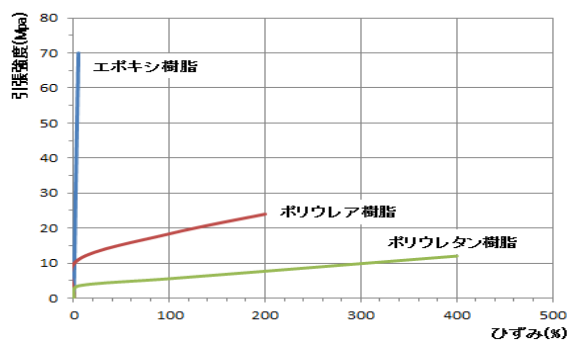
非常にシステムチックで簡便な施工法であるとともに、塗布時には、速乾性で施工面でのダレがないこと、早期に強度が発生すること、新設・既設を問わず施工が可能であること等、他の補修・補強工法にはない利点を有している。

(2) ライニング材料の特性および施工法

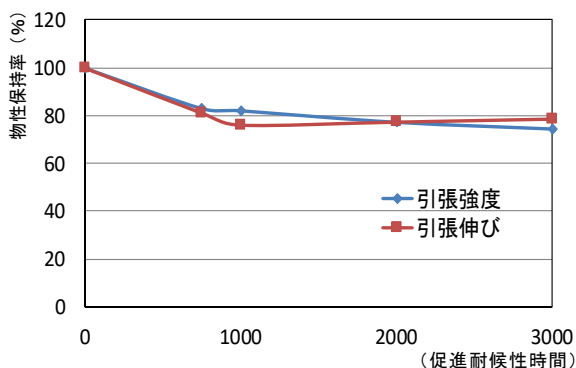
1) ライニング材料の力学特性の比較

ライニング材料としては、ポリウレタ樹脂、エポキシ樹脂、ポ

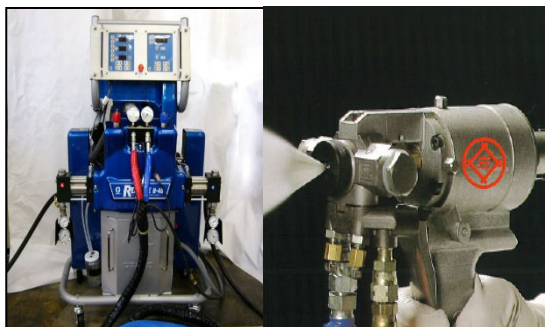
* 交通運輸事業本部 道路事業部 道路橋梁部
** 清水建設(株) 土木技術本部 基盤技術部
*** 三井化学産資(株) 環境ソリューション事業部 技術開発部



図－1 樹脂材料の力学特性の比較



図－2 促進耐候性試験結果



写真－1 吹付装置およびスプレーガン

リウレタン樹脂等がある。図－1 に引張試験より得られたライニング材料の力学特性を示す。この図より、ポリウレア樹脂は引張強度が 24MPa 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 70MPa と非常に大きい、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、引張強度は 10MPa 程度と小さい。以上より、引張強度と伸び性能の双方に優れたポリウレア樹脂に着目し本技術の研究開発を行った。

2) ポリウレア樹脂の耐久性

図－2 に、ポリウレア樹脂の促進耐候性試験結果を示す。試験は JIS A 1415 のオープンフレームカーボンアークランプによる暴露試験方法によって行った。その結果、促進耐候性 3000 時間(実構造 15 年相当)まで引張強度および伸びのいずれも 75% 以上となっており、優れた耐候性が確認された。

3) 施工法とその品質管理

ポリウレア樹脂は、ポリイソシアネート(R-NCO)とポリアミン(R-NH₂)の 2 液を、専用の吹付装置によって加温・圧送し、圧送ホース先端に取付けたスプレーガンを使用して衝突混合させウレア結合を生成した状態で、構造物表面に塗布するのである。吹付装置およびスプレーガンの外観を写真－1(スワールスプレーシステム：三井化学産資(株)技術資料)に示す。

ポリウレア樹脂は現場で衝突混合により生成される材料であるため、その品質管理においては、施工環境や吹付装置の適切な運用が重要である。また、コンクリートへの付着力を確保するために下地の状態を確認し、適切な処理をすることが必要となる。そこで、本工法においては、表－1 に示す管理項目を定め厳重な品質管理を実施している。

3. 剥落防止性能の検証^{1), 2), 3), 4)}

(1) 実験目的

本実験の目的は、ポリウレア樹脂で表面被覆することにより、高架橋やトンネル覆工におけるコンクリートの剥落防止効果を確認することである。

表－1 品質管理項目の一覧表

確認項目	確認方法	合格基準
01) 雰囲気温度	温度計による	5～35℃
02) 相対湿度	湿度計による	85% 以下
03) コンクリートの引張強度	建研式接着力試験機による	1.5N/mm ² 以上
04) 漏水処理状況	目視による	漏水がないこと
05) 下地処理状況	目視による	スムーズで汚れや異物がないこと
06) コンクリートの表面含水率	含水率計による	8% 未満
07) ブライマーの塗布厚さ	材料の使用量による	設計使用量 以上
08) 循環加熱後の A 材および R 材の温度	温度計による	施工中 45℃ 以上
09) ポリウレア樹脂の塗布厚さ	針入式膜厚計あるいは材料使用量による	設計厚さ 以上あるいは設計使用量 以上
10) 付着強度	建研式接着力試験機による	1.5N/mm ² 以上
11) 引張強度、伸び	現地にて試験シートを製作し試験室にて確認	引張強度 24N/mm ² 以上 伸び 200% 以上

(2) 実験方法

1) 押抜き試験

土木学会規準「コンクリート片のはく落防止に適用する表面被覆材の押抜き試験方法(案)(JSCE-K533-2010)」に準拠して、ポリウレア樹脂(膜厚:1.5mm)で試験体の表面を被覆した場合の剥落抵抗性を検証した。

2) トンネル覆工载荷試験

载荷試験は、反力フレーム、反力用油圧シリンダ、载荷用油圧ジャッキからなる試験装置(図-3)を用い、新幹線トンネルの1/5程度の覆工模型(外径2150mm、巻厚150mm)の試験体3体を対象として実施した。

(3) 実験結果

1) 押抜き試験

3体の押抜き試験を実施した結果、いずれの試験体も変位

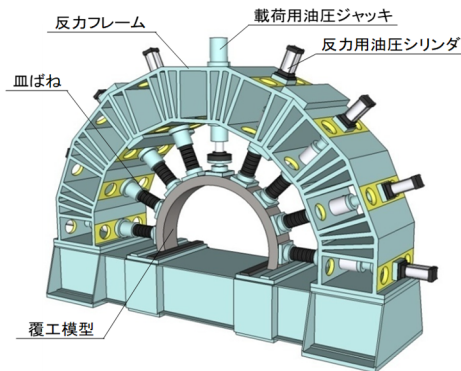


図-3 実験装置の模式図

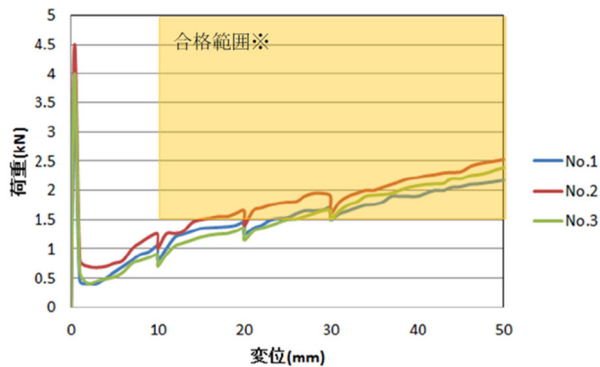


図-4 押抜き試験結果

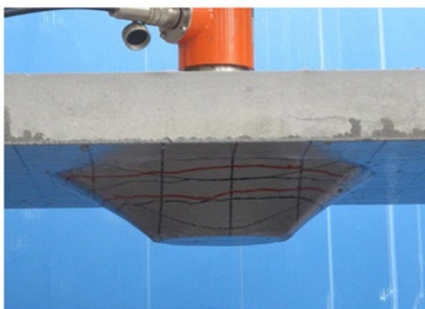


写真-2 変位 50mm 時の試験体

10mm から 50mm の範囲で 1.5kN 以上の荷重に到達する(※構造物施工管理要領、Nexco3 社、H26 年 7 月)ことの条件を満足できた(図-4)。また、変位 50mm においてもポリウレア樹脂は十分変形に追随し(写真-2)、破断することはなかった。

2) トンネル覆工载荷試験³⁾

無被覆の場合(Case1)、ポリウレア樹脂にて被覆した場合(Case2)、アラミド繊維にて被覆した場合(Case3)の3ケースに対する実験結果を図-5に示す。Case1は変位49mmで剥落が発生し荷重が急激に低下したが、Case2は変位60mmまで最大荷重を保持できた(写真-3)。またCase3は変位23mmにて覆工天端部において、せん断ひび割れが発生し、せん断破壊により耐力を失った。

(4) 剥落防止機能の骨子

- 対象構造物をポリウレア樹脂にて被覆(膜厚 1.5mm)した場合、1.5kN のかぶりコンクリートの剥落を防止できる。
- トンネル覆工ではポリウレア樹脂にて被覆した場合(膜厚 1.5mm)、圧縮破壊しても覆工の有効巻厚を確保でき、大変形時まで最大荷重を保持可能である。

4. 貯水性能の検証⁵⁾

(1) 実験目的

本実験の目的は、ポリウレア樹脂で内面被覆することにより、上水道用の貯水槽や防火水槽の大規模地震時における貯水性効果を確認することである。

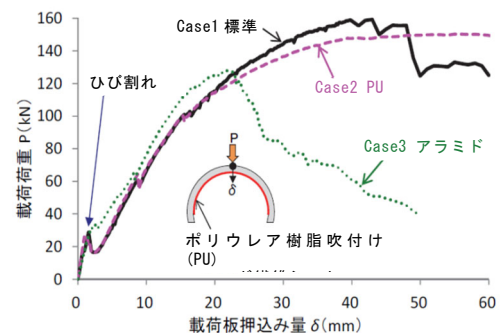


図-5 荷重-変位曲線

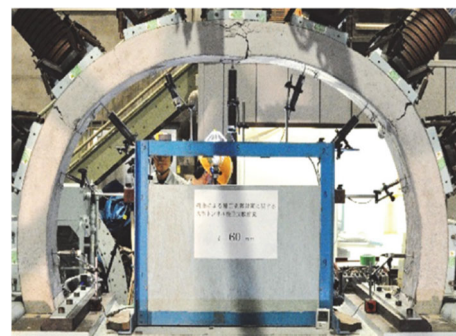


写真-3 Case2(変位 60mm)

(2) 実験方法

大規模地震時における貯水槽等の貯水性を確保するためには、構造体に発生する曲げひび割れ幅がポリウレア樹脂のひび割れ追随性能以下である必要がある。そこで以下の 2 つの実験を実施した。

1) 大規模地震時における曲げひび割れ幅の検証実験

貯水槽の底版を対象として曲げ実験を実施した。載荷方法としては、写真－4 に示すように 35t ジャッキを 2 台用いて曲げスパン 1000mm、せん断スパン 1200mm ($a/d = 1200/340 = 3.5$) の中央 2 点載荷で実施した。鉛直変位は、試験体高さ方向中央 7 カ所で、また曲げスパンの底部では 2 断面 24 箇所において π 型変位計 (写真－5) でひび割れ幅を計測した。

2) ひび割れ発生断面における貯水性確認実験

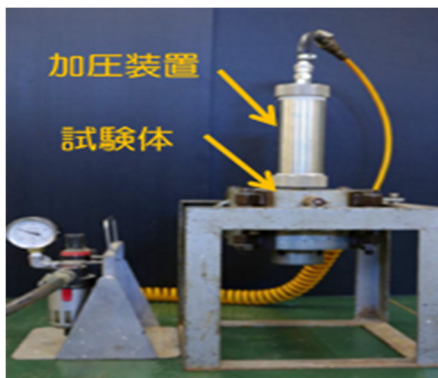
樹脂材料の防水性確認試験 (写真－6) に準じて、70mm × 70mm × 35mm の試験体 2 体を突き合せた後にポリウレア樹脂で表面を被覆 (膜厚 2.0mm) し、突き合せた試験体を引



写真－4 実験装置



写真－5 π 型変位計



写真－6 防水性確認試験

き離すことで 2mm～10mm の疑似的なひび割れを発生させた。その後、水圧を 0.1N/mm²、0.3N/mm² の 2 段階で 7 日間連続して作用させ、貯水性を確認した。

(3) 実験結果

1) 大規模地震時における曲げひび割れ幅の検証実験

曲げスパン内に発生したひび割れの分布図 (曲げスパン中央位置を X 軸のゼロと規定) を図－6 に示す。試験体のひび割れ発生強度は 43kN であり、曲げスパン内のひび割れ本数は 3 本であった。

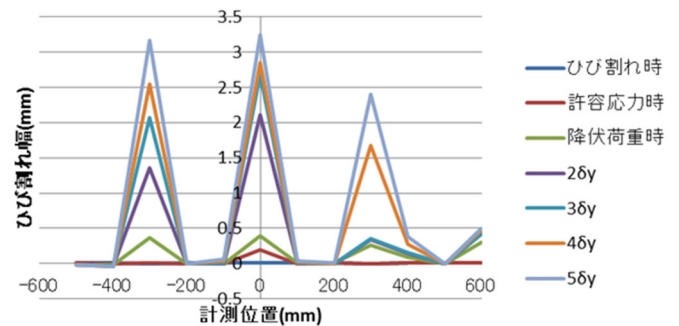
主となるひび割れは 1 δy 時までに発生しその後、ひび割れ幅が増大し 2 δy 時で最大 2.1mm、5 δy 時で最大 3.2mm であった。

2) ひび割れ発生断面における貯水性確認実験

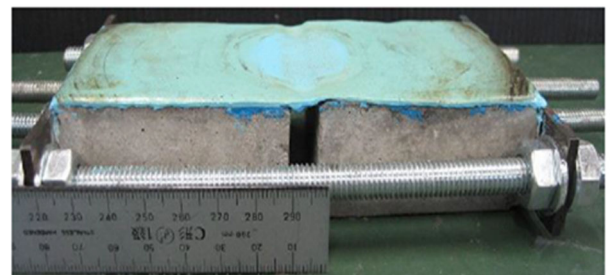
膜厚 2.0mm、ひび割れ幅 10mm の条件で、水圧 0.3N/mm² を 7 日間連続して作用させた結果、ひび割れ面からの漏水、ポリウレア樹脂の過大な変形、隅角部における亀裂等は観測されず、貯水性を確保できることが確認された (写真－7)。

(4) 貯水性機能の骨子

1) 大規模地震時における貯水槽のひび割れ幅は、過去の震災事例の調査より概ね 2.0～3.0mm 程度であり、本実験よりひび割れ幅に対応する部材の塑性率は 2.0～5.0 程度と考えられる。



図－6 曲げひび割れ幅



写真－7 実験終了時の試験体

- 2) ポリウレア樹脂で水槽内面を被覆する(膜厚:2.0mm)ことにより、最大ひび割れ幅 10mm、最大水圧 0.3MPa までの条件で、貯水性の確保が可能である。
- 3) 今回実施した 2 つの実験結果より、貯水槽等における大規模地震時の塑性率が 5.0 程度であれば、部材がせん断破壊する場合を除いて貯水性を確保できると考えられる。

5. 耐久性能の向上^{6), 7)}

(1) 実験目的

本実験の目的は、ポリウレア樹脂を表面被覆材料として用いたコンクリート構造物の塩害、凍害に対する耐久性向上効果を確認することである。

(2) 実験方法

1) 塩化物イオン透過試験

膜厚 1.0mm のポリウレア樹脂を用いて塩化物イオン透過試験を実施した。試験方法としては 3% の食塩水と蒸留水を分離し、20℃ の環境で、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(写真-8)した。また、試験期間は塩分透過量が微量であったため 300 日まで延長した(通常は 30～120 日)。

2) 凍結融解試験

水セメント比 W/C を 60%とした AE コンクリート試験体に対してポリウレア樹脂(膜厚 2.0mm)で被覆したもの、被覆していないものそれぞれについて、JIS A 1148 に準じたコンクリートの凍結融解試験を実施した(写真-9)。試験サイクルは AE コンクリートに対する効果を確認するため 480 サイクルとした(通常は 300 サイクル)。

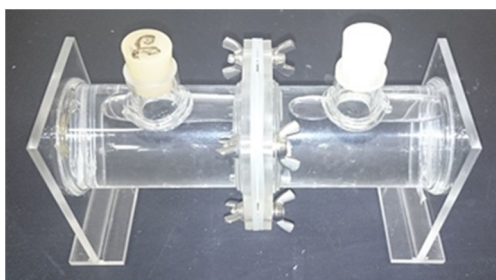


写真-8 塩化物イオン透過試験状況

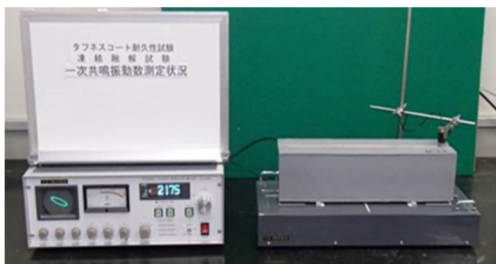


写真-9 相対動弾性係数の計測状況

(3) 実験結果

1) 塩化物イオン透過試験

計測された塩化物イオン透過度は表-2 に示すように最大 $0.23 \sim 1.92 \times 10^{-5} (\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{日})$ であり、一般環境の PC または RC 構造物に対する基準値 $1.0 \times 10^{-2} (\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{日})$ の 1/500 以下、特に厳しい環境における基準値 1.0×10^{-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、フィックの拡散式(1 次元熱伝導式)を用いて、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、水セメント比を 50%とした場合の浸透状況を図-7 に示す。こ

表-2 塩化物イオン透過度の一覧表

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

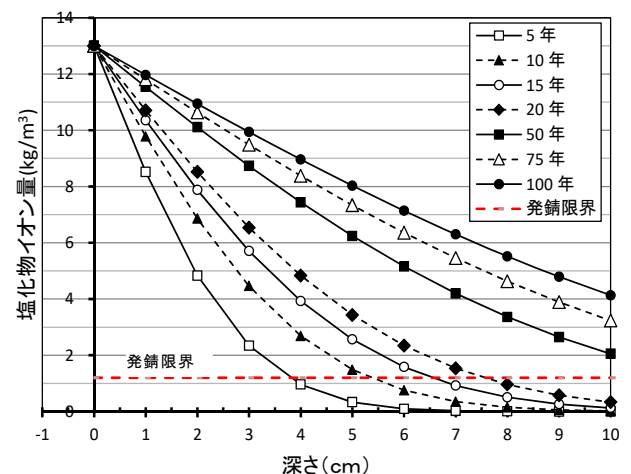


図-7 塩化物イオン透過曲線(表面被覆なし)

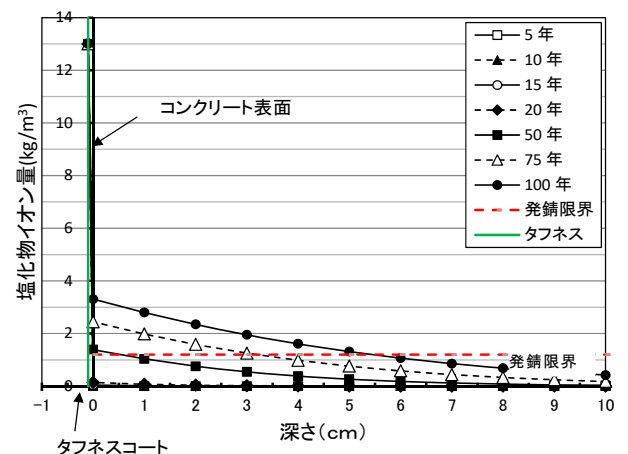
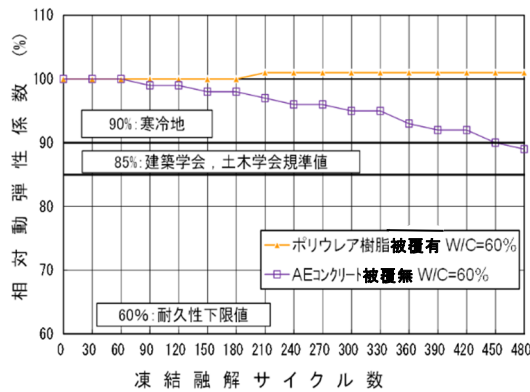


図-8 塩化物イオン透過曲線(表面被覆あり)



図－9 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

の図より、かぶり 50mm の位置においては 10 年程度で鉄筋の発錆限界値 1.2 kg/m^3 に到達することが確認された。一方、ポリウレタ樹脂 1mm で表面被覆した場合には、塩化物イオン透過試験結果に基づくポリウレタ樹脂の拡散係数をフィックの拡散式に追加した。その結果、図－8 に示すように発錆限界値 1.2 kg/m^3 に到達する期間は 100 年程度であることが確認された。

2) 凍結融解試験

凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を図－9 に示す。被覆した試験体はコンクリート表面に変色、剥離、膨れ等の劣化は見られず、相対動弾性係数の低下も発生しなかった。一方、被覆していない試験体は表面にスケーリングが見られ、繰返し回数 480 回において相対動弾性係数が 11% 低下した。

(4) 耐久性向上機能の骨子

- 1) 塩化物イオン透過試験 (膜厚 1.0mm) の結果、塩化物イオン透過度は基準値に比べて十分小さく、塩害に対する抵抗性を大幅に向上できる。
- 2) 凍結融解試験 (膜厚 2.0mm) の結果より、ポリウレタ樹脂の表面被覆によって、外部からの水分浸入を阻止でき、凍害に対する抵抗性を大幅に向上できる。

6. 衝撃性能の検証 (8), 9), 10), 11), 12), 13), 14)

(1) 実験目的

本実験の目的は、ポリウレタ樹脂を表面被覆材料として用いたコンクリート構造物の、衝撃力に対する性能向上効果を確認することである。

(2) 実験方法

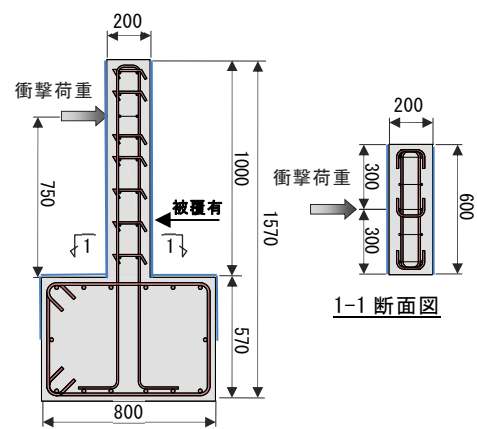
近年、都市内の高架橋の防護柵においては車両の衝突事故に対する衝撃性能の向上対策が、またコンビナート工場等では不慮の爆発に対する飛散防止対策が課題となっている。そこで以下に示す 2 つの実験を実施した。

1) 壁高欄の衝撃曲げ実験

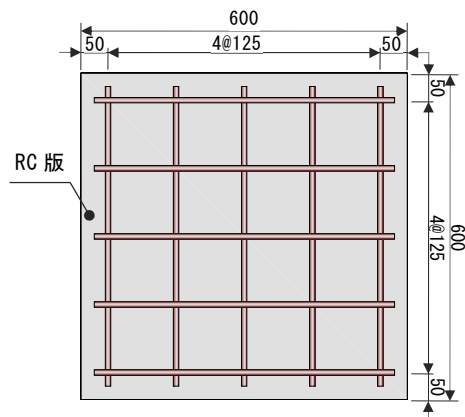
高速道路の壁高欄を一部切出した試験体は、奥行 600mm、厚さ 200mm、高さ 1000mm (図－10) で主鉄筋およびせん断補強鉄筋には D10 (SD345) を使用した。ポリウレタ樹脂は、試験体の梁部の上下面およびフーチングの上面、側面に厚さ 2mm、4mm で一様に塗布した。無被覆を含めたそれぞれの試験体を 3 体ずつ合計 9 体製作し、衝撃荷重としては質量 1000 kg の重錘を落下高さ 300mm から自由落下させた後に、損傷した試験体の残留耐力を評価するために落下高さ 50mm から繰返し自由落下を行った。

2) 版部材の衝突繰返し実験

衝突実験は、高速衝撃実験装置 (写真－10) を用いて実施した。飛翔体は、直径 50mm、質量 3.0kg で先端形状は平



図－10 実験試験体



図－11 RC 版試験体



写真－10 高速衝撃実験装置

面となっており、衝突速度は中速度 (10m/sec) 程度である。また試験体は $600 \times 600 \times 90\text{mm}$ の RC 版 (図 - 11) であり、無被覆の場合、ポリウレア樹脂にて前面を被覆した場合 (膜厚 2.0mm)、背面を被覆した場合 (膜厚 2.0mm)、両面を被覆した場合 (膜厚 2.0mm) の比較実験を実施した。

(3) 実験結果

1) 壁高欄の衝撃曲げ実験

一体目の実験から得られた RC 試験体 (無被覆)、RCT1-1 (膜厚 2.0mm) および RCT2-1 (膜厚 4.0mm) 試験体の入力エ

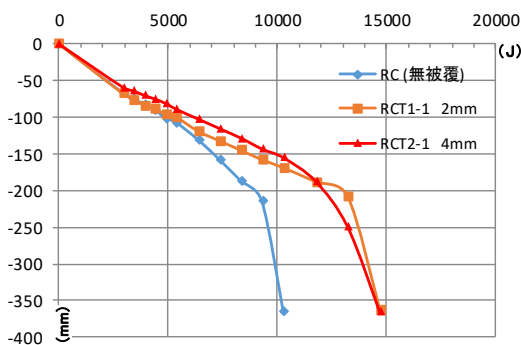


図-12 入力エネルギーと変位の関係(H-300)

表-3-1 衝突繰返し実験の結果(その1)

実験ケース	Case1 RC供試体 (無被覆)		Case2 前面被覆供試体 (タフネスコート)	
	表面	裏面	表面	裏面
写真				
破壊形式	かぶり部の裏面剥離		コンクリートのコーン破壊	
破壊時の衝突回数	5回		10回	
破壊時の外力エネルギー(J)	750		1500	
破壊時の状況	破壊時の表面くぼみ: 2mm		破壊時の表面くぼみ: 7mm	
	裏面剥離面積: 75,000mm ²		裏面剥離面積: 62,500mm ²	
	裏面剥離深さ: 45mm		裏面剥離深さ: 66mm	

表-3-2 衝突繰返し実験の結果(その2)

実験ケース	Case3 背面被覆供試体 (タフネスコート)		Case4 両面被覆供試体 (タフネスコート)	
	表面	裏面	表面	裏面
写真				
破壊形式	かぶり部の裏面剥離後に 表面タフネスコートの亀裂破壊		コンクリートのコーン破壊後に 表面タフネスコートの亀裂破壊	
破壊時の衝突回数	13回		24回	
破壊時の外力エネルギー(J)	1950		3600	
破壊時の状況	破壊時の表面くぼみ: 57mm		破壊時の表面くぼみ: 59mm	
	裏面剥離面積: 87,500mm ²		裏面剥離面積: 100,000mm ²	
	裏面盛り上り: 20mm		裏面盛り上り: 15mm	

ネルギーと変位の関係を図 - 12 に示す。この図より、試験体の崩壊 (変形が 350mm 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 (膜厚 2.0mm、4.0mm) 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された。3 試験体の平均値では、2mm で被覆した試験体が 52% の増加、4mm で被覆した試験体が 59% の増加となった。

2) 版部材の衝突繰返し実験

実験結果の一覧を表 - 3-1、表 - 3-2 に示す。無被覆の試験体は 5 回目の衝突でかぶりコンクリートが裏面剥離した。前面を被覆した試験体は 10 回目の衝突で裏面にコーン破壊が発生した。背面を被覆した試験体は 6 回目の衝突で裏面剥離が生じた後に、13 回目で裏面に亀裂が生じた。また、両面を被覆した試験体では 10 回目の衝突でコーン破壊が発生した後に 24 回目で裏面に亀裂が生じた。4 試験体の破壊までのエネルギーを比較してみると、Case1:Case2:Case3:Case4 = 1:2:2.6:4.8 となっており、タフネスコートの飛散防止効果が定量的に把握された。

(4) 衝撃性向上機能の骨子

- 1) 交差条件部における壁高欄にポリウレア樹脂を膜厚 2.0mm、4.0mm で吹付けることにより、崩壊までの吸収エネルギーはそれぞれ 52%、59% 増加する。
- 2) コンクリート壁の両面にポリウレア樹脂を膜厚 2.0mm で吹付けることにより、裏面剥離に必要な入力エネルギーは 4.8 倍となる。

7. 施工実績およびその効果

本工法の施工実績としては、トンネルおよび高架橋の剥落防止工事、上水道用の配水池の貯水性確保工事、擁壁の耐久性向上工事等合計 19 件である (写真 - 11、写真 - 12)。本技術には 4 機能を確保・向上する効果があり、主目的に加えて、その他 3 機能の相乗効果があるため、21 世紀のコンクリート構造物の機能保持、長寿命化に大きく貢献できると考えられる。



写真-11 上水道用配水池の施工例



写真-12 高架橋の施工例

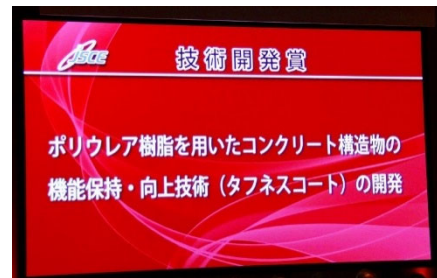


写真-13 土木学会技術開発賞の受賞

8. 今後の展開

本工法は、2018 年度土木学会技術開発賞を受賞(写真-13)しており、研究開発において必要とされた検討項目はすべて実施済みである。また、2021 年度には、土木学会技術審査機構において、学識経験者 5 名による技術評価制度検討委員会を発足させ、受託側委員 5 名と技術内容、施工方法、検査基準等に関して議論を行った。その成果を「ポリウレア樹脂を用いたコンクリート構造物の機能保持・向上技術(タフネスコート工法)に関する技術評価」(写真-14)としてまとめ、国内における技術展開に必要な技術評価を確立した。さらに、同年には、国土交通省の新技術情報提供システム(NETIS)に登録(QS-210065-A)している。NETIS は、新技術の活用の際に、その情報の共有および提供を目的としたものであり、このシステムに登録することは、今後の技術展開に大きな役割を果たすと考えられる。

さらに、新工法の展開には、その受け皿となる組織が必要であるため、2019 年 9 月に「タフネスコート技術研究会」を設立した。この研究会は、タフネスコート工法の技術研鑽と普及を目的としたものであり、現在 7 社の会員会社より構成されている。

本研究会における技術委員会は、1 年に 5 回程度開催されており、2021 年度には発注者からの要望が多いタフネスコートの透明化(タフネスコートクリア工法)¹⁵⁾に成功している。透明化された塗布膜では、ひび割れ観察が容易となり、今後、耐久性や剥落防止を目的とした案件への展開が期待されている。また、本研究会では、施工管理技術者の育成のために、講習会を実施し、一定の技術を習得した者には資格認定証を発行している。現在までに、約 40 名程度の施工管理資格認定者が輩出しており、技術展開にともなう実施体制の整備にも注力している。

タフネスコート工法は、コンクリート構造物の表面にピュアポリウレア樹脂を吹付けることにより、コンクリート構造物に対して、剥落防止、貯水性確保、耐久性向上および衝撃性能向上を図る技術である。ポリウレア樹脂は、従来から防水工法として多くの実績があったものの十分に活用されていなかった



写真-14 土木学会技術評価証の取得

め、その力学特性に着目し、未解明であった効果を実験・解析等により検証した。2013 年より概ね 10 年に亘って研究開発された本工法が、「コンクリート構造物の機能保持・長寿命化を通して持続可能な社会の実現に寄与することを切に期待する。」ことを記して結語としたい。

参考文献

- 1) 奥石正己、野城一栄、井出一直:構造物の機能保持技術(タフネスコート)によるトンネル覆工の剥落防止効果、土木学会全国大会第 70 回年次学術講演会、2015
- 2) 伊藤直樹、野城一栄、奥石正己、井出一直:ポリウレア樹脂を用いた吹付け型剥落防止対策工の開発、土木学会全国大会第 71 回年次学術講演会、2016
- 3) 嶋本敬介、野城一栄、川上義輝、奥石正己、井出一直:トンネル覆工の剥落対策としてのポリウレア樹脂吹付けの模型実験と試験施工、土木学会論文集 F1(トンネル工学)、Vol73、No3、I-21~I-31、2017
- 4) 野城一栄、奥石正己、井出一直:樹脂吹付けによるトンネル覆工剥落対策工の開発、日本鉄道施設協会誌、2017
- 5) 奥石正己:RC 防火水槽の健全性評価および大規模地震時の保水性確保に関する検討、プレストレストコンクリート、第 63 巻 2 号、2020
- 6) 久保昌史、奥石正己、高梨和光、井出一直:ポリウレア樹脂によるコンクリート構造物の耐久性向上に関する基礎実験、土木学会全国大会第 71 回年次学術講演会、2016

- 7) 奥石正己:高ひずみ樹脂による RC 構造物の機能保持技術(タフネスコート)、建設機械施工 623、Vol.53、No.1、pp.52、2017
- 8) 奥石正己、高梨和光、西村淳、井出一直、藤掛一典、大野友則:ポリウレア樹脂で表面被覆した RC 壁の衝撃挙動と樹脂被覆による安全性向上効果、土木学会全国大会第 69 回年次学術講演会、2014
- 9) 川井田健、園田佳巨、奥石正己、井出一直:SPH 法を用いた重錘の繰返し落下衝突に対する RC 片持ち梁の衝撃応答解析、土木学会全国大会第 70 回年次学術講演会、2015
- 10) 奥石正己:高ひずみ樹脂による構造物の機能保持技術(タフネスコート)、土木学会構造工学委員会 耐爆・耐衝撃設計法に関する調査研究小委員会、2015
- 11) 奥石正己:高ひずみ樹脂による RC 構造物の安全性向上及び長寿命化技術(タフネスコート)、電力土木、No.376、pp.112、2015
- 12) 影山幹浩、園田佳巨、奥石正己、井出一直:ポリウレア樹脂で表面被覆した RC 版の繰返し衝撃力に対する耐荷性に関する実験的検討、土木学会全国大会第 72 回年次学術講演会、2017
- 13) Yoshimi SONODA, Masami Koshiishi, Kazunao IDE: Impact Response Analysis of RC cantilever beams with Polyurea resin by SPH method, 6th International Conference on Design and Analysis of Protective Structures (DAP2017), 2017
- 14) 井福達也、園田佳巨、玉井宏樹、奥石正己:ポリウレア樹脂を塗布した RC 版の繰返し衝撃荷重下における耐衝撃性能に関する検討、第 13 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、2022
- 15) 久保昌史、宮田佳和、井出一直:下地コンクリートの状態を確認できるポリウレア樹脂吹付工法の開発、土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会、2021