

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

清水建設株式会社 久保昌史

日本工営株式会社 興石正己

三井化学産資株式会社 井出一直

1 はじめに

我が国の橋梁、トンネル等の社会基盤施設に用いられるコンクリート構造物は建設される場所の環境条件によって劣化が進行することが知られている。現在、高度経済成長期以降に建設されたこうした施設の多くは30年から50年が経過し材料の経年劣化や構造物としての機能低下が懸念されている。このような機能が低下したコンクリート構造物に対しては、補修・補強が行われている。一般的に補修は、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、補強は大規模地震後などに、部材の耐力を増加させることになるが、これらの方法では補修工事は場当りのとなり、また補強工事は大がかりとなるため、維持管理コスト及び工期に課題がある。

今回、コンクリート構造物に専用のポリウレア樹脂を吹き付けることによりこれらの課題を解決しうる技術を開発した¹⁾。

本技術は、コンクリート構造物の表面に専用の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4つの機能、すなわち剥落防止、保水性確保、耐久性向上および耐衝撃性向上を図る技術である。

本報ではその内容を示すとともに、適用事例も紹介する。

本技術により、今後の社会インフラ及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、長寿命化が期待される。

2 開発した技術の概要

2.1 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である専用のポリウレア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、合理的な維持管理並びに長寿命化を図ることを目的としている。

具体的には、①道路及び鉄道における高架橋やトンネル覆工の剥落防止、②配水池や防火水槽の大規模地震時の保水性確保、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コンクリート構造物の衝撃性能向上および爆発に対するコンクリート片の飛散防止である。

使用するライニング材料は、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専用のポリウレア樹脂である。

本技術は従来十分に検証されていなかったポリウレア樹脂の力学特性に着目し、その効果を実験及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。これは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く、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。

2.2 ライニング材料の特性及び施工法

(1) ライニング材料の力学特性の比較

一般的に使用されるライニング材料は、ポリウレア樹脂、エポキシ樹脂、ポリウレタン樹脂などがある。図-1にライニング材料の力学的特性を示す。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が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工法の開発を行った。

(2) ポリウレア樹脂の耐久性

図-2 に、本技術で使用する専用の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3,000時間までに引張強度および伸びのいずれも約75%を保持しており、優れた耐候性が確認された。

ここでサンシャインウェザロメーターによる促進試験は200時間が約1年間の自然暴露に相当する²⁾といわれており、3,000時間の促進暴露試験は15年の自然暴露に相当すると考えられる。

(3) 施工法とその品質管理

本技術は、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(R-NH-CO-NH-R)を生成した状態で、構造物表面に塗布する。吹付装置及びスプレーガンの外観を写真-1 に示す。

本技術で使用する専用の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転が重要である。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、雰囲気温度、下地処理の状況、表面含水率、材料温度、付着強度等の管理項目を定め、厳重な品質管理を実施している。

3 剥落防止性能の検証

3.1 実験概要

本技術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ために実験を行った。

3.2 実験内容

(1) 押抜き試験

土木学会標準「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、専用のポリウレア樹脂(膜厚:1.5mm)で表面を被覆した3体の試験体を用いて試験を実施した。その結果、いずれの試験体も変位

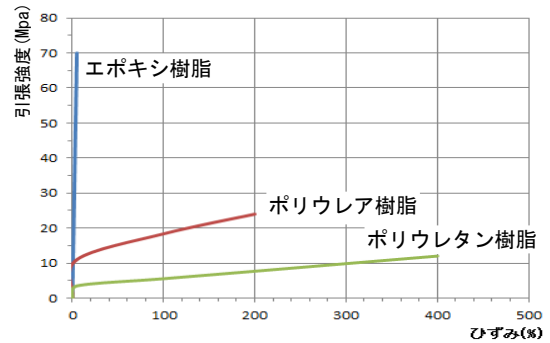


図-1 樹脂材料の力学特性の比較

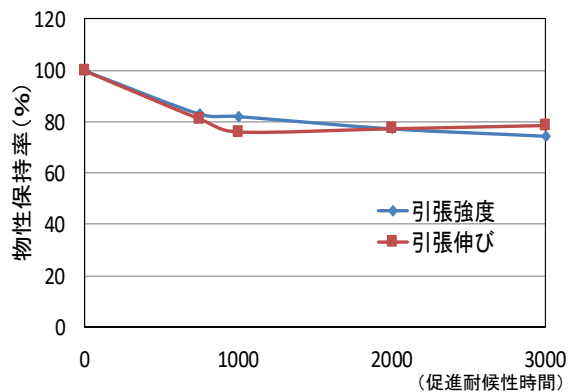


図-2 促進耐候性試験結果



写真-1 吹付装置及びスプレーガン



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ことが確認された(図-3)。また、変位 50mm においても十分変形に追随し(写真-2)、破断することはなかった。

(2) トンネル覆工载荷実験³⁾

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-4)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。

無被覆の場合(Case1), 専用のポリウレタ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 より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圧縮力が蓄積しせん断破壊が発生し耐力を失った。

3.3 効果のまとめ

- ①対象構造物を専用のポリウレタ樹脂にて被覆(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。
- ②トンネル覆工では専用のポリウレタ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 保水性能の検証

4.1 実験概要

専用のポリウレタ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保水性効果を確認する実験を行った。

4.2 実験内容

貯水槽等の大規模地震時における保水性を確保するためは, 構造体に発生する曲げひび割れ幅がポリウレタ樹脂のひび割れ追従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

貯水槽の底板を対象として曲げ実験を実施した。载荷方法としては, 写真-4 に示すように 35トンジャッキを 2 台用いて等曲げ区間 1000mm, せん断スパン 1200mm ($a/d = 1200/340 = 3.5$)の中央2点载荷で実施した。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 型変位計でひび割れ幅を計測した。

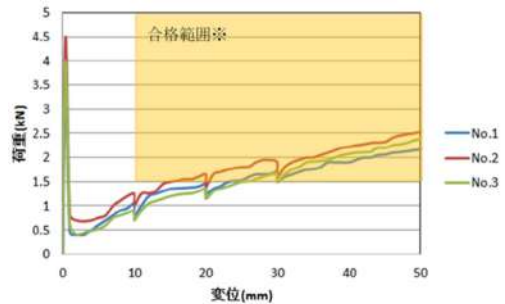


図-3 押抜き試験結果

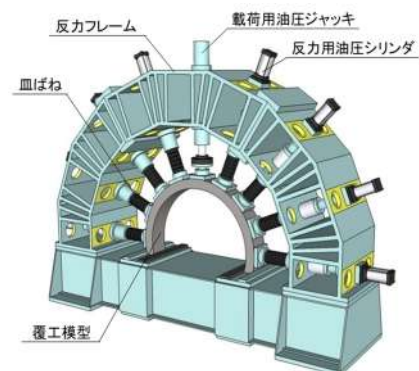


図-4 実験装置模式図

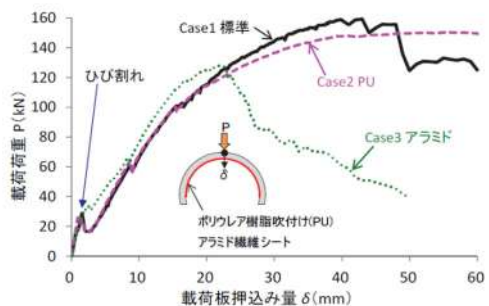


図-5 荷重-変位曲線



写真-4 実験装置

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 δ y 時まで発生しその後、ひび割れ幅が増大し 2 δ y 時で最大 2.1mm, 5 δ y 時で最大 3.21mm であった。(ここで δ y 降伏変位)

(2) ひび割れ発生断面における保水性確認実験

樹脂材料の防水性確認試験(写真-5)に準じて、70mm×70mm×35mm の試験体 2 体を突き合せた後に専用のポリウレタ樹脂で表面を被覆(膜厚 2.0mm)し、突き合せた試験体を引き離すことで 2mm~10mm の疑似的なひび割れを発生させた。

塗膜厚 2.0mm, ひび割れ幅 10mm, 水圧 0.3N/mm² を 7 日間連続して作用した結果、ひび割れ面からの漏水、ポリウレタ樹脂の過大な変形、隅角部における亀裂などは観測されず、保水性を確保できることが確認された(写真-6)。

(3) 効果のまとめ

- 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、本実験より部材の塑性率は 2.0~5.0 程度と考えられる。
- ②専用のポリウレタ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、保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保水性を確保できることが確認された

5 耐久性能の向上

5.1 実験概要

専用の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塩害、凍害に対する耐久性向上効果を確認するために実験を行った。

5.2 実験内容

(1) 塩化物イオン透過試験

厚さ 1mm の専用のポリウレタ樹脂を用いて塩化物イオン透過試験を実施した。これは 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-7)する。試験期間は、塩分透過量が少なかったため 300 日まで延長した。(通常

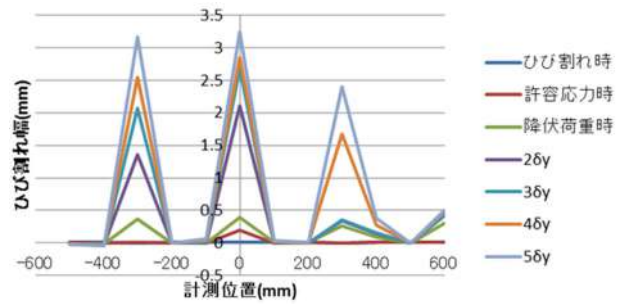


図-6 曲げひび割れ幅



写真-5 防水性確認実験

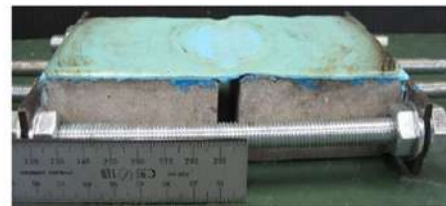


写真-6 実験終了時

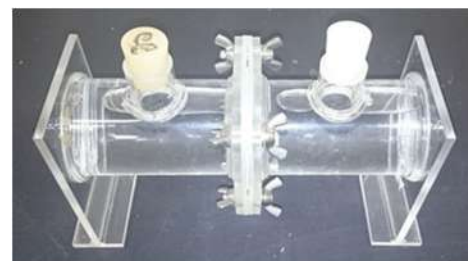


写真-7 塩化物イオン浸透試験状況

表-1 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 (mg/cm ² ・日)	塩化物イオン濃度 (mg/l)
30	ND	ND
90	1.47x10 ⁻⁵	0.13
120	1.01x10 ⁻⁵	0.12
270	1.92x10 ⁻⁵	0.51
300	0.23x10 ⁻⁵	0.07

は 30～120 日)

計測された塩化物イオン透過度は表-1 に示すように最大 0.23～1.92×10⁻⁵ 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 1.0×10⁻³ 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。

(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専用のポリウレタ樹脂(膜厚 2.0mm)で被覆したものの、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-8)。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)

凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を図-7 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ルリングがみられ、相対動弾性係数が 11%低下した。

5.3 効果のまとめ

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、専用の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。



写真-8 相対動弾性係数の計測状況

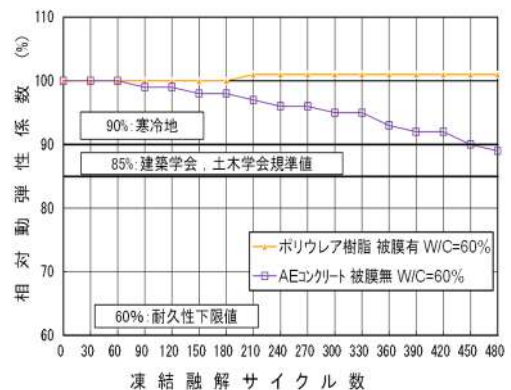


図-7 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係



写真-9 高速衝撃実験装置

6 衝撃性能の検証

6.1 実験概要

専用の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ために実験を行った。

6.2 実験内容



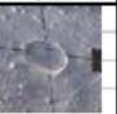





近年、コンビナート工場等では不慮の爆発の衝撃力に対する飛散防止対策が課題となっている。そこで版部材の衝突繰返し実験を行った。

(1) 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-9)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 600×600×90mm の RC 版であり、無被覆の場合、専用のポリウレタ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。

実験結果の一覧を表-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 回目でも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

表-2 衝突繰返し実験の結果一覧表

実験ケース	1.RC供試体B (無被覆)		2.前面被覆供試体 (タフネスコート)		3.背面被覆供試体 (タフネスコート)		4.両面被覆供試体 (タフネスコート)	
	表面	裏面	表面	裏面	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		かぶり部の裏面剥離後, 裏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, 裏面タフネスコートの亀裂破壊	
破壊時の衝突回数	5		10		13		24	
破壊時の 外力エネルギー(J)	750		1500		1950		3600	
備考	破壊時の表面くぼみ:2mm		破壊時の表面くぼみ:7mm		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:75000mm ²		裏面剥離面積:62500mm ²		裏面剥離面積:87500mm ²		裏面剥離面積:100000mm ²	
	裏面剥離深さ:45mm		裏面剥離深さ:66mm		裏面盛り上がり:20mm		裏面盛り上がり高さ:15mm	

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、飛散防止効果が定量的に把握された。

7 施工実績及びその効果

本工法の施工実績としては、トンネル及び高架橋の剥落防止工事、上水道用の配水池、中間貯蔵施設集水ピット及び調圧水槽の保水性確保工事等である(写真-10、写真-11)。高架橋工事は剥落防止を主目的としたものであるが、床版下面が防水されることによる耐久性向上も同時に図られている。また、上水道用の配水池工事は、大規模地震時の保水性確保が主目的であるが、耐久性向上及び剥落防止も同時に図られている。このように、本技術は事業の主目的を達成するとともに、技術自体が持つ付加的な価値が追加される複合効果があり、これからの社会インフラ及び産業インフラにおけるコンクリート構造物の維持管理、長寿命化に大きく貢献できると考えている。



写真-10 高架橋の施工例



写真-11 上水用配水池の施工例

【参考文献】

- 1) 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), 建設機械, 第 623 号, pp.52-59, 2017.1
- 2) 財団法人鉄道総合研究所: 炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針, 1996.7
- 3) 嶋本他 4 名: トンネル覆工の剥落対策としてのポリウレタ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

【備考】

本稿は、土木建設技術発表会 2018 で発表した内容を含んでいる。