

# 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

久保昌史

タフネスコート工法はコンクリート構造物の表面に専用のポリウレア樹脂であるタフネスコート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（効果）、すなわち剥落防止、貯水性確保、耐久性向上および耐衝撃性向上を付与する技術である。ポリウレア樹脂は、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等の特徴がある。タフネスコート工法は従来防水工法として多くの実績があるものの、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。

キーワード：コンクリート構造物、ポリウレア樹脂、剥落防止、貯水性確保、耐久性向上

### 1. はじめに

我が国の橋梁、トンネル、港湾岸壁、上下水道施設等の社会インフラ施設に用いられるコンクリート構造物は、建設された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となるが、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。

「タフネスコート工法」は、コンクリート構造物に専用のポリウレア樹脂（以下、タフネスコート）を吹き付けることによりこれらの課題を解決する技術である。これは、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行う考え方に基づいている。

### 2. タフネスコート工法の概要

#### (1) 開発の目的とコンセプト

タフネスコート工法は、コンクリート構造物の表面に高ひずみ樹脂であるタフネスコートを吹付けること

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) ライニング材料の特性及び施工法

##### (a) 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、ポリア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

脂は引張強度が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。ポリウレタ樹脂は、引張強度と伸び性能の双方に優れている。

(b) タフネスコートの耐久性

図一2に、タフネスコート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（15年相当）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。

(c) 施工法とその品質管理

タフネスコートは、ポリイソシアネート (R-NCO) とポリアミン (R-NH<sub>2</sub>) 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タ結合を生成した状態で、構造物表面に塗布するものである。吹付装置及びスプレーガンの外観を写真一1に示す。

タフネスコート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

(1) 実験概要

タフネスコート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。

(2) 実験内容

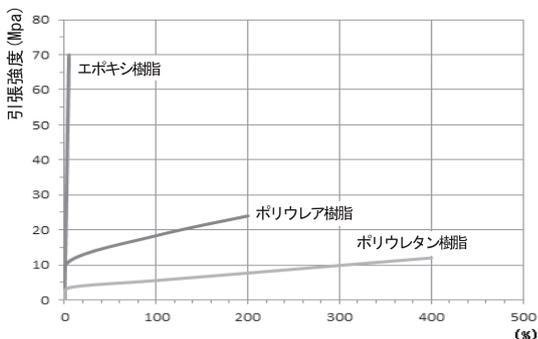
(a) 押抜き試験

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、タフネスコート（膜厚：1.5 mm）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。

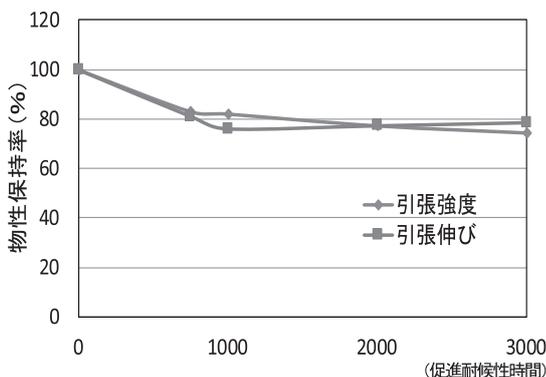
その結果、いずれの試験体も変位10 mmから50 mmの範囲で1.5 kN以上の荷重に到達することが確認された（図一3）。また、変位50 mmにおいてもタフネスコートは十分変形に追随し（写真一2）、破断することはなかった。

(b) トンネル覆工載荷実験

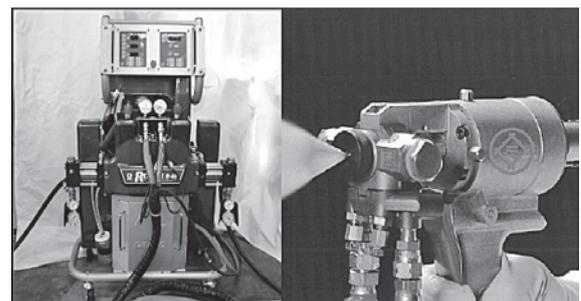
載荷試験は、反力フレーム、反力用油圧シリンダ、載荷用油圧ジャッキからなる試験装置（図一4）を用い、新幹線トンネルの1/5程度の覆工模型（外径



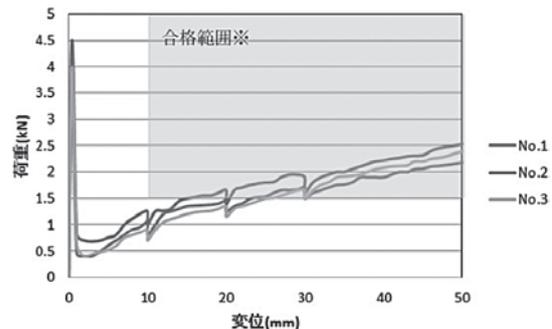
図一1 樹脂材料の力学特性の比較



図一2 促進耐候性試験結果



写真一1 吹付装置及びスプレーガン



図一3 押抜き試験結果

2,150 mm, 巻厚 150 mm) の試験体 3 体を対象として実施した。

無被覆の場合 (Case1), タフネスコートにて被覆した場合 (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一 5 に示す。Case1 は変位 49 mm より荷重が急激に低下したが, Case2 は変位 60 mm まで最大荷重を保持できた (写真一 3)。また Case3 は変位 23 mm 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) 効果のまとめ

①対象構造物をタフネスコートにて被覆 (膜厚

1.5 mm) した場合, 1.5 kN のかぶりコンクリートの剥落を防止できる。

②トンネル覆工ではタフネスコートにて被覆した場合 (膜厚 1.5 mm), 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

(1) 実験概要

タフネスコート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実験を行った。

(2) 実験内容

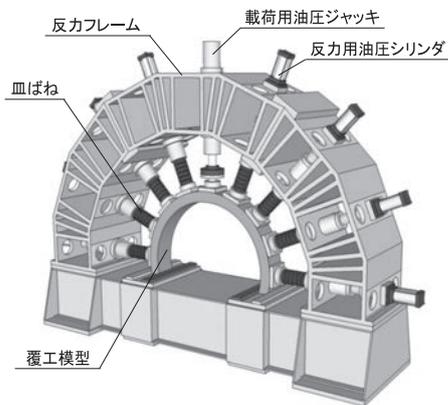
貯水槽等の大規模地震時における貯水性を確保するためには, 構造物に発生する曲げひび割れ幅がポリアレ樹脂のひび割れ追随性能以下である必要がある。そこで以下の 2 つの実験を実施した。

(a) 大規模地震時における曲げひび割れ幅の検証実験

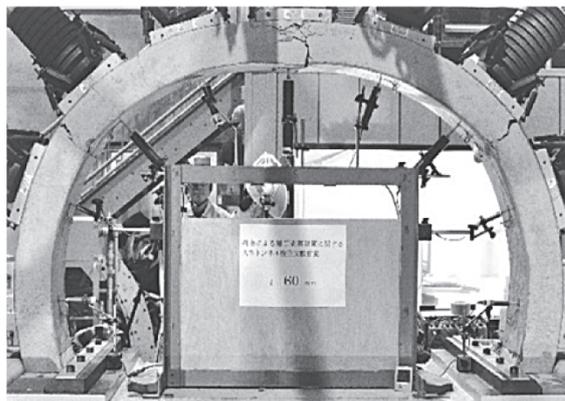
貯水槽の底板を対象として曲げ実験を実施した。載荷方法としては, 写真一 4 に示すように 35 トンジャッキを 2 台用いて等曲げ区間 1,000 mm, せん断スパン 1,200 mm ( $a/d = 1200/340 = 3.5$ ) の中央 2 点載荷で実施した。鉛直変位は, 試験体高さ方向中央 7 カ所で,



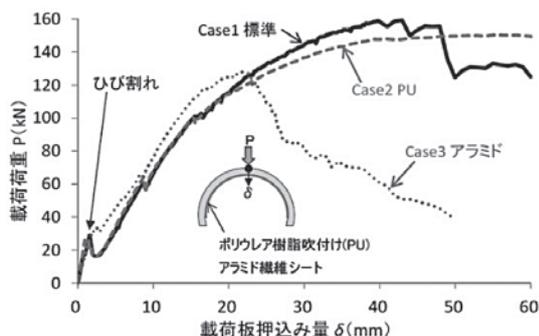
写真一 2 変位 50 mm 時の試験体



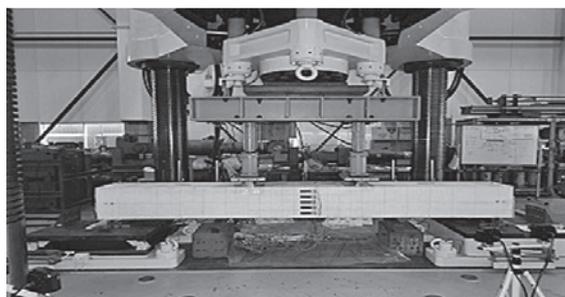
図一 4 実験装置模式図



写真一 3 Case2 (変位 60 mm)



図一 5 荷重-変位曲線



写真一 4 実験装置

また曲げスパンの底部では2断面24箇所において $\pi$ 型変位計でひび割れ幅を計測した。

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43 kN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 $\delta y$ 時までには発生しその後、ひび割れ幅が増大し2 $\delta y$ 時で最大2.1 mm、5 $\delta y$ 時で最大3.21 mmであった。

#### (b) 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-5)に準じて、70 mm×70 mm×35 mmの試験体2体を突き合せた後にタフネスコートで表面を被覆(膜厚2.0 mm)し、突き合せた試験体を引き離すことで2 mm~10 mmの疑似的なひび割れを発生させた。

塗膜厚2.0 mm、ひび割れ幅10 mm、水圧0.3 N/mm<sup>2</sup>を7日間連続して作用した結果、ひび割れ面からの漏水、タフネスコートの過大な変形、隅角部における亀裂などは観測されず、貯水性を確保できることが確認された(写真-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2.0~3.0 mm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。

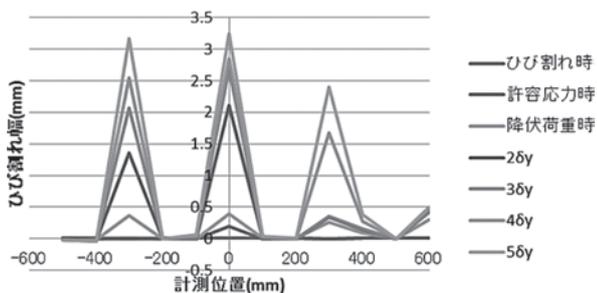


図-6 曲げひび割れ幅



写真-5 防水性確認実験

②タフネスコートで水槽内面を被覆する(膜厚:2.0 mm)ことにより、最大ひび割れ幅10 mm、最大水圧0.3 MPa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ことが確認された。

## 5. 耐久性能の向上

### (1) 実験概要

タフネスコートで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。

### (2) 実験内容

#### (a) 塩化物イオン透過試験

厚さ1 mmのタフネスコート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 $0.23\sim 1.92\times 10^{-5}$ であり、一般環境のPCまたはRC構造物に対する基準値 $1.0\times 10^{-2}$ の1/500以下、特に厳しい環境における基準値 $1.0\times 10^{-3}$ に対し

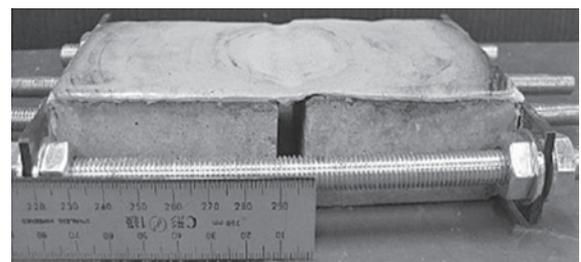


写真-6 実験終了時

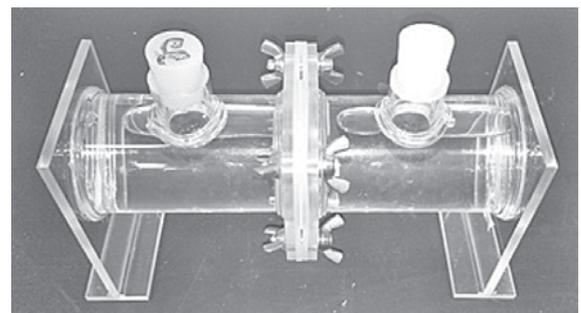


写真-7 塩化物イオン浸透試験状況

ても 1/50 以下であり、十分な遮塩効果が確認された。

(b) 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タフネスコート（膜厚 2.0 mm）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—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）。

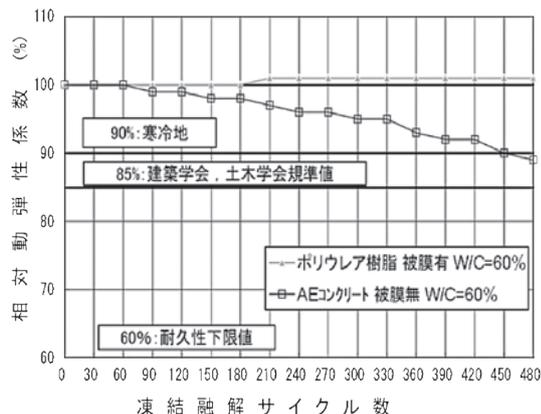
凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を図—7 に示す。被覆した試験体はコンクリート表面に変色、剥離、膨れ等の劣化は見られず、相対動弾性係数の低下も発生しなかった。一方、被覆していない試験体は表面にスケーリングがみられ、相対動弾性係数が 11% 低下した。

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 <sup>2</sup> ・日)	塩化物イオン濃度 (mg/l)
30	ND	ND
90	1.47 × 10 <sup>-5</sup>	0.13
120	1.01 × 10 <sup>-5</sup>	0.12
270	1.92 × 10 <sup>-5</sup>	0.51
300	0.23 × 10 <sup>-5</sup>	0.07



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

(3) 効果のまとめ

- ①塩化物イオン透過試験（膜厚 1.0 mm）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 2.0 mm）の結果より、タフネスコート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

(1) 実験概要

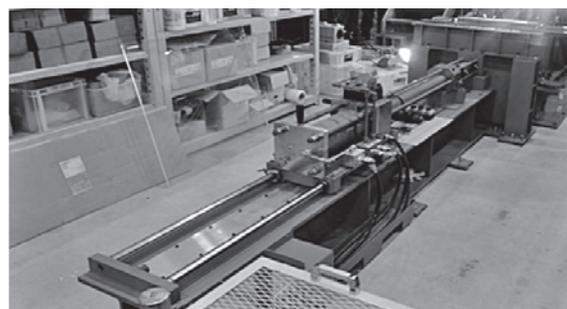
タフネスコートを表面被覆材料として用いたコンクリート構造物の衝撃力に対する性能向上効果を確認するために実験を行った。

(2) 実験内容

(a) 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 50 mm、質量 3.0 kg で先端形状は平面となっており、衝突速度は中速度（10 m/sec）程度である。また試験体は 600×600×90 mm の RC 版であり、無被覆の場合、タフネスコートにて前面を被覆した場合（膜厚 2.0 mm）、背面を被覆した場合（膜厚 2.0 mm）、両面を被覆した場合（膜厚 2.0 mm）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、飛散防止効果が定量的に把握された。



写真—9 高速衝撃実験装置

表一 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 <sup>2</sup>		裏面剥離面積:62500mm <sup>2</sup>		裏面剥離面積:87500mm <sup>2</sup>		裏面剥離面積:100000mm <sup>2</sup>	
	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	

### 7. 施工実績及びその効果

タフネスコート工法を経年劣化したL型擁壁に施工した事例を写真一 10 に示す。

施工前の擁壁は、構造上の問題は見られなかったものの、経年劣化により、浮きはく離・ひび割れによる擁壁背面からの漏水やはく落事故の懸念、段差・汚れなどの美観の悪化などが生じていた。

本構造物に断面修復やひび割れ注入など下地コンクリートを補修した後に、タフネスコート工法を施工した。

これにより、擁壁を造り変えることなく、コンクリートのはく落や漏水に対する機能の回復や、美観向上を図ることができ構造物の長寿命化を図ることができた。また、劣化因子進入の抑制が期待できることで点検等の頻度が減り維持管理の効率化になると考えられる。



《参考文献》

- 1) 興石正己, 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

施工前



施工後



写真一 10 タフネスコート工法の施工事例

- 2) 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

【筆者紹介】

久保 昌史 (くぼ まさふみ)

清水建設㈱

土木技術本部 基盤技術部 コンクリートグループ

