

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）の開発

清水建設(株) フェロー会員 ○興石 正己
三井化学産資(株) 正会員 井出 一直
清水建設(株) 正会員 久保 昌史

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などに対応すべく大規模な補修・補強及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及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などに、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残されていた。このような状況を鑑み、21世紀の課題である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、長寿命化を実現する新技術が期待されていた。

2. 技術の概要

(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、社会インフラに関しては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高速道路と鉄道などの重要交差点における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。

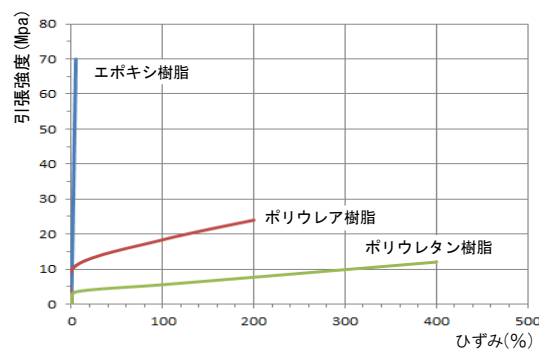


図-1 樹脂材料の力学特性の比較

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。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及び施工法

a) 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、ポリウレタ樹脂は引張強度が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

キーワード インフラ更新、補強・補修、ポリウレタ樹脂、剥落防止、保水性向上、耐久性向上

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1 清水建設(株)土木技術本部 TEL:03-3561-3886

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開発を行った。

b) 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 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

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ものである。吹付装置及びスプレーガンの外観を写真-1 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、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。

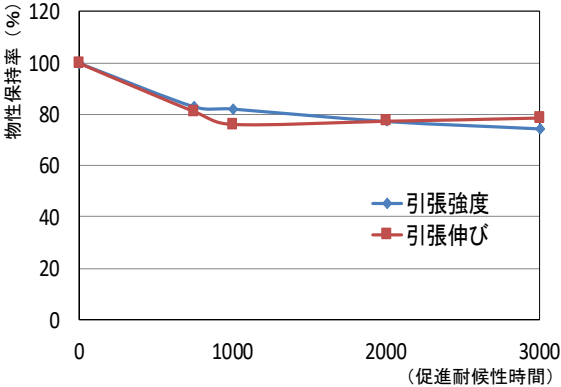


図-2 促進耐候性試験結果

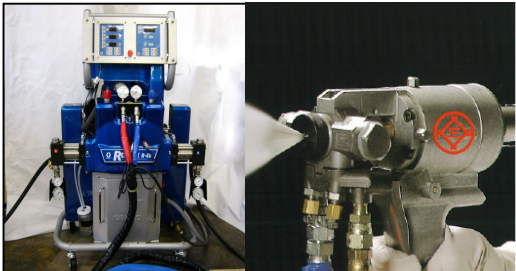


写真-1 吹付装置及びスプレーガン

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) プ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

3. 剥落防止性能の検証

(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。

(2) 実験方法

a) 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。

b) トンネル覆工载荷実験

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

a) 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 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-4 ※構造物施工管理要領, Nexco3 社, H26 年 7 月)。また、変位 50mm においてもポリウレタ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。

b) トンネル覆工载荷試験

無被覆の場合(Case1)、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て耐力を失った。

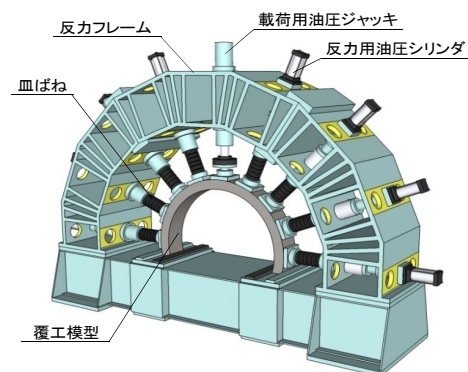


図-3 実験装置模式図

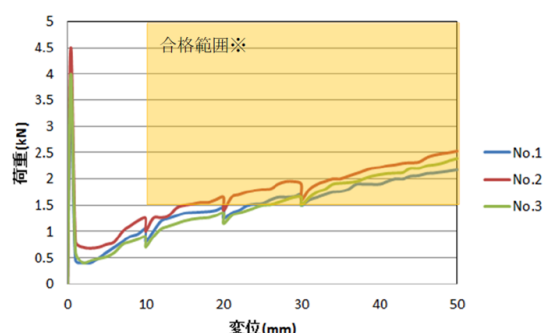


図-4 押抜き試験結果

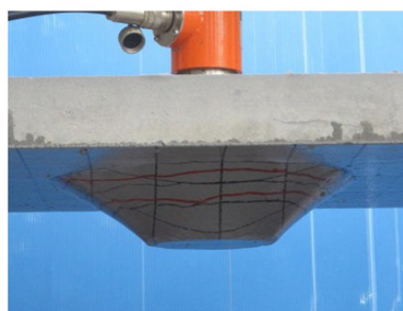


写真-2 変位 50mm 時の試験体

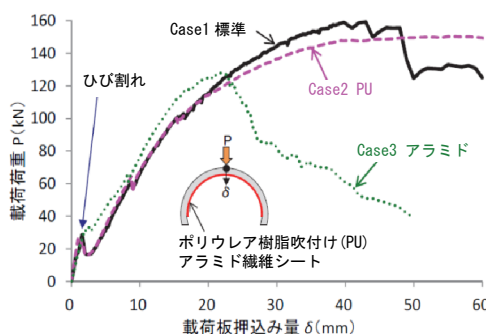


図-5 荷重-変位曲線



写真-3 Case2(変位 60mm)

(4) 効果のまとめ

- ①対象構造物を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

(1) 実験目的

本実験の目的は、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ことである。

(2) 実験方法

大規模地震時における貯水槽等の保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。

a) 大規模地震時における曲げひび割れ幅の検証実験

貯水槽の底版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 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(写真-5)でひび割れ幅を計測した。

b) 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-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、保水性を確認した。

(3) 実験結果

a) 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3.21mmであった。

b) ひび割れ発生断面における保水性確認実験

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、ポリウレア樹脂の過大な変形、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-7)。

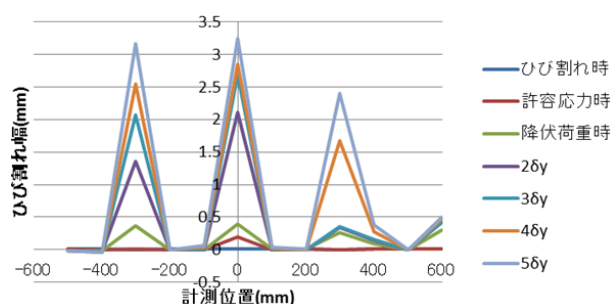


図-6 曲げひび割れ幅



写真-4 実験装置



写真-5 π 型変位計



写真-6 防水性確認実験

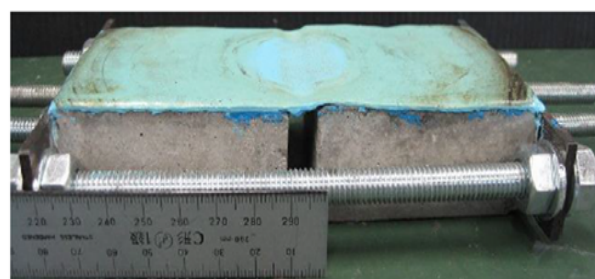


写真-7 実験終了時

(4) 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、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

(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

a) 塩化物イオン透過試験

厚さ1mm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。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少なかったため300日まで延長した。(通常は30～120日)

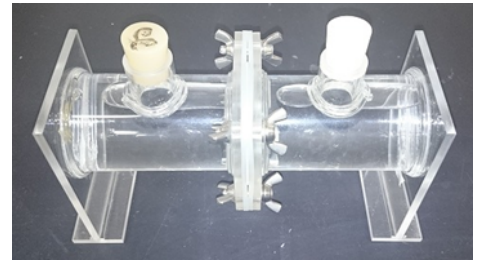


写真-8 塩化物イオン浸透試験状況

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ポリウレタ樹脂(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-9 相対動弾性係数の計測状況

(3) 実験結果

a) 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 $0.23 \times 10^{-5} (\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{日})$ 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、ポリウレタ樹脂1mmで表面被覆した場合には、図-8に示すように100年程度で $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ であった。

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

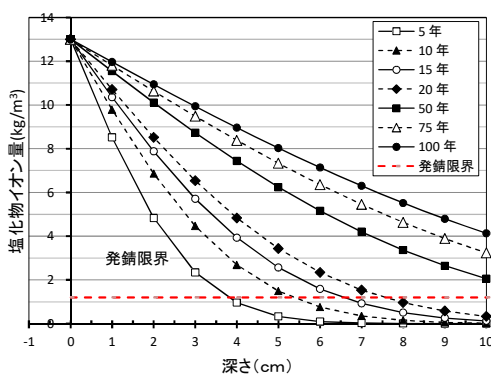


図-7 塩化物イオン浸透曲線(表面被覆なし)

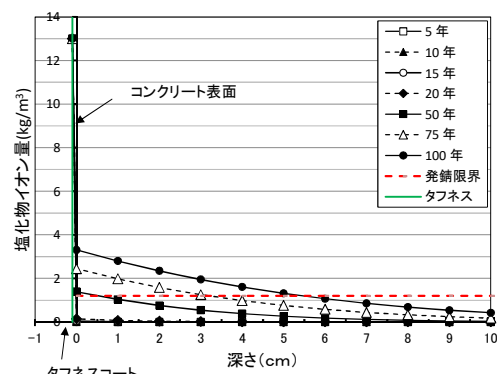


図-8 塩化物イオン浸透曲線(表面被覆1mm)

b) 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みられ、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) 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

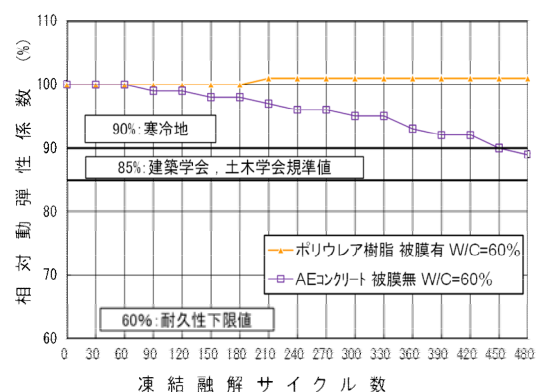


図-9 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

向上できる。

- ②凍結融解試験(膜厚2.0mm)の結果より、ポリウレア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

(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、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。

a) 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、幅 600mm、高さ 200mm、長さ 1,000mm(図-10)で主鉄筋及びせん断補強鉄筋には D10 (SD345) を使用した。ポリウレア樹脂は、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 2mm、4mm で一様に塗布した。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。

b) 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(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

a) 壁高覧の衝撃曲げ実験

実験にて得られた RC 試験体、RCT1-1(膜厚 2.0mm)及び RCT2-1(膜厚 4.0mm)試験体の入力エ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 2mm、4mm)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%，4mm で被覆した試験体が 59%の増加となった。

b) 版部材の衝突繰返し実験

実験結果の一覧を表-3 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

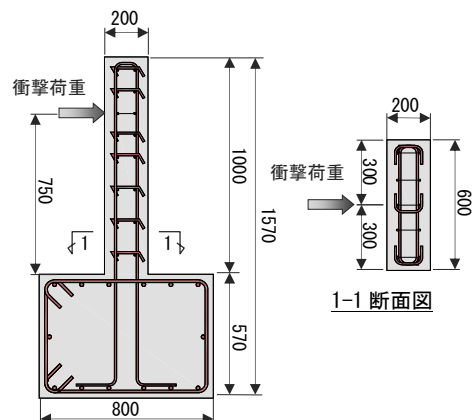


図-10 実験試験体

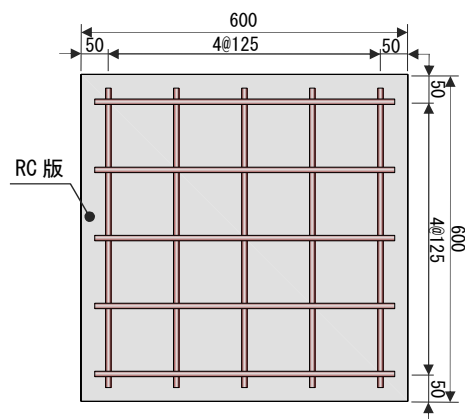


図-11 RC版試験体



写真-10 高速衝撃実験装置

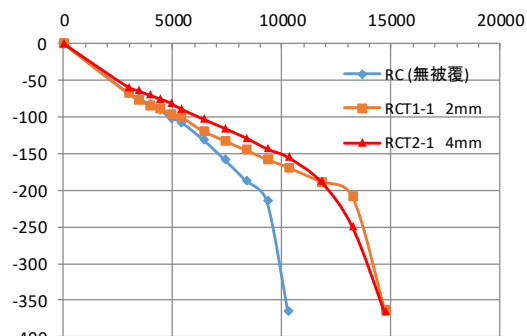
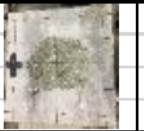


図-12 入力エネルギーと変位の関係(H-300)

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。

表-3 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	

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の合計 5 件である(写真-11、写真-12)。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加わる相乗効果があり、21 世紀の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られる。



写真-11 上水用配水池の施工例



写真-12 高架橋の施工例

8. 今後の展開

本工法では現在、専用の吹付装置の操作方法、吹付ガンの使用法、安全管理項目などの技能講習を行っている。さらに、技能講習修了証書の提出を義務づけており、適切な品質管理を実施している。今後の方向性としては、熟練作業員の技量に基づく吹付作用を改善するため自動吹付装置(写真-13)を開発する予定であり、これにより施工時の安全性、生産性を大幅に向上でき、さらなる発展が可能と考えられる。

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
- 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



写真-13 自動吹付装置(開発中)