特集≫ 防災、安全・安心を確保する社会基盤整備

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

輿 石 正 己・井 出 一 直・藤 掛 一 典

鉄筋コンクリート構造物(以下、RC 構造物という)の衝撃力に対する抵抗性向上を図るために、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「本技術」という)に着目し、平成 22 年から共同で技術開発を行ってきた。本技術は、従来のエポキシ樹脂やポリウレタン樹脂で被覆した工法に比べ、引張強度(σ t = 24 N/mm²)と伸び性能(ε tu = 200%)に優れたポリウレア樹脂で被覆することにより、RC 構造物の衝撃力に対する抵抗性を向上できるとともに長寿命化の促進を可能とするものである。

キーワード:ポリウレア樹脂,衝撃,津波,安全性向上,入力エネルギー

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。

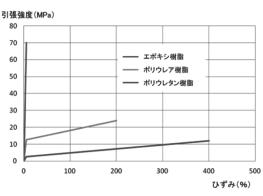
著者らはライニング材料でRC構造物を被覆することにより、構造物の崩壊を抑制し、大変形しても耐荷力を保持できる本技術を研究開発中である。本報告では、ポリウレア樹脂の特徴、ポリウレア樹脂の衝撃力に対する効果(現地調査)、簡易及び実物大の衝撃実験、および長寿命化に必要なひび割れ追随性に関する知見を紹介する。

2. ライニング樹脂

本技術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25 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レベルは400%程度と大きいが、引張強度は10 MPa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て研究開

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(O=C=N-Q-N=C=O)とポリアミン(NH2-R-NH2)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毒性が無い。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能力及びひずみレベルが大きい領域での復元力を確保する強度が必要であり、破断時のひずみレベル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に比べ、ポリウレア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、本技術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と長寿命化を図る技術である。



図─1 樹脂材料の力学特性の比較 2)

3. 現地調査によるラッピング効果の観察

東日本大震災の津波被害を受けた岩手県野田村のサ ケ・マス養殖場において、ポリウレア樹脂で防水処理 した水槽は崩壊することなく原形を保っていた。下安 家漁業協同組合サケ・マスふ化場は野田村下安家の安 家川の河口から約300m上流にある。このサケ・マ スふ化場には第1~第6ふ化場と呼ばれる水槽群が設 置されており、これらの水槽群の中で、第5,6ふ化場 は稚魚に対する安全性と稚魚の食付きによる損傷が少 ないとの理由から従来のようなエポキシ樹脂ではな く、ポリウレア樹脂(厚さ2mm)による防水処理が 実施されていた。この第5,6 ふ化場は長さ24 m×幅 15 m×深さ1mの掘り込み水槽を2基,並列に並べ て1つのふ化場としたものである。写真―1に津波 を受けているサケ・マス養殖場,写真-2に被災後 の第5,6ふ化場を示す。第5,6ふ化場における津波の 浸水高は約3.0 m であり、波圧に換算すると約90 kPa が作用したことが判明している。被害状況としては第 1~第4ふ化場が津波により崩壊したが、近くにある 第5.6 ふ化場では水槽内部に津波が運んできた泥土 が20cm 程度堆積し、軽自動車や岩塊等の激突によ る局部的な破損はあったものの大きな形状変形や損傷 は無く水槽としての機能は維持されていた。



写真一1 津波を受けているサケ・マス養殖場 (写真提供:下安家漁業協同組合)



写真-2 津波被災後の第5,6ふ化場

4. 簡易衝擊実験

ポリウレア樹脂で表面被覆したU型側溝(幅 325 mm×高さ300 mm×長さ600 mm, 厚さ50 mm)で形状保持効果を確認するために簡易衝撃実験を行なった。U型側溝をポリウレア樹脂(厚さ2.5 mm)で表面被覆したRC供試体と通常のRC供試体に対して,コの字の張りだした頂部に20kgの錘を1.0 mの高さから落下させた。通常のRC供試体では,1回目の衝撃載荷でコの字型の頂部に貫通クラックが入り,写真一3に示すように3回目の衝撃載荷で崩壊した。

一方、**写真**—4に示すようにポリウレア樹脂で表面被覆した供試体は錘を20回衝撃載荷した後でも、細かい貫通ひび割れが数本入ったもののコの字型の形状は保持されていた。ひび割れの脇に記入してある数字は、ひび割れ発生時の錘の落下回数である。実験結果より、供試体をポリウレア樹脂で表面被覆することにより、貫通ひび割れが入り断面は破壊されても、形状を保持でき全体崩壊を防止できることが確認された。



写真-3 錘の衝撃載荷(3回目)後の状況



写真-4 錘の衝撃載荷(20回目)後の状況

5. 実大衝撃実験

(1) 実験概要

本実験は、基礎的段階として高速道路の壁高欄を一部切出したRC片持ち梁試験体をライニング材料で被覆し、設計荷重の2.0~3.5倍程度を想定した衝撃載荷実験を行なった。実験では、衝撃載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、本技術の効果を定量的に把握した。

図―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 で主鉄筋およ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厚さ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抜出しを防止した。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4 mmで一様に塗布した。

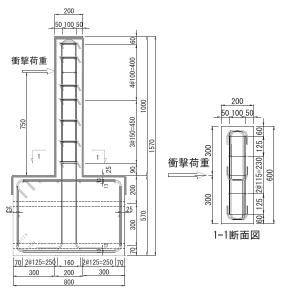


図-2 衝撃実験試験体

写真-5に衝撃実験装置の概要を示す。スパン長 0.75 m で片持ち支持された RC 梁試験体に質量 1000 kg の重錘を所定の落下高さ(300,500,600 mm)から自由落下衝突させた。さらに初期衝撃載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50 mm から質量 1000 kg の重錘を繰返し自由落下させた。表-1 に実験試験体の一覧を示す。

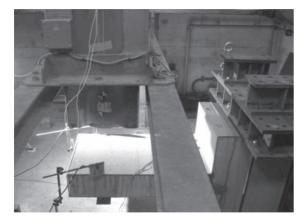


写真-5 衝擊実験装置

表-1 衝撃実験試験体の一覧

試験体	重錘質量	初期落下	繰返し落下	ポリウレア樹脂
	(kg)	高さ (mm)	高さ (mm)	塗布厚 (mm)
RC1	1,000	600	50, 100	0.0 (無)
RC2	1,000	500	-	0.0 (無)
RC3	1,000	300	50, 100, 150	0.0 (無)
RCT1	1,000	600	50, 100	4.0
RCT2	1,000	500	_	4.0
RCT3	1,000	300	50, 100, 150	4.0

(2) 衝擊実験結果

RC1 及び RCT1 試験体に対して初期衝撃載荷を実施した後に、設計荷重レベルの繰返し衝撃載荷を追加した。この実験にて得られた入力エネルギーと変位の関係を図一3に示す。また、図一4に RC3 及び RCT3 試験体に対する同様の実験結果を示す。両図より、試験体の崩壊(変形が300 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には、無被覆の RC 試験体に比べて22~53%程度増加することが確認された。なお、繰返し衝撃実験においては同一高さからの載荷を5回までとし、順次入力エネルギーを増加させて実施した。

写真 6,7にRC1及びRCT1試験体の崩壊状況を示す。RC1試験体では圧縮側(下面側)のコンクリー

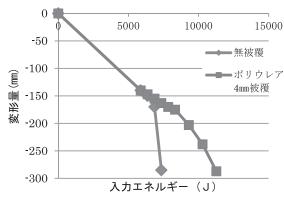


図-3 入力エネルギーと変位の関係(H=600 mm)

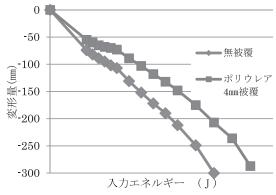


図-4 入力エネルギーと変位の関係 (H = 300 mm)

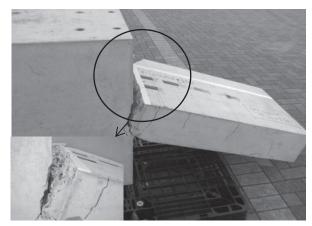


写真-6 RC1 試験体の崩壊状況

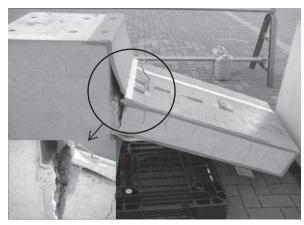


写真-7 RCT1 試験体の崩壊状況

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 5 本の破断と同時に急激に崩壊した。一方 RCT1 試験体はポリウレア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の 2 本だけが破断した後に緩やかに崩壊した。通常の RC 試験体およびポリウレア樹脂で被覆した RC 試験体の終局時における模式図を図一5、6 にそれぞれ示す。

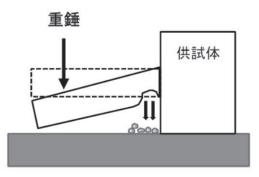


図-5 無被覆の RC 試験体

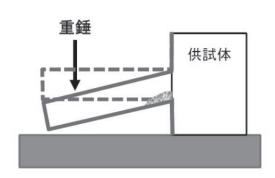


図-6 ポリウレア樹脂で被覆した RC 試験体

6. 構造物の長寿命化

(1) 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、凍害およびアルカリ骨材反応などが報告されている。このような要因によるコンクリートの経年劣化は、以下のような過程で進行することが確認されている。①コンクリート表面にひび割れが発生し、そのひび割れから水分が浸透する。②浸透した水分により鉄筋に腐食が発生する。③鉄筋腐食に伴う膨張圧の増加によりさらにひび割れ幅が拡大する。このような負の連鎖により、コンクリート構造物は段階的に劣化していくこととなる。

現在、コンクリート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、今回ポリウレア樹脂、ポリウレタン樹脂およびエポキシ樹脂で4面を被覆した試験体による準静的曲げ試験(載荷速度:0.1 mm/s)を実施し、それぞれの樹脂のひび割れ追随性を確認した。図一7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100 mm、高さ120 mm、長さ1200 mmで主鉄筋にはD13(SD345)を4本使用した。表一2に試験体の一覧を示す。

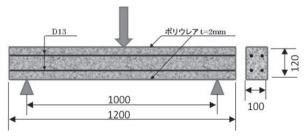


図-7 準静的曲げ試験の試験体

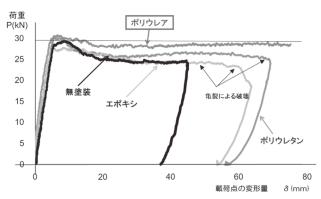
表-2 準静的曲げ試験体の一覧表

試験体	載荷スパン長 (mm)	被覆材料	被覆厚 (mm)	載荷面
RC	1000	_	-	-
RCE	1000	エポキシ	2.0	4面
RCPU	1000	ポリウレタン	2.0	4面
RCP	1000	ポリウレア	2.0	4面

(2) 実験結果

図―8に示すように、準静的曲げ試験(載荷速度; 0.1 mm/s)では、RC 試験体は初期降伏後の変形量が 46 mm まで耐荷力は 24 kN 以上を維持しながら大きく変形することを確認できた。また、エポキシ樹脂及びポリウレタン樹脂で 4 面を被覆した試験体では、RC 試験体と耐力は同等であったが、変形量はそれぞれ 62 mm、73 mm まで伸びることが確認された。さらに、ポリウレア樹脂で 4 面を被覆した試験体では初期降伏後に耐荷力を維持しながら変形量が増大し最大 78 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性能を有するものと推測される。

次に、写真-8~11 に準静的曲げ試験後における 各試験体の破壊状況を示す。通常の RC 試験体 (写真-8) では、載荷点直下にひび割れが発生し荷重の増加に伴いひび割れ幅が増加した。終局時では、ひび割れの分散が見られず V字型の破壊モードを示した。こ



図―8 各試験体の荷重―変形量曲線



写真-8 RC 試験体の曲げ破壊状況



写真―9 ポリウレアで被覆した試験体の曲げ破壊状況

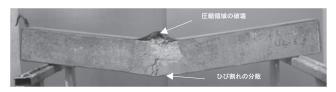


写真-10 ポリウレタンで被覆した試験体の曲げ破壊状況



写真―11 エポキシで被覆した試験体の曲げ破壊状況

れに対して、伸び性能の高いポリウレア樹脂やポリウレタン樹脂で4面を被覆した試験体(写真—9,10)では、終局時にひび割れが分散し、変形モードも緩やかな曲線を描くことが確認された。また、エポキシ樹脂で4面を被覆した試験体(写真—11)では、エポキシ樹脂の伸び性能が5%程度と低いため、ひび割れ幅の増加に追随できず通常のRC試験体と同様に終局時にはひび割れが集中し、破壊モードもV字型となった。

7. 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) ポリウレア樹脂で表面被覆した RC 構造物では 断面破壊後の形状保持効果があることが、津波 被害調査及び簡易衝撃実験で明らかにされた。
- 2) 実大衝撃実験における初期衝撃載荷では、ポリウレア樹脂(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。さらに、RC壁の基部に発生するひび割れは圧縮側では壁体内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。

- 3) 実大衝撃実験における初期衝撃載荷では、ポリウレア樹脂(4mm)の有無による変形量には有意な差は認められなかった。
- 4) 実大衝撃実験における繰返し衝撃載荷では、ポリウレア樹脂(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22~53%程度増大する。すなわち初期衝撃載荷における入力エネルギーが大きく、損傷の大きいRC試験体ほど本技術タフネスコートによる安全性向上効果は大きいことが確認された。
- 5) コンクリート構造物の長寿命化に必要な樹脂の ひび割れ追随性に関しては、ポリウレア樹脂お よびポリウレタン樹脂は、発生したひび割れに 終局状態まで追随できた。一方、エポキシ樹脂 は伸び能力が5%程度と小さいため、ひび割れ の拡大に追随できずに破断することが確認され た。

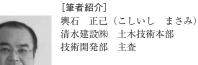
謝辞

本技術「タフネスコート」の開発に当たり、平成22年から4年間技術開発に協力いただいた防衛大学校殿、三井化学産資(株)殿には、本欄をお借りして心より謝辞を申し上げます。

J C M A

《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) スワエールスプレーシステム(ポリウレア樹脂防水防食材)スワエール 三井化学産資(株)技術資料.





井出 一直(いで かずなお) 三井化学産資(株) 環境資材開発部 課長



藤掛 一典 (ふじかけ かずのり) 防衛大学校 建設環境工学科 教授