

高耐候性クリア樹脂を被覆した RC 部材の剥落防止効果 及び耐衝撃補強効果の基礎検討

玉井宏樹¹, Murat Hosogulu²

¹九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 准教授

²九州大学大学院 工学府 土木工学専攻 修士課程学生

概要：“維持管理性”は新設・既設に関わらず構造物にとって重要な性能の一つと言える。従来の表面被覆工法や繊維補強工法は着色系の補修剤や補強材の適用により、施工後の既設部の点検が困難となり、維持管理性能が低下する恐れがあった。本研究では、この問題点を解決するために、耐候性の弱点を解決した透明なウレア樹脂の適用を試み、塗膜厚と透明度を把握した上で衝撃実験を実施し、RC 梁部材へ適用した際の耐衝撃補強や剥落防止効果を検討する。

1. はじめに

逼迫した財政状況下で社会基盤施設に対して、低コストかつ高クオリティで点検や補修・補強などの措置を施さなければならない現状において、構造物に維持管理性能（点検や措置のしやすさ）を付加することは重要である。それは、新設のみならず、補修・補強後の構造物に対してもいえる。しかし、表面被覆工法（補修）や繊維補強工法（補強）は着色系の補修剤や補強材の施工により、結果的に既設コンクリート部材の表面を隠すこととなり、以後の点検がしにくくなると同時に、既設コンクリート部の変状を容易に把握することが困難になるため、維持管理性能の低下に繋がっていることが危惧される（図-1 参照）。この問題点を解決するために、近年、透明（クリア）な材料の開発が進み、適用性検討が始まっているが、それらの多くは劣化因子の侵入防止などの補修用に限られており、剥落防止や補強用途では、その有効性についてはまだ研究途上であると言える。

そこで、本研究では、耐候性の弱点を解決した透明なウレア樹脂（以後、クリア樹脂と称する）のコンクリート構造物への適用を最終的な目標とし、それを達成するために、クリア樹脂の塗膜厚による透明度を検討し、さらに、鉄筋コンクリート（RC）梁部材を対象とした落錘式衝撃実験を実施することで塗膜厚が部材の耐衝撃補強効果や剥落防止効果に及ぼす影響を検討した。

なお、上述の両効果に着目したのは、道路橋主部材以外にも壁高欄や落石防護工などへの適用を想定しているためである。



図-1 着色系樹脂被覆による維持管理性能の低下

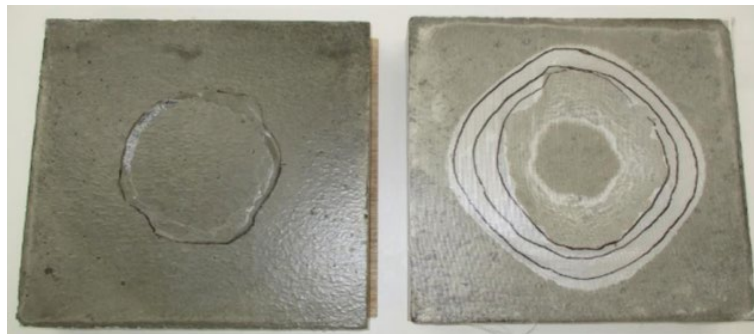
2. 本研究で着目した樹脂

本研究で着目した樹脂は、蛍光型透明ポリウレア樹脂塗料であり、既に、支承防錆等への適用が検討されている塗料である。この樹脂は、ウレタン樹脂、無機系充填材、高沸点炭化水素、エステル系溶剤といった複数成分から成るものであり、代表的な性能を表-1 に示すように、鋼橋塗装設計施工要領防水塗装 B 種や JIS などの規格値以上の性能を有している。

表に示すように、着目した樹脂は、500 時間後の促進耐候性で光沢保持率・色差ともに規格値を大きく上回っていると同時に、5000 時間後における光沢保持率についても 80%を保持しており、非常に耐候性が高いものとなっている。また、もう一つの特筆すべき性能としては、引張特性として、強度は 28.3N/mm²程度であるものの、伸び率（破断ひずみ）は 334%と非常に高い性能を有しており、伸び能力に卓越しているといえる。また、JIS A 5372 に規定されている押抜き試験を実施した結果を図-2 に示す。この図には、本塗料と併せて利用する、ポリエステ

表-1 代表的な性能

性能試験項目		規格値	結果	方法
耐荷重(kN)		0.3 以上	0.5	鋼橋塗装設計施工要領防水塗装 B種
付着性	標準養生	1.0 以上	3.3	
	半水中養生	1.0 以上	2.3	
	温冷繰り返し養生	1.0 以上	2.9	
伸び性能(mm)		10 以上	31	
塩化物イオン透過量		5.0×10^{-3} 以下	5.0×10^{-5}	
促進耐候性 (500 時間後)	光沢保持率(%)	70%以上	104	
	色差	1.0 以内	0.48	
水蒸気透過量($\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{日}$)		5.0 以下	2.9	
ひび割れ追従性	常温時	2.0 以上	3.0	
	促進耐候性試験後	2.0 以上	2.2	
	低温時(-20°C)	0.4 以上	3.8	
引張試験	伸び率(%)	—	334	JIS K 5600
	引張強度(N/mm^2)	—	28.3	
促進耐候性	光沢保持率(%)	1500 時間 異常無し	5000 時間 80%	JIS K 5600 7-7



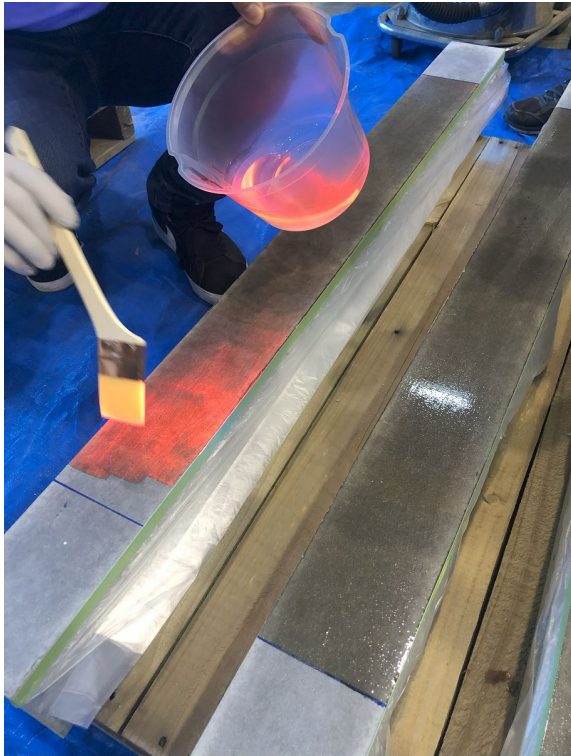
(a)樹脂のみ (b)樹脂+クロスシート

図-2 押し抜き試験後の試験板の状態

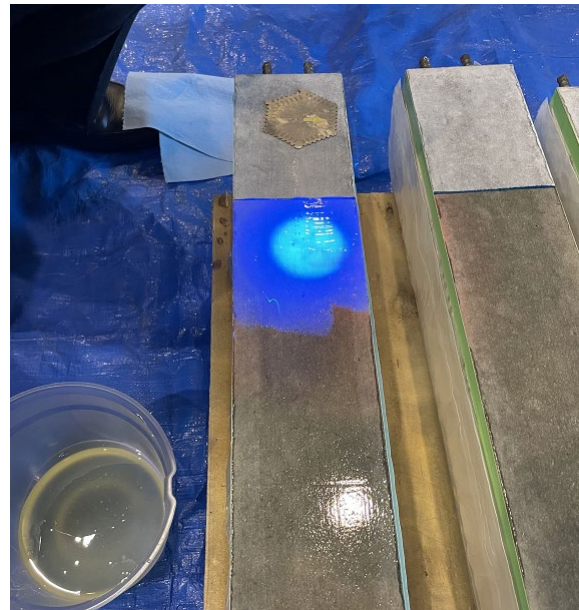
ル系クロスシート（樹脂との反応で透明化）の結果も併せて記している。樹脂のみでは、最大荷重 0.5kN であったのに対して、クロスシートを併せて利用した場合は 3.12kN にまで達し、さらに押し抜き変位も約 3 倍に達することがわかった。なお、ポリエステル系クロスシートの詳細については後述する。

また、本塗料には蛍光顔料が含まれていることも特徴の一つである。写真-1 に RC 梁底面への本塗料の施工状況について記す。本塗料を施工する際には、プライマー処理が必要であり、プライマー塗布後に、本塗料を塗布することとなる。なお、本研究においては、塗布対象面積が小さかったため、刷毛塗りとした。写真-1(a)はプライマー塗布の状況、写真-1(b)は本塗料塗

布の状況を示している。この写真より、プライマー処理後は赤色、本塗料塗布後は青色に光っているのがわかるが、これはブラックライトを照射後にこのように塗布箇所が光ることによって、塗布忘れや塗り斑を防止するようになっている。クリア樹脂の場合、このような施工上の工夫が必要になる。また、写真-2 にクロスシートの施工状況を記す。クロスシートはプライマー、本塗料を塗布した後に、写真-2(a)のように設置し、その後、本塗料を上塗りすることで施工した。(写真-2(b)参照) 塗布厚に関しては、塗膜厚測定ゲージ（ウェットゲージ）によって管理した。本来であれば、この塗布厚をパラメータとした実験を予定していたが、後述の理由により、ここでは、塗布厚 1mm のケースについて

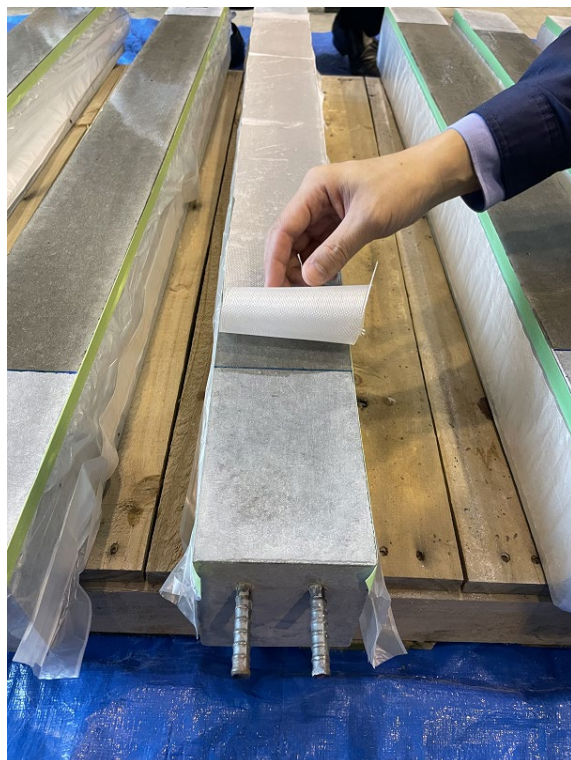


(a)プライマー

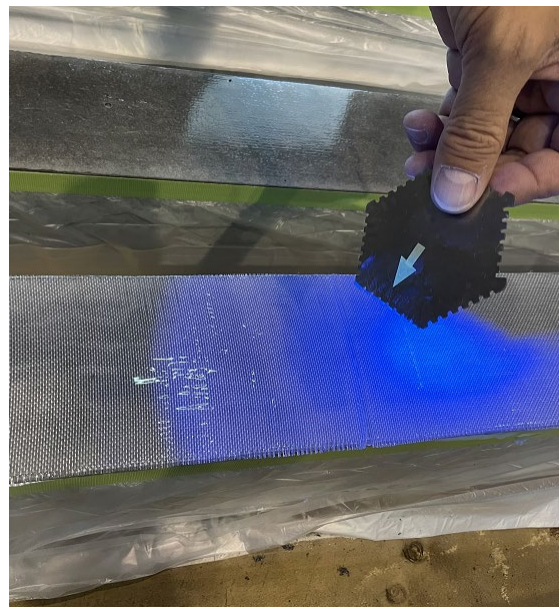


(b)本塗料

写真-1 塗布状況



(a)クロスシート



(b)クロスシート設置後、本塗料で上塗り

写真-2 クロスシート施工

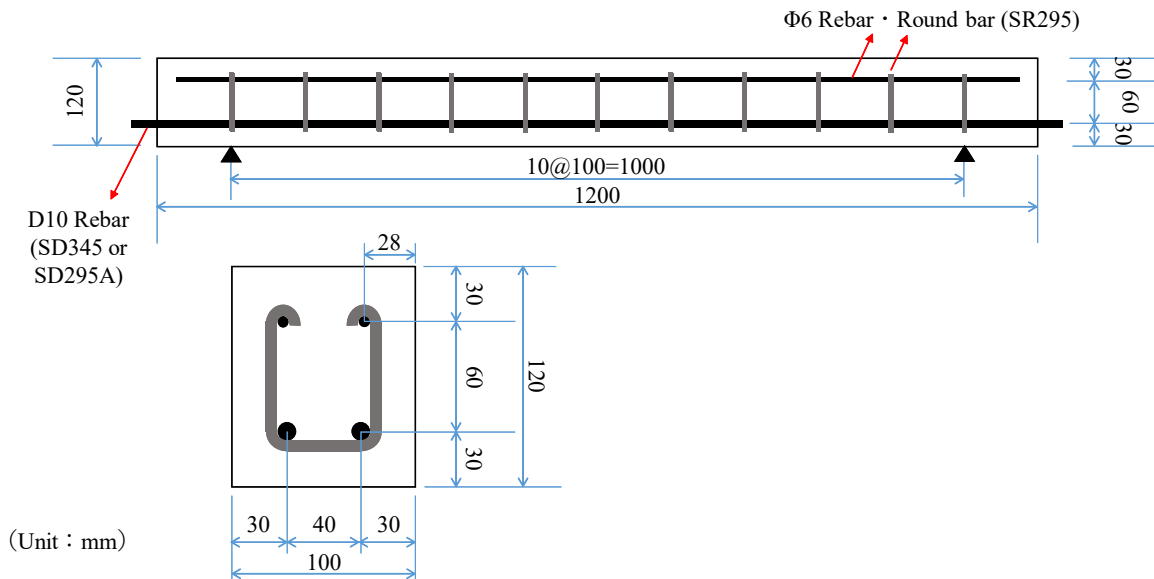


図-3 実験に用いた RC 梁（基準供試体）

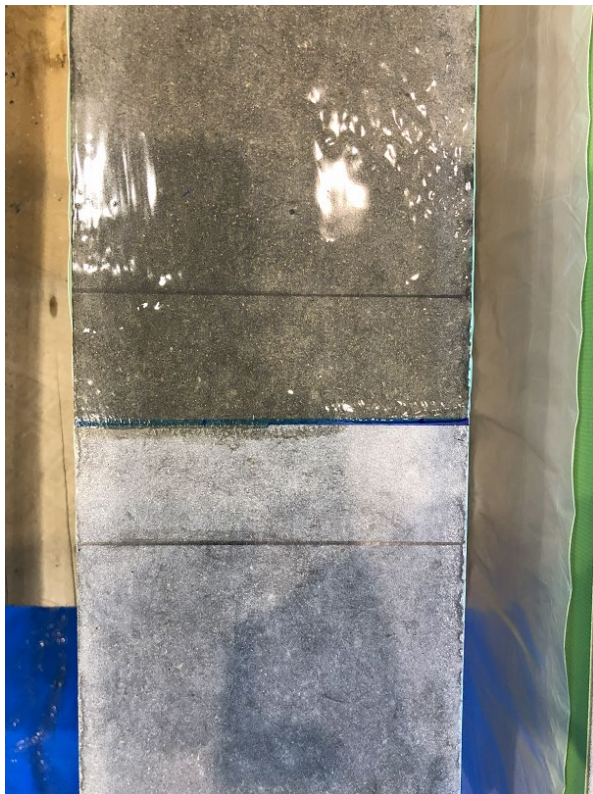


写真-3 透明度（透視度）の目視確認

実験結果および考察を記す。

3. 実験概要

まず、クリア樹脂塗料の塗布後の厚さと透明度の関係に関する実験について、当初の予定では、厚さをいくつかパラメータとする計画を立てていたが、塗膜厚 1mm 以上の厚さの正確な管

理が困難であったこと、また、透明度（透視度）の定量測定に用いるヘイズメーターによる計測に問題が生じたこと、などを理由にこの研究期間内での実施は断念した。ただし、1mm 厚さにおける透明度の目視観察は実施したため、その結果の一例を写真-3 に示す。この写真は上部が塗布箇所、下部が塗布していない箇所を表している。この写真より、マーカー（幅約 1mm）の黒色実線が塗布後にも明瞭に視認できることを確認した。この透明度（透視度）が厚みに応じて、どのように変化するかについては今後の研究で明らかにしていく予定である。

次に、剥落防止効果、また、耐衝撃補強効果を明らかにするために落錘式衝撃実験を実施した。実験に用いた供試体は、図-3 に示す小型の曲げ破壊型 RC 梁である。図に示す通り、矩形断面を有する複鉄筋 RC 梁で、圧縮側主鉄筋とせん断補強筋には $\phi 6$ で SR295、引張側主鉄筋には D10 で SD345 を用いている。せん断補強筋間隔は 100mm である。また、コンクリート強度は 3 本平均が 45.9N/mm^2 （材齢 14 日）であった。

実験供試体は、基準供試体（樹脂塗料の塗布無し）、樹脂塗布供試体（梁底面にクリア樹脂塗料を塗膜厚 1mm 塗布した供試体）、樹脂+シート補強供試体（樹脂塗布供試体にポリエステル系クロスシートを貼付した供試体）の 3 種類である。ポリエステル系クロスシートは、樹脂によって湿潤されると透明化する特殊な素材であり、このシートを用いることで、実用上、剥落防止効果、また、耐衝撃補強効果の向上を期待できると考えて、利用した。

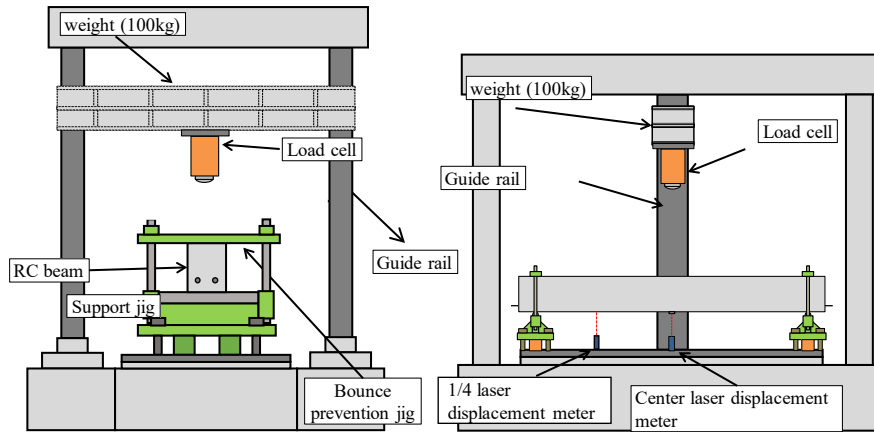


図-4 落錘式衝撃試験装置

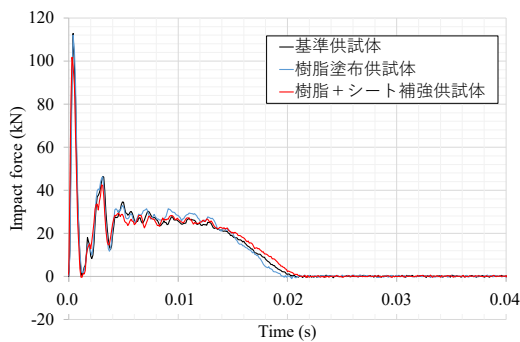


図-5 重錘衝撃力波形

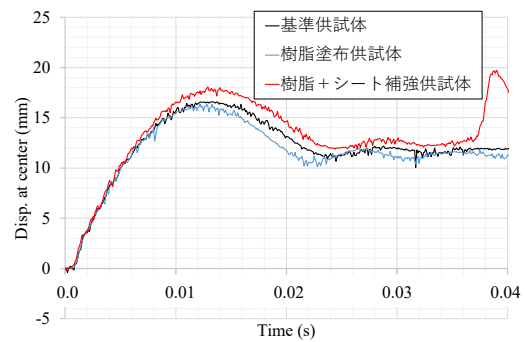


図-6 スパン中央の鉛直変位波形

実験には、本学所有の落錘式衝撃試験装置(図-4 参照)を利用し、重錘質量 100kg の鋼製重錘を用いて、衝突速度 3m/s の単発衝撃実験と衝突速度 1m/s の繰り返し衝撃実験を実施した。なお、その際、累積残留変位がスパン長の 1%である 10mm に達した際を本実験における終局と仮定した。衝突速度 3m/s の衝突条件は、対象とする基準供試体が単発で終局に至るレベルであるのに対し、衝突速度 1m/s では単発で終局に至ることはなく、繰り返し衝撃に伴う破壊の推移を確認できる衝突条件となっている。

実験での計測項目は、重錘衝撃力、梁の鉛直変位、高速カメラによる破壊性状である。

4. 実験結果及び考察

まず、単発衝撃実験の結果として、重錘衝撃力波形、および、スパン中央の鉛直変位波形の比較図をそれぞれ図-5、図-6 に示す。これらの図より、樹脂+シート補強供試体では最大衝撃力が若干低下するものの、衝撃力波形、変位波形ともに大きな差は見られなかった。つまり、単発で終局に至るレベルの衝突条件に対しては、



(a) 樹脂塗布 (b) 樹脂+クロスシート
写真-4 底面の破壊状況写真

1mm の塗膜厚の樹脂塗布、さらにはクロスシートの補強効果はほぼないということが明らかとされた。写真-4 に底面の破壊状況の比較図を示す。3 種類ともに共通して、曲げひび割れが支配的であり、曲げ破壊型で終局に至ったものの、この写真を見てもわかるように、塗膜厚 1mm の樹脂塗布のみでは、曲げひび割れ開口と同時に樹脂も破断するが、クロスシートを貼付した供

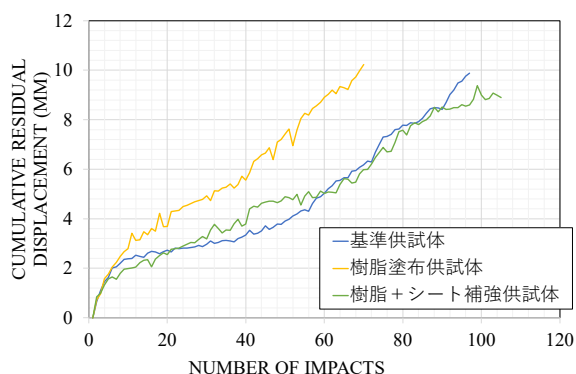
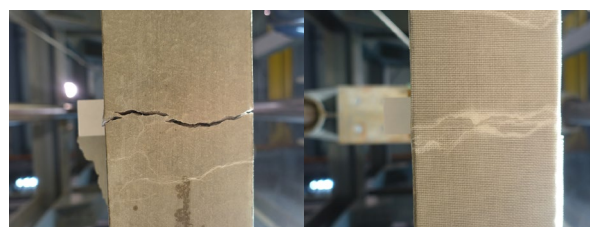


図-7 累積残留変位と衝突回数の関係

試体では、曲げひび割れ開口に対するエネルギーをシートが吸収することで、いわば緩衝層のような効果を生ずるため、樹脂は破断しなかった。写真-4(b)中の白色箇所がひび割れ箇所を示している。つまり、樹脂とクロスシートを併せて用いることで、十分なひび割れ追従性を得られることが分かり、剥落防止に高い効果を示すことが明らかとされた。

次に、繰り返し衝撃実験の結果について考察する。図-7に繰り返し衝撃実験において重要なグラフの一つである累積残留変位と衝突回数の関係の比較図を示す。ここで、累積残留変位とは、各回における残留変位の累積値のことで、損傷度を表す指標となり得るものである。この図より、基準供試体では約97回、樹脂塗布供試体は約70回で終局に達したのに対し、樹脂+クロスシート補強供試体では105回の衝突でも累積残留変位は10mmを達さず、衝突部の圧縮破壊が進行し、適切な载荷ができない可能性があったため、終局前に実験を終了した。よって、この回数を終局に達した衝突回数とした。終局に達した衝突回数を見ると、明らかに、樹脂とクロスシートを用いた供試体は多くなっており、繰り返し耐衝撃性能が向上したことがわかった。一方で、塗膜厚1mmの樹脂塗布だけでは、性能向上には寄与しないことも同時に明らかとなった。また、写真-5に底面の破壊状況の比較図を示す。この写真は、終局時点のものを示している。写真-5(a)より、単発衝突の場合と同様に、樹脂塗布供試体では、スパン中央に近い位置の曲げひび割れの開口とともに樹脂も破断したことがわかる。ただし、その周辺部に生じているひび割れは樹脂が白色化している（いわばクレーズ状態¹⁾に達している）ものの、樹脂の破断は見られなかった。つまり、樹脂塗布単体でも、衝撃载荷時にある程度のひび割れ追従性を有し



(a) 樹脂塗布 (b) 樹脂+クロスシート
写真-5 底面の破壊状況（終局時）

ているといえる。写真-5(b)には、樹脂+クロスシート補強供試体だが、樹脂の破断は見られず、単発衝突の場合と同様な傾向を示した。

5. 結論

本研究では、クリア樹脂塗料を塗布した RC 梁部材の耐衝撃補強効果や剥落防止効果に及ぼす影響について基礎検討を実施した。現時点で得られた成果を以下に列挙する。

1. 本研究で着目したクリア樹脂塗料において、塗膜厚 1mm では、十分な耐衝撃補強効果を得ることはできないことが明らかとなった。ただし、目視では、塗膜厚 1mm の透明度はひび割れを十分に視認できるものであることも同時に確認した。
2. クリア樹脂塗料の塗布とともに、ポリエステル系クロスシートを貼付する場合、シートが緩衝層の効果を発揮することで、ひび割れ追従性が高まることで、樹脂破断が見られず、十分な剥落防止効果を確認することができた。また、繰り返し耐衝撃性能が著しく向上することも確認できた。

今後は、当初の予定であった、塗膜厚をパラメータとした実験を実施することで、本年度の研究をより発展させていく予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、樹脂の開発・提供に関して湊久幸氏（三重塗料株式会社）に多大なご協力をいただいた。また、本研究は一般社団法人九州建設技術管理協会による令和4年度「建設技術研究助成」のもとで遂行されたものである。ここに、両者に謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋順一：結晶性ポリマにおけるクレーズ進展挙動のモデル化およびそれを用いた破壊予測シミュレーション，慶応義塾大学大学院理工学研究科学位論文，2013（未公開資料）