

論文 斜めひび割れを生じた RC 梁の修復効果に関する研究

深澤 優一*1・斉藤 成彦*2・高橋 良輔*2

要旨: 地震により被災した RC 構造物の早期かつ適切な復旧には、部材損傷量の定量的把握に基づく効果的な修復の実施が要求される。樹脂注入によるひび割れの修復効果を定量的に評価するためには、修復後のひび割れ進展性状や耐荷挙動への影響について把握しておく必要がある。本研究では、耐荷挙動に対してひび割れが支配的であるせん断破壊する RC 梁を対象に、樹脂注入による斜めひび割れの修復が部材の耐荷挙動に及ぼす影響について検討を行った。その結果、斜めひび割れの修復効果を実験的に明らかにするとともに、数値解析によりひび割れ進展性状の変化が再現できることを示した。

キーワード: RC 梁, せん断破壊, 斜めひび割れ, 修復, 樹脂注入, 数値解析, 剛体バネモデル

1. はじめに

地震により被災した構造物の中には、修復して再利用されるものもあり、損傷を生じた RC 構造物の修復性に関する研究はこれまで数多く行われてきている¹⁾。損傷した部材におけるコンクリートの修復では、ひび割れに対する樹脂注入や剥離・剥落に対する断面修復が一般的になりつつある。このうち、ひび割れの修復に用いられるエポキシ樹脂などは、コンクリートに比べて弾性係数は小さいものの、引張強度はかなり大きいため、修復された部材のひび割れ進展や耐荷挙動に大きな影響を与える場合のあることが考えられる。ひび割れに対する樹脂注入の効果は、様々な部材実験により確認されているが、曲げ破壊型の部材においては断面修復を伴うことが多く、修復前後でのひび割れ進展の変化は詳述されていない²⁾。ひび割れの観察が比較的容易なせん断破壊型の部材に対する実験も実施されているが、修復後のひび割れ進展性状の変化や耐荷挙動への影響については詳細に検討されていない^{3,4)}。しかしながら、地震により被災した構造物の損傷状態の評価や、修復後の部材の性能評価を定量的に行うためには、部材中におけるひび割れの修復効果や、修復前後でのひび割れ進展性状の変化などに関する基本的な情報を蓄積していくことが必要である。

そこで本研究では、ひび割れの観察が容易なせん断破壊する RC 梁を対象に、樹脂注入による斜めひび割れの修復効果について検討を行った。せん断スパン比およびせん断補強鉄筋の配置が異なる RC 梁の静的載荷実験を行い、修復前後における斜めひび割れの進展性状の変化について詳細に検討を行った。また、ひび割れの評価が比較的容易な剛体バネモデルによる数値解析を用いて、修復部材におけるひび割れ進展の再現も試みた。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

せん断スパン比およびせん断補強鉄筋の配置が異なる 4 種類の RC 梁試験体に対し、部材がせん断破壊するまで静的載荷を行い、樹脂注入により斜めひび割れの修復を行った後、再度、破壊するまで静的載荷を実施した。試験体の諸元を表-1、表-2、および図-1 に示す。

試験体 Y1 は、せん断補強鉄筋を配置しないせん断スパン比 5.0 の RC 梁で、斜め引張破壊（主要な斜めひび割れを一つ形成し破壊）するように設計した試験体である。ここでは、試験体 Y1 で斜めひび割れが生じたスパンを左スパンとする。試験体 Y1S は、試験体 Y1 の片側（右）スパンにせん断補強鉄筋を配置し、右スパン内では破壊しないようにしたものである。つまり、試験体 Y1 は、斜めひび割れの修復後に損傷のない反対側（右）のスパンで破壊し、試験体 Y1S は、修復後もせん断補強鉄

表-1 試験体諸元

試験体	有効高さ d (mm)	せん断 スパン比 a/d	コンクリート f_c' (N/mm ²) ()内は載荷 2 回目	せん断補強 鉄筋の配置	
				左	右
Y1	160	5.0	37.5 (47.4)	-	-
Y1S			32.9 (42.9)	-	D10
Y2	200	3.0	38.7 (48.8)	D6	D6
Y2S			31.7 (43.7)	D6	D10

表-2 鉄筋の材料特性

引張鉄筋			せん断補強鉄筋		
呼び名	f_{sy} (N/mm ²)	E_s (kN/mm ²)	呼び名	f_{sy} (N/mm ²)	E_s (kN/mm ²)
D22	362	173	D6	300	168
D25	750	169	D10	388	181

*1 山梨大学大学院 医学工学総合教育部土木環境工学専攻 (学生会員)

*2 山梨大学大学院 医学工学総合研究部准教授 博(工) (正会員)

表-3 修復材の特性

エポキシ樹脂		
圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
84.2	20.2	2.64
ポリマーセメントモルタル		
圧縮強度 (7日) (N/mm ²)		
26.2		

筋のない同じ (左) スパン内で破壊することを想定したものである。

試験体 Y2 は、せん断スパン比 3.0 で、両せん断スパンにせん断補強鉄筋を配置し、せん断補強鉄筋の降伏後に破壊するように設計したものである。試験体 Y1 シリーズの設計思想と同様に、試験体 Y2 は、せん断破壊するスパンを左スパンとすれば、斜めひび割れの修復後に反対側 (右) のスパンで破壊することを想定し、試験体 Y2S は、右スパンのせん断補強鉄筋量を増加させることにより、修復後も同じ (左) スパンで破壊することを想定したものである。これらの試験体により、修復前後の斜めひび割れの発生・進展挙動を観察し、斜めひび割れの修復効果について検討を行った。

2.2 荷重方法および修復方法

荷重方法は、単純支持した試験体中央への単調漸増荷重とし、試験体中央下部で鉛直変位を計測した。

1 回目の荷重により破壊した試験体に対し、表面ひび割れ幅 0.2mm 以上の箇所にエポキシ樹脂によるひび割れ注入を施した。ひび割れ注入は、補修専門業者に依頼した。また、試験体 Y2 シリーズでは、コンクリートの圧壊により荷重板付近に一部断面欠損を生じたため、ポリマーセメントモルタルによる断面修復を施した。修復に使用した材料の諸元を表-3 に示す。修復材の特性は業者による試験値である。

修復した試験体は、1 回目の試験と同様の方法で破壊試験を行った。

3. 実験結果

3.1 初期荷重 (荷重 1 回目)

(1) 荷重-変位関係およびひび割れ性状

初期荷重の実験より得られた荷重-変位関係を図-2 に、ひび割れ性状を図-3 に示す。せん断スパン比が比較的大きくせん断補強鉄筋を配置していない試験体 Y1 は、大きな斜めひび割れの発生と同時に破壊に至る斜め引張破壊を示した。試験体 Y1S も同様に、せん断補強鉄筋を配置していないスパンで斜め引張破壊を示した。一方、せん断スパン比が比較的小さく、せん断補

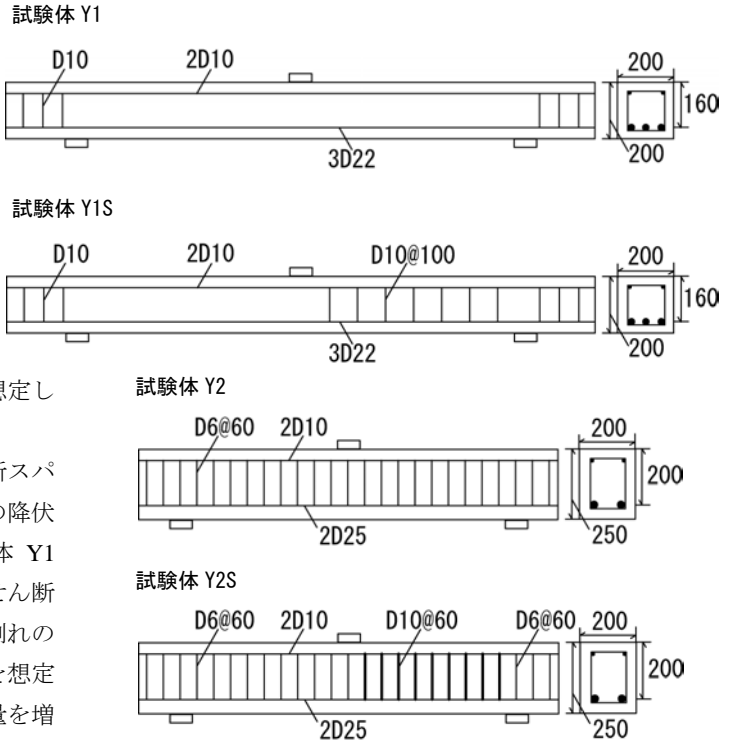
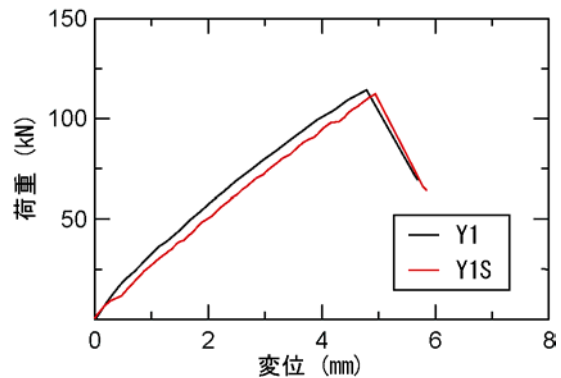
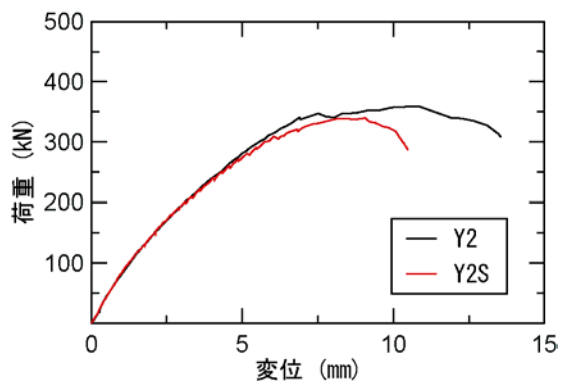


図-1 試験体諸元



a) 試験体 Y1 シリーズ



b) 試験体 Y2 シリーズ

図-2 荷重-変位関係 (初期荷重)

強鉄筋をスパン全域に配置した試験体 Y2 シリーズでは、両スパンで斜めひび割れが多数発生し、せん断補強鉄筋

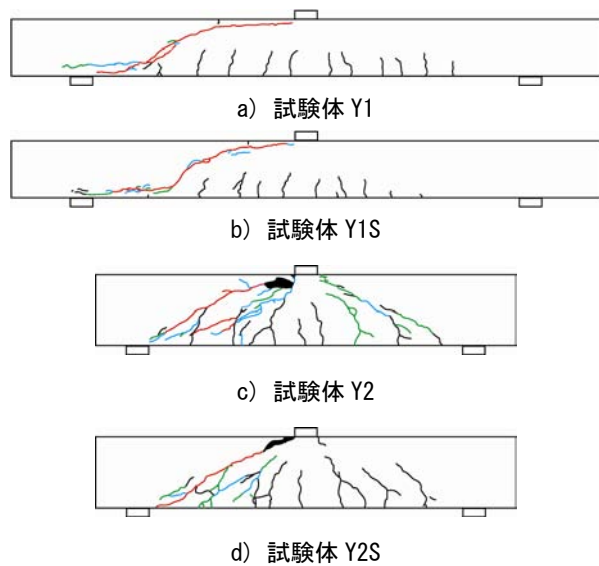


図-3 ひび割れ性状

の降伏後に、荷重板近傍でのコンクリートの圧壊を伴うせん断圧縮破壊を示した。なお、試験体 Y2S は、せん断補強鉄筋量の小さいスパンで破壊に至った。試験体 Y1 シリーズおよび Y2 シリーズのいずれにおいても、コンクリート強度の大きい試験体の方が最大荷重は若干大きいものの、2 つの試験体でほぼ同様の荷重-変位関係を示した。

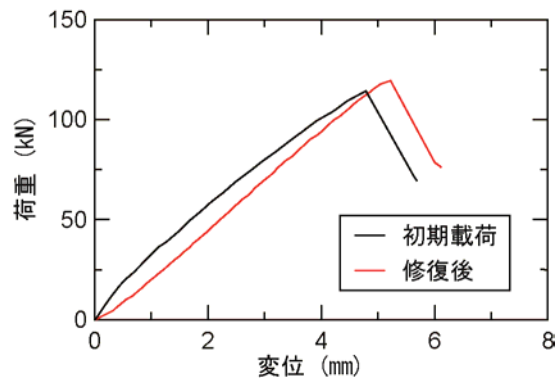
(2) 残留ひび割れ幅

荷重試験終了後、荷重を除荷した状態での試験体表面における残留ひび割れ幅を図-3 に色分けにより示す。残留ひび割れ幅 (w_r) が、 $0.05\text{mm} \leq w_r < 0.1\text{mm}$ を黒、 $0.1\text{mm} \leq w_r < 0.2\text{mm}$ を緑、 $0.2\text{mm} \leq w_r < 1\text{mm}$ を青、 $1\text{mm} \leq w_r$ を赤で示した。斜め引張破壊を示した試験体 Y1 シリーズでは、斜めひび割れの幅は 1mm 以上を示すほど大きいことが確認できる。せん断補強鉄筋を配置した Y2 シリーズでは、支配的な斜めひび割れは 1mm 以上の幅を示し、その他の斜めひび割れでも 0.1mm 以上を示す箇所が多く見られる。なお、いずれの試験体でも、曲げひび割れの残留ひび割れ幅は 0.1mm 未満であった。

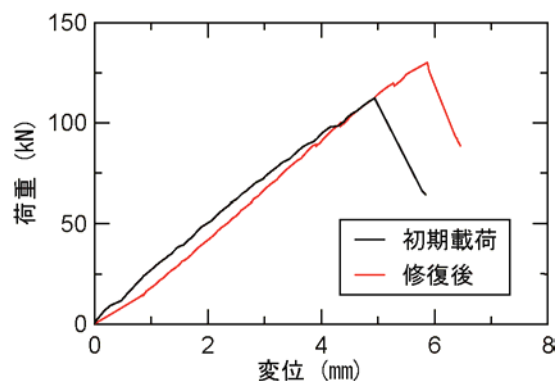
一般に、樹脂注入の目安となる表面ひび割れ幅は 0.2mm 以上であるので、ひび割れ幅の小さい曲げひび割れは修復対象とせず、 0.2mm 以上の斜めひび割れに対して樹脂の流失を防ぐシール材を塗布し、エポキシ樹脂を注入した。また、試験体 Y2 シリーズにおいて、コンクリートの圧壊により断面欠損が生じた部分は、ポリマーセメントモルタルによる断面修復を施した。

3.2 修復後 (荷重 2 回目)

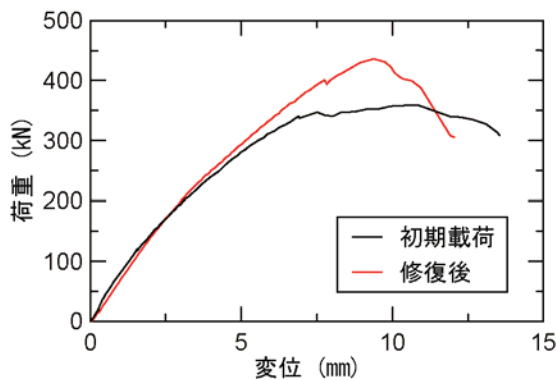
修復後の試験体の荷重実験より得られた荷重-変位関係を図-4 に、ひび割れ性状を図-5 に示す。ひび割れ図では、修復前の荷重によるひび割れを黒、修復後の荷重によるひび割れを赤で示してある。既往の研究^{3,4)}のと



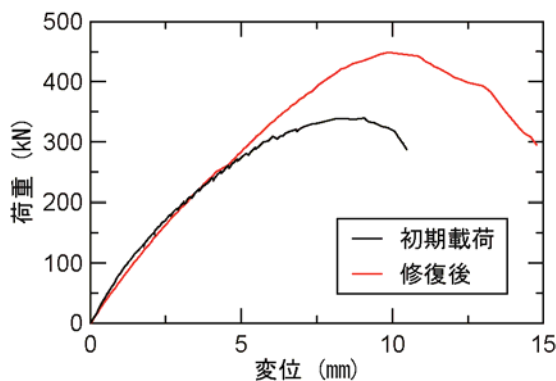
a) 試験体 Y1



b) 試験体 Y1S



c) 試験体 Y2



d) 試験体 Y2S

図-4 荷重-変位関係 (実験結果)

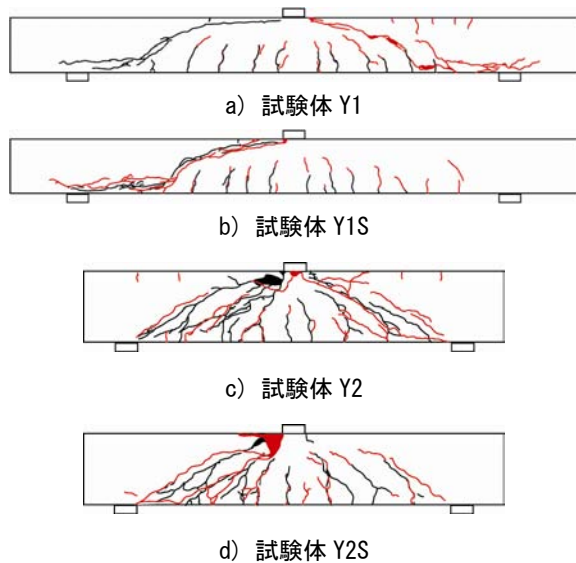


図-5 修復前後でのひび割れ性状の比較

おり、いずれの試験体も樹脂注入によるひび割れ修復により、せん断耐力は回復していることが確認できる。

試験体 Y1 シリーズでは、曲げひび割れの修復を行っていないため、修復後の試験体の初期剛性が修復前よりも小さいことが確認できる。修復後の試験体 Y1 は、修復前と反対側のスパンで大きな斜めひび割れの発生と同時に破壊に至った。修復後の試験体で最大荷重が若干増加しているのは、材齢の進行による圧縮強度の増加の影響と考えられる(表-1)。一方、片側のスパンにせん断補強鉄筋を配置した試験体 Y1S は、修復前と同様にせん断補強鉄筋を配置していないスパンで大きな斜めひび割れを形成し破壊に至った。ひび割れに注入したエポキシ樹脂の引張強度はコンクリートの引張強度に比べてかなり大きいので、修復後の荷重により生じた斜めひび割れは、修復した斜めひび割れを避けるように形成されることが確認できる。したがって、修復後の試験体 Y1S の最大荷重の増加程度が試験体 Y1 よりも大きかったのは、修復したスパンで破壊に至る際に新たな斜めひび割れの形成が困難であったためと考えられる。

せん断スパン比が比較的小さい試験体 Y2 シリーズでは、修復後の初期剛性の低下程度が Y1 シリーズに比べて小さくなったが、これはせん断力が支配的であり、修復の非対象である曲げひび割れが少なかったためと考えられる。試験体 Y2 は、修復前と反対側のスパンにおいて、荷重板直下のコンクリートの圧壊を伴って破壊に至った。一方、試験体 Y2S では、せん断補強鉄筋量の少ないスパンにおいて、修復前の斜めひび割れを避けるように新たな斜めひび割れが形成され、断面修復部を含むような圧壊を生じて破壊に至った。試験体 Y2 シリーズでは、スパン全域で斜めひび割れが修復され、新たなひび割れが生じ難いことから、最大荷重はいずれも修復前よ

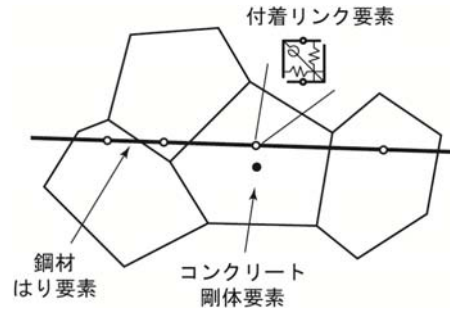


図-6 剛体バネモデル

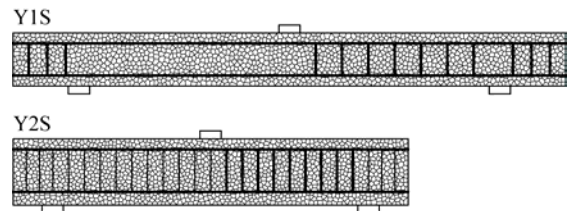


図-7 解析モデル

り比較的大きくなった。

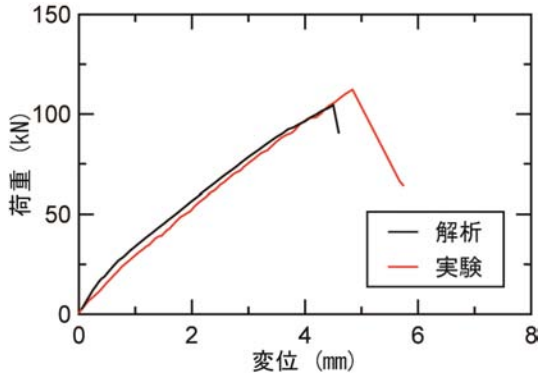
せん断破壊した RC 梁に生じた斜めひび割れの幅は、曲げひび割れ幅に比べてかなり大きいので、樹脂注入による修復の効果は高いことが確認された。また、新たな斜めひび割れは、修復した斜めひび割れを避けるように進展するため、修復対象となる斜めひび割れの発生位置やせん断補強鉄筋の配置が耐荷挙動に影響を及ぼすことが確認された。

4. 解析による修復効果の再現

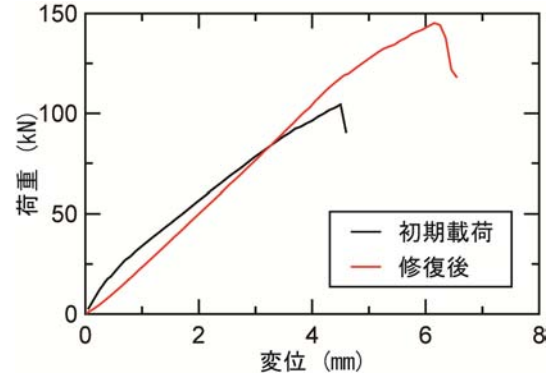
4.1 解析概要

本論では、同じせん断スパン内で破壊を生じた試験体 Y1S および Y2S を対象に、非線形数値解析による斜めひび割れの修復効果の再現性について検討を行った。解析には、ひび割れ挙動の再現性に優れる 2 次元剛体バネモデルを用いた(図-6)。剛体バネモデルは、コンクリートを剛体要素と仮定し、隣接する要素間のバネに材料の非線形特性をモデル化することにより、ひび割れのような材料の不連続現象を比較的容易に表現できることが特徴である。鉄筋は、はり要素を用いて離散的に扱い、はり要素の節点において付着バネ要素を介してコンクリート剛体要素と接合される。コンクリート、鉄筋、鉄筋とコンクリート間の付着挙動に関する材料モデルの詳細、および解析手法の RC 梁部材への適用性については、文献⁵⁾を参照されたい。

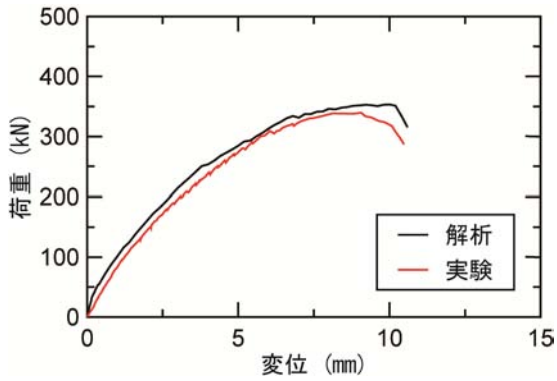
図-7に、試験体 Y1S および Y2S に対する解析モデルを示す。修復部材の解析法は、文献⁶⁾を参考にした。各試験体は、せん断破壊するまで荷重した後に除荷を行い、ひび割れを生じたバネのうち、残留ひび割れ幅が 0.2mm 以上であるバネの弾性係数、引張強度、圧縮強度を表一



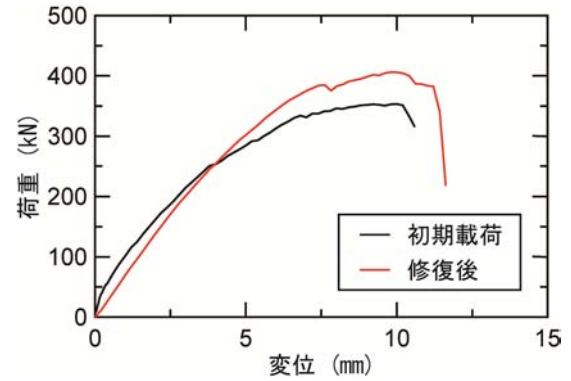
a) 試験体 Y1S



a) 試験体 Y1S



b) 試験体 Y2S



b) 試験体 Y2S

図-8 荷重-変位関係 (初期载荷)

図-10 荷重-変位関係 (解析結果)

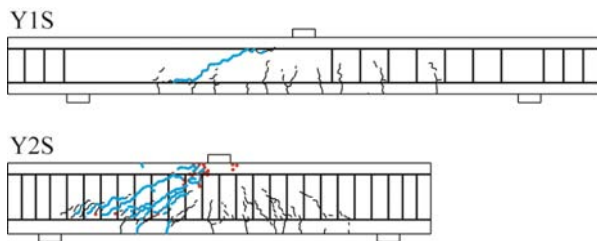


図-9 ひび割れ性状 (初期载荷時の解析結果)

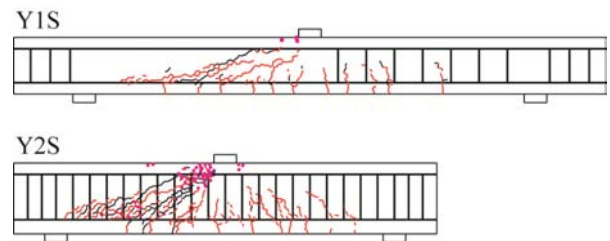


図-11 ひび割れ性状 (修復後の解析結果)

3 に示すエポキシ樹脂の特性に置換し、応力やひずみの履歴を消去した。つまり、ひび割れは閉じたものと仮定した。樹脂の強度はコンクリートの強度に比べて非常に大きく、結果的に弾性バネとなるため、樹脂の材料モデルにはコンクリートと同じものを用いた。修復が行われなかったバネについては、応力やひずみの履歴を保持したまま解析を行った。なお、修復後のコンクリートの特性には、表-2 に示す修復後の強度（材齢の進行により増大した強度）を用いた。実験ではポリマーセメントモルタルにより断面修復を行ったが、今回の試験体における断面修復の範囲は小さく影響は少ないと考えて、簡略化のため、解析では初期载荷で圧壊したバネの履歴を消去し、修復後の強度を用いた健全なコンクリートバネとした。

4.2 解析結果

(1) 初期载荷 (载荷 1 回目)

初期载荷の解析より得られた荷重-変位関係を図-8 に、ひび割れ性状を図-9 に示す。ひび割れ図における赤の印は、圧縮強度に達したバネを示している。解析より得られた荷重-変位関係は実験結果とよく対応しており、いずれの試験体も解析と実験は同様の破壊形式を示した。解析より得られたひび割れ性状も実験と比較的よく対応しており、試験体 Y1S では大きな斜めひび割れの発生・進展を、試験体 Y2S では分散する斜めひび割れをよく再現できていることが分かる。

図-9 中の青のひび割れは、除荷後に 0.2mm 以上の残留ひび割れ幅となった部分を示しており、このひび割れがエポキシ樹脂により修復されたひび割れである。修復

されたひび割れには、一部曲げひび割れも含んでいる。その他のひび割れについては修復せず、そのまま2回目の載荷を行った。

(2) 修復後（載荷2回目）

修復後の解析より得られた荷重-変位関係を図-10に、ひび割れ性状を図-11に示す。ひび割れ図中の黒のひび割れは初期載荷時のものを、赤のひび割れは修復後のものを示している。いずれの試験体でも、修復後の解析結果は実験と同様に初期載荷時と同じスパンで破壊に至った。0.2mmより小さいひび割れ、特に曲げひび割れを修復せず、初期載荷時の履歴を残して解析を行ったため、実験で見られるような修復後の初期剛性の低下を再現できている。試験体Y2Sの解析において、修復後の最大荷重は実験結果を過少評価しているものの、両試験体ともに修復後の最大荷重は初期載荷時を上回っており、修復によるせん断耐力の回復を再現することができた。

解析より得られた修復後のひび割れ性状を見れば、樹脂注入により修復されたひび割れを避けるように新たな斜めひび割れが形成されていることが確認できる。実験では、残留ひび割れ幅が0.2mmより小さいひび割れにもいくらか樹脂が侵入しており、断面修復部のモデル化を含め、荷重-変位関係やひび割れ性状の精度向上には、更なる検討が必要である。

5. まとめ

本研究では、せん断破壊するRC梁を対象に、樹脂注入による斜めひび割れの修復が部材の耐荷挙動に及ぼす影響について、実験および解析により検討を行った。得られた知見は以下の通りである。

(1) せん断破壊するRC梁の斜めひび割れをエポキシ樹

脂により修復することで、せん断耐力は初期の耐力以上に回復し、せん断スパン比およびせん断補強鉄筋の配置によって、斜めひび割れの進展性状や耐荷挙動が異なることが確認できた。

(2) 2次元剛体バネモデルを用いた修復部材の解析では、樹脂の特性および載荷履歴を考慮することで、修復前後における斜めひび割れの進展挙動の違いを概ね評価することができた。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：被災構造物の復旧性能評価研究委員会報告書，2007.8
- 2) 石橋忠良，津吉毅，小林薫，小林将志：大変形正負交番載荷を受けるRC柱の損傷状況及び補修効果に関する実験的研究，土木学会論文集，No.648/V-47，pp.55-69，2000.5
- 3) 小林茂敏，森濱和正，高橋正志，高橋弘人：破壊形式の異なるRC梁の樹脂注入補修効果，セメント技術年報，Vol.37，pp.549-552，1983
- 4) 渡辺篤史，田才晃：柱のせん断劣化過程における残存軸耐力と損傷修復性，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.337-342，2000
- 5) Saito, S. and Hikosaka, H.: Numerical analyses of reinforced concrete structures using spring network models, J. Materials, Conc. Struct., Pavements., JSCE, No.627/V-44, pp.289-303, 1999.8
- 6) 仁平達也，渡辺忠朋，滝本和志，笹谷輝勝，土屋智史，原夏生，谷村幸裕，岡本大：損傷履歴を考慮した修復部材の性能評価に関する一考察，土木学会論文集E，Vol.65，No.4，pp.490-507，2009.11