

論文 部分的に付着が消失した RC はりの曲げ挙動に関する実験的検討

横田 直倫*1・丸山 直樹*2・近藤 拓也*3・東山 浩士*4

要旨: 劣化や断面修復箇所において部分的に付着が消失した鉄道ラーメン高架橋の縦ばりを想定し、コンクリートのはつり深さと範囲をパラメータとした試験体の曲げ試験および2次元非線形解析を実施した。実験および解析の結果、引張鉄筋をコンクリートに接触する形で露出させたはり試験体の曲げ耐力の低下はほとんど確認されなかった。一方で、断面修復工法の施工時を模擬し、劣化因子を除去する目的で引張鉄筋を完全に露出させたはり試験体では、はつり範囲の増加とともに曲げ耐力やひび割れ発生荷重の低下が確認された。

キーワード: RC はり, 曲げ耐力, はつり範囲, はつり深さ, 付着

1. 序論

鉄筋コンクリート部材の耐久性に影響を与える要因の1つに中性化や塩害がある。これらを原因として鉄筋腐食が生じた箇所の補修対策の1つとして、コンクリートを除去し、腐食した鉄筋のケレンを行った後にポリマーセメントモルタルにより埋め戻す断面修復工法がある。また火災による熱を受け、かぶりコンクリートが剥落した場合(写真-1)、耐久性の確保を目的とし、断面修復工法を用いる場合もある。

断面修復工法は、劣化因子を含むコンクリートをはつることが必要であるが、その際一時的に断面性能を減少させることになるため、構造物を供用しつつ修繕を実施する場合、耐荷力の低下を考慮する必要がある。しかし、かぶりコンクリートの除去、鉄筋の付着力低下がはりの曲げ挙動に与える影響を検討した事例は少なく¹⁾、定量的に把握されていないのが現状である。

本検討は、劣化時または補修および補強時における部材安全性を判断する指標の基礎資料整備を目的として、コンクリートのはつり深さおよび範囲をパラメータとしたRCはり試験体の載荷試験ならびに2次元非線形解析を実施した。



写真-1 火災による被災を受けた鉄道高架橋

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) コンクリート

本実験で用いるコンクリートは実高架橋を模擬し、水セメント比57%、粗骨材の最大寸法20mm、スランプ8cmとした。使用したコンクリートの配合表を表-1に、圧縮試験によるコンクリートの材料特性を表-2に示す。

(2) 鉄筋

本実験では、圧縮鉄筋にφ9(SR235)、引張鉄筋にD13(SD345)、スターラップにφ6(SR235)を使用した。引張試験による各鉄筋の材料特性を表-3に示す。

2.2 試験体概要

試験体の概要図を図-1に示す。試験体寸法は150×300×2300mmのはりとし、標準的な鉄道高架橋縦ばりの

表-1 コンクリートの配合表

s/a (%)	W/C (%)	G _{max} (mm)	SL (cm)	単体量(kg/m ³)			
				W	C	S	G
44.8	57	20	8	168	295	826	1029

表-2 コンクリートの材料特性

圧縮強度(N/mm ²)	ヤング係数(kN/mm ²)
31.6	31.2

表-3 鉄筋の材料特性

		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
スターラップ	φ6	385.9	495.2	210.6
圧縮鉄筋	φ9	333.4	430.0	203.1
引張鉄筋	D13	361.8	520.9	186.9

*1 西日本旅客鉄道株式会社 近畿統括本部神戸土木技術センター施設管理係 修士(工学) (正会員)

*2 西日本旅客鉄道株式会社 近畿統括本部施設課主査 修士(工学) (正会員)

*3 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室主査 博士(工学) (正会員)

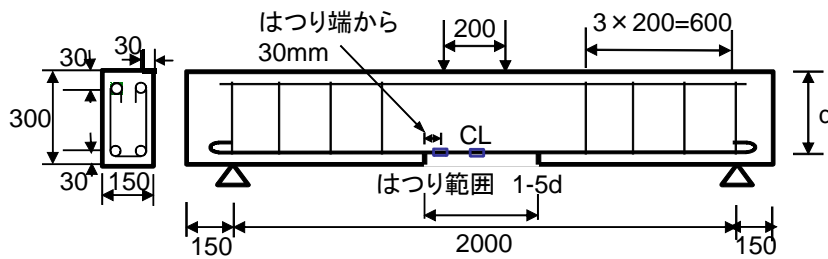
*4 近畿大学 理工学部社会環境工学科准教授 博士(工学) (正会員)

断面を約 1/3 に縮小したモデルとした。また、鉄筋比はほぼ等しくなるように設定した。

試験体の要因一覧を表-4 に示す。健全な試験体を試験体 A とした。試験体 B は、鉄筋腐食や火災被害によるかぶりコンクリートの剥落を想定し、引張鉄筋表面は露出しているがコンクリートに接触し、コンクリートとの高さ方向のずれは生じない状態を模擬した (図-2 中 (a))。試験体 C は、断面修復工法における鉄筋背面までのはつり出しを想定した (図-2 中 (b))。試験体の有効高さは、試験体のはつり深さにかかわらず同一 ($d=270\text{mm}$) とし

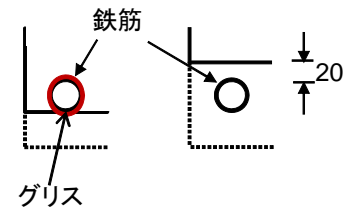
表-4 試験体一覧

試験体名	はつり深さ	はつり範囲	試験体数
試験体 A	なし	なし	1
試験体 B	RC はり下面から 30mm まで (かぶり部)	1d	1
		2d	1
		3d	1
		4d	1
試験体 C	RC はり下面から引張鉄筋上面 20mm まで	1d	1
		2d	1
		3d	1
		4d	1
		5d	1



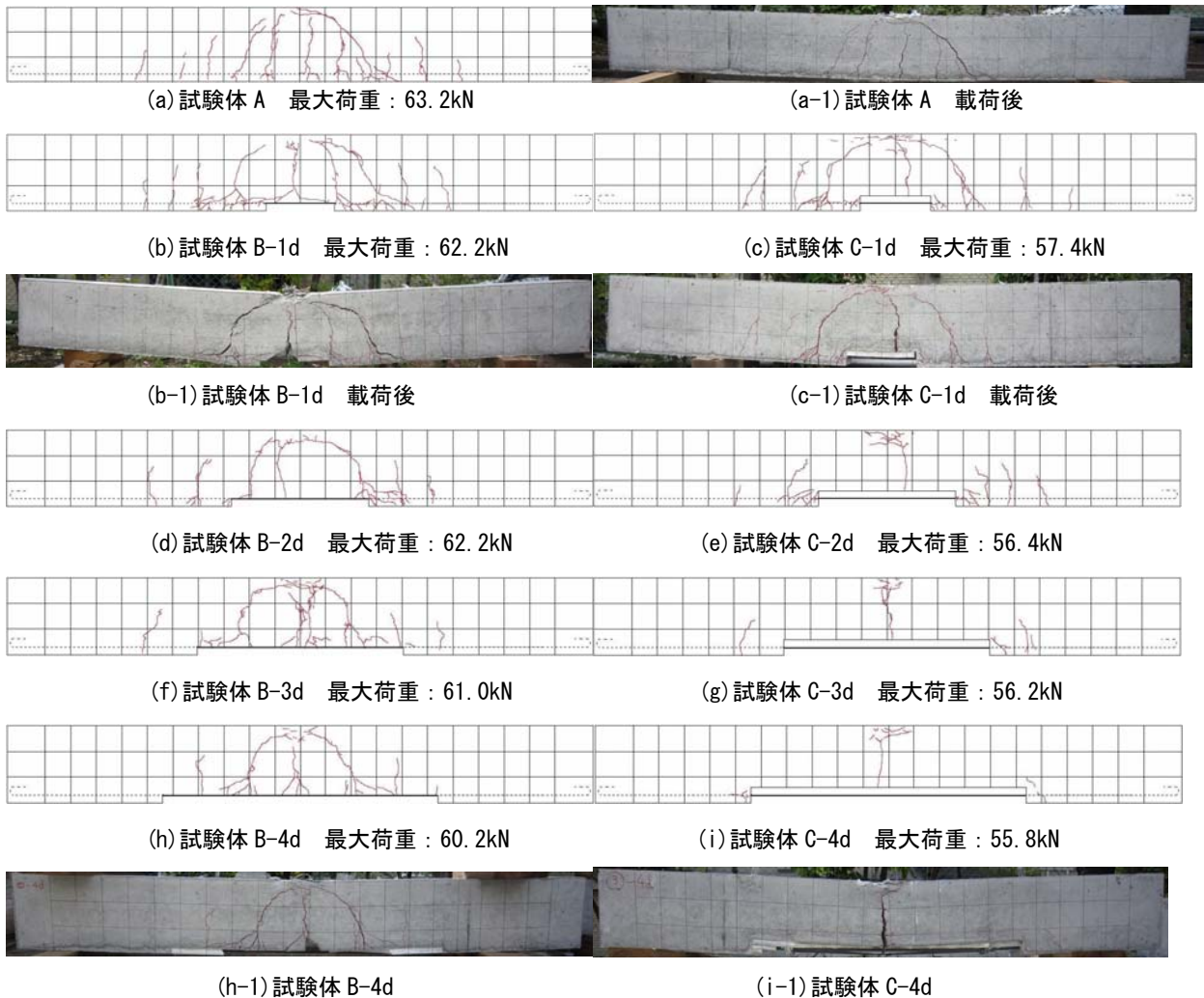
(図中□はひずみゲージを示す)

図-1 試験体概要図



(a) 試験体 B (b) 試験体 C

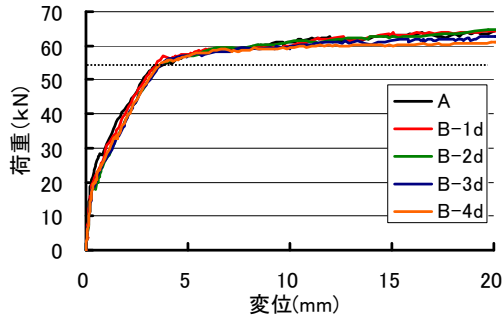
図-2 はつり部分模擬図



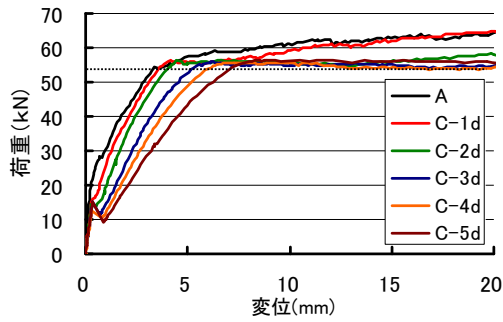
(h-1) 試験体 B-4d

(i-1) 試験体 C-4d

図-3 曲げ試験終了後のひび割れ発生状況

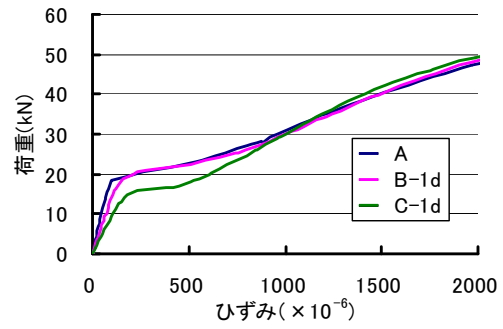


(a) 試験体 A および B

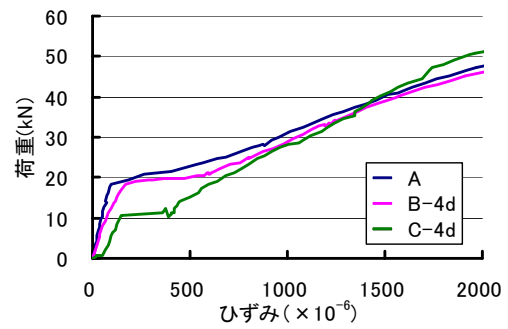


(b) 試験体 A および C

図-4 はつり範囲毎の荷重-支間中央変位

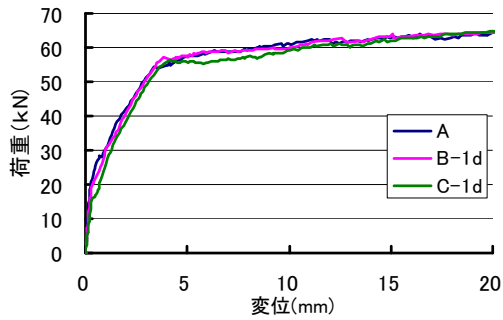


(a) はつり範囲 1d

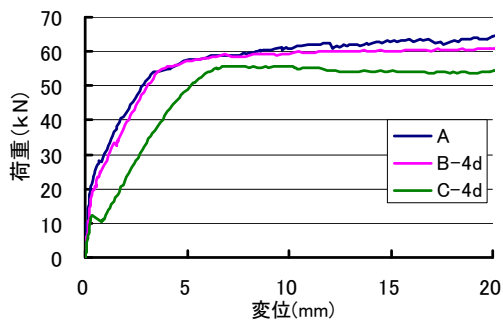


(b) はつり範囲 4d

図-6 荷重-引張鉄筋ひずみ関係 (支間中央)



(a) はつり範囲 1d



(b) はつり範囲 4d

図-5 はつり深さ毎の荷重-支間中央変位

た。鉄筋露出範囲は有効高さに対して、試験体 B は 1d ~4d, 試験体 C は 1d~5d とした。また、配筋は各供試体で同一とした。

2.3 荷重方法

試験体の支間長は 2.0m で単純支持とし、等曲げ区間は 200mm, せん断スパン 900mm の 2 点曲げ荷重とした。荷重方法は単調荷重とした。測定計器類については、支間中央に変位計 (感度 1/200mm), ならびに鉄筋応力状態を確認するため、供試体中央ならびにコンクリートはつり端部から 30mm 離れた位置の引張鉄筋にひずみゲージを貼り付けた。

3. 曲げ試験結果

3.1 ひび割れ性状

曲げ試験終了後の各試験体側面のひび割れ発生状況を図-3 に示す。健全な試験体 A と比較し、引張鉄筋が完全に露出している試験体 C において、露出範囲の増加とともにひび割れ本数が減少し、かつスパン中央付近のひび割れが顕著に現れる傾向が示された。これは、コンクリートをはつり出すことにより、はつり範囲が無筋コンクリート状態となることから生じた現象と考えられる。

試験体 A は引張鉄筋とコンクリート間の付着により、ひび割れが分散する結果を示した。試験体 B では試験体 A とほぼ同様のひび割れ性状を示している。これは、グリス塗布により付着なしを想定したものの、コンクリートと引張鉄筋が接触していることによる機械的摩擦力等により、露出部の引張鉄筋にひずみ差が生じ、付着が 0 となっていない影響が考えられる。

3.2 荷重-変位関係

はつり範囲ごとの荷重-支間中央鉛直変位関係を図-4、はつり深さごとの荷重-支間中央鉛直変位をはつり範囲1dならびに4dについて図-5に示す。なお、鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物²⁾により算出した曲げ耐力に達する載荷荷重は52.7kNとなる。

試験体Bは3.1で述べたように、引張鉄筋とコンクリートの接触面の鉛直変位が同一になっているため、平面保持が成立する試験体Aと成立しない試験体Bの差異が、載荷試験では明確に現れなかったものと考えられる。

試験体Cについては、曲げひび割れが発生すると同時に、一旦荷重が低下する傾向が見られた。またその傾向は、はつり範囲の増大とともに顕著となった。これは、試験体Cははつり範囲が無筋状態であるため、曲げひび割れ発生とともに、はりが脆性的に挙動し、はり端部に定着されている鉄筋に引張力が伝達されることから、このような荷重-変位関係になったものと考えられる。

3.3 引張鉄筋ひずみ

はつり範囲1dならびに4dについて、支間中央部の引張鉄筋に貼り付けたひずみゲージによる荷重-引張鉄筋ひずみの関係を図-6に示す。

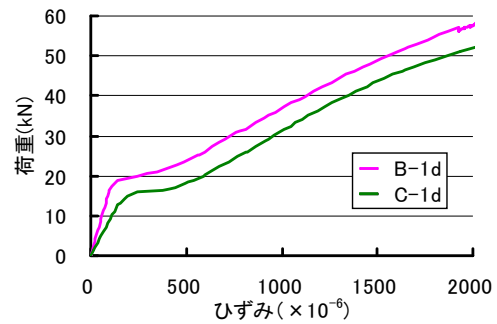
試験体AならびにBについては、かぶりコンクリートのはつり範囲に関わらず、ほぼ同様の挙動を示していることが確認できる。一方で、試験体Cについては、曲げひび割れ発生荷重が試験体A、Bと比較し小さくなり、載荷荷重が30kNを超えると試験体A、Bの引張鉄筋ひずみがほぼ同一となっていることが確認される。これは、曲げひび割れ発生後、試験体Cの引張鉄筋がコンクリート部材に接触し始めることによるものと考えられる。

はつり長1dならびに4dについて、はつり端部から30mm離れた位置に貼り付けたひずみゲージによる荷重-引張鉄筋ひずみの関係を図-7に示す。支間中央に貼り付けたひずみゲージの値と異なり、試験体BとCで挙動が異なっている様子が確認できる。特に、はつり範囲が大きい4dについてはその差が顕著に現れている。

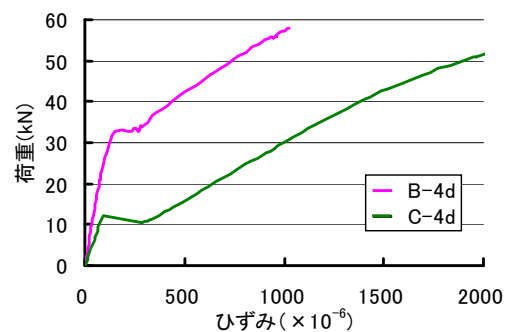
支間中央とはつり端部30mm離れた位置における引張鉄筋のひずみ差について、曲げひび割れ発生以降の30kNで比較したものを図-8に示す。鉄筋とコンクリートの付着がない場合、その間の鉄筋のひずみは同一となるが、試験体Bについてはひずみ差が生じており、はつり範囲の拡大とともにひずみ差が増加する傾向が見られた。これは異形鉄筋の機械的な摩擦等の影響と考えられる。一方、試験体Cでは鉄筋ひずみ差がほとんどない。これは引張鉄筋の定着により、はつり区間の引張鉄筋には一様の引張力が作用していることを意味している。

3.4 曲げ耐力

試験体Aに対する最大荷重比を図-9に示す。試験体



(a) はつり範囲1d



(b) はつり範囲4d

図-7 荷重-引張鉄筋ひずみ関係
(はつり端部から30mm)

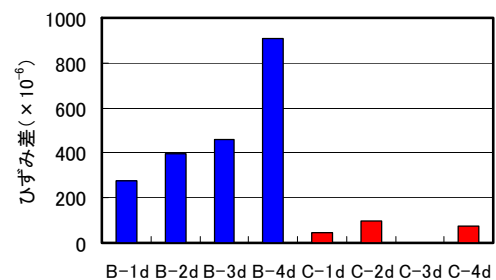


図-8 支間中央部とはつり端部の鉄筋ひずみ差
(載荷荷重30kN)

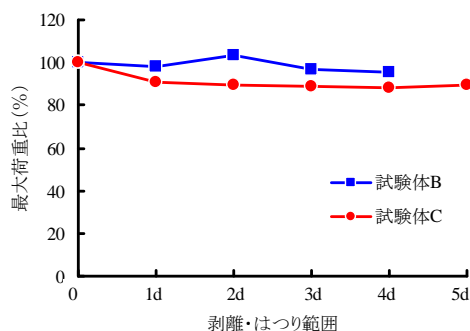


図-9 試験体Aに対する最大荷重比

Bについては最大荷重の低下がほとんど見られないが、試験体Cについては、はつり範囲にかかわらず概ね10%の最大荷重低下が見られた。しかしながら、試験体Cを

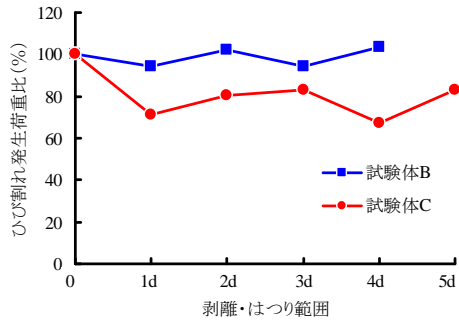


図-10 試験体 A に対する曲げひび割れ発生荷重

含む全ての試験体において、実験で得られた最大荷重が 3.2 において算出した曲げ耐力を上回る結果を示した。

3.5 ひび割れ発生荷重

各試験体の試験体 A (曲げひび割れ発生荷重=18.4kN) に対するひび割れ発生荷重比を図-10 に示す。試験体 A と比較して、試験体 B は曲げひび割れ発生荷重の低下がほとんど見られなかった。今回試験したコンクリートの剥落範囲 (1d~4d) であれば、耐力上安全性に大きな影響はないものと考えられる。一方、試験体 C については、試験体 A と比較して 20~30%のひび割れ発生荷重の低下が見られた。

4.2 次元非線形有限要素解析

4.1 解析概要

はつり範囲を増加させた場合の挙動を確認するため、有限要素解析プログラム ATENA を用いた 2 次元非線形解析を実施した。コンクリートは 4 節点平面要素、鉄筋はトラス要素を用いた。鉄筋露出範囲は、物性値をほぼ 0 としたダミー要素を用いた。試験体 B については、コンクリート要素とダミー要素の境界面と同位置に鉄筋を配置するようモデルを構築した。試験体 C については、ダミー要素に鉄筋要素を埋め込む形とした。試験体寸法と配筋状態は図-1 と同様であり、各材料強度は表-2 および表-3 と同様とした。

引張鉄筋の応力-ひずみ関係は、ひずみ硬化を考慮したトリリニア型の応力ひずみ関係を適用した。圧縮鉄筋およびスターラップは、バイリニア型の応力ひずみ関係を用いた。引張コンクリートの最大応力以降の応力-ひずみ関係は指数関数モデルを適用した。また、コンクリートの破壊エネルギーは、土木学会標準示方書【設計編】³⁾に基づき算定した。

4.2 ひび割れ性状

解析における最大荷重時のひび割れ図を図-11 に示す。なお、ここに示したひび割れは、幅 0.01mm 以上のひび割れを表示している。

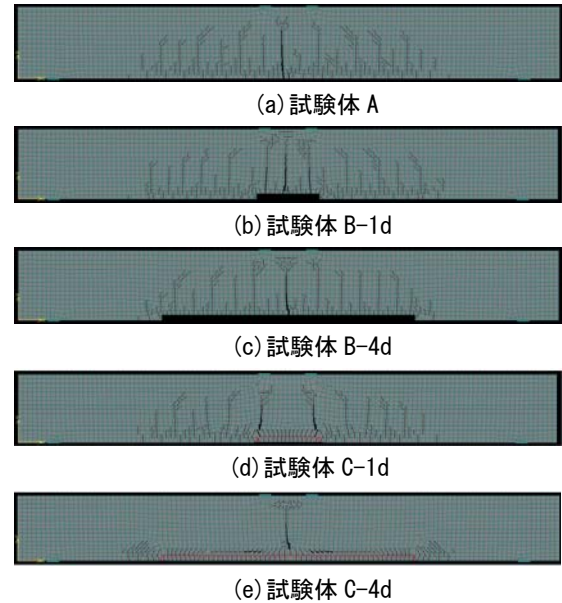


図-11 解析によるひび割れ性状

試験体 B は、試験体 A とほぼ同様なひび割れ性状を示した。それに対して、試験体 C では、はつり範囲の増大に伴い、ひび割れ本数の減少が顕著に見られた。これは、図-3 に示す試験での曲げひび割れ発生状況とほぼ同様の傾向となる。

4.3 荷重-変位関係

各試験体の荷重-変位関係を図-12 に示す。図-4 と比較すると、実験値と解析値は最大荷重までほぼ同様の傾向を示した。

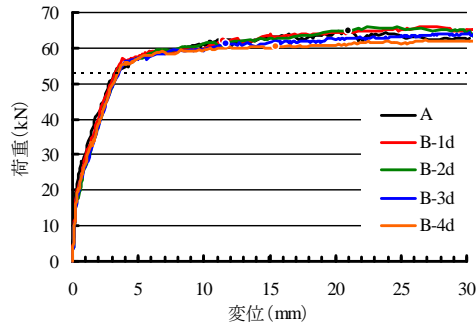
試験体 B については、試験体 A とほぼ同じ挙動を示したものの、試験体 C については鉄筋露出範囲が増加するに伴って最大荷重の低下ならびに変位の増加が見られた。

4.4 曲げ耐力

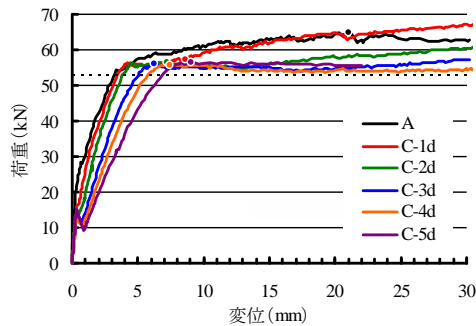
4.2 および 4.3 において、本解析は実験を模擬できると考えられることから、以降の検討でははつり範囲ならびにはつり深さを拡大し検討することとした。なお、試験パラメータを下記のように設定する。

- 1) はつり深さを引張鉄筋上面 15mm : 試験体 C'
- 2) はつり深さを引張鉄筋上面 40mm : 試験体 D
- 3) はつり深さを引張鉄筋上面 60mm : 試験体 E
- 4) はつり深さを引張鉄筋上面 80mm : 試験体 F

試験体 A と比較した最大荷重比を図-13 に示す。試験体 B については剥離範囲 7d においても最大荷重の低下が見られないが、試験体 C については最大荷重の低下が見られ、実験と同様の傾向を示した。解析により最大荷重の低下が見られた試験体 C', D においても試験体 C と同様の傾向が見られるが、特に はつり範囲 5d 以上の最大荷重低下が顕著であった。



(a) 試験体 A および試験体 B



(b) 試験体 A および試験体 C

図-12 解析による荷重-変位関係

5. 補修工事への適用

断面修復工を実施する場合は、鉄筋に残した錆を残したままポリマーセメントモルタルで修復すると、再劣化を生じることが報告されていること⁴⁾から、錆の除去に必要な施工上のスペースを確保するために、鉄筋背面ままでコンクリートをはつる必要がある。

その場合、本検討においては、引張鉄筋の端部が健全なコンクリートに十分定着されていれば、引張鉄筋を露出させても、露出していないはりに近い終局耐力を有していることが分かった。

しかし、劣化したコンクリートをはつり、引張鉄筋全体を露出させた場合、その範囲が無筋コンクリートとなる。そのため、はつり範囲が増加すれば、荷重作用によりひび割れ幅が拡大し、変位も大きくなることが分かった。

したがって、供用状態で断面修復工を行う場合は、鉄筋のはつり出しを行っていない引張鉄筋で耐力評価を行うことで、はつり面積や方法を検討する必要があると考えられる。ただし、使用性や復旧性から上記の事柄が許容される状態であれば、安全性は満足していることから

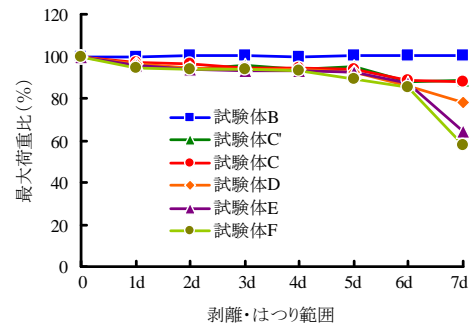


図-13 解析による試験体 A に対する最大荷重比

全ての引張鉄筋の露出が可能になると考えられる。

6. 結論

RC 構造物の劣化によりかぶりコンクリートが剥落した状態や断面修復工における鉄筋のはつり出しを模擬し、RC ばりの曲げ挙動を実験および 2 次元非線形解析により実施した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 引張鉄筋がコンクリートと接触している状態であれば、剥離範囲にかかわらず曲げ耐力および曲げひび割れ発生荷重については、健全なはりとの差は見られない。
- (2) 引張鉄筋を完全に露出させた試験体の耐力は計算で求めた終局耐力を上回るものの、はつり範囲が拡大するとはつり範囲が無筋状態となり、曲げ耐力やひび割れ発生荷重の低下、変位の増大が確認された。したがって、鉄筋のはつり範囲は使用性や復旧性能に応じて判断する必要がある。

参考文献

- 1) 村山八洲雄, 金 相昊, 武田絵里, 西村伸一: 鉄筋の付着損失が RC 部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響, コンクリート年次論文集, Vol.30, No.3, pp.733-738, 2008.7
- 2) 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説-コンクリート構造物, 2004.4
- 3) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】, 2008
- 4) 土木学会関西支部: コンクリート構造の設計・施工・維持管理の基本, 2009.10