ヒンジ位置保証型 RC 梁の力学挙動に主筋の付着除去が与える影響

THE EFFECTS OF DE-BOND OF LONGITUDINAL REBARS ON STRUCTURAL BEHAVIOR OF RC BEAM WITH A GUARANTEED HINGE POSITION

毎田悠承 — * 1 益田一毅 — * 2
佐藤裕貴 — * 3 坂田弘安 — * 4
前川利雄 — * 5 服部 翼 — * 5

Yusuke MAIDA — * 1 Kazuki MASUDA — * 2
Yuki SATO — * 3 Hiroyasu SAKATA — * 4
Toshio MAEGAWA — * 5 Tsubasa HATTORI — * 5

キーワード：
ヒンジ位置保証型 RC 梁, ヒンジリロケーション, 損傷制御,
付着除去

Keywords:
RC beam with a guaranteed hinge position, Hinge relocation,
Damage control, De-bond

In this study, structural tests were performed on the specimens that contained the de-bond of longitudinal rebars at the four corners of the RC beam with a guaranteed hinge position. Through this test, it was confirmed that the de-bond of longitudinal rebars at the four corners of the RC beam does not significantly affect the structural performance of the RC beam member, including the restoring force characteristic and energy dissipation capacity. Moreover, the cracks were concentrated on the hinge-side of the de-bond area, and the number of cracks in the de-bond area was suppressed.

1. 序

近年, RC 造建築物において大地震による倒壊を防ぐ安全性能だけではなく, 地震後も継続使用可能な損傷制御性能や修復性能の向上が求められている。瀧口らの研究によると, 曲げおよびせん断を受ける RC 部材において, 鉄筋とコンクリート間の付着を完全に除去した場合, 最大曲げモーメントを受ける箇所あるいは支点上に生ずる材軸に直角のひび割れのみが大きくなり, 斜めひび割れが大きくなるようなものにはなにくく, 急激に破壊することはないが, 履歴特性がスリップ型に近づくことが報告されている^{1), 2)}。鉄筋とコンクリートの付着を完全に除去することは構造性能の観点では不利に働く面があるが, ひび割れの集中は損傷領域を低減させ, 損傷制御性能や修復性能の向上が期待できる。しかし, 梁断面における部分的な付着除去の影響については不明瞭である。また, RC 柱梁接合部の損傷抑制を目的として, RC 梁の塑性ヒンジ位置を柱際から離す方法であるヒンジリロケーション (以下, HR) 技術に関する研究も進められており, その損傷制御の有効性も示されている³⁾ など。

本研究では, RC 造の梁, および柱梁接合部の損傷制御を目的として, 梁のひび割れ性状に与える影響が比較的大きいと考えられる梁四隅の主筋の付着に着目し, ヒンジ位置を梁端部から意図的に離れた RC 梁 (以下, ヒンジ位置保証型 RC 梁) において付着除去を施した試験体の構造実験を行う。付着除去の有無やその領域の長さをパラメータとし, 部材の構造性能や, 損傷性状を把握し, 梁四隅の主筋の付着除去が力学挙動に与える影響について検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の詳細を図 1 に, ヒンジ位置保証型 RC 梁の耐力概念を図 2 に, 試験体諸元を表 1 に, 鉄筋の材料特性を表 2 に, コンクリートの材料特性を表 3 に, 試験体の耐力計算値一覧を表 4 に示す。

試験体はスパン中央を反曲点位置として切り出した片持ち梁である。試験体は筆者ら⁴⁾ が過去に実験を実施したヒンジ位置保証型 RC 梁と同一の断面, 配筋とした。これは, 試設計された超高層 RC 造建築物を対象として実大の約 1/2 スケールを想定し, 梁の断面は 275mm×450mm とし, スタブ上面から加力点までの距離を 1800mm としたものである。また, 柱面から 550mm の位置をヒンジ位置と想定し, そこまでの区間の主筋を 4+4D19, その先, 中央部の 2 段筋をカットオフし, 機械式定着とし, 4-D19 とすることでヒンジ位置を意図的に移動させている。これらの設計概念は全長にわたって主筋を 4+2-D19 とした梁と耐力を同等とし, 且つ耐力余裕度を確保することである。ここで, 耐力余裕度とは, 2 段筋カットオフ位置の曲げ終局強度 M_k 時における耐力 V_k に対する梁端の曲げ終局強度 M_0 時における耐力 V_0 の比であり, 曲げ終局強度は日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説」⁵⁾ に示される略算式 (式 (1)) を用いて計算した。計算値算出の鉄筋強度には材料試験結果を用いた。

$$M_u = 0.9a_t\sigma_y d \quad (1)$$

ここで, a_t : 引張鉄筋の断面積[mm²], σ_y : 引張鉄筋の降伏強度[N/mm²],

^{*1} 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 助教・博士 (工学)
(〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

^{*2} 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系修士課程 大学院生

^{*3} 元東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 修士学生・修士 (工学)

^{*4} 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 教授・工博

^{*5} 熊谷組技術本部

^{*1} Assistant Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Tech, Dr. Eng.

^{*2} Graduate Student, Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Tech.

^{*3} Former Graduate Student, Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Tech, M. Eng.

^{*4} Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Tech, Dr. Eng.

^{*5} Technical Division, Kumagai Gumi Co., Ltd.

図1 試験体詳細 (単位: mm)

図2 ヒンジ位置保証型 RC 梁の耐力

図3 試験体詳細 (単位: mm)

図4 試験体詳細 (単位: mm)

図5 試験体詳細 (単位: mm)

表1 試験体諸元

試験体名		B	DB-1D	DB-all
梁	$b \times D$ [mm]	275×450		
	F_c [N/mm ²]	50		
	端部主筋	4+4-D19 (SD490)		
	中央部主筋	4-D19 (SD490)		
	あばら筋	端部	4-D6@100 (USD685)	
		中央部	4-D6@150 (USD685)	
スタブ	付着除去区間の長さ [mm]	-	450 (1D)	1250 (all)
	$b \times D$ [mm]	700×450		
	F_c [N/mm ²]	50		
	主筋	14-D19 (SD490)		
	せん断補強筋	6-D6@100 (USD685)		

(b : 幅, D : せい, F_c : コンクリートの設計基準強度)

表2 鉄筋の材料特性

	σ_y [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]
D19 (SD490)	554	744	192000
D6 (USD685)	736*	901	212000

(σ_y : 降伏強度, σ_u : 引張強度, E_s : 鉄筋のヤング係数)
*0.2%オフセット耐力

表3 コンクリートの材料特性

	σ_B [N/mm ²]	σ_T [N/mm ²]	E_c [N/mm ²]
B	60.7	4.1	33800
DB-1D	61.9	4.0	33900
DB-all	63.3	3.9	34000

(σ_B : 圧縮強度, σ_T : 割裂強度, E_c : コンクリートのヤング係数 (σ - ϵ 関係で σ_B の1/3における割線剛性))

表4 試験体の耐力計算値

梁端の曲げ終局強度計算値 M_u [kNm]	437
2段筋カットオフ位置の曲げ終局強度計算値 M_k [kNm]	234
梁端の曲げ終局強度時における耐力 V_u [kN]	243
2段筋カットオフ位置の曲げ終局強度時における耐力 V_k [kN]	187
耐力余裕度 V_u/V_k	1.30

写真1 付着除去の状況

d : 有効せい[mm]である。

試験体は計3体とした。B試験体は全区間に対し付着除去を行わないもの、DB-1D試験体は2段筋カットオフ位置より1D (D : 梁せい (450mm)) までの区間の梁四隅の主筋に対し付着除去を行ったもの、DB-all試験体は2段筋カットオフ位置から反曲点位置までの区間 (1250mm) の梁四隅の主筋に対し付着除去を行ったものである。付着除去は主筋をシース管に通し、シース管内にコンクリートが流れ込まないように端部を自己融着テープで塞ぐことで行った (写真1)。

図3 セットアップ (単位: mm)

図4 変位計の配置

2.2 荷重・計測

セットアップを図3に、変位計の配置を図4に示す。試験体はスタブをPC鋼棒で反力床に固定し、梁自由端に接続したアクチュエータにより加力を行った。反力床に固定したフレームに接続したパンタグラフにより面外拘束した。加力点高さの水平変位 Δ をせん断スパン(1800mm)で除することで部材角 R を求め、変位制御により加力を行った。加力サイクルは部材角 $R=1/800, 1/400, 1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33\text{rad}$ までを2サイクルずつ、 $R=1/25\text{rad}$ を1サイクルの正負交番漸増繰り返し載荷を行った後、 $R=1/18\text{rad}$ の正加力を1度行い、除荷して終了とした。計測箇所は、図4に示す位置の変位計により、梁の各区間の水平変位 Δ 、曲げ変形 δ_b 、せん断変形 δ_s を計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 せん断力 Q —部材角 R 関係

各試験体のせん断力 Q —部材角 R 関係を図5に示す。図中の破線は、ヒンジ想定位置での梁曲げ終局強度時における耐力 V_k の計算値を示している。全ての試験体において、復元力特性はスリップ型にはならず、紡錘型の安定したループを描いており、付着の有無や領域の違いによる復元力特性の変化は見られなかった。除荷時残留変位についても全試験体で大差はなかった。剛性と耐力については、B試験体、DB-1D試験体、DB-all試験体の順にわずかながら大きかった。最大せん断力はB試験体では $Q=233\text{kN}$ 、DB-1D試験体では $Q=221\text{kN}$ 、DB-all試験体は $Q=213\text{kN}$ であり、付着除去による耐力低下は10%未満であった。

3.2 履歴吸収エネルギー

せん断力 Q —部材角 R 関係の1サイクルの面積から求めた累積履歴吸収エネルギー E の推移を図6に示す。付着の有無や領域の違いによって累積履歴吸収エネルギー量に大差はなく、 $1/25\text{rad}$ サイクル終了時においても差は10%程度であった。

図5 せん断力 Q —部材角 R 関係

図6 累積履歴吸収エネルギー量

図7 主筋のひずみ分布

3.3 主筋のひずみ分布

$R=1/67, 1/33\text{rad}$ サイクルの正加力時の引張側主筋の正面側のひずみ分布を図7に示す。図中の破線は材料試験から得た降伏ひずみ ϵ_y ($=3250\mu$)を示している。B試験体は $R=1/67\text{rad}$ 時に2段筋カットオ

フ位置において降伏し、DB-1D 試験体は $R=1/67\text{rad}$ 時に、DB-all 試験体は $R=1/33\text{rad}$ 時に 2 段筋カットオフ位置から付着除去区間の範囲で降伏した。概ね想定した位置にヒンジが形成されたことが分かる。また、付着除去区間内の主筋に概ね一様にひずみが生じていることから付着除去が行えていることが確認できる。

3.4 変形状

曲率およびせん断ひずみの算定方法を図 8 に、 $R=1/67\text{rad}$ 時における梁の各計測区間の曲率 ϕ の分布を図 9 に、せん断ひずみ γ の分布を

図 8 曲率およびせん断ひずみの算定方法

図 9 曲率の分布

図 10 せん断ひずみの分布

図 11 せん断変形の割合の推移

図 10 に、梁の全変形量 Δ に対するせん断変形 δ の割合の推移を図 11 に示す。B 試験体は、曲率、せん断ひずみともに広い領域で生じているが、付着除去を行った DB-1D、DB-all 試験体は、付着除去区間のヒンジ想定位置側端部に変形が集中し、付着除去区間内の変形が低減している。また、全変形量 Δ に対するせん断変形 δ の割合は、いずれの試験体においても部材角の増大に伴って増加する傾向にある。この増大量は、DB-all 試験体では大変形域において他 2 体より小さい。これは DB-all 試験体では、ヒンジ想定位置に変形が集中し、そこを中心に回転変形している影響が大きいと考えられる。

3.5 ひび割れ状況

各試験体の $R=1/67\text{rad}$ 時におけるひび割れ状況を図 12 に示す。なお、本節以降、側面の損傷の結果は左側面のみを示すが、右側面でも同様の結果であった。全ての試験体において、 $R=1/400\text{rad}$ 時に曲げひび割れが発生し、その後は曲げせん断ひび割れへと伸展した。また、正面、側面ともに 2 段筋カットオフ位置に大きなひび割れが生じ、想定した位置にヒンジが形成されたことを確認できた。正面では、付着除去区間が長いほどひび割れがヒンジ想定位置に集中し、損傷傾

図 12 ひび割れ状況 ($R=1/67\text{rad}$)

域が抑制された。これは、付着を除去した主筋からコンクリートへの応力伝達がないため、付着除去区間のヒンジ想定位置側端部に損傷が集中し、付着除去区間内の損傷が抑制されたものと考えられる。側面では、付着除去をしていない中央の主筋周辺に付着割裂ひび割れと正面まで伸展しない曲げひび割れが生じた。付着割裂ひび割れは付着除去区間が長くなるほど発生する傾向にあり、これは四隅の主筋の付着除去により付着のある中央主筋周辺のコンクリートに応力が集中したためと考えられる。なお、全ての試験体において $R=1/18\text{rad}$ まで脆性破壊は生じず、破壊形態は曲げ破壊であった。

3.6 損傷

ひび割れ幅の計測位置および定義を図 13 に、ひび割れ面積の算定方法⁶⁾を図 14 に示す。ひび割れ幅は各部材角の正負それぞれの 1 サイクル目のピーク時と除荷時にクラックスケール(最小目盛 0.03mm)を用いて計測した。正面は、上下縁、主筋位置、主筋から 65, 130mm のグリット位置、およびあばら筋の位置を、側面は、両縁、主筋位置、およびあばら筋の位置を横断するひび割れを計測した。ひび割れ幅はひび割れに対して直交方向に計測した。ここでは、ひび割れの本数、最大ひび割れ幅、ひび割れ面積に着目する。ひび割れ面積は図 14 (a) に示すような実際のひび割れを、図 14 (b) に示すような平行四辺形のひび割れに置換・モデル化し、連続的に変化するひび割れを「グリット上のひび割れ幅×計測間隔」の平行四辺形のひび割れとして算出した。なお、比較、検討する際に付着除去の有無、領域の違いも確認するため、梁全体を図 15 に示す 7 つの領域に分けて考察した。

【ひび割れ本数】

ひび割れ本数の推移を図 16 に示す。正面では、DB-all 試験体では他 2 体に比べて梁全体および付着除去区間を含む 650～1800mm の区間において本数が少なく、付着除去によりひび割れの本数が抑制されていることが確認できる。また、DB-1D 試験体は B 試験体に近い結果を示した。側面については、示している図は左側面の推移であるため、その面が引張縁になる負加力時に増加する。側面のひび割れ本数は全ての試験体で概ね同じであった。

【最大ひび割れ幅】

最大ひび割れ幅の推移を図 17 に示す。側面の結果は左側面が引張縁となる負加力時のみ示す。正面ではピーク時において DB-1D, DB-all 試験体は B 試験体より大きく、付着除去により最大ひび割れ幅が大きくなったことが分かる。一方、除荷時には全ての試験体で概ね同じで、付着除去の有無や領域による大差はなかった。側面では、ピーク時、除荷時ともに DB-1D, DB-all 試験体は B 試験体より大き

図 14 ひび割れ面積の算定方法⁶⁾

図 15 ひび割れ性状の考察のための領域分け

図 16 ひび割れ本数の推移

図 17 最大ひび割れ幅の推移

図 13 ひび割れ幅の計測位置および定義

図 18 ひび割れ面積率の分布

図 19 ひび割れ面積の推移

く、付着除去により最大ひび割れ幅が大きくなった。

【ひび割れ面積】

$R=1/67\text{rad}$ 時の面積率 β_{cr} の分布を図 18 に、面積 A_{cr} の推移を図 19 に示す。面積率の分布は各領域に生じたひび割れ面積を各領域の面積で除したものである。正面、側面ともに全ての試験体において 2 段筋カットオフ位置にひび割れ面積が集中した。B 試験体に比べ、他 2 体では 2 段筋カットオフ位置に極端に集中し、その他の領域では低減され、DB-all 試験体では全く損傷の無い領域があった。全体のひび割れ面積の推移に着目すると、正面は全サイクルで 3 体とも概ね同じだが、側面は $R=1/100\text{rad}$ のみ DB-all 試験体が多い。これは四隅より先に降伏した付着のある主筋周辺のコンクリートへの応力集中によって発生する付着割裂ひび割れの影響であると考えられる。650

～1800mm の区間では正面、側面ともに、付着除去区間が大きくなるほど面積は低減し、付着除去区間内の損傷が抑制された。

4. 結

本研究では、四隅の主筋の付着除去を施したヒンジ位置保証型 RC 梁の構造実験を行い、その力学挙動および損傷を把握した。得られた結論を以下にまとめる。

- 1) ヒンジ位置保証型 RC 梁において、四隅のみの主筋の付着を除去しても、部材の復元力特性や、エネルギー吸収量などに悪影響は及ぼさない。
- 2) 梁の四隅のみの主筋の付着除去は、梁に生じる除荷時残留最大ひび割れ幅には大きな影響を与えることなく、想定したヒンジ位置である付着除去区間端部に变形やひび割れを集中させ、付着除去区間内の变形やひび割れの本数、および面積を抑制できた。

実構造物における梁の主筋に付着除去を施す場合、スパン全長にわたって除去する、またはスパン中央部だけは除去しないなど、本実験との条件の違いによって、部材の復元力特性や損傷、骨組全体に与える影響なども異なると考えられるため、今後も検討を重ねる。

謝辞

本研究成果の一部は、JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (JPMJP1723) によるものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Takiguchi K., Okada K., Sakai M.: Deforming Characteristics of RC Members with and without Bond, Transactions of the Architectural Institute of Japan, No.249, pp.1-11, 1976.11 (in Japanese)
滝口克己, 岡田謙二, 堺政博: 付着のある RC 部材と付着のない RC 部材の変形特性, 日本建築学会論文報告集, 第 249 号, pp.1-11, 1976.11
- 2) Takiguchi K.: Deforming Characteristics of RC Members with and without Bond, II, Transactions of the Architectural Institute of Japan, No.262, pp.53-59, 1977.12 (in Japanese)
滝口克己: 付着のある RC 部材と付着のない RC 部材の変形特性・II, 日本建築学会論文報告集, 第 262 号, pp.53-59, 1977.12
- 3) 石川裕次, 平林聖尊, 川野翔平, 麻生直木, 中根一臣: 鉄筋コンクリート造ヒンジロケーション接合部の耐震性能, 構造工学論文集, Vol.61B, pp.59-69, 2015.3
- 4) Maida Y., Kishiki S., Qu Z., Maegawa T., Hamada M., Sakata H.: Structural Behavior of Damage Position Guaranteed RC Beams with BRB Connections, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.82, No.737, pp.1091-1101, 2017.7 (in Japanese)
毎田悠承, 吉敷祥一, 曲哲, 前川利雄, 濱田真, 坂田弘安: 座屈拘束ブレース接合部を有する損傷位置保証型 RC 梁の力学挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 737 号, pp.1091-1101, 2017.7
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999.8
- 6) Sakata H., Sakagami H., Kato M., Wada A., Matsuzaki Y.: Effect of Floor Slab on Mechanical Behavior of A cruciform Frame Using P/C Mild-press-joint, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.75, No.649, pp.635-642, 2010.3 (in Japanese)
坂田弘安, 坂上肇, 加藤雅樹, 和田章, 松崎育弘: PC 圧着関節工法を用いた十字形骨組の力学的挙動に対する床スラブの影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 649 号, pp.635-642, 2010.3

[2020 年 5 月 28 日原稿受理 2020 年 7 月 27 日採用決定]