

主筋周囲に拘束筋を施したRC梁の補強効果に関する実験的研究 大地震時の損傷低減が可能な CCM-RC 梁工法

坂本 啓太・前川 利雄・石渡 康弘

著者らは、大地震時における梁端部の損傷を抑制することで、継続使用性の向上が期待できる主筋周囲拘束補強型 RC 梁「CCM-RC 梁」を開発した。CCM-RC 梁は、梁端部の損傷が著しい主筋と周囲のコンクリートの一体性を向上させることで付着割裂破壊を抑制し、さらに損傷部を集中的に補強することで建設費の増大は最小限に抑えられる。本報では、付着割裂要素実験の結果から、CCM-RC 梁の付着割裂強度が増大することを示し、部材実験から付着割裂破壊を含めた損傷抑制効果を報告する。

キーワード：鉄筋コンクリート造，RC 梁，継続使用性，付着割裂破壊，損傷抑制

1. はじめに

建築基準法では生命および財産の保護を目的とした最低の基準が定められているが、大地震発生後の建築物の継続使用性については定められていない。しかしながら、近年では大地震が頻発していることから、大地震後の建築物の継続使用については重要な課題だと考えられる。さらに、カーボンニュートラルの実現に向けた取り組みの一環として、建築物の長寿命化や継続使用性の向上が社会的に要求されている。この要求において、多くの鉄筋コンクリート造（以下、RC 造と称する）建築物は、梁曲げ降伏先行型の全体崩壊形として設計されるため、梁端部に大きな損傷が生じやすい。また、梁曲げ降伏後、主筋のひずみ硬化により脆性破壊である付着割裂破壊が生じる場合もある。

建築物の長寿命化や継続使用性を向上させるためには、柱、梁、壁等の地震に抵抗する部材、つまり建築基準法施行令第1条3項に定める構造耐力上主要な部分の断面を大きくすることで、耐震性能を高めること等の対応が挙げられる。しかしながら、部材断面を大きくすることで建設費の増大、居住面積の減少、レタブル比の減少等が懸念される。

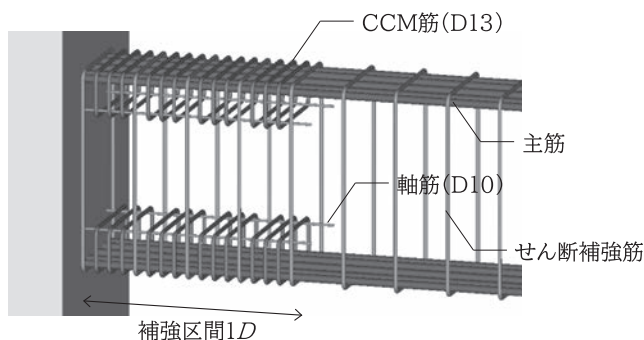
これらを背景に、著者らは大地震時における梁端部の損傷を抑制することで、継続使用性の向上が期待できる RC 梁（以下、主筋周囲拘束補強型 RC 梁「CCM-RC 梁」と称する）を開発した。この CCM-RC 梁は、梁端部の損傷が著しい主筋と周囲のコンクリートの一体性を向上させることで付着割裂破壊を抑制し、さらに損傷部を集中的に補強することで建設費の増大は最

小限に抑えられる。

本報では、はじめに CCM-RC 梁の概要を示し、続いて付着割裂要素実験と部材実験の両結果から、CCM-RC 梁の効果について報告する。

2. 工法概要

CCM-RC 梁は、主筋と周囲のコンクリートの一体性を向上させるために、主筋周囲拘束筋（Confined Concrete and Main bar（以下、CCM 筋と称する））が RC 梁端部のせん断補強筋の間に配置されている。図一1に CCM-RC 梁の概要を示す。CCM-RC 梁には、主筋とその周囲のコンクリートを囲むように、RC 梁端部 $1D$ (D : 梁せい) の区間に CCM 筋が配置されている。以下、CCM 筋が配置されている RC 梁端部 $1D$ の区間を補強区間と称する。また、CCM 筋の梁内側の折曲げ部には、図一1に示すような軸筋と呼ばれる細径の鉄筋が配置されている。これにより、



図一1 CCM-RC 梁の概要

CCM-RC 梁は下記の効果が期待できる。

- ① 曲げ降伏後の主筋の付着特性を改善
- ② 付着割裂強度の増大による付着割裂破壊の防止
- ③ CCM 筋で拘束されたコンクリートの靱性向上
- ④ 大変形時の主筋座屈挙動の抑制

上記の①～④は、それぞれが独立に作用するものではなく、相互に作用し合うものである。例えば、①の付着特性を改善するためには、②に示す付着割裂破壊を防止する必要がある、そのためには③に示す CCM 筋で拘束されたコンクリートの靱性向上、つまりコンクリートの圧壊やひび割れによる損傷を抑制しなければならない。また、主筋は当然ながら健全である必要があり、④の座屈挙動を生じさせないことが肝要である。

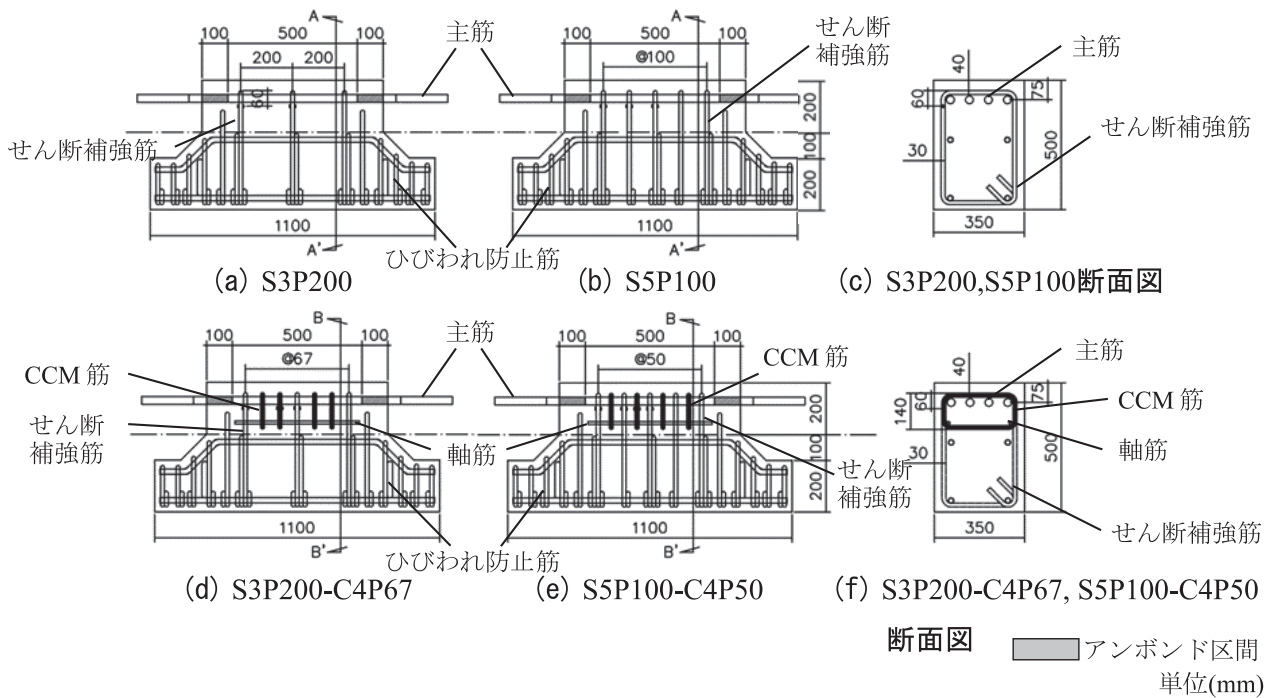
同図に示すように、CCM 筋を配置する補強区間は損傷が著しい梁端部から 1D のみであることや、CCM 筋は一般的に用いられている異形鉄筋 D13 を使用することから、材料費や建設費の増大は最小限に抑えられる。

3. 付着割裂要素実験

(1) 試験体概要

図一 2 に示す付着割裂要素実験の試験体は、図一 1 の補強区間を模擬している。表一 1 に試験体一覧を示し、表一 2 に使用した鉄筋の材料特性をそれぞれ示す。従来の RC 梁を想定した試験体は、せん断補強筋の間隔 200 mm とした試験体 S3P200 と、せん断補強筋の間隔 100 mm とした試験体 S5P100 の 2 体を基本とした。CCM-RC 梁を想定した試験体 S3P200-C4P67 と S5P100-C4P50 は、試験体 S3P200 と S5P100 のせん断補強筋の間に、CCM 筋をそれぞれ配置したものである。なお、試験体 S3P200 と S5P100 はいずれもサイドスプリット型¹⁾の破壊形式を想定した。

本実験は、梁の上端筋の付着割裂性状に着眼していることから、主な付着割裂ひび割れの試験領域は上端から 200 mm とした。せん断補強筋は、試験体のスタブ最下部で定着させ、スタブにはひび割れ防止筋が配



図一 2 試験体形状

表一 1 試験体一覧

試験体名	主筋	せん断補強筋		CCM 筋 (主筋周囲拘束筋)		コンクリート圧縮強度 σ_B (N/mm ²)
		配置数量	間隔 (mm)	配置数量	間隔 (mm)	
S3P200	4-D29	3	200	-	-	29.7
S5P100		5	100	-	-	29.4
S3P200-C4P67		3	200	4	67	29.7
S5P100-C4P50		5	100	4	50	28.6

表一 鉄筋の材料特性

適用部位	鉄筋径 (鋼種)	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	ヤング係数 E_s ($\times 10^3$ N/mm ²)
主筋	D29 (SD390)	432	617	211
せん断補強筋	D13 (SD295)	352	514	186
CCM筋	D13 (SD295)	392	517	178

置されている。また、CCM筋の下端折曲げ部に軸筋(D10)を配置した。この軸筋は、部材の曲げ強度に寄与させず、配筋時のCCM筋の仮固定や、コンクリート打ち込み時の配筋の乱れを防止するために用いられる。そのため、軸筋を補強区間のみに設置し、柱梁接合部には軸筋を定着させない。

主筋は異形鉄筋(D29)を4本とし、主筋の付着評価区間 L は500 mmとした。 L の外側両端100 mmはアンボンド区間として付着を除去することで、 L 端部の付着破壊によるコンクリート面の損傷を生じさせないようにした。

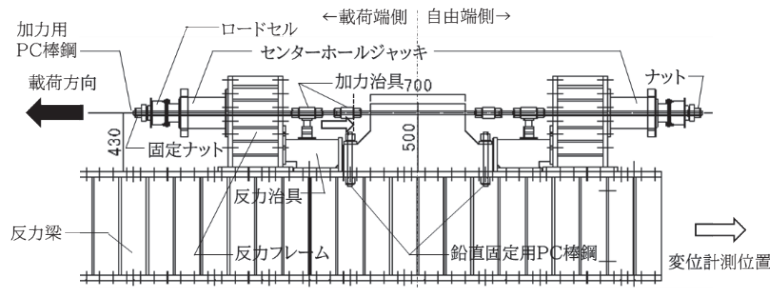
(2) 加力方法

図一3に加力装置を示す。試験体はスタブの両端に設けた鉛直固定用PC棒鋼で緊結し、反力梁と固定した。引張力は、試験体左側(载荷側)に設置した水平方向のセンターホールジャッキおよび加力用PC棒

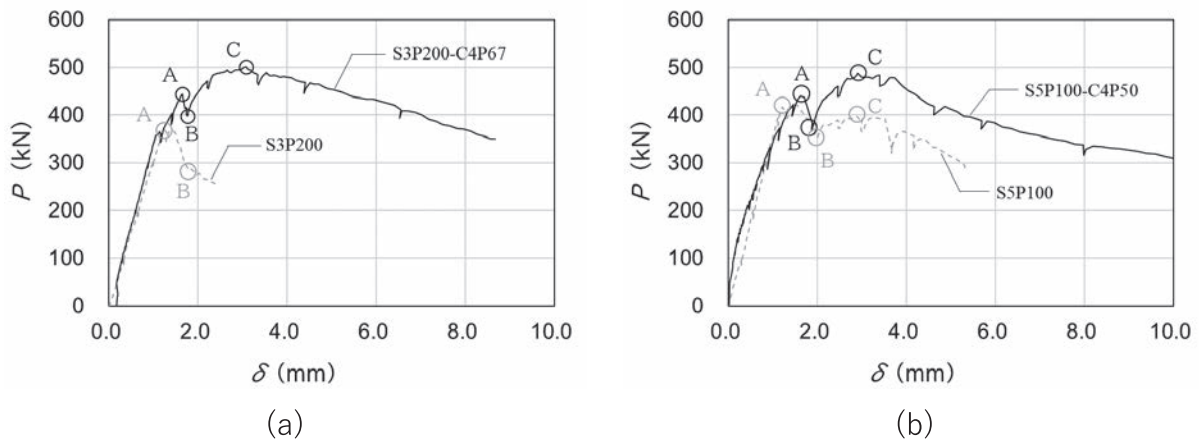
鋼を用いて与えた。加力用PC棒鋼と試験体から露出させた4本の主筋(D29)は、2つの加力治具で緊結し、同一変位で載荷した。荷重の値は、センターホールジャッキと固定ナットの間に設けたロードセルにより計測した。また、加力方式は片側単調載荷とした。

(3) 実験結果

図一4に荷重 P -すべり量 δ 関係を示す。 δ は図一3に示した計測変位位置における主筋の移動量から、スタブの移動量やアンボンド区間の主筋の伸びを補正した、純粋な主筋のすべり量である。ここで、付着割裂ひび割れ時の最大荷重 $A P_{max}$ の点をA点、その後荷重が低下した点をB点、再度荷重増大した時の最大荷重 $C P_{max}$ に到達した点をC点と定義する。同図(a)より、試験体 S3P200 は、 $\delta=1.5$ mm 付近(A点)で付着割裂ひび割れが生じながら $A P_{max}$ に達し、その後付着割裂破壊により大きな荷重低下が見られた。これ



図一3 加力装置



図一4 荷重 P -すべり量 δ 関係

に対し、CCM筋を配置した試験体 S3P200-C4P67 は、試験体 S3P200 と同様に $\delta=1.8\text{ mm}$ 付近 (A 点) で付着割裂ひび割れにより荷重低下 (B 点) が見られたが、CCM筋がこのひび割れを抑制することで再度荷重が増大した。そして、 $\delta=3\text{ mm}$ 近傍 (C 点) で cP_{max} に到達した後、緩やかな荷重低下を呈した。

せん断補強筋のピッチを 100 mm とした試験体 S5P100 では、B 点以降若干荷重が増大したが、 $A P_{max}$ を超えることはなかった。一方 CCM筋を配置した試験体 S5P100-C4P50 は、試験体 S3P200-C4P67 と同様に、 $\delta=3\text{ mm}$ 近傍 (C 点) で $A P_{max}$ より大きい cP_{max} に到達し、その後緩やかな荷重低下が見られた。

以上より、CCM筋を配置することで、付着割裂ひび割れ後に再度荷重は増大して最大荷重に達し、その後急激な荷重低下は生じなかった。

4. 部材実験

(1) 試験体概要

試験体の形状および寸法を図一五に示し、試験体諸元を表一三に示す。また、使用した鉄筋の材料特性を表一四に示す。試験体は、2/3 縮小スケールの従来の RC 梁 (試験体 NB) と CCM-RC 梁 (試験体 RB) の合計 2 体とした。試験体 NB は CCM筋を設けず、付着割裂破壊するように部材設計し、試験体 RB は付着割裂破壊を抑制するための CCM筋を配筋した。

試験体 RB の梁下端から $1D$ の補強区間には、せん断補強筋の間に溶接閉鎖型の CCM筋が配置されている。また、軸筋は下スタブに定着せず、梁部材の曲げ強度に影響しないように配慮した。

(2) 加力方法

図一六に加力装置を示す。試験体は下スタブを反力床に固定し、上スタブを油圧ジャッキに取り付けた。加力は、水平方向への押し引き加力とし、片持ち形式の正負交番変位漸増載荷とした。加力サイクル

表一三 試験体諸元

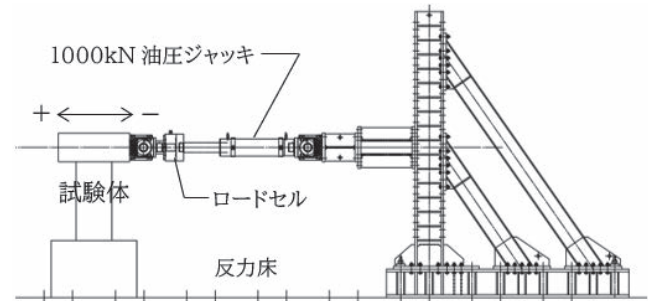
試験体	NB	RB
$b \times D$ (mm)	350 × 500	
σ_B (N/mm ²)	30.7	31.1
主筋	4-D22	
せん断補強筋	2-D10@152	
CCM筋	-	2-D10@76

σ_B : コンクリート圧縮強度

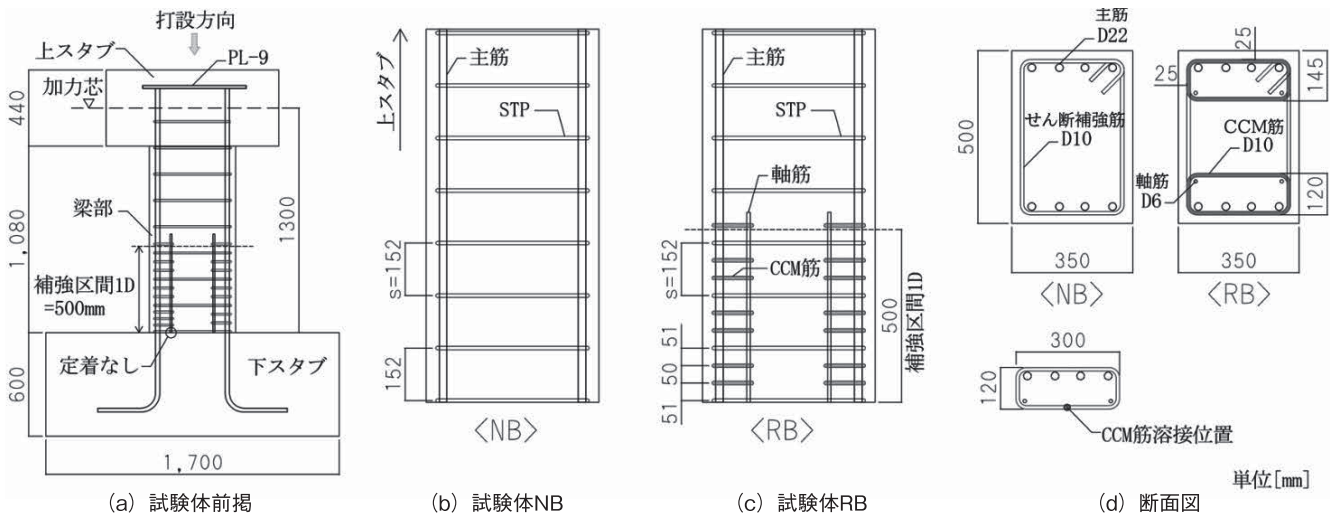
表一四 鉄筋の材料特性

諸元	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E_s ($\times 10^5$ N/mm ²)
主筋 D22 (SD390)	452	622	2.11
せん断補強筋、 CCM筋 D10 (SD295)	413	520	2.13

σ_y : 降伏強度, σ_u : 引張強度, E_s : ヤング係数



図一六 加力装置



図一五 試験体の形状および寸法

単位 [mm]

は、部材変形角 $R = \pm 1/1000 \text{ rad}$, $\pm 1/400 \text{ rad}$ を各 2 回, $R = \pm 1/200 \text{ rad}$, $\pm 1/133 \text{ rad}$, $\pm 1/100 \text{ rad}$, $\pm 1/67 \text{ rad}$ を各 3 回, $R = \pm 1/50 \text{ rad}$ を 2 回, $\pm 1/33 \text{ rad}$ を 1 回とし、最後に $R = +1/25 \text{ rad}$ まで載荷した。

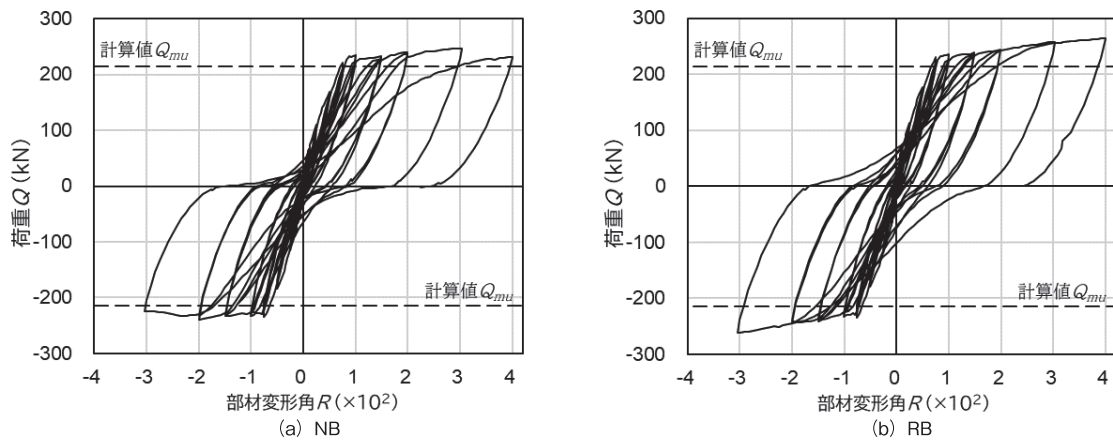
(3) 実験結果

図一 7 に荷重 Q - 部材変形角 R 関係を示す。いずれの試験体も $R = 1/120 \text{ rad}$ 近傍で主筋が降伏したことによる剛性低下が生じ、それ以降緩やかに荷重が増大した。試験体 NB は、 $R = 1/33 \text{ rad}$ の負加力時において最大荷重を下回った。これに対し、試験体 RB は、 $R = 1/25 \text{ rad}$ まで荷重の低下傾向は見られなかった。ここで、 $R = 1/67 \text{ rad}$ と $R = 1/50 \text{ rad}$ の Q - R 関係に着目する。図一 8 に $R = 1/67 \text{ rad}$, $1/50 \text{ rad}$ の Q - R

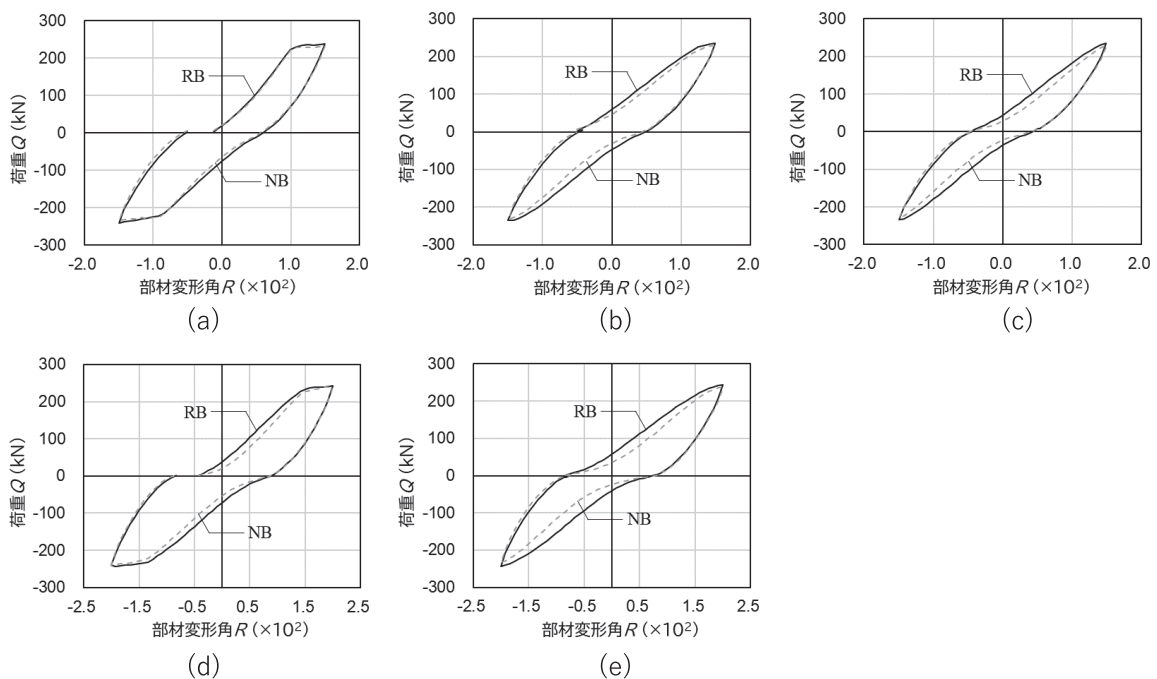
関係を示す。 $R = 1/67 \text{ rad}$ の 1 サイクル目から徐々に試験体 RB の履歴曲線は、試験体 NB よりも若干大きい傾向が見られた。特に、除荷後における荷重 0 kN からの荷重増大時の剛性に顕著な違いが見られた。また、 $R = 1/50 \text{ rad}$ の 2 サイクル目の履歴曲線では、荷重 0 kN からの荷重増大時の剛性の違いが更に顕著になり、 $R = 1/67 \text{ rad}$ と比較して試験体 RB の履歴曲線は、試験体 NB より更に大きい結果となった。この要因については、次節の破壊形状を観察して推察する。

(4) 破壊性状

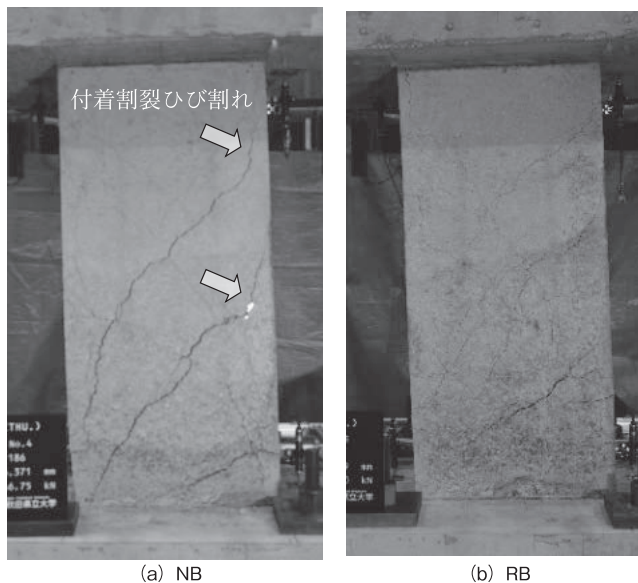
写真一 1 に破壊状況 ($R = 1/33 \text{ rad}$) を示す。試験体 NB は、 $R = 1/67 \text{ rad}$ 以降に主筋に沿った付着割裂ひび割れが顕著に発生したが、試験体 RB は付着割裂



図一 7 荷重 Q - 部材変形角 R 関係



図一 8 $R = 1/67 \text{ rad}$, $1/50 \text{ rad}$ の Q - R 関係



写真—1 破壊状況 ($R=1/33$ rad)

ひび割れが抑制されていた。つまり、付着割裂ひび割れを抑制することで、曲げ降伏後の付着特性が改善されているものと推察される。また、 $1/50$ rad において試験体 NB はひび割れが集中し、ひび割れの幅は 3 mm 程度と大きかったが、試験体 RB はひび割れが分散し、ひび割れ幅は 1 mm 程度と小さい。さらに端部の圧縮側コンクリートを比較すると、試験体 NB は一部コンクリートの圧壊が見られたが、試験体 RB では圧壊が確認されなかった。これらの要因により、前項で述べたように $R=1/67$ rad 以降の試験体 RB の履歴曲線は、試験体 NB より大きかったものと推察される。

以上より、CCM-RC 梁は従来の RC 梁と比較して①曲げ降伏後の主筋の付着特性を改善、②付着割裂強度の増大による付着割裂破壊の防止、③ CCM 筋で拘束されたコンクリートの靱性向上の効果がある。また、これら効果により④大変形時の主筋座屈挙動の抑制も期待できる。

5. おわりに

本報では、CCM-RC 梁の効果として①曲げ降伏後の主筋の付着特性を改善、②付着割裂強度の増大による

付着割裂破壊の防止、③ CCM 筋で拘束されたコンクリートの靱性向上の効果、を付着割裂要素実験と部材実験の両結果から示した。これらの効果により、④大変形時の主筋座屈挙動の抑制も期待できると言える。

著者らは大地震が頻発する近年において、建築物の長寿命化や継続使用性に貢献できるように、CCM-RC 梁が一般的に用いられるよう普及に努めていく。

飛鳥建設(株)、(株)熊谷組および鉄建建設(株)は、主筋周囲拘束補強型 RC 梁 (CCM-RC 梁) 工法を (一財) 日本建築センターにおいて「評定 (BCJ 評定)」を令和 6 年 2 月 26 日に取得した。

謝 辞

秋田県立大学の西田哲也教授、菅野秀人教授および櫻井真人准教授に、技術的助言を賜りました。深く謝意を表します。

JCMMA

【参考文献】

- 1) 鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準・同解説, 日本建築学会, 2021.

【筆者紹介】



坂本 啓太 (さかもと けいた)
飛鳥建設(株)
技術研究所 研究開発グループ
主任研究員



前川 利雄 (まえがわ としお)
(株)熊谷組
技術本部 技術研究所
防災技術研究室
室長



石渡 康弘 (いしわた やすひろ)
鉄建建設(株)
建設技術総合センター
研究開発センター
環境グループリーダー