主筋周囲に拘束筋を施した CCM-RC 梁の補強効果に関する実験的考察

Experimental Study on the Reinforcing Effect of CCM-RC Beams with Restrained Reinforcement Around the Main Bars

> 坂本啓太^{**1} 阿部隆英^{**1} 石 Keita Sakamoto Takahide Abe Yuta

石田 雄太郎** Yutaro Ishida

【要旨】

著者らは、地震時における鉄筋コンクリート(RC)造建築物の大変形時の損傷を抑制することで、エネルギー吸収 性能が向上する主筋周囲拘束補強型 RC 梁(以下, CCM-RC 梁と称す)についての研究開発を行っている. CCM-RC 梁は、RC 梁端部のせん断補強筋間に、主筋周囲を拘束する補強鉄筋を施すことで、損傷の抑制やエネルギー吸収 性能が向上する.

本報では、はじめに CCM-RC 梁の概要を述べ、その後、実大スケール部材実験結果から、損傷抑制効果や等価 粘性減衰定数 heq を用いてエネルギー吸収を検証する.その結果、CCM-RC 梁は、従来の梁に比べて損傷を抑制す ると共にエネルギー吸収性能が向上していることを確認した.特に大変形時においては、付着割裂ひび割れやせん 断ひび割れによる損傷に対する高い損傷抑制効果を得た.

【キーワード】 RC 梁 拘束筋 実大スケール 部材実験 履歴性状

1. はじめに

近年、安全かつレジリエントで持続可能な都市づくり に向けて、建築物の長寿命化や継続使用性の向上が求め られている¹⁾.また、想定外の巨大地震や繰返し発生する 地震動に備えて、所定の耐震性を満足しつつ余力をもっ た部材性能を有することも重要である.一方で、多くの 鉄筋コンクリート(RC)造建築物の RC 梁は、降伏を許容 し、ある程度の変形と損傷を許容しつつ、地震エネルギ ーを吸収する部材として期待される²⁾.そのため、現行の 設計法による RC 梁では、継続使用性や耐震性の余力と いう点で課題があるといえる.

これらを背景に著者らは、RC 梁におけるヒンジ部の損 傷を抑制し、地震エネルギー吸収性能を向上させる主筋 周囲拘束補強型 RC 梁(以下, CCM-RC 梁と称す)の研究 開発を行っている^{3,4}. 図-1に CCM-RC 梁の概要を示 す.特に CCM-RC 梁は、ヒンジ部となる梁端部における 主筋周囲のコンクリートの健全性に着目しており、大変 形領域においても主筋と周囲のコンクリートの一体性を 確保することで、付着割裂破壊を抑制し、エネルギー吸 収性能が向上すると考えている.補強方法の詳細につい ては、次章で述べる.

本報では、はじめに CCM-RC 梁と従来 RC 梁の実大ス ケール試験体及び実験の概要を述べ、続いて実験結果か ら CCM-RC 梁の損傷抑制状況やエネルギー吸収性能の 効果について報告する.

2. CCM-RC 梁の概要

CCM-RC梁は、図-1に示すように、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)] をRC梁端部のせん断補強筋間に設ける. CCM筋は、直方 形状に加工した細径の鉄筋であり、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 間に配置する. 主な補強効果は以下の通りである.

- 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靭性向上
- ④ 大変形時の主筋座屈挙動の抑制

なお、これら①~④の補強効果は、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が、 着目点を明確にするため敢えて別々に表記している.以 上の効果が複合的に作用することで、CCM-RC梁はより 優れたエネルギー吸収性能を発揮できると考える.



^{1.}技術研究所 研究開発 G 第四研究室



図-2 試験体の形状および寸法

3. 実大スケール部材実験概要

3.1 試験体詳細

試験体の形状および寸法を図-2に示し、試験体諸元 を表-1に示す.試験体は、文献1)で示されている整形建 物で標準的なRC造建築物として設計されている14階建 てRC造建物の13階部分の梁および柱部材を模した、実大 スケールの梁および柱型である.試験体形状は、柱型を 中心として、左右に片持ち形式に梁を配置し、スパンの 中央を反曲点位置として切り出した十字型である.なお、 図-2には右側の梁のみを図示している.左右に取付く 梁の断面は同一断面、同配筋としている.梁は幅b500mm ×せいD850mmの断面とし、柱型面から加力点までの距 離を2600mmとしている.柱型は幅B800mm×幅D800mm の断面とし、梁上下面からそれぞれ200mmずつ延伸させ て、全体の長さを1250mmとしている.

試験体は、前述の文献1)を模擬したRC梁試験体(以下, NB試験体と称す)と、NB試験体にCCM筋を配筋した CCM-RC梁試験体(以下,RB試験体と称す)の計2体とした. RB試験体は、主筋とその周囲のコンクリートを拘束する CCM筋を、NB試験体の材軸方向に並ぶ従来のせん断補強 筋(以下,STPと称す)の間に3つずつ配置した梁である.ま た、本報においては紙幅の都合上、右側の梁についての み、それぞれNB試験体、RB試験体として報告する.なお、 左側の梁の結果については、別報にて報告する.

使用した鋼材の材料特性を表-2に、コンクリートの 材料特性を表-3に示す.コンクリート圧縮強度のは、 30N/mm²を目標強度とした.CCM筋には、汎用性の高い 材料として、SD295を採用し、STPと同径のD13を用いた. コンクリートは現場での打設と同様に、上部方向から梁 と柱型を同時に打設した.打設後は、CCM筋の周囲にも 十分にコンクリートが充填されていることを確認した.

表-1 試験体諸元

試験体		NB	RB	
	$b \times D$ [mm]	500×850		
梁	F_c [N/mm ²]	30		
	主筋	5-D29		
	せん断補強筋 STP	3-D13 @200		
	CCM 筋		2-D13@50	
柱	$B \times D$ [mm]	800×800		
	主筋	20-D32		
	せん断補強筋	2-T13 @100		

表-2 鋼材の材料特性

		σ_y [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]	<i>Es</i> [×10 ³ N/mm ²]
梁	主筋 D29 (SD390)	429.5	637.6	195
	せん断補強筋 STP D13 (SD295)	363.5	495.9	189
	中子筋 D13 (SD295)	341.2	499.6	191
柱	主筋 D32 (SD390)	412.8	608.5	200
	せん断補強筋 T13 (SPR785)	878.1	1051.4	204
CCM 筋 D13 (SD295)		367.3	497.8	186

σ_i: 降伏強度, σ_u: 破断強度, E_s: ヤング係数

表-3 コンクリートの材料特性

試験体	$\sigma_B [\text{N/mm}^2]$	σ_T [N/mm ²]	E_c [N/mm ²]
NB	31.24	2.54	26492
RB	31.79	2.76	26002

σB:圧縮強度, σT: 引張強度, Ec: ヤング係数



3.2 加力方法

図-3に加力装置を示す. 試験体は,反力床上の固定 治具に固定し,試験体先端に設けたガセットプレートと 左右の載荷用ジャッキ(1500kN)先端に取付けたクレビス でピン接合する.載荷は,載荷用 1500kN ジャッキに取付 けたロードセルで荷重を計測し,右梁の下向きを正加力 とする.ここで,右梁載荷中,左梁は荷重ゼロを維持し自 由端とする.また,試験体の柱型上部には,鉛直軸力用ジ ャッキ(5000kN)を設置し,柱軸力比 N/(Fc·BD)=0.15 とな るように一定軸力を与える.

図-4に加力サイクルを示す.載荷は正負交番繰返し 載荷とし、端部に設置した制御用変位計の値を部材長さ 0.5Lで除した部材変形角 Rで制御する.目標とする Rは、Phase1 として $R=\pm0.001$ rad、 ±0.0025 rad を各 2 回, $R=\pm0.005$ rad、 ±0.0075 rad、 ±0.01 rad を各 3 回、Phase2 と して Phase1 と同様の変位を与える.その後、Phase3 と して $R=\pm0.015$ rad、 ±0.02 rad を各 2 回、 $R=\pm0.033$ rad を 1 回繰り返す.ここで目標変位は、制御用変位計の値から 柱型の回転成分を除去した値とする.

4. 実大スケール部材実験結果

4.1 試験体の計算値耐力Qmu

試験体の曲げ強度を梁の内法スパン L の半分で除した 計算値耐力 Q_{mu} は、下式により算定される. なお、 Q_{mu} は NB 試験体、RB 試験体ともに 370.5kN である.

$$Q_{mu} = M_y / 0.5L \tag{1}$$

$$M_y = 0.9a_t \cdot \sigma_y \cdot d \tag{2}$$

M_y	: 梁の曲げ強度[kNmm]	L	: 梁の内法スパン[=5200mm]
a _t	: 引張鉄筋断面積[mm²]	σ_y	:引張鉄筋の降伏点強度[N/mm ²]
d	: 梁の有効せい[mm]		

4.2 試験体の最大荷重Qmax

載荷実験による最大荷重の正負平均値は、NB試験体が 422.6kN、RB試験体が436.4kNであり、いずれも計算値Qmu を上回る結果となった.降伏後も荷重が増大しているこ とから、主筋のひずみ硬化が影響していると推察される.

4.3 荷重 Q 一部材 变形角 R 関係

図-5に、荷重Q-部材変形角R関係を示す. なお. 計算値耐力Qmuを図中に併記する. R=0.01radまでは、NB試験体およびRB試験体に大きな差は見当たらない. しかし、 R=0.015rad, 0.02radでは、変位ピーク後に荷重0まで除荷した後の荷重増加部分(第2象限および第4象限)における剛性に違いが見られる. NB試験体は剛性が小さく変位が延びてスリップ挙動を示しているのに対し、RB試験体はやや剛性が高くスリップ挙動も小さい.

また,変位ピーク時の荷重値については,NB試験体が *R*=0.03radで低下しているのに対し,RB試験体は荷重が増 大している.これより,CCM筋を有するRB試験体は,靭 性能が向上しているといえる.

4.4 ひび割れ状況

写真-1に, R=0.01rad(Phase1), 0.015rad, 0.02 rad, 0.033 rad (Phase3)時における正加力1サイクル目のひび割れ状 況を示す.写真-1(a), (b)を比較すると, R=0.01radの時 点で既に,正加力時の引張側のコンクリートに生じる曲 げひび割れの分布位置が異なっている.NB試験体は曲げ ひび割れの発生が3箇所であるのに対し, RB試験体は4 箇所となっている.特に, NB試験体の梁端から300mm 離れた位置に生じたひび割れが集中している.これらの ことから, CCM-RC 梁はひび割れを分散させる効果があ ると言える.

同写真-1(c), (d)を比較すると, R=0.015rad 時点でNB



(a) NB 試験体 R = 0.01rad 正加力 1 サイクル目



(c) NB 試験体 R=0.015rad 正加力 1 サイクル目



(e) NB 試験体 R=0.02rad 正加力1 サイクル目



(g) NB 試験体 R = 0.033rad 正加力 1 サイクル目 写真-1 試験体においては、梁端から800mm 位置で、主筋に沿っ て水平方向に延びる付着割裂ひび割れが確認できる。一 方、RB 試験体においては、梁端から1250mm を超えた位 置に、僅かに付着割裂ひび割れが見られるのみである。

同写真-1(e),(f)を比較すると,NB 試験体の端部から 300mm に位置する曲げせん断ひび割れは大きく開き,引 張主筋位置で生じた付着割裂ひび割れまで繋がっている.

同写真-1(g), (h)を比較すると, NB試験体はせん断ひ び割れが顕著となり, 圧縮側にも損傷が生じている. こ れに対して, RB試験体は, 付着割裂ひび割れがなく, せ ん断ひび割れも抑制されている. さらに, 圧縮側のコン クリートでは, 圧壊も観察されない.



(b) RB 試験体 R = 0.01rad 正加力 1 サイクル目



(d) RB 試験体 R=0.015rad 正加力1サイクル目



(f) RB 試験体 R=0.02rad 正加力1サイクル目



サイクル目 (h) RB 試験体 R = 0.033rad 正加力 1 サイクル目 写真- 1 各サイクルのひび割れ状況



図-6 ひずみゲージ貼付け位置

4.5 鉄筋のひずみ分布

図-6に、ひずみゲージの貼付け位置を示す. ここでは、STP および CCM 筋のひずみデータについて述べる. また、本報におけるひずみデータは、*R*=0.15rad (1/67rad) まで計測できた SR-S, CSR-TS, CSR-BS の値で考察する. 図-7にひずみ分布を示す.

はじめに、STP のひずみ(SR-S)について述べる. 図-7 (a)によると、NB 試験体は X=400mm の位置において *R*=0.005rad (1/200rad)以降ひずみが増大している. この結 果は、写真-1(a)の X=300mm において、ひび割れが生 じていることと傾向が一致している. しかし、NB 試験体 の X=800mm 以上の範囲では、ほとんどひずみが生じて いない. これは、ヒンジ領域にせん断ひび割れが集中し ていることを示している. 一方、図-7(b)に示す通り、 RB 試験体は、X=400mm 位置のひずみより X=800mm 位

置のひずみの方が大きい.

また, X=800mm 以上の範囲においてもひずみは増大し ている.これは, NB 試験体とは異なりせん断ひび割れが 分散していることを示している.なお,いずれの試験体 も STP のひずみは 1000 μ 程度であり,降伏ひずみには達 していない.

次に, CCM 筋のひずみ分布について述べる. 上端の CSR-TS, 下端の CSR-BS 共にひずみは生じており, CCM 筋は応力を負担していることがわかる. 位置によってば らつきがあるものの, 最大 500 μ 程度のひずみが生じて いることがわかる.

これらの結果を踏まえると, RB 試験体は X=0mm~ 850mm の梁せい 1D のヒンジ領域において, CCM 筋の応 力負担により, せん断ひび割れの集中を抑制できている ものと推察される.また, CCM 筋は主筋と周囲のコンク リートを拘束していることから, 周囲のコンクリートに 対する拘束効果を与えていると考えられる.

R=0.015rad(1/67rada)以降, STP や CCM 筋のひずみを計 測することができなかったが,前掲の**写真-1(h)**から主 筋の座屈挙動は, CCM 筋により抑制されていると推察さ れる.







5. CCM-RC 梁の等価粘性減衰定数 heq

図-8に主筋降伏後となる主要変形角の2サイクル目の定常ループを示す.荷重0からピークに向けての履歴ループの膨らみは,RB試験体の方が大きいことがわかる.

図-9に定常ループから算出した等価粘性減衰定数*h*_{eq} を示す.また,併せてNB試験体の*h*_{eq}に対するRB試験 体の*h*_{eq}の比をそれぞれ図中の折れ線グラフで示す.主筋 降伏の1/133rad以降のサイクルでNB試験体に対するRB 試験体が上回っており,その比は1.190~1.386であった. このことから, CCM-RC 梁のエネルギー吸収は,従来RC 梁に比べて高いと判断される.

6. 結論

本報では、主筋周囲拘束補強型 RC 梁(CCM-RC 梁)と 従来 RC 梁の実大スケール試験体及び実験の概要を示す とともに、実験結果から CCM-RC 梁の損傷抑制状況やエ ネルギー吸収性能の効果について示した.本報で得られ た知見を以下に列記する.

- ① CCM-RC 梁は従来 RC 梁と比べひび割れを分散し、せん断ひび割れ及び付着割裂ひび割れを抑制した.
- ② ひび割れが集中するヒンジ領域に配筋した CCM 筋に, 最大 500 µ 程度のひずみが発生していることから,

CCM 筋にはヒンジ領域のひひ割れを抑制する効果がある。

③ 主筋降伏の 1/133rad 以降のサイクルにおいて、定常ループから算出した CCM-RC 梁の等価粘性減衰定数 heq は、従来 RC 梁の 1.190~1.386 倍であった. このことから、CCM-RC 梁のエネルギー吸収は、従来 RC 梁に 比べて高いと判断される.

著者らは持続可能な社会実現に向けて、CCM-RC 梁が 普及することを期待している.

謝辞:本開発は、共同技術開発の取組みの中で行っており、熊谷組、鉄建建設の技術協力を得て実施しました.熊谷組の前川利雄氏、服部翼氏、および鉄建建設の石渡康 弘氏に、深く謝意を表します.また、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.最後に、元飛 島建設社員の久保田雅春氏には、開発立ち上げ当初から 様々な助言をいただきました.深く謝意を表します.

【参考文献】

- 1) 国土交通省住宅局,防災拠点等となる建築物に係る機 能継続ガイドライン(新築版),平成30年5月
- 2) 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.
- 3) 坂本啓太ら他8名,エネルギー吸収性能向上を目指した主筋周囲拘束補強RC梁に関する実験的研究(その1)~(その4),日本建築学会大会学術講演梗概集,構造IV,pp213-220,2022.7
- 4) 坂本啓太,阿部隆英,石田雄太郎,櫻井真人,主筋周囲 に拘束筋を施した RC 梁の付着性能に関する実験的検 討,コンクリート工学年次大会論文集,第45巻2号, pp.385-pp.390,2023.

Summary The authors have pursued research on reinforced concrete beams with restrained and reinforced reinforcement around the main bars (CCM-RC beam hereinafter), which will allow reinforced concrete (RC) buildings to exhibit improved energy absorption performance and thereby suppress damage when subjected to large deformations during earthquakes. The CCM-RC beam features a restrained reinforcing bar around the main bars between the shear reinforcement bars at the end of an RC beam, which reduces damage and improves energy absorption performance.

This paper provides an overview of the CCM-RC beam, then verifies its damage suppression effects and energy absorption performance based on the results of full-scale member experiments, using the equivalent viscous damping constant, heq. Our results confirm that the CCM-RC beams exhibit both improved energy absorption performance and damage suppression compared to conventional beams. In particular, under large deformation, the CCM-RC beams exhibit high damage suppression performance against damage due to bond splitting cracks and shear cracks.

Key Words: RC beam, restraint bars, Full-scale, member experiment, hysteresis properties