論文 分割鋼板巻き補強によるRC柱の耐震性能に関する実験的研究

村上 修一*1· 菅野 俊介*2· 佐藤 立美*3· 奥本 英史*4

要旨:鉄筋コンクリート柱に対してせいが低いコの字型鋼板2枚を向い合わせて高力ボルト で摩擦接合して巻き立て,それを柱の高さ方向に数段積み上げることで耐震補強を行う「分 割鋼板巻き補強」を提案し,高軸力下における補強効果を検証するために正負漸増繰返し載 荷試験を行った。その結果,無補強時には付着割裂により脆性破壊を起こす柱に対して分割 鋼板巻き補強を施すことで,大変形時にも耐力低下のない高靭性型に改善でき,従来の溶接 接合による鋼板巻き補強と同等の補強効果があることを確認した。

キーワード: RC 柱, 耐震補強, 分割鋼板, 高軸力, 靭性能

1. はじめに

既存鉄筋コンクリート造(以下, RC 造)建 物に対する耐震補強では, 靭性の向上を図る靭 性抵抗型補強が現実的かつ有効な補強方法の1 つとされている。靱性を向上させる耐震補強技 術として, 鋼板巻き補強や連続繊維シート巻き 補強があるが, その中でも鋼板巻き補強は古く から行われており, 設計の参考となる研究報告 が豊富である。また,構造性能の信頼性も高く, 高軸圧縮力に対して他の補強方法よりも効果 的とされている。ただし, 施工時に溶接を必要 とする点が最大の問題であり, 火災を誘引する 可能性があるため厳格な管理が必要とされ, か つ溶接部の品質確保も課題となる。また, 建物 内部で鋼板という重量物を運搬・揚重・組立す ることも施工を困難にする一因とされている。

高軸力を受ける補強事例が増加している現状 に鑑み,施工面の問題を解決しつつ,高軸力下 にも有効に働く鋼板補強法の開発が急務である と言える。そこで,鋼板を柱高さ方向に分割し, コの字型形状の鋼板を高力ボルト接合とするこ とにより材料の軽量化を計り,施工上の問題を 解決し,建物利用者が「居ながらできる補強」 が可能となる分割鋼板巻き補強が提案された。 本研究では,その提案された分割鋼板巻き補強 を施した RC 柱の高軸力下における耐震性能を 実験的に検証し,その有効性について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1に試験体一覧,表-2,3,4に使用材料の 力学的特性,図-1に試験体詳細を示す。基準 試験体 NR(無補強)は高軸力下における既存建 物の柱を想定し,なおかつ補強研究の少ない付 着割裂破壊先行型として以下に示す評価式^{1)~3)} により設計した。なお柱主筋にはこの方針に従 って SD390 材を用いた。式中の τ_{bu} は付着強度, Q_{bu} は付着せん断耐力, Q_{mu} は曲げせん断耐力, Q_{su} はせん断耐力を表し,他の記号は文献に従う。

 $\tau_{bu} = \tau_{co} + \tau_{st}^{(1)}, Q_{bu} = Q_t + \alpha \cdot Q_a^{(2)}, Q_{mu} = 2M_u / h_0^{(3)},$ $Q_{su} = \left[0.053p_t^{0.23} \left(18 + F_c \right) / \left\{ M / (Q \cdot d) + 0.12 \right\} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} + 0.1\sigma_0 \right] \cdot b \cdot j^{(3)}$ (1)

本実験では、従来型の溶接接合による分割の ない鋼板巻き補強の柱(S4.5W)を補強試験体の 基準とした。分割は実大を想定し、重機を使用 しないで施工できる重さの範囲を考え、9 分割 とした。分割鋼板の幅は 130 mmである。

基準補強試験体の溶接接合は裏当て金を使用

*1 広島大学大学院工学研究科大学院生	(正会員)	
*2 広島大学大学院工学研究科教授	工博	(正会員)
*3 広島工業大学工学部教授	工博	(正会員)
*4(株)竹中工務店大阪本店設計部副部	(正会員)	

した開先溶接とし、分割鋼板の高力ボルト接合 はトルク管理をして締め付けを行う摩擦接合と した。なお、高力ボルトのボルト軸径(*d*₁)は 12 mm,導入軸力(*N*)は 61.4kN,トルク係数値(*K*)は 0.15 で、トルク(*T*)は以下の式(2)により管理した。

 $T = K \cdot d_1 \cdot N \tag{2}$

鋼板表面はサンドブラスト仕上げを行った。 分割鋼板巻き補強試験体では鋼板厚さ 4.5mm を基準とし,鋼板厚さを変化させない試験体 (DS4.5B),及び鋼板厚さを混合して補強した試 験体(DSmixB)を作製した。DSmixB 試験体では, 柱上下端部においては曲げせん断ひび割れに起 因する応力伝達力の低下が大きくなることが予 想されるので,柱上下端部の補強鋼板厚さを 6.0mm に増大させて補強効果の向上を図った。

補強試験体では、曲げ耐力の増大を防ぐため に柱頭柱脚に15mmずつのクリアランスを設け、 グラウトを充填させるために柱表面から隙間を 確保して、鋼板を巻きつけた。その後、正面と 背面の柱脚のクリアランス部分よりグラウトを 圧入し充填した。なお、接合部(溶接接合・ボル ト接合)のせん断補強筋としての役割を見るた めに、加力方面において鋼板を接合した。

			表一	1 8	式駒	·本列	一覧				
試験体名	補強方法		補強 箇所	金 フ	岡板ら ト平	分割数 鉛直	板厚 (mm)	鋼板接合	合方法		
NR	魚	長有	前強	_		_		_	I —		
S4.5W	鋼	板	巻き	全体	:		2	4.5	開先消	容接	
DS4.5B	分割	鋼	板巻き	全体	:	9	2	4.5	高力ボ	ルト	
				上端		3	2	6.0			
DSmixB	分割	鋼	板巻き	中央	:	3	2	4.5	高力ボ	ルト	
				下端	i	3	2	6.0			
		表	-2	鋼材	tの	力的	学的特	性			
下午 下:			ヤング	ゲ係券	女E _s	降值	犬強度	σ_{sy}	引張強度	$E\sigma_{su}$	
个里头	浿		$(\times 10)$	0^{5} N/m	m^2)		(N/mm^2)	2)	(N/mm^2)		
D6 (SD2	D6 (SD295) 1		. 64 326. 8		481.9		9				
D16(SD390) 1		. 67 452. 9)	617.4						
PL4.5(S	L4.5(SS400) 1		. 68			270.0)	396.	2		
PL6.0(S	PL6.0(SS400) 1.76		. 76			293.0)	426.	9		
	長一	3	コン	クリ	—	10	り力学	的特	性		
	・ト	~>	ノグ係	数E _c	圧	縮強)) 度σ _B	引	引張強度 σ_T		
武駛14	. (×	10^4 N/m	(N/mm^2)		(N/mm^2)					
NR		2.15			26.08			2.44			
S4.5W		2.10			27.05		2.74				
DS4.5W	I	2.04			25.78		2.72				
DSmixW	I	2.13		25.95			2.54				
表-4 充填材の力学的特性											
種類	Ę	Ŀ	E縮強	渡 c	σ _B	(N/	mm^2)	材	令(日)		
グラウト 38				38	. 79	9			9		



2.2 載荷·計測方法

試験体には一定軸力(軸力比 η =0.6)を加えた 後,水平方向正負漸増繰返し力を作用させた。 制御は試験体頂頭部水平変位を柱内法高さで除 した変形角 R を用いて行い,変形角 R=1/800, 1/400, 1/200, 1/100, 1/50, 1/25rad.をそれぞれ 2 サイクルずつ繰返し,その後 R=1/16rad.まで 押し抜きを行った。

載荷装置は図-2 に示す,広島工業大学の耐 震防災棟にある装置を使用した。この軸力載荷 装置は連動ジャッキにより制御されており,試 験体頂部が水平移動しても,常に垂直に軸力を 載荷できる。各荷重は同図に示すように各ジャ ッキ先端に設置したロードセルにより測定し, 併せて試験体の水平変位,鉛直変位は変位計に より測定した。また,主筋,帯筋および補強 3 試験体の鋼板表面に適宜ひずみゲージを貼付し て,ひずみの進展状況を計測した。



3. 実験結果と検討

3.1 破壊性状

図-3 に各試験体の最終破壊性状を示す。ただし、補強試験体は実験終了後に鋼板とグラウトを剥がした後のひび割れ状況を示す。

図-3より,全試験体において主筋に沿った 顕著な付着割裂ひび割れが確認される。

また,補強試験体の柱上下端部ではひび割れ が多数発生し,下端部では剥落(黒塗り部分)が 生じている。これは、曲げモーメント及びせん 断力により生じたものと考えられる。そのため 曲げモーメントの小さい柱中央部では部材端部 に比べて、付着割裂ひび割れは生じているもの の、曲げひび割れ及びせん断ひび割れは生じに くかったと考えられる。

ただし,分割鋼板巻き補強試験体(DS4.5B と DSmixB)では,ほぼ分割鋼板の切れ目に沿って 両側面より水平方向にひび割れが確認された。 特に DSmixB では,このひび割れが試験体中央 部でも顕著に確認される。これは,分割鋼板の ずれが原因で生じたと考えられるが,柱部材の 性能に影響を与えるようなひび割れではない。



3.2 履歴性状

図-4 に各試験体の水平荷重 - 変形角履歴曲 線,図-5 に包絡線,表-5 に実験結果一覧を 示す。ここで降伏とはひずみ測定から柱の圧縮 側鉄筋が降伏したことを,終局とは最大耐力以 降その 80%に耐力が低下したことを示す。なお, 柱は引張降伏しておらず、鉄筋の降伏には材料 試験から求めた降伏ひずみを基準としている。

無補強の基準試験体 NR は変形角 1/150rad.付 近で主筋の圧縮降伏と同時に付着割裂ひび割れ が顕著に発生し,耐力が急激に低下した。その ため,変形角+1/100rad.の除荷後に実験を終了し た。なお,最大耐力は 263.6kN であった。

補強試験体 S4.5W, DS4.5B, DSmixB は変形 角 1/140rad.~1/130rad.付近で圧縮降伏し、その 後,変形角 1/50rad.付近において最大耐力 (S4.5W は 344.8kN, DS4.5B は 349.0kN, DSmixB は 347.4kN)に達した。補強 3 試験体において最 大耐力に有意な差はない。さらに変形角 1/16rad. 付近において最大耐力の 80%に耐力が低下し 終局状態と判断した。ただし、載荷装置の安全 上, 変形角 1/16rad.は正の水平加力を 1 回しか 行っていない。変形角 1/16rad.においても、溶 接部破断,ボルト破断などの損傷はみられず, 柱上下端部鋼板の膨らみがみられる程度であっ た。分割鋼板巻き補強試験体の柱上下端部の分 割鋼板どうしには鉛直方向にズレが生じたが, 柱中央部の分割鋼板はほぼ一体となり, 鋼板巻 き補強の柱中央部とほぼ同様の挙動を示した。

以上の結果と図-3 より補強試験体において も実験中に付着割裂ひび割れが生じたと推測さ れることを合わせて考える。すると,分割鋼板 巻き補強と鋼板巻き補強ともに,RC 部分に付 着割裂ひび割れが生じても,鋼板により拘束さ れているため脆性的な破壊は生じず,大変形時 にも耐力低下のない高靱性型に改善でき,変形 角 1/16rad.においても十分な耐震性能を発揮す ることが確認された。





試驗休夕	Q_y	Q _{max}	Ry	R _u
予えて	(kN)	(kN)	$(\times 10^{-2})$	$(\times 10^{-2})$
NR	— 263.6			0.67
S4.5₩	S4.5W 306.4		0.70	6.24
DS4.5B	307.0	349.0	0.76	6.22
DSmixB	298.2	347.4	0.70	6.23

降伏耐力 expQy, 最大耐力 expQmax, 降伏変形角 expRy, 終局変形角 expRu,

3.3 拘束効果および鉛直支持能力

補強試験体の高軸力下での拘束効果を調べる ために,試験体正面の鋼板表面に水平方向に貼 付したひずみゲージにより測定した鋼板のひず み分布を図-6 に示す。測定位置は図の縦軸に 示す。また,降伏ひずみを図中に示す。

> さらに、高軸力下での鉛直支持能力を 調べるために、変形角ごとの鉛直変位を 図-7 に示す。鉛直変位は上下スタブ間 に設置した変位計を用いて求めている。 なお、水平方向ひずみ及び鉛直変位とも に正の値は伸び、負の値は縮みを示す。

> 図-6 より,溶接鋼板と分割鋼板とも に変形角 1/50rad.に至っても,鋼板は降 伏せずに水平せん断力に対する十分な補 強効果が確認された。また,目視による 両側面の鋼板の膨らみは板厚 4.5 mmに比 べて,板厚 6.0 mmの方が小さかった。

> 図-7 より,補強試験体は各試験体と もに変形角 1/100rad.付近まで NR とほぼ 同様の鉛直変位分布を示した。その後, 補強鋼板の拘束効果の差により,補強試 験体は DSmixB, DS4.5B, S4.5W の順に

鉛直変位が大きくなった。鉛直変位が最大 の S4.5W でも、変形角-1/50rad.において軸 力を保持し、縮み量の平均値は 3.67 mmで、 柱内法高さの 1/330 程度にとどまった。 1200

(1) S4.5WとDS4.5Bの比較検討

水平方向ひずみ測定位置において,図-1 の断面図に示すように S4.5W では鋼板1枚 が力を負担するのに比べ, DS4.5B では鋼板 2枚分が摩擦接合により板厚9.0mmの鋼板と 同等の力を負担するため拘束効果が大きく なり、S4.5W より水平方向ひずみが半減し たと考えられる。さらに、S4.5W に比べ, DS4.5B の方が中央部のひずみが小さいの は,S4.5W では鋼板自体の上端から下端まで の伝達される応力が大きく、DS4.5Bでは水 平方向に分割されているので、上下の分割 鋼板どうしでの応力の伝達が小さいためと 考えられる。以上より、S4.5W の方が応力 状態が厳しく,水平方向ひずみが大きいと 考えられる。S4.5Wに比べ, DS4.5Bの方が 拘束効果が大きいため, 鋼板の膨らみが小 さく, 鉛直変位が小さいと推定される。

(2) DS4.5BとDSmixBの比較検討

ひずみ分布が同程度なので、板厚が厚く 力を負担する面積が大きくなる DSmixB の 柱上下端部の方が拘束効果が大きいと考え られる。DS4.5B に比べ、DSmixB の方が拘 束効果が大きいため、鋼板の膨らみが小さ く、鉛直変位が小さいと推定される。

3.4 水平耐力

式(1)のせん断耐力 *Q*_{su}の式に, 鋼板巻き補強 の等価帯筋量 *p*_{w2}・ σ_{wy2} を加えると,以下に示す 従来の鋼板巻き補強に対する評価式(3)となる。

 $Q_{su} = \left[0.053 p_t^{0.23} \left(18 + F_c \right) / \left\{ M / \left(Q \cdot d \right) + 0.12 \right\} \right]$

+0.85 (*p_w*·*σ_{wy}* + *p_{w2}*·*σ_{wy2}</sub> +0.1<i>σ*₀]·*b*·*j* (5) この評価式(3)に対する分割鋼板巻き補強の適 用性を検討した。その計算結果,せん断余裕度, 実験の最大耐力及び比較値(=実験値/計算値)の 一覧を**表-6**に,比較図を**図-8**に示す。



試験体名	$_{cal}Q_{bu}(kN)$	$_{cal}Q_{su}(kN)$	$_{cal}Q_{mu}\left(kN ight)$	せん断	余裕度	$_{exp}Q_{y}(kN)$	$_{exp}Q_{max}(kN)$	実験値	/計算値
NR	170.2	179.6	276.4	1/3	0.62		263.6	5/1	1.55
S4.5₩	/	348.2	279.6		1.25	306.4	344.8		1.23
DS4.5B	/	344.9	275.4	2/3	1.25	307.0	349.0	5/3	1.27
DSmixB		350.5	275.9		1.27	298.2	347.4		1.26
$\bigcirc \qquad \bigcirc \qquad$									

表-6 水平耐力およびせん断余裕度一覧

①_{cal}Q_{bu}:付着せん断耐力(計算値)(kN) ③_{cal}Q_{mu}:曲げせん断耐力(計算値)(kN)

分割鋼板巻き補強の計算結果及び実験結果は、 鋼板巻き補強の場合とほぼ同様の値となり、さらに補強試験体の比較値は1.23~1.27となった。

以上のことより,分割鋼板巻き補強の場合に も,分割を考慮せずに従来型の鋼板巻き補強に 対する評価式を適用しても,実験結果を安全側 に評価することを確認した。

3.5 変形性能

無補強は式(4)4,補強試験体は式(5)5)を用いて,

 ${}_{c} \alpha \cdot_{cal} Q_{mu} \ge_{cal} Q_{su} \mathcal{O} \succeq \stackrel{*}{\approx} {}_{cal} R_{u} = R_{250} \quad (4)$ ${}_{cal} R_{u} = \mu \cdot R_{v} = \mu \cdot (1/150) \quad (5)$

それぞれ終局変形角 $_{cal}R_u$ を求め,実験結果と比較することで評価式に対する適用性の検討を行った。ただし、現在のところ、高軸力下の柱の補強は研究資料が少ないため、文献 5)を参考に SRC 耐震改修設計指針と同様に、終局塑性率 μ 及び降伏部材角 R_y より終局変形角を求めた。なお、式(4)中の $_c \alpha$ は柱の強度寄与係数を表す。 終局変形角の実験値 $_{exp}R_u$ 、計算値 $_{cal}R_u$ 及び比較値(=実験値/計算値)を**表**-7 に示す。

実験結果は安全側に分布していることが確認 できるが、補強試験体については、比較値(=実 験値/計算値)が 5.14~6.36 となり、はるかに大 きな値となった。また、分割鋼板巻き補強と従 来型の鋼板巻き補強の違い、及び分割鋼板巻き 補強において鋼板厚さを変えたことによる終局 変形角の有意な差は無い。

表-7	実験結果	と終局変形	角計算結果-	-覧
-----	------	-------	--------	----

試験体名	計算に用いた 鋼板厚さ(mm)	$expR_u$ (×10 ⁻²)	$^{cal}R_u$ (×10 ⁻²)	実験値/計算値 (_{exp} Ru/ _{cal} Ru)
NR	—	0.67	0.40	1.66
S4.5W	4.5	6.24	0.98	6.36
DS4.5B	4.5	6.22	1.01	6.16
DSmivB	4.5	6.23	1.10	5.66
DOULTED	6.0	6.23	1.21	5.14

②_{cal}Q_{su}: せん断耐力(計算値) (kN) ④_{exp}Q_y: 降伏耐力(実験値) (kN) ⑤_{exp}Q_{max}: 最大耐力(実験値) (kN)

4. まとめ

分割鋼板巻き補強を施した RC 柱に対して, 高軸力下において正負漸増繰返し載荷実験を実 施し,以下の知見を得た。

- 1)分割鋼板巻き補強は従来の溶接鋼板巻き補強 と同等に、高軸力下においても十分な鉛直支 持能力を保持し、付着割裂により脆性破壊を 起こす柱を高靱性型へ改善できた。
- 2)分割鋼板巻き補強において、柱上下端部を厚 く補強したことによる耐震性能上の有意な違 いは確認されなかった。しかし、水平加力に よる柱上下端部の損傷の進行が鉛直変位増大 に寄与するため、板厚が厚くなると拘束効果 は大きくなり、鉛直変位の増大を小さくする ことがわかった。
- 3)分割の有無にかかわらず鋼板巻き補強した柱の水平耐力は、既往の評価式で安全側に評価された。一方、高軸力下の補強後における変形性能は、今後更なる検討が必要である。

謝辞:本研究の実験に際し,多大な協力を得た 広島大学耐震工学研究室および広島工業大学佐 藤ゼミの皆様に,謝意を表します。

参考文献

- 1)日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終 局強度型耐震設計指針・同解説
- 2)松野一成,角徹三,田村冬樹:連続繊維シートで補強された RC 部材の付着割裂破壊時の せん断耐力,コンクリート工学年次論文報告 集,Vol.24,No.2,pp1255-1260,2002
- 3)(財)日本建築防災協会:既存鉄筋コンクリート 造建築物の耐震改修設計指針同解説 2001 年
- 4)(財)日本建築防災協会:既存鉄筋コンクリー ト造建築物の耐震診断基準同解説 2001 年
- 5)(財)日本建築防災協会:既存鉄骨鉄筋コンク リート造建築物の耐震改修設計指針同解説 1998 年