論文 鋼板巻立て補強を行ったせん断スパン比の小さい鉄筋コンクリート 部材の耐震性能に関する実験的研究

醍醐 宏治*1·水野 光一朗*2·小林 將志*3

要旨:鉄筋コンクリートラーメン高架橋柱の耐震補強では,鋼板巻立て補強工法が広く用いられている。しかし, せん断スパン比が小さい部材に対して鋼板巻立て補強を行った鉄筋コンクリート柱の耐震性能に関する研究は少なく, 十分な知見が得られていない。そこで,本研究では,鉄筋コンクリート柱試験体を用いて静的正負交番載荷試験を行い,鋼板巻立て補強を行ったせん断スパン比の小さい鉄筋コンクリート部材における耐震性能について検討を行った。その結果,せん断スパン比が小さい部材においても曲げせん断耐力比が 1.5 程度までは補強鋼材量に応じて変形性能が向上することを確認した。

キーワード:鉄筋コンクリート,せん断スパン比,鋼板巻立て補強,変形性能,静的正負交番載荷試験

1. はじめに

兵庫県南部地震によるコンクリート構造物の甚大な 被害を契機として、既設構造物の耐震補強が進められて いる。鉄筋コンクリート(以下, RC という) ラーメン 高架橋においては、施工性や経済性に優れる鋼板巻立て 補強が広く用いられている。鋼板巻立て補強を行った柱 の耐震性能に関する研究は、これまで数多く行われてき ているが、それらの多くはせん断力を受ける部材の支点 から載荷点までの距離(以下, せん断スパン a という) と有効高さdの比であるせん断スパン比(以下, a/dとい う)が2.0程度以上のものがほとんどである。そのため、 盛土構造から高架橋に構造が変化する取り付け部の柱や, ラーメン橋台の桁受け部の柱など, a/d が 1.0 程度と小さ い RC 部材に鋼板巻立て補強を行った場合の耐震性能に 関する研究事例 1)が少なく,破壊形態の判定方法や補強 鋼板量の変形性能への寄与度などが十分に解明されてい ないのが現状である。しかしながら、補強後の RC 部材 の耐震性能を適切に評価することは、合理的な補強設計 とするために不可欠といえる。

以上を背景に、本研究では、鋼板巻立て補強を行った a/dの小さいRC柱試験体を用いて静的正負交番載荷試験 を行い, a/d が小さい柱部材の損傷の進展過程を観察し, 変形特性を把握する。また, a/d が小さい部材に対する鋼 板巻立て補強の破壊形態の判定方法や変形性能について 考察を行う。

2. 実験の概要

1 試験体の諸元

試験体の諸元および形状を表-1および図-1に示 す。試験体は、断面寸法が450mm×450mm,a/d=1.0の RC柱であり、補強鋼板厚をパラメータとして、5体を製 作した。B-1 試験体は無補強のまま載荷を行った。SJシ リーズは鋼板巻立て補強を行い、補強鋼板と柱く体との 間に充填する充填材の材料をそれぞれパラメータとした。 補強鋼板厚は2.3mm~12mmとし、コの字形に曲げ加工 した補強鋼板の短辺上において溶接して閉合した。補強 鋼板は曲げ耐力に寄与しないよう、柱基部から高さ方向 に30mmの隙間を空けて設置した。鋼板巻立て補強を行 ったいずれの試験体も、柱く体を構築した後に充填材の 充填を行った。SJ-1 試験体はエポキシ樹脂を、SJ-3~5 試験体は、モルタルを充填材としてく体と補強鋼板の間 に充填した。充填材の厚さはSJ-1 試験体が3mm、SJ-3

試験体 名称	せん断 スパン a[mm]	せん断 スパン 比 a/d	引張 鉄筋 (最外縁)	帯鉄筋 (鉄筋径・間隔 [mm]・組数)	補強 鋼板厚 t[mm]	充填材 材料	引張 鉄筋比 p _t [%]	帯 鉄筋比 p _w [%]	柱コンク リート 圧縮強度 [N/mm ²]	充填材 圧縮強度 [N/mm ²]	柱の 降伏荷重 (計算値) P _{ycal} [kN]	曲げせん 断耐力比 V _y /V _{mu}
B-1	400	1.0	D22-6	D10@100-1 組	—	—	1.29	0.32	25.4	_	1023.8	0.69
SJ-1	400	1.0	D22-6	D10@100-1 組	12	エポキシ 樹脂	1.29	0.32	22.7		1014.6	2.39
SJ-3	400	1.0	D22-6	D10@100-1 組	12	モルタル	1.29	0.32	25.6	4.3	1013.6	2.52
SJ-4	400	1.0	D22-6	D10@100-1 組	4.5	モルタル	1.29	0.32	25.0	4.4	946.8	1.47
SJ-5	400	1.0	D22-6	D10@100-1 組	2.3	モルタル	1.29	0.32	24.1	6.3	1060.1	1.12
*1 車日本旅客鉄道(株) 構造技術センター 修(工) (正会員)												

表-1 試験体の諸元

*1 東日本旅客鉄道(株)
*2 東日本旅客鉄道(株)
*3 東日本旅客鉄道(株)

構造技術センター 博(工)

(工) (正会員)

▶ 「旅客鉄道(株) 構造技術センター 課長 工修 (正会員)

~5 試験体が 20mm とした。それぞれに使用したコンク リートおよび充填モルタルの圧縮強度試験の結果を表-1に、鋼材の引張試験の結果を表-2に示す。なお、表 -1の曲げせん断耐力比 V_y/V_{mu} の算出においては、 V_c 、 $V_s と補強鋼板が負担するせん断耐力 <math>V_p$ の和として $V_y を$ 算出した。 V_c は a/d の効果および側鉄筋の影響を考慮し て算定し²⁾、 V_p は帯鉄筋に換算して算定を行った。

2.2 載荷方法および計測項目

載荷装置の概要を図-2に示す。水平方向に載荷した際の柱の軸方向鉄筋のひずみを計測し、軸方向鉄筋が初降伏した時の載荷点位置の水平変位を降伏変位δ'yとして、δ'yの整数倍で変位制御にて繰返し漸増載荷を行った。各サイクルでの繰返し回数は3回とした。軸方向圧縮力は、一般の鉄道 RC 橋脚における死荷重の軸方向圧縮力を想定^{例えば3),4)}し、0.98N/mm²(198.5kN)と一定とした。

計測項目は、水平変位、軸方向鉄筋、帯鉄筋、補強鋼 板のひずみ、軸方向鉄筋の抜出し量、ひび割れ状況等と した。軸方向鉄筋のひずみゲージは、複数の軸方向鉄筋 に分けて貼付することにより、付着力が低下しないよう に配慮した。補強鋼板のひずみゲージは柱基部から 150mm,250mmの高さに3軸ゲージを貼付け、水平方向、 鉛直方向,45°方向の鋼板ひずみについて計測を行った。 軸方向鉄筋の抜出しは、柱基部の位置の軸方向鉄筋に計 測用ワイヤーを固定し、ワイヤーをステンレス管とゴム チューブで防護した。

3. 実験結果

3.1 試験体の損傷状況

各試験体は,水平方向の載荷により損傷が進展した。 それぞれの損傷の進展状況について以下に記す。

(1)無補強試験体(B-1)

B-1 試験体における最外縁鉄筋が降伏する Y 点および 降伏荷重を維持する最大変位時である N 点での損傷状況 を写真-1および写真-2に示す。なお, 各点の状況は, それぞれの状態に到達する載荷ステップの終了時の写真 を掲載している。

水平方向の載荷により,まず,柱基部とフーチング上 面の境界部に水平ひび割れが生じた。そして,載荷点か ら圧縮側の柱基部の対角ラインに沿う斜めひび割れが生 じた。その後,荷重の増加とともに,載荷点下側に新た に水平および斜めひび割れを生じ,正側の載荷において, 斜めひび割れと交差する付近で帯鉄筋が降伏した。さら に荷重が大きくなると,斜めひび割れが伸展し,柱基部 の軸方向鉄筋が降伏した。繰り返し載荷により,斜めひ び割れが若干進展したものの,本数やひび割れ幅につい ては大きな変化はなかった。



図-1 試験体の断面(SJ-3)

表-2 鋼材の材料試験の結果

試験体 名称	軸方向鉄筋 降伏強度 f _{sty} [N/mm ²]	帯鉄筋 降伏強度 f _{swy} [N/mm ²]	補強鋼板 降伏強度 f _{spy} [N/mm ²]		
B-1	376	404			
SJ-1	376	404	266		
SJ-3	371	388	279		
SJ-4	392	407	280		
SJ-5	392	407	375		



図-2 載荷装置の概要

2δ'_yのサイクルでは,対角ライン付近の斜めひび割れ の本数がさらに増加するとともに,ひび割れ幅が拡大し た。また,柱基部付近で,コンクリート表面が剥離する ような微細ひび割れが発生した。なお,2δ'_yの1回目の 正側載荷が最大荷重となった。繰返し載荷により,斜め ひび割れ幅が顕著に大きくなり,斜めひび割れが交差す る箇所で,かぶりコンクリートの剥離を生じた。

その後、交番載荷により、斜めひび割れに沿ってかぶ りコンクリートの剥落を生じた。載荷中、対角ラインに 沿う斜めひび割れが大きく発達して広がったが、さらに 載荷が進んでも部材全体がずれるような挙動とはならな かった。また、曲げ変形が支配的な a/d の大きな部材に 生じるような明確な回転中心は確認し難い状況であった。 斜めひび割れに沿って部材の損傷が進展し、荷重が低下 した。その結果、軸方向鉄筋の顕著な変形は見られず、





写真-2 N 点での状況(B-1)



写真-3 載荷終了後の状況 (SJ-3)

軸方向圧縮力を保持している状況であった。

帯鉄筋およびせん断補強鋼材が軸方向鉄筋に先行し て降伏した場合の破壊形態を「せん断破壊型」,軸方向鉄 筋が先行して降伏した場合の破壊形態を「曲げ破壊型」 とすると, B-1 試験体はせん断破壊型であった。

載荷終了後,軸方向鉄筋の内側のコアコンクリートの 観察を行ったところ,斜めひび割れが貫通し,大きなひ び割れを生じていた。斜めひび割れが交差する範囲の外 側の一部のコアコンクリートが紛体化していたものの, コアコンクリートの大部分は軸方向鉄筋の内側に保持さ れていた。

(2) 鋼板巻立て補強試験体 (SJ-1, SJ-3, SJ-4, SJ-5) いずれの試験体も,水平方向の載荷により,まず柱基 部とフーチング上面の境界部に水平ひび割れが生じた。 荷重がさらに大きくなると,SJ-1を除く3体の試験体で は,帯鉄筋が降伏し,その後に柱基部の軸方向鉄筋が降 伏した。

28'yのサイクルでは、柱基部付近で、コンクリート表面が剥離するような微細ひび割れが発生した。なお、いずれの試験体も、28'yの正側の載荷が最大荷重となった。

その後,鋼板の下端部からコンクリート片が漏出し, 徐々に荷重が低下した。

補強鋼板は,いずれの試験体においても軸方向鉄筋の 降伏後に補強前面および背面側ともに水平方向が降伏し た。

破壊形態は、いずれの試験体も軸方向鉄筋が補強鋼板 よりも先行して降伏したことから、曲げ破壊型であった。

載荷終了後,補強鋼板を撤去し,内部の損傷状況の確認を行った。SJ-3 試験体における補強鋼板撤去後の柱く体の損傷状況を写真-3 に示す。いずれの試験体も,軸方向鉄筋の顕著な変形は見られず,軸方向圧縮力を保持している状況であった。また,軸方向鉄筋の内側のコアコンクリートは,斜めひび割れが貫通していた。SJ-1,SJ-3 試験体については,斜めひび割れが交差する範囲の外側の一部のコアコンクリートが紛体化していたものの,コアコンクリートの欠損は顕著ではなかった。SJ-4,SJ-5試験体については,特に斜めひび割れが交差する箇所や





斜めひび割れに沿ってコアコンクリートが紛体化していた。

3.2 荷重と水平変位の関係

各試験体の載荷点位置の荷重と水平変位の関係を図 -3に示す。材料特性値のばらつきの影響をなくすため、 載荷点荷重は、柱基部断面の最外縁鉄筋が降伏するとき の水平荷重の計算値(Pycal)で除して単位化を行った。 各試験体のPycalを表-1に併せて示す。

各試験体ともに、軸方向鉄筋が降伏し、最大の水平抵 抗荷重に到達した後に、部材の水平変位が降伏荷重を維 持する最大の変位に達するという履歴となることがわか る。また、曲げせん断耐力比が大きくなるに従い、荷重 の低下が緩やかになる傾向を示した。曲げせん断耐力比 が同程度であり、充填材が異なる SJ-1 と SJ-3 を比較す ると、ほぼ同様に荷重が低下しており、充填材による影 響は確認されなかった。

鋼板巻立て補強を行った試験体が曲げ降伏する際の 載荷点荷重の計算値により発生する水平変位の実験値 (以降,降伏変位 δ_{yexp})と曲げせん断耐力比 V_{y}/V_{mu} の 関係を図-4に示す。曲げせん断耐力比 V_{y}/V_{mu} が大きく なるに従い,降伏変位 δ_{yexp} が若干小さくなる傾向にある ことがわかる。これは、補強鋼板により剛性が大きくな り、また a/dが小さい部材において降伏変位に占める割 合が大きいとされるせん断変形⁵⁾を抑制する効果が補強



鋼材量に応じて大きくなるため、降伏変位に差が生じた ものと考えられる。また、同程度の曲げせん断耐力比を 有する SJ-1 と SJ-3 を比較すると、SJ-1 の方が降伏変位 が小さい。これは、SJ-1 の充填材に用いたエポキシ樹脂 が,柱く体と補強鋼板を接着することで付着が生じ、斜め ひび割れ幅の拡大が抑制されたためと推察される。

3.3 部材のじん性率

各試験体が降伏荷重の計算値を維持できる水平変位の実験値 δ_{nexp} と降伏変位 δ_{yexp} との比であるじん性率 μ を算出し、各試験体のじん性率 μ と曲げせん断耐力比の関係を図-5に示した。曲げせん断耐力比の算出における V_c の算定には、a/d の効果を考慮する式²⁾を用いた。

図-5より,鋼板巻立て補強を行うことで,じん性率 が大きくなる傾向にあることがわかる。また,補強鋼材 量に応じて,じん性率が高くなる傾向を示した。

4. 破壊形態の判定

RC 部材の破壊形態の判定は,部材の曲げせん断耐力 比により行われ,その判定の基準値は 1.0 が適用される ことが一般的である⁷⁾。a/d が小さい RC 柱部材のせん断 耐力については,算定方法の提案式がいくつか提案され ている^{2),8)}。本稿では,トラス理論に基づいて RC 部材 のせん断耐力を算出することとし,せん断補強鋼材を用 いないコンクリート棒部材が負担するせん断耐力の算出 方法について,設計実務で用いられることの多い a/d の 効果を考慮しないせん断耐力式⁸⁾と, a/d の効果を考慮し たせん断耐力式²⁾により算出し, a/d の効果が破壊形態の



判定に与える影響について検討を行った。a/d=1.0程度の 部材において、せん断補強鋼材が負担するせん断耐力の 算定方法は明確にされていないため、本稿ではトラス理 論により算定を行った。また、補強鋼板は帯鉄筋に換算 してせん断耐力を算定した。なお、本章における破壊形 態は、「せん断破壊型」と「曲げ破壊型」の2種類に分類 することとし、曲げせん断耐力比 $V_y/V_{mu} < 1.0$ の場合を「せ ん断破壊型」、 $V_y/V_{mu} \ge 1.0$ の場合を「曲げ破壊型」と判 定した。

各試験体の破壊形態の判定結果を表-3に示す。a/d の効果を考慮しない方法では、SJ-5 がせん断破壊型と判 定されており、実際の破壊形態を適切に推定できていな いと考えられる。一方で,a/d の効果を考慮する方法では、 全ての試験体に対して、実験結果を表現できる結果とな った。この結果は、一般に RC 部材では a/d が小さくな るに従ってせん断耐力が大きくなるが、a/d の効果を考慮 しない方法では、部材のせん断耐力を過小評価し、破壊 形態を適切に判定できないことを示している。

以上より,鋼板巻立て補強を行った a/d の小さい部材 について, a/d の影響を考慮した V_cの算定式を用いるこ とにより,本稿の実験の破壊形態を説明できることがわ かった。

5. 変形性能の評価

5.1 変形性能の評価方法

RC 部材の変形性能の評価方法は、一般にじん性率に よる方法と部材の回転角による方法がある。本章では、 鋼板巻立て補強を行った a/d の小さい柱の変形性能の評

試験体 名称	実験結果による 破壊判定	曲げせん断耐力比 V _y /V _{mu} (a/d 考慮)	破壊判定 (a/d 考慮)	曲げせん断耐力比 V _y /V _{mu} (a/d 非考慮)	破壊判定 (a/d 非考慮)
B-1	せん断破壊型	0.69	せん断破壊型	0.30	せん断破壊型
SJ-1	曲げ破壊型	2.39	曲げ破壊型	1.86	曲げ破壊型
SJ-3	曲げ破壊型	2.52	曲げ破壊型	2.12	曲げ破壊型
SJ-4	曲げ破壊型	1.47	曲げ破壊型	1.05	曲げ破壊型
SJ-5	曲げ破壊型	1.12	曲げ破壊型	0.74	せん断破壊型

表-3 各試験体の破壊形態の判定結果

価を回転角により行う。

RC 部材のじん性補強を行った場合,N 点における回 転角 θ_n は、補強前と比較して大きくなる。一般に、**RC** 部材の終局回転角 θ_n は、以下のように算定される⁹。

$$\theta_{n} = \theta_{n0} + \theta_{n1} \qquad (1)$$

ここに,

θ_{n0}:N点におけるく体変形による回転角

θ_{nl}:N点における部材接合部からの軸方向鉄筋の伸出しによる部材端部の回転角

本章では、 θ_{n0} により変形性能の評価を行った。 a/dが大きい鋼板巻立て補強を行った RC部材における θ_{n0} は、式(2)により評価できる⁹(**図**-6参照)。

 $\theta_{n0} = \delta_{n0}/a$

(2)

 $\delta_{n0} = \delta_{nb} + \delta_{np}(3)$

ここに,

δ_{n0}: N 点におけるく体変形

- δ_{nb}: 塑性ヒンジ部以外における曲げ変形による
 変位
- θ m: 塑性ヒンジ部におけるく体の変形

a/d の大きい部材においては,曲げ変形に対してせん断 変形が微小であるため、式(2)の θ_{n0} の算定においてはせ ん断変形の影響は無視されている。しかし、a/d の小さい 部材においては、水平変位に占めるせん断変形の割合が 比較的大きく⁵,また今回試験を行った a/d=1.0 の部材に おいては、塑性ヒンジ部と塑性ヒンジ部以外との区別が 明確でない。以上のことから、今回対象とする鋼板巻立 て補強を行った a/d が小さい部材における θ_{n0} の実験値 θ_{n0exp} は式(4)により評価することとした¹⁰(**図**-7参照)。

 $\theta_{n0exp} = \theta_{nexp} - \theta_{n1exp}(4)$

ここに,

θ_{nexp}: N点におけるく体変形による回転角の実験
 値

 $\theta_{\text{nexp}} = \delta_{\text{nexp}} / a$ (5)

- δ_{nexp}:降伏荷重の計算値を維持する最大の
 水平変位の実験値
- θ nlexp: N 点における部材接合部からの軸方向鉄筋の抜出しによる部材端部の回転角の実験値

$$\theta_{n1exp} = (6-3N'_{d}/N'_{b}) \cdot \theta_{y1exp} (6)$$

N'_d:作用軸力(kN)

N'_b: 釣合い軸力で, 軸方向鉄筋の降伏と同 時にコンクリートの圧縮縁のひずみ が 0.0035 となる場合の軸力(kN)

θ_{ylexp}:Y 点における軸方向鉄筋の伸出し



図-6 a/d が大きい部材における一般的な 終局変位の考え方







図-8 く体変形による回転角と曲げせん断 耐力比の関係

による回転角

$$\theta_{y1exp} = \Delta L_{yexp} / (d-x_y)$$
 (7)

△L_{uexp}:Y点における部材接合部からの軸 方向鉄筋の抜出し量
x_v:Y点における中立軸位置

5.2 変形性能の評価

図-8にN点におけるく体変形による回転角 θ_{n0exp} と 曲げせん断耐力比 $V_{y}V_{mu}$ の関係を示す。これより, $V_{y}V_{mu}$ =1.5 程度までは、曲げせん断耐力比が大きくなる に従い、く体変形による回転角 θ_{n0exp} が大きくなる傾向 にあることがわかる。また、 $V_{y}V_{mu}$ >1.5 程度では、 θ_{n0exp} の増加が緩やかとなっていることがわかる。これより、 a/dが小さいRC部材においても鋼板巻立て補強により変 形性能を向上させることができると考えられ、 $V_{y}V_{mu}$ が 1.5 程度以上となると変形性能の伸びが緩やかになる傾 向であるといえる。また、曲げせん断耐力比が同程度で ある SJ-1 と SJ-3 を比較すると、く体変形による回転角 θ_{n0exp} に大きな差は見られず、充填材による鋼板巻立て 補強の補強効果は小さい傾向にあることが確認された。

6. まとめ

RC 柱部材を模擬した試験体を用いて静的正負交番載 荷試験を行い,鋼板巻立て補強を行ったせん断スパン比 が小さい RC 部材の耐震性能について考察を行った。本 実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 柱く体と補強鋼板の間の充填材にエポキシ樹脂系 接着剤を用いた場合、モルタルを充填した場合より も降伏変位が小さくなる傾向であった。一方で、終 局変位については、充填材の種類による差異は認め られなかった。
- (2) 部材の破壊判定では、せん断補強鋼材を用いないコンクリート棒部材が負担するせん断耐力 V_cの算出において、a/dの効果を考慮した算定式を用いることにより精度よく判定できる。
- (3) 曲げせん断耐力比 V_y/V_{mu}が大きくなるに従い, N 点 におけるく体変形による回転角が大きくなる傾向 であった。これより, a/d の小さい部材においても鋼 板巻立て補強により変形性能を向上させることが できる。また, V_y/V_{mu}が 1.5 程度以上になると, く 体変形による回転角の増加率が緩やかとなる傾向 を示した。

参考文献

- 岡本大,松枝修平,谷村幸裕,田所敏弥:鋼板巻立 てによるせん断スパン比の小さいRC柱の変形性能 向上方法,鉄道総研報告,vol.26,No.4,pp11-16, 2012.4
- 運輸省鉄道局監修,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), 丸善, 1992.10
- 石橋忠良,吉野伸一:鉄筋コンクリート橋脚の地震
 時変形性能に関する研究,土木学会論文集,第390
 号,V-8, pp.57-66, 1988.2
- 石橋忠良、中山弥須夫,津吉毅:帯鉄筋を配置して いない RC 柱の地震時破壊形態,土木学会論文集, N0.676 / V-51, pp.13-18, 2001.5
- 5) 水野光一朗,小林將志: せん断スパン比の小さい鉄 筋コンクリート部材の変形性能に関する実験的研 究, コンクリート工学年次論文報告集, vol.35, No.2, pp781-786, 2013
- 6) 町田篤彦,睦好宏史,豊田和彦:鉄筋コンクリート 部材の塑性変形能定量化に関する研究,土木学会論 文集,第378号, V-6, pp.203-212, 1987.2
- 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(耐震設計),丸善, 1999.10
- 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), 丸善,2004.4
- 渡邊忠朋,谷村幸裕,瀧口将志,佐藤勉:鉄筋コン クリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定 手法,土木学会論文集,No.683,V-52,pp.31-45, 2001.8
- 前田友章,岡本大,谷村幸裕:鋼板巻立て補強した 鉄筋コンクリート柱の変形性能算定手法,コンクリ ート工学年次論文集,vol.31, No.2, 2009.7