

論文 腐食範囲を考慮した鋼板巻き補強柱の耐震性能に関する実験的検討

飯塚 大介*1・平山 武志*1・渡部 太郎*2

要旨：鋼板巻き耐震補強工法を用いた高架橋柱では、経年劣化により鋼板の局所的な腐食が発生している。現在、再巻き立て等の対策工を実施しており、地表面での掘削等の膨大な手間を要することが問題となっている。そこで、本稿では、腐食範囲を考慮した鋼板巻き耐震補強柱の耐震性能を実験的に確認し、対策工の要否を検討するため、水平交番載荷試験を行った。その結果、本実験の範囲内においては、断面寸法 400×400mm、軸方向鉄筋に D19 を用いた場合、鋼板腐食を模擬した鋼板補強省略範囲が柱基部から 1D 以内にあり、その高さが 0.35D 以下であれば、じん性率 10 程度以上の変形性能を有していることを確認した。

キーワード：鋼板巻き耐震補強工法、鋼板、腐食、RC ラーメン高架橋

1. はじめに

当社における RC ラーメン高架橋では、柱のせん断破壊を防ぐため、既設 RC 柱の周囲を鋼板で巻き立てて、柱の変形性能を向上させる鋼板巻き耐震補強工法(以下、本工法)が多くの箇所で行われている。本工法を用いた高架橋柱では、経年劣化により地表面付近で鋼板の局所的な腐食や欠損が生じており、耐震性能の低下が懸念されている。現在、柱毎に鋼板厚を測定し、図-1 に示すように再巻き立て等の対策工を実施しているが、地表面での測定と対策工は掘削が必要となり、膨大な手間を要することが問題となっている。飯塚ら¹⁾は鋼板の腐食範囲が 1D 内外にある場合に区分して水平交番載荷試験を行い、鋼板補強を省略した範囲とその柱基部からの位置が柱の変形性能に影響を与えることを確認したが、腐食範囲と変形性能の明確な関係性について把握できてい

ない。そこで、本稿では、鋼板巻き耐震補強柱の腐食範囲と変形性能の関係を実験的に確認し、対策工の要否に関する基礎的検討を行った。

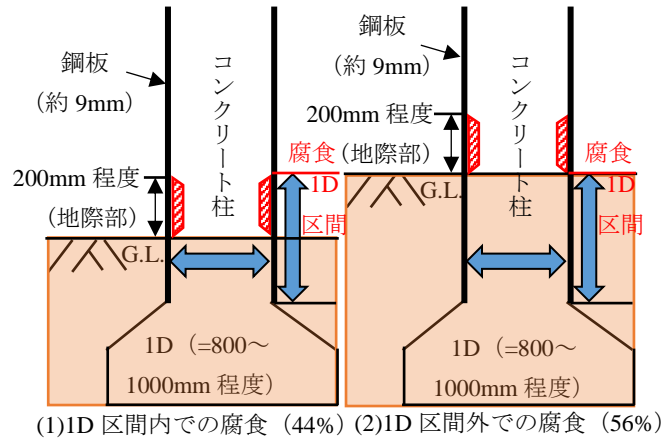
2. 鋼板腐食範囲の現地調査

当社管内における約 800 本の高架橋柱にて鋼板の腐食範囲が柱基部から 1D (D:柱幅) の区間に入っているか否かを確認する現地調査を実施した。その結果、1D 区間内と 1D 区間外の腐食範囲となっている比率が 44:56 とほぼ同等の割合であることが分かった。

図-2 に示すように、1D 区間内と 1D 区間外のいずれに鋼板腐食箇所がある場合においても、地表面から 200mm 程度の高さの範囲の地際部で腐食が発生していた。そこで、鋼板の腐食が 1D 内外にある場合に区分して水平交番載荷試験を行うとともに、腐食範囲をパラメ



図-1 鋼板巻き補強柱の腐食部と対策工



※()内の比率は現地調査での結果を記載
図-2 腐食発生箇所の概念図

*1 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター テクニカルセンター 研究員 修(工) (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター テクニカルセンター 主幹研究員 博(工) (正会員)

ータとした実験を行い、腐食範囲と変形性能の関係を実験的に確認することとした。

3. 実験概要

各試験体の概要図と諸元をそれぞれ図-3、表-1に示

す。ここで、表-1中の V_u はせん断耐力、 V_{mu} は最大せん断力であり、 V_{mu} は曲げ耐力を M_u 、せん断スパンを a として、式(1)で算定した。

$$V_{mu} = M_u / a \quad (1)$$

交番載荷試験は、菅野ら²⁾を参考に、圧縮応力 1.0N/mm^2

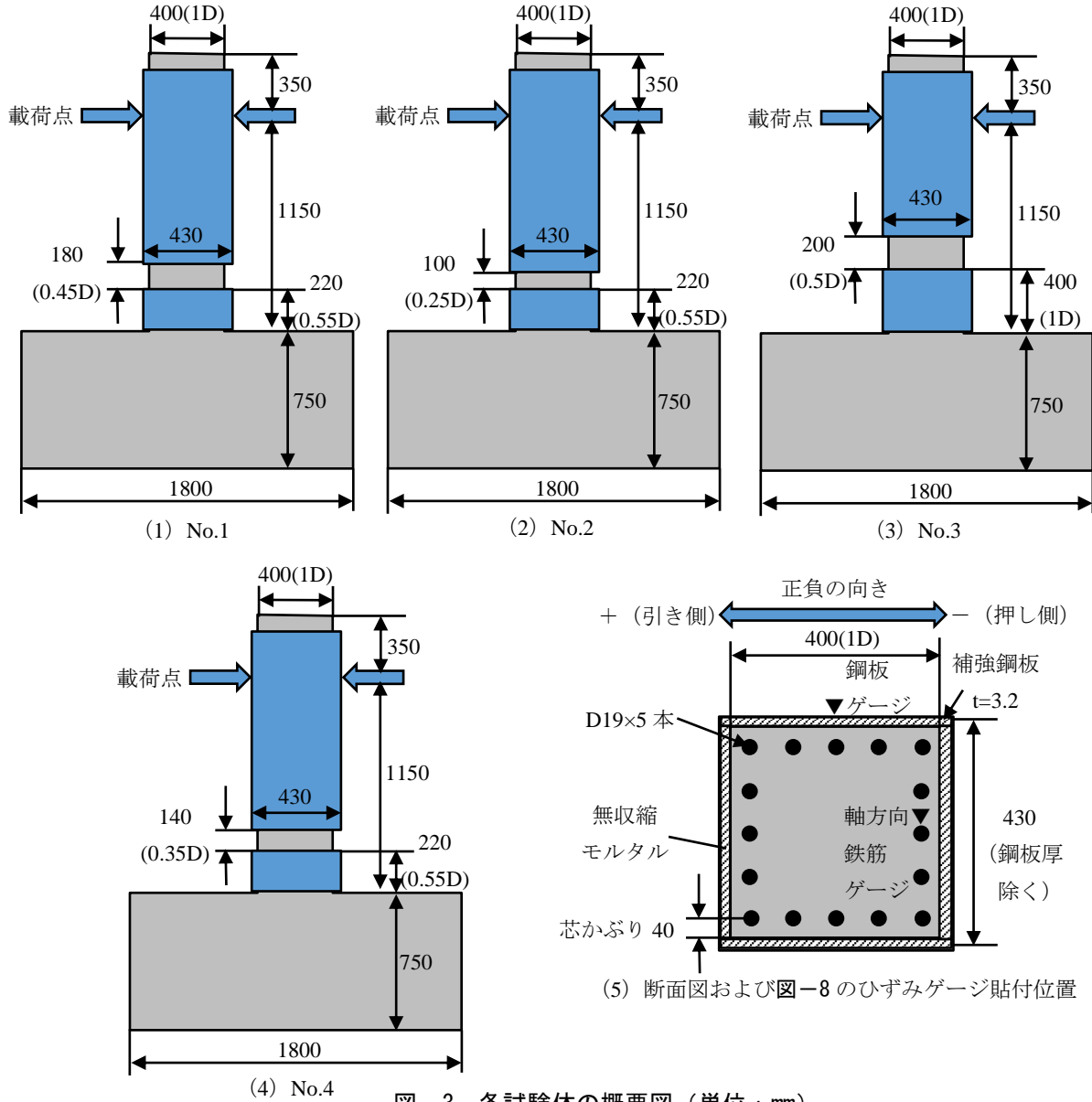


表-1 試験体諸元

試験体 No.	柱基部から鋼板無しとなる範囲までの高さ(mm)	鋼板無し範囲(mm)	コンクリート強度 (N/mm ²)	軸方向鉄筋降伏強度(N/mm ²)	曲げせん断耐力比 (V_u/V_{mu})	
					鋼板補強範囲	鋼板無し範囲
1	220(0.55D)	180(0.45D)	25.8	378.9	2.89	0.65
2		100(0.25D)	33.2	389.6	2.95	0.67
3	400(1.0D)	200(0.50D)	28.9	387.8	2.93	0.65
4	220(0.55D)	140(0.35D)	32.7	379.9	3.69	0.68

を載荷した状態で柱頭部付近を載荷点とした正負水平交番載荷を行った。主鉄筋が降伏するまで荷重制御で1サイクルの載荷 ($1\delta_y$) を実施し、その後は降伏変位の整数倍の変位を変位制御により各1サイクルずつ交番載荷を行った。なお、RC柱には帯鉄筋を配置せず、鋼板の腐食範囲を安全側に模擬し鋼板が無い状態で実験を行った。No.1, 2, 4試験体は、柱基部から1D区間内で腐食が発生している状態を想定し、柱基部から220mm (約0.5D) 上からそれぞれ180mm (0.45D), 100mm (0.25D), 140mm

(0.35D) の範囲を鋼板無しとした。No.3は、柱基部から1D区間外で腐食が発生している状態を想定し、柱基部から400mm (1D) 上から200mm (0.5D) の範囲を鋼板無しとした。全ての試験体において、柱断面寸法を400mm×400mm、せん断スパンを1150mm、せん断スパン比を3.19、引張鉄筋をD19×5本、引張鉄筋比を0.99%、鋼板厚を3.2mm、鋼板の強度をSS400、無収縮モルタルの強度を40N/mm²以上に設定している。

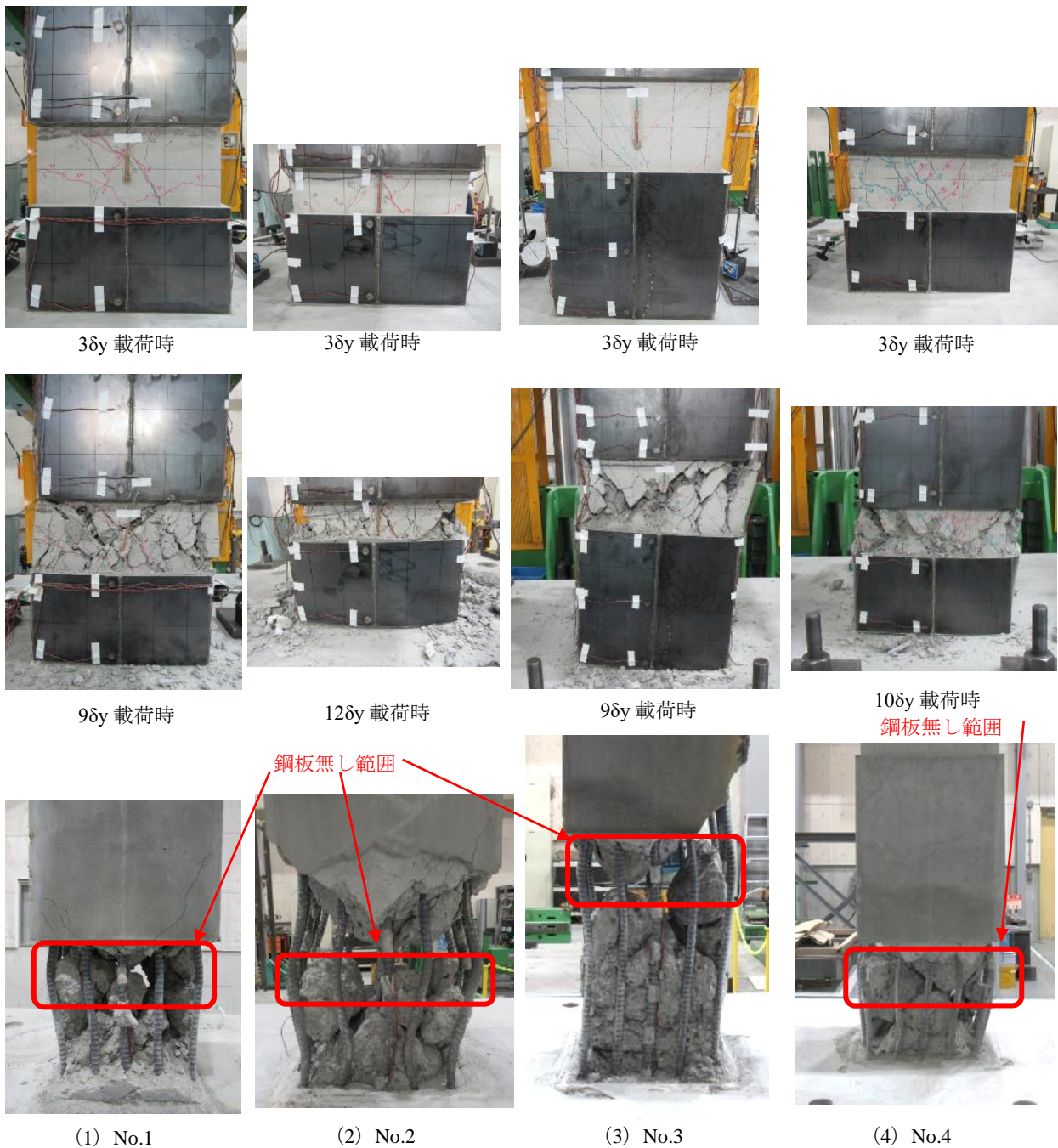


図-4 各試験体の損傷状況 (上・中段: 載荷中, 下段: 載荷終了後 (鋼板撤去後))

4. 実験結果

4.1 損傷状況

図-4に各試験体の損傷状況を示す。全ての試験体において、 $1\delta_y$ 載荷時に鋼板が無い区間において引張縁から曲げひび割れが発生し、載荷変位が大きくなるにつれて、鋼板が無い範囲においてX字状の斜めひび割れが進展していった。No.1, 3においては $9\delta_y$, No.2では $12\delta_y$, No.4では $10\delta_y$ 載荷時において鋼板が無い区間での損傷が激しくなった。載荷試験後に鋼板を撤去し、内部のコンクリートの状態を確認したところ、1Dより上部の鋼板補強範囲のコンクリートはひび割れもなく健全な状態を保持していた。また、鋼板が無い範囲では、主鉄筋内部のコアコンクリートにX字状の斜め破壊面が交差して

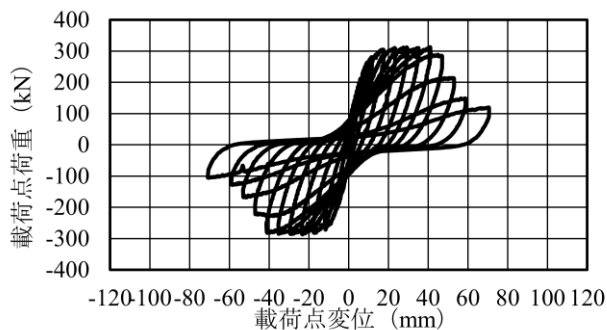
おり、鉄筋のはらみ出しが見られた。一方、鋼板が無い範囲より柱基部側の鋼板補強範囲においては、鋼板が無い範囲に比べて損傷程度は比較的小さかった。

4.2 耐力と荷重-変位関係, じん性率

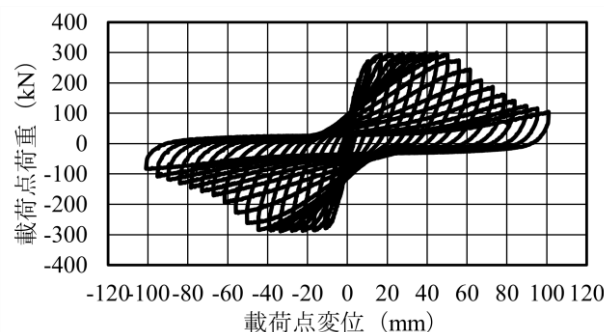
実験結果の一覧を表-2に示す。また、各試験体の水平荷重と載荷点変位との関係を図-5に示す。P_{ye}, P_{yc}, P_{maxe}, P_{maxc}はそれぞれ降伏荷重の実験値, 計算値, 最大荷重の実験値, 計算値であり、全ての試験体について実験値と計算値の比率は1.01から1.17までの間となっている。No.1, 3は終局変位(降伏荷重を下回らない最大変位)を降伏変位で除したじん性率がそれぞれ8.7, 9.3となり、既往の文献³⁾より換算弾性応答加速度1500galが確保できる変形性能に相当する、じん性率10未満とな

表-2 実験結果

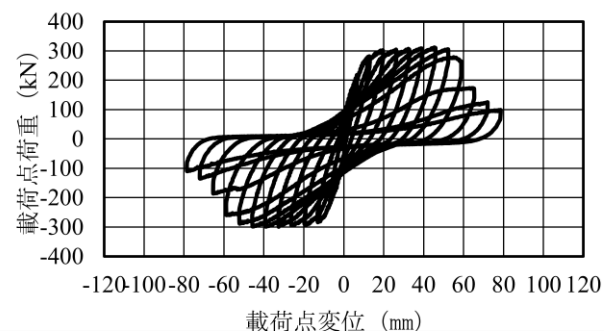
試験体 No.	降伏荷重(kN)			最大荷重(kN)			降伏変位 δy (mm)	終局変位 δu (mm)	じん性率
	実験値 P _{ye}	計算値 P _{yc}	P _{ye} / P _{yc}	実験値 P _{maxe}	計算値 P _{maxc}	P _{maxe} / P _{maxc}			
1	208.1	203.1	1.02	298.6	255.1	1.17	5.9	51.4	8.7
2	214.5	212.4	1.01	293.1	268.5	1.09	5.6	62.7	11.2
3	217.8	209.1	1.04	305.1	263.5	1.16	6.6	60.8	9.3
4	209.7	207.5	1.01	291.5	262.9	1.11	6.3	64.4	10.2



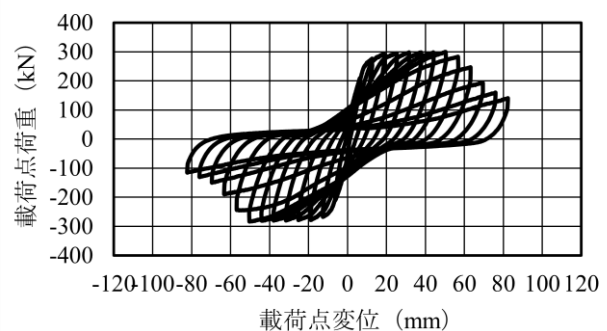
(1) No.1



(2) No.2



(3) No.3



(4) No.4

図-5 各試験体の荷重-変位関係

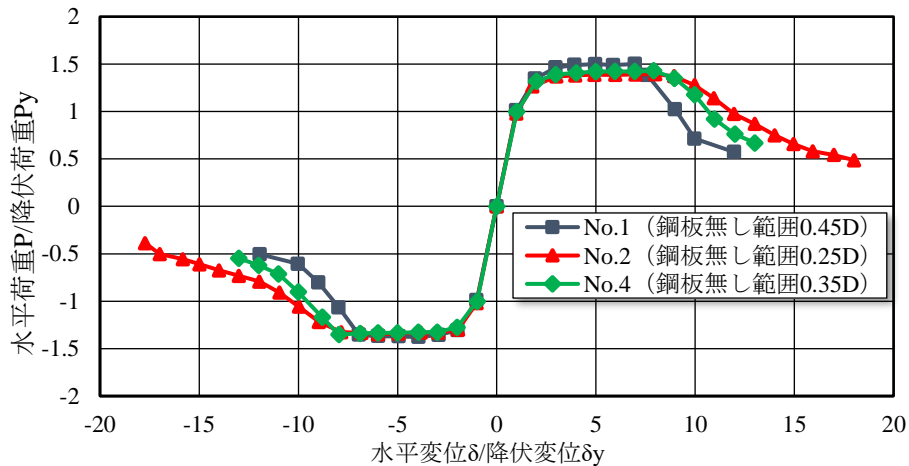


図-6 1D 区間内での荷重-変位関係 (無次元化)

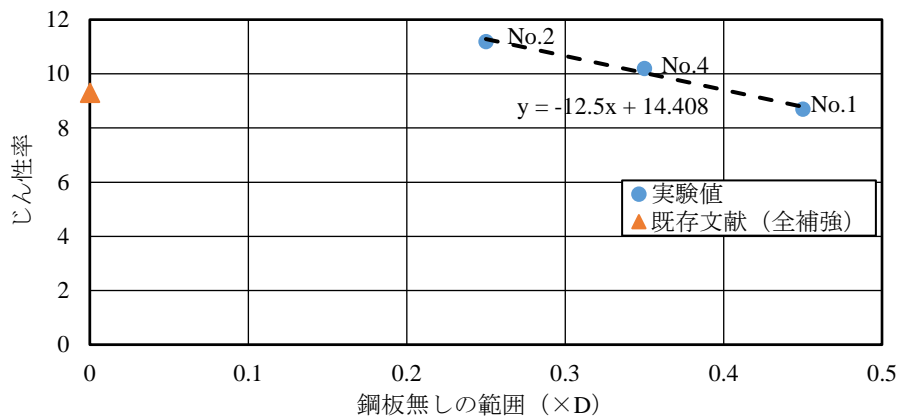


図-7 腐食範囲とじん性率の関係

った。一方, No.2, 4 は荷重低下が緩やかであるとともにじん性率がそれぞれ 11.2, 10.2 となり, 換算弾性応答加速度 1500gal 相当の十分な変形性能を有していることが分かった。

また, 1D 区間内に鋼板無しの区間を設けた No.1, 2, 4 試験体について, 無次元化した水平荷重と載荷点変位との関係を比較したものを図-6 に, 鋼板無し範囲とじん性率の関係を図-7 に示す。図-6 より, No.1 (鋼板無し区間 0.45D) は $8\delta_y$ 以降から急激な荷重低下が見られるが, No.2 (鋼板無し区間 0.25D) と No.4 (鋼板無し区間 0.35D) は No.1 に比べ, 鋼板無しの範囲が小さくなるにつれて荷重の低下が緩やかになっていることが確認できる。図-7 より, 横軸を鋼板無しの範囲, 縦軸をじん性率としてプロットすると, 1次関数の直線として近似することが確認できた。参考値として, 菅野ら²⁾が実験を行った際の全区間を補強した試験体のじん性率も掲載している。鋼板無しの範囲が大きくなるにつれて, じん性率が直線状に小さくなることが確認でき, 鋼板補強を無しとした範囲が大きくなるほど変形性能が小さくなることが分かった。

一方で, 1D 区間内外に着目して図-5 の No.1, 3 を比

較すると, No.3 が No.1 に比べじん性率が若干大きいものの, どちらも $8\delta_y$ 以降に急激な荷重低下が見られた。

4.3 鉄筋と鋼板のひずみ分布

図-8 に各試験体における軸方向鉄筋および鋼板のひずみ分布を示す。軸方向鉄筋および鋼板のひずみゲージ貼付位置は図-3 の (5) に示すように, それぞれ載荷面の中央の鉄筋と載荷側面の中央部としている。図中横軸の点線は鋼板補強範囲と鋼板無しの範囲の境界部である。図中縦軸の点線は鋼板の降伏ひずみ ϵ_y , 赤線はひずみが進展したサイクルでのひずみである。

No.1, No.2 では $7\delta_y$ で鉄筋のひずみが鋼板無し範囲の近傍において進展している。No.3, No.4 では $9\delta_y$ 以降に柱基部からの高さ 400mm, 200mm (鋼板補強の境界部) 近傍でひずみが進展している。

鋼板のひずみについては, No.1, No.2 では降伏ひずみを下回るひずみとなっているが, No.4 では $12\delta_y$ で降伏ひずみを超過している。これは, No.4 の方が鋼板無し範囲のコンクリートの損傷が大きく, コンクリートの剥落に伴って, 鋼板のはらみ出しが大きくなったと考えられる。

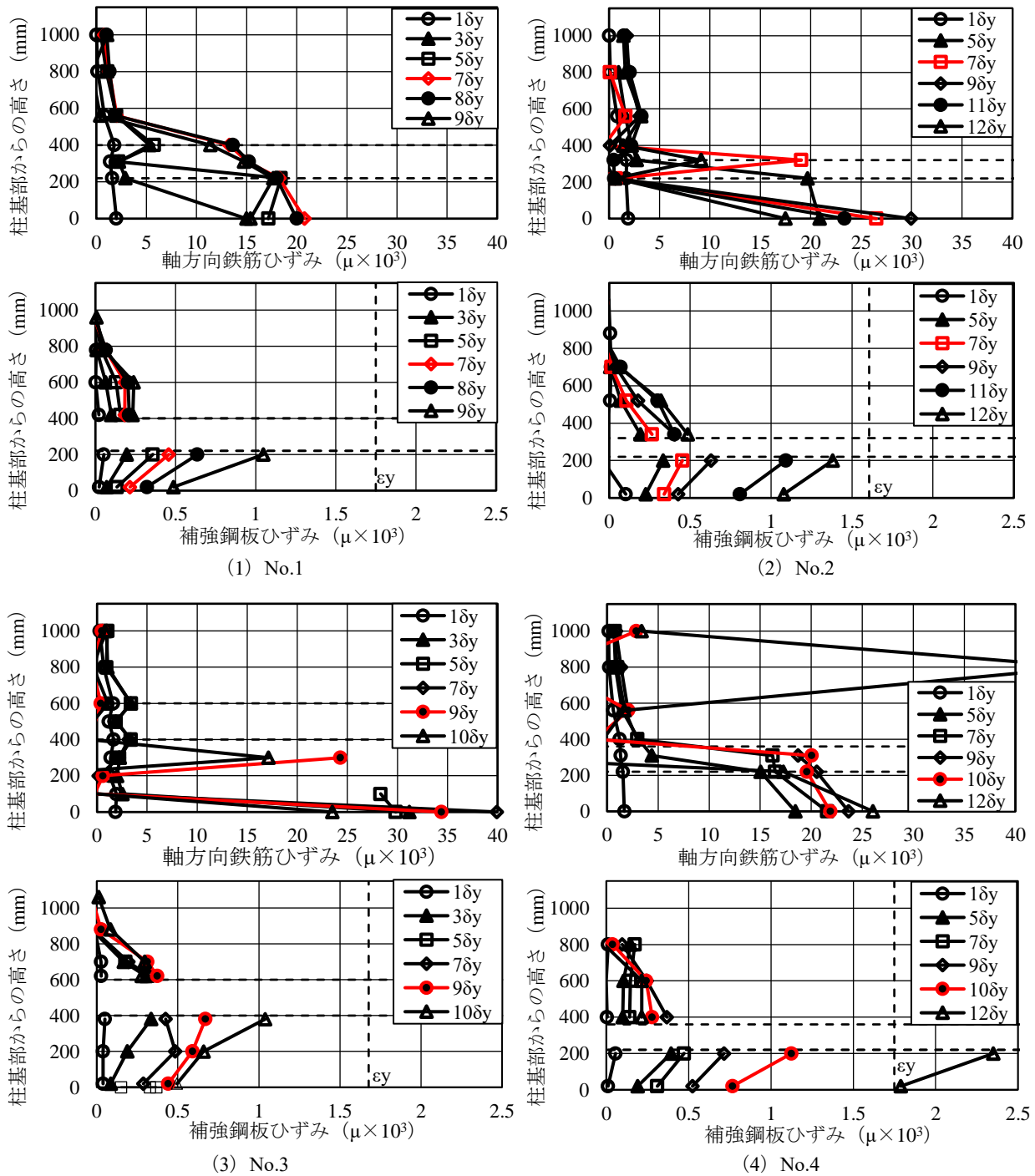


図-8 各試験体のひずみ分布（上段：軸方向鉄筋，下段：鋼板（載荷方向側面））

5. まとめ

今回の交番載荷試験により、鋼板補強を省略した範囲とその柱基部からの位置が柱の変形性能に影響を与えることが分かった。特に、鋼板補強を省略した範囲が柱基部から1D以内にある場合、鋼板腐食を模擬した鋼板補強省略範囲が0.35D以下であれば、所要の変形性能を有していることを確認した。今後は更に、補修が必要な場合の対策工について、どのような工法が最適であるかを検討し、今後の耐震補強施策に反映させていきたい。

参考文献

- 1) 飯塚大介, 平山武志, 渡部太郎: 腐食範囲を考慮した鋼板巻き補強柱の耐震性能に関する実験的検討, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, V-61, 2022.9
- 2) 菅野貴浩, 石橋忠良, 大庭光商, 水野光晴: 鋼板巻き補強RC柱の載荷試験, SED, No. 6, pp. 10-15, 1996.5
- 3) 東日本旅客鉄道株式会社: 耐震補強設計施工マニュアル, 2007.12