

S 造と SRC 造の建物の柱脚の実験的研究 (その 1)

—— 4 種類の柱脚の比較実験 ——

武 田 寿 一
高 橋 泰 彦

An Experimental Investigation of Column Bases of Steel Reinforced Concrete Structure (Part 1)

——Comparisons of Four Kinds of Column Bases——

Toshikazu Takeda
Yasuhiko Takahashi

Abstract

Four types of column bases widely used at present, whose steel members are fixed in foundation beams were selected and tests of their models were performed to investigate stress flows of bases and to compare the behaviors of bases supported by plain concrete with those supported by reinforcing members.

As a result, the behaviors of reinforced bases were similar to those of non-reinforced ones at the stage of low load, but with increased load, the effects of reinforcing were demonstrated, and in concrete terms, although the effects of stud bolts were not very prominent, it was clarified that the behavior of anchor-reinforcing bar type of column base was quite excellent. However, it is difficult at the present stage to quantitatively grasp column-base stresses.

概 要

建物の基礎ばりのなかに柱の鉄骨を埋込んで固定とする柱脚形式から、現在広く使われている 4 種類の形式を選びだし、実大の 1/3 の模型実験を行なった。この実験によって、柱脚の応力の流れを解明する手掛りを得るとともに、コンクリートの支圧力で応力を伝達する無補強の柱脚の性状と、柱の鉄骨にとりつけた各種補強材の効果を調べることにした。

その結果、低荷重時には無補強柱脚も補強形式の柱脚も挙動にはほとんど差はないが、荷重の増加につれて補強効果があらわれること、具体的にはスタッドボルトの効果はあまり顕著ではないが、アンカー鉄筋形式の柱脚の挙動は大変すぐれていること、などが明らかになった。しかし、柱脚の応力を定量的に把握することは現段階ではむずかしい。

1. 序

建物の柱脚は上階からの柱の応力を基礎または基礎ばりに伝達する重要な部分である。ところが、柱脚は通常、鉄骨構造または鉄骨鉄筋コンクリート構造から鉄筋コンクリート構造へと変化する構造上の不連続部であり、また、柱脚の性状は解明されているとはいえない。

最近、柱脚の実験や研究^{1)~4)}が行なわれつつあるが、実用的な資料は少なく、また、実際に使われている柱脚の検討も十分ではないので、柱の鉄骨を基礎ばりの中に埋込んで、鉄骨の脚部を固定とした柱脚形式を対象とし

て実験的研究を行なった。

2. 柱脚形式の選択

柱の鉄骨を基礎ばりの中に埋込む柱脚の形式は、鉄骨の補強方法によって多くの種類があるが、今回は図-1 の代表的な 4 形式を選んだ。

(1)は鉄骨無補強形式で基礎ばりのコンクリートの支圧力で応力を伝える。(2)は(1)の形式の柱型をダブルフープで巻き、支圧力を高めるとともに、割裂を防止している。(3)と(4)は鉄骨補強形式で、(3)はスタッドボルトを打ち、その抵抗偶力でモーメントを伝達する。また、(4)は

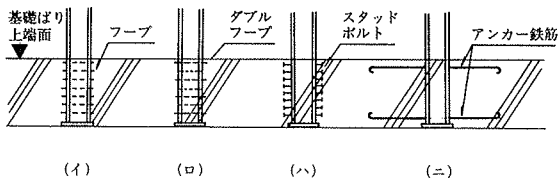


図-1 柱脚形式

アンカー鉄筋の定着でモーメントを処理する形式である。

いずれも、使用例が比較的多い柱脚である。

3. 試験体

試験体はS4N0, S4H0, S4S0, S4A0の4体でそれぞれ、図-1の(イ)(ロ)(ハ)(ニ)の柱脚をモデル化している。

試験体の形状は図-2のように、柱の鉄骨と基礎ばりを水平荷重時の反曲点の位置から切り出した逆T字型であり、基礎ばりには直交方向の一部もとり出し、また、交差部には水平ハンチをつけて立体的な柱脚とした。各試験体の部材断面、配筋などは表-1に、柱の鉄骨詳細を図-3に示しているが、実物をほぼ1/3に縮小した寸法となっている。ただし、鉄骨フランジ、ウェブとも実状より板厚を増し、早期降伏を防止するとともに、鉄骨の埋込み長さを40cmとして、柱脚コンクリートに破損が生じやすいように計画した。

なお、S4S0とS4A0の柱脚の設計には、合成ばり構

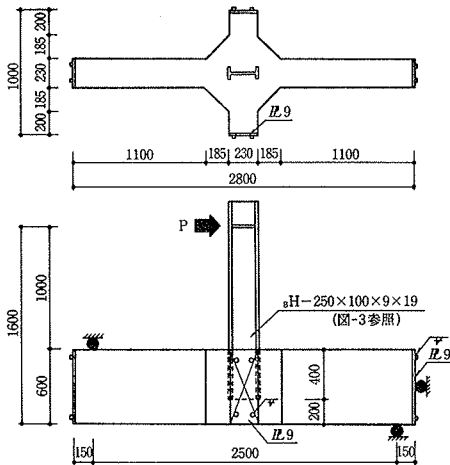


図-2 試験体形状

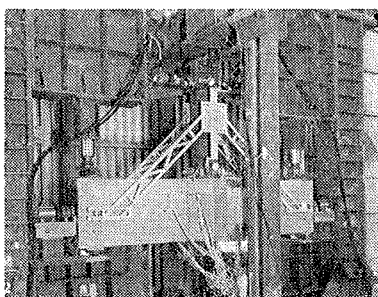


写真-1 加力状況

	コンクリート	鋼板		鉄筋				
		FL19	FL9	D25	D22	D16	D10	D6
降伏応力度 (TON/cm ²)	—	3.12	3.30	3.96	3.58	3.82	3.76	3.68
最大応力度 (TON/cm ²)	0.165	4.79	4.90	6.13	5.43	5.45	5.47	5.27

表-2 素材試験結果

造設計施工指針によるスタッドボルトの終局耐力と、アンカー鉄筋の降伏耐力の偶力のみでモーメントを伝える方法を採用し、補強材の本数や断面積をきめた。使用鋼材とコンクリートの素材試験の結果を表-2に示す。

4. 加力方法および測定方法

加力方法は、図-2、写真-1の通りで、柱頭に水平力をかけ、基礎ばり端部の3点をローラー支持して、柱脚近傍を短期荷重時の応力状態とした。また、柱頭の変位で制御し、柱の部材角で0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.027, 0.035 rad.の変形で左右2回の繰り返し加力を行った。

全体の変形は基礎ばりの両端を不動点とした治具により柱頭と柱脚で測定し、その他に、柱脚の抜け出し量と沈下量、および、水平移動を測定した。歪は鉄骨、はり主筋、スターラップ、フープ、コンクリート表面で測り、また鉄骨フランジ表面の接触支圧を検討するためにモールドゲージを埋めた。

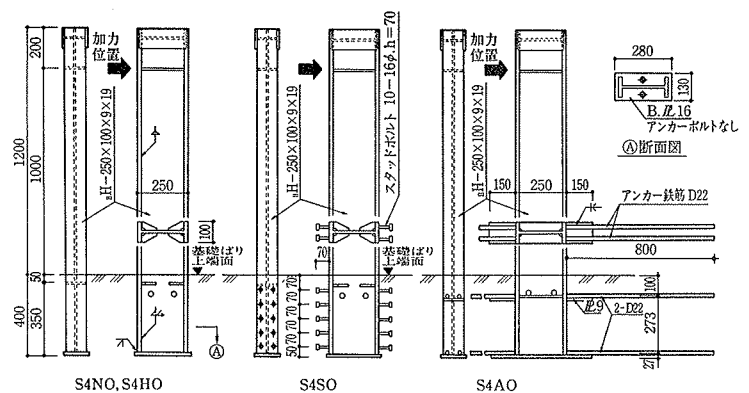


図-3 試験体の柱鉄骨詳細

項目	柱		柱脚 (柱埋込み部)				基礎ばり		
	軸力	鉄骨断面	埋込み深さ	主筋	フープ	補強方法	RC断面	主筋	スターラップ
S4N0	なし	H-250×100×9×19	40cm	4-D16	2-D6 @70 P _w =0.30%	—	23×60cm	上端 2-D25 下端 2-D25	2-D10 @100 P _w =0.62%
S4H0	同上	同上	同上	同上	2-D10 @70 P _w =0.68%	S4N0に比べ約2倍のフープ量 2-D10 @70	同上	同上	同上
S4S0	同上	同上	同上	同上	2-D6 @70 P _w =0.30%	スタッドボルト補強 10-16φ, h=70	同上	同上	同上
S4A0	同上	同上	同上	同上	2-D6 @70 P _w =0.30%	アンカー鉄筋補強 上端 2-D22 下端 2-D22	同上	上端 2-D25 下端 2-D25 アンカー鉄筋 4-D22	同上

表-1 試験体一覧表

5. 実験結果と考察

5.1. 実験結果

基礎ばりのクラック発生状況は各試験体で明瞭な差はなく、図-4にその一部を示す。荷重(P)と柱頭の変位(δ_u)の履歴曲線と、その包絡線を図-5、図-6に、柱脚の浮き上りと沈下量を図-7に、柱脚の回転を含む水平移動量を図-8に示す。

図-9は基礎ばりの中の柱の歪から計算した軸力とモ

メントの深さ方向の分布である。また、図-10は柱フランジ表面の支圧部の歪であり、図-11は基礎ばり上端面のコンクリートの歪分布を表わす。各種耐力をまとめた一覧表が表-3である。

なお、各図には計算結果も併記した。

5.2. 変形

図-6で計算剛性を考慮しながら、試験体別の比較を行なう。P- δ_u 曲線は、(I)基礎ばりにクラックが発生するまで、(II)クラック発生から柱に塑性ヒンジが完成するまで、(III)塑性ヒンジ完成以後、の3段階に分けることができる。

(I)段階は、 $P < 8\text{ton}$ であり、全試験体の剛性が等しく、かつ、計算

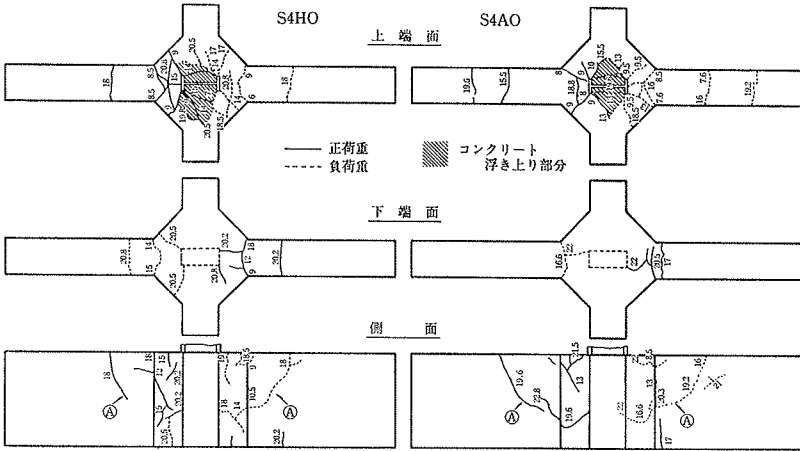


図-4 クラック発生順序

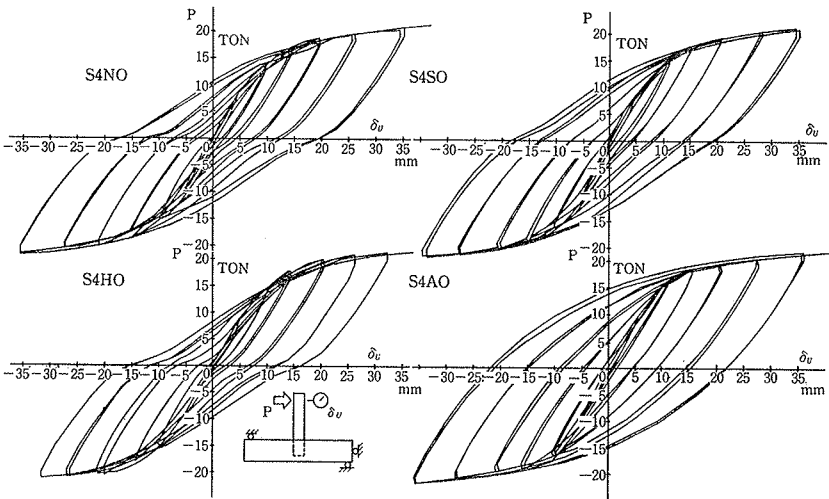


図-5 荷重-変形曲線

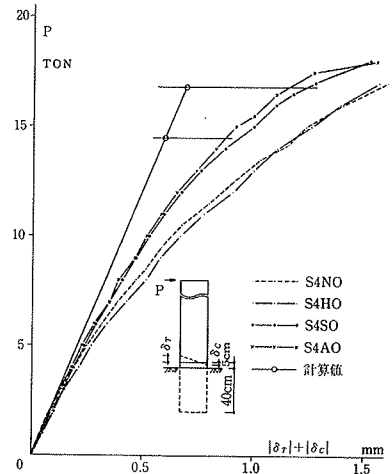


図-7 柱脚の浮き上りと沈下

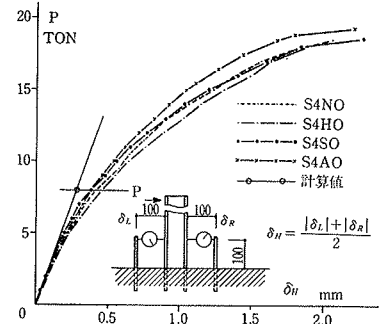


図-8 柱脚の水平移動

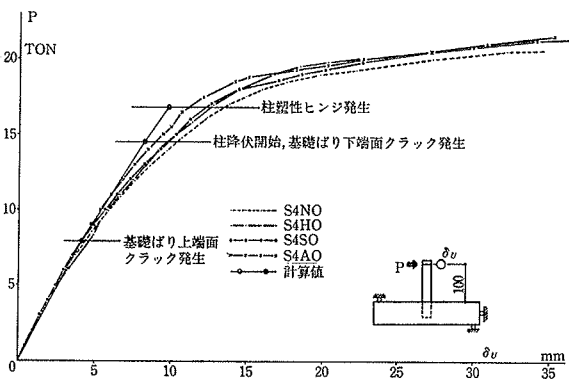


図-6 荷重-変形曲線 (包絡線)

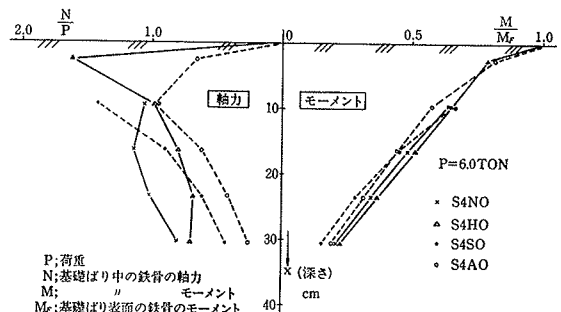


図-9 基礎ばり中の柱の軸力とモーメント

値ともほぼ一致する。全試験体の挙動が等しいことは、補強材の効果があらわれておらず、柱の応力はコンクリートとの支圧力と摩擦力で伝わっていると考えられる。支圧力は、図-10のように、柱の基

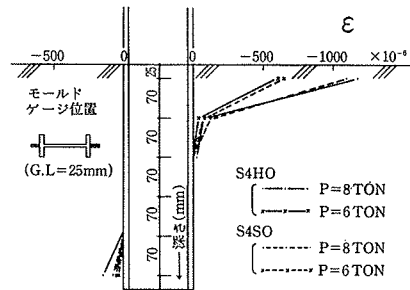


図-10 支圧部の歪分布

礎より上端面近くと埋込み最下端で大きく、特に上端面の集中が顕著である。

また、摩擦力が作用していると考えた理由は、図-9で基礎より中の柱に軸力が入っていることと、モーメントが基礎より上端面の支圧力が大きい部分で急激に減少していることを考慮したためである。

図-6の計算値は柱、基礎より、柱脚パネル部の変形のほかに、コンクリート内の柱鉄骨の伸縮による柱脚の回転を含んでいる。内訳はそれぞれ61, 7, 6, 26%である。変形量にかなり大きな影響を与える柱脚の回転角 θ_F は、図-9で $x=0$, $M/M_F=0.8$ と $x=40$, $M/M_F=0$ を結ぶ直線のモーメント分布 $M(x)$ を用いて(1)式から求めた。

$$\theta_F = \int_0^{D_s} \frac{M(x)}{EI} dx \quad \dots\dots(1) \quad \begin{matrix} D_s; \text{柱の埋込み長} \\ EI; \text{柱の曲げ剛性} \end{matrix}$$

図-7, 図-8で実験値と比べても低荷重ではだいたいいい結果である。

基礎ばりにクラックが発生して、(II)段階に入ると剛性が徐々に低下し、計算値と離れてくる。図-7, 図-8にも同じ傾向がみられるので、柱脚コンクリートの局所的な塑性化と柱の抜け出しが原因であろう。また、 $P > 14 \text{ ton}$ では柱の降伏も剛性低下を引き起こしている。

試験体別に見ると、この段階のS4A0の変形は少なく、 $P=12\sim 15 \text{ ton}$ でS4N0, S4H0, S4S0の3体の約90%である。柱脚の補強による相違があらわれていると思われ

項目 試験体名	計算耐力 (TON)					実験確認耐力 (TON), 破壊箇所					
	柱の耐力		基礎ばりの耐力		柱脚の耐力	実験途中		実験終了時		最終耐力	破壊箇所
	降伏	塑性ヒンジ	上端面クラック	下端面クラック		降伏	支圧降伏	設計耐力	上端面クラック		
S4N0	14.5	16.8	7.92	14.4	33.2	13.6	2.93	+8.5 -9.0	+16.5 -15.0	22.4	柱に塑性ヒンジ発生、柱脚コンクリートの表面の浮き上り
S4H0	14.5	16.8	7.92	14.4	33.2	13.6	2.93	+8.5 -9.0	+14.0 -12.0	22.4	同上
S4S0	14.5	16.8	7.92	14.4	33.2	13.6	15.0	±8.0	+15.0 -14.5	22.8	同上
S4A0	14.5	16.8	8.48	14.4	55.6	13.6	14.8	+8.0 -8.5	+17.0 -16.6	22.8	同上

表-3 各種耐力

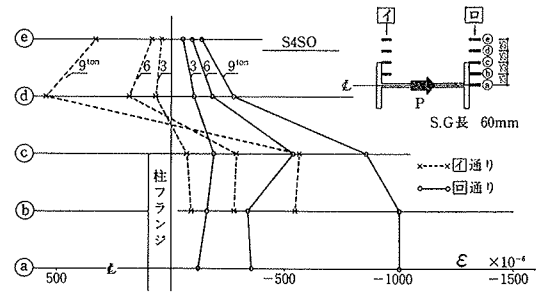


図-11 コンクリート上端面歪分布

るので、柱脚近傍の変形から考察する。

図-7の柱脚の引き抜きと沈下量は、S4A0とS4S0ではほぼ等しく、S4N0, S4H0より少ない。アンカー鉄筋にはスタッドボルトと同様に、柱脚の上下動を止める効果があることが分かる。また、図-8ではS4A0の変形が他の3体に比べやや少なく、アンカー鉄筋は水平移動も拘束していることがわかる。

したがって、アンカー鉄筋は良い補強方法であり、図-6のS4A0の挙動が説明できる。スタッドボルトの柱脚は無補強タイプよりすぐれた挙動を示すはずであるが、図-6にはその傾向があらわれていない。コンクリートの支圧力と摩擦力で伝わる応力が意外に多いと思われる。

柱に塑性ヒンジが完成する $P > 18 \text{ ton}$ になると、柱の変形が全体変形に占める比率が著しく増大し、各柱脚形式の優劣の判定が不可能となる。

5.3. 耐力

基礎ばりの上、下端面のクラック発生荷重は表-3のように計算と実験はよく一致し、しかも、図-6ではこの荷重あたりから剛性の低下も認められる。また、柱の降伏や塑性ヒンジの発生荷重も、実情に合っていると思われる。

なお、基礎ばりの耐力の計算には、RC構造計算規準の(8.5), (8.6)式を用い

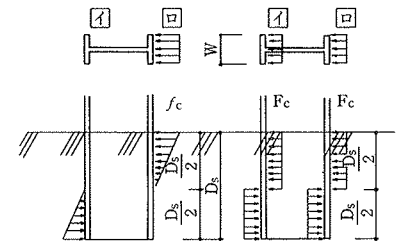


図-12 支圧応力の仮定

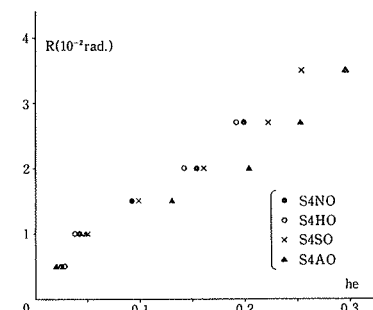


図-13 減衰定数

ている。

柱脚のコンクリートの支圧に関する適当な式がないので、降伏耐力の目安として、図-12のように支圧部に完全塑性の応力分布を仮定した(2)式を、また、設計式としては片フランジ面の三角形応力分布のもとでとりあえず $f_c = 2F_c/3$ とした(3)式を用いることとした。

$$M_y = wD_s^2 F_c/2 \quad \dots\dots(2)$$

$$M_D = wD_s^2 f_c/6 \quad \dots\dots(3)$$

(3)式は RC 構造計算規準に基づいた式であり、PC 設計施工規準を準用したり、有効支圧面を2面と考えたりすれば、さらに大きな耐力となる。したがって(3)式は最小設計耐力と言える。表-3にこれらの式による計算結果を示す。

S4A0 と S4S0 の設計耐力は 14.8 ton, 15.0 ton で、図-6の $P-\delta_u$ 曲線にあてはめれば、まだかなりの余力があるところに位置している。また、S4N0, S4H0 の(3)式による設計耐力は鉄骨の埋込み長さが 40 cm であることを反映し、2.93 ton と非常に低い。柱を基礎より底面まで埋めたとしても、6.59 ton である。いずれにしても、図-6の完全弾性域にある。

無補強柱脚の(2)式による降伏耐力は 13.6 ton であるが、実験では 22 ton 以上の荷重となっても柱脚には圧壊が起っていない。この荷重での支圧応力度は F_c を大幅に上回り、かなりの塑性化が生じていると思われるが、拘束あるコンクリートの局部圧縮強度が非常に大きい⁴⁾ことが確認された。

次に、図-11の歪分布から支圧耐力に影響を与える有効支圧面について考える。図-11では柱フランジの両面 \square , \square の支圧力が有効に働いていることは明らかである。しかし、荷重が増加し、変位振幅が大きくなると、図-4のように柱ウェブ面近くのコンクリートが浮き上り、有効支圧面は片面のみになったと思われる。

以上の考察から、支圧型の柱脚の耐力はコンクリートの支圧強度、有効支圧面、さらに柱の有効長さなどに関係し、また、補強形式の柱脚では支圧との協同効果が生じる。今後、これらを検討する必要がある。

5.4. 履歴性状

図-5の履歴曲線では $\delta_u > 10$ mm のループで相違がみられ、その差を変形部材角 R と減衰定数 h_e の関係で図-13に表わす。S4A0 は大変形時まで安定した紡錘型の履歴を示し、エネルギー吸収性の良い柱脚である。S4N0 と S4H0 の挙動はほぼ等しく、やや逆S字型のループを描き $R = 0.027$ rad. の変形時で S4A0 の約75%にエネルギー吸収性が低下している。また S4S0 は上記両者の中間的な履歴性状で、エネルギー吸収性は $R = 0.027$

rad. で S4A0 の85%である。

コンクリートの支圧力と摩擦力で応力を伝える状態では差はあらわれないが、高荷重となりコンクリートが局部的に塑性化し、繰り返し加力で拘束が低下すると補強の効果があらわれている。

5.5. 破壊性状

今回は、柱に塑性ヒンジが発生し、変形が増加したので、 $R = 0.055$ rad. で実験を終了としたが、柱脚コンクリートの圧壊や基礎より鉄筋の降伏などは確認されなかった。わずかに、図-4の斜線部分の厚さ約 5 cm のコンクリートが浮き上がった程度であった。したがって、各試験体の最大耐力や破壊状況にはほとんど差はなく、柱脚の耐力を検討するデータは得られていない。

しかし、柱脚の破壊形式として、コンクリートの支圧力による圧壊の他に、柱鉄骨のコンクリートのえぐり取り破壊(図-4の④クラック)と繰り返し加力によるコンクリートの劣化にともなう荷重低下が考えられることがわかった。

6. まとめ

(1) 基礎ばりに柱の鉄骨を埋込んだ形式の柱脚の耐力は補強の有無によらず非常に高く、今回の実験では柱脚の破壊は認められなかった。

(2) 検討した4種類の柱脚は設計耐力に対しては十分に余力がある。

(3) 柱脚の補強の効果は、基礎よりクラック発生後の変形と履歴性状に明確にあらわれる。また、アンカー鉄筋形式が最もすぐれ、スタッドボルトの効果は比較的低い。

(4) 柱脚の応力は補強材の他に、コンクリートの支圧力と摩擦力で伝達されるが、定量的な把握が今後の課題と思われる。

参考文献

- 1) 鷺尾, 鈴木, 他: 鋼構造柱脚部における基礎部への埋込み効果について, 日本建築学会学術講演梗概集, (昭和53. 9)
- 2) 伸, 森田, 他: 鉄骨鉄筋コンクリート柱脚の耐力と履歴特性に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第276号, (昭和54. 2)
- 3) 増田: 鉄骨鉄筋コンクリート柱脚部の力学的性状に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第260号, (昭和52. 10)
- 4) 秋山, 平岡, 他: 鋼構造柱脚の基礎実験, 日本建築学会関東支部研究報告集, (昭和54. 7)