

正方形断面を有する RC 柱を斜め載荷した場合の動的耐力・変形特性

西田 秀明¹・運上 茂樹²・長屋 和宏³

¹正会員 工修 建設省土木研究所 耐震技術研究センター耐震研究室 研究員(〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)

²正会員 工博 建設省土木研究所 耐震技術研究センター耐震研究室 室長(同上)

³正会員 建設省土木研究所 耐震技術研究センター耐震研究室 研究員(同上)

1. はじめに

我が国の橋梁の耐震設計では、一般に水平二方向の慣性力はそれぞれ独立して作用するものとし、橋軸および橋軸直角方向を対象に耐震設計を行っている¹⁾。しかし、実際の地震動は三次元的挙動を示すことから、橋脚には複雑に慣性力が作用し、現行の設計では直接的に考慮していない二軸曲げなどが生じる。特にこうした点は、幾何学的形状が複雑である斜橋や曲線橋で顕著になると推測される。また、Caltrans や ISO などの海外および国際基準では、多方向入力の影響(外力の方向性、ねじれなど)を考慮した耐震設計法が盛り込まれている²⁾。このような背景のもとで、我が国においても地震動の多方向入力が橋梁の耐震性に及ぼす影響を明らかにすることが求められている。そこで、慣性力の作用方向の違いに着目して、正方形断面を有する鉄筋コンクリート柱を対象とした一方向正負交番載荷実験を行い、その動的耐力・変形特性を検討した。

2. 実験概要

実験供試体を図-1に示す。供試体は2体で、いずれも一辺600mm正方形断面で、橋脚基部から載荷点までの高さ3010mm(せん断支間比5.02)、軸方向鉄筋比0.95%(SD295、48@D10)、帯鉄筋体積比0.32%(帯鉄筋間隔75mm、SD295、D6)である。実験時の材料特性を表-1に示す。

水平耐力-変形特性、断面内のひずみ分布、曲率を測定するための変位計、ひずみゲージ(軸、帯鉄筋)は柱基部から柱断面長さのおよそ1.5倍の区間(920mm)に配置している。

載荷は、載荷方向を図-2に示すように断面軸方向にした場合(RC-00)、およびこれを45°傾けた対角線方向にした場合(RC-45)で行った。実験は、写真-1に示すように供試体を横にした状態で、死荷重反力に相当す

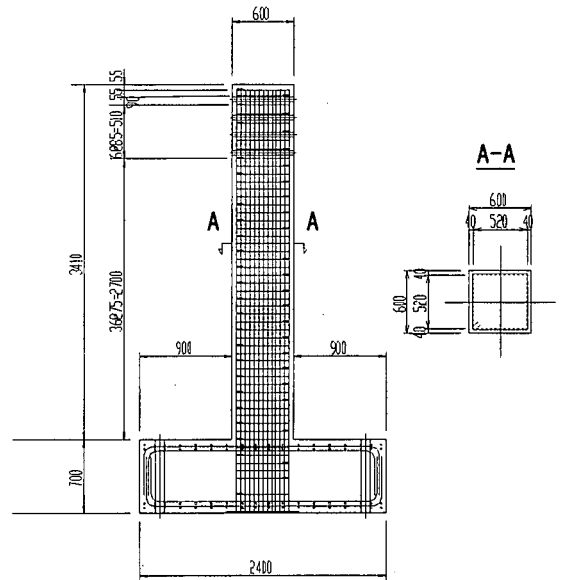


図-1 実験供試体

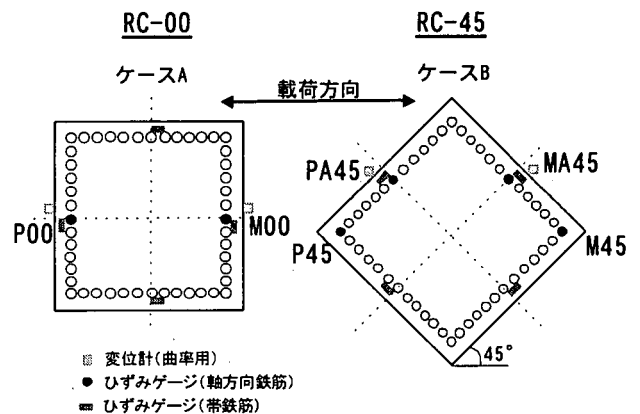


図-2 供試体断面と載荷方向の関係

る軸力353kN(軸応力0.981N/mm²)をかけ、水平変位を制御した。

制御変位は、2ケースとも、RC-00の最外縁軸方向鉄筋が降伏に至るときの変位11.5mmを基準変位(δ_0)として、この整数倍で変化させた。なお、載荷速度は3cm/s、載荷繰り返し回数は3回とした。

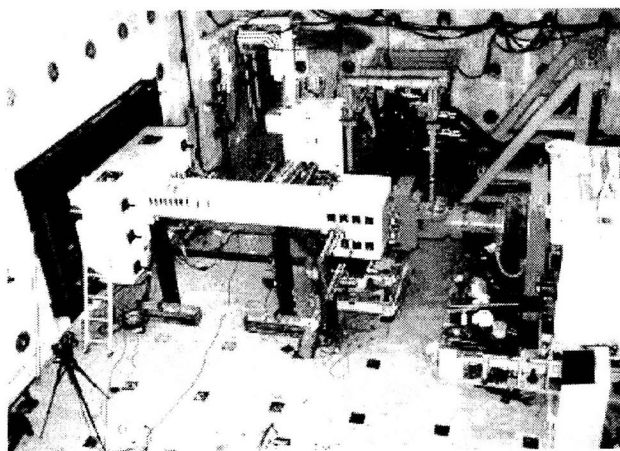


写真-1 供試体設置状況 (RC-45)

3. 実験結果の検討

(1) 損傷の進展状況

実験は、RC-00 で $11\delta_0$ 、RC-45 では $8\delta_0$ まで行った。RC-45 では $8\delta_0$ の 3 波目載荷中に規定値以上のねじれが生じ、軸力載荷装置が停止したため実験をその段階で終了した。 $8\delta_0$ までの各載荷ステップでの損傷状況を図-3 に示す。

かぶりコンクリートが剥落し始めるのはいずれの供試体も $4\delta_0$ で同じであった。この段階までは、いずれの供試体もほぼ水平ひびわれの進展が進むのみであり、高さ方向の分布等にもさほど大きな差は見られなかったが、それ以降の損傷の進展には差が見られた。最外縁鉄筋が見える程かぶりコンクリートが剥落する段階および軸方向鉄筋が破断する段階はそれぞれ、RC-00 では $6\delta_0$ と $9\delta_0$ (5 本破断)、RC-45 では $5\delta_0$ と $6\delta_0$ (1 本破断) でいずれも後者のほうが早かった。なお、RC-45 で最初に破断した軸方向鉄筋は、載荷方向の角部に位置するものであり、最もひずみの進展が早いところである。かぶりコンクリートは、RC-00 では載荷方向に位置する面に対して損傷が一樣に進展するのに対し、RC-45 は載荷方向に面ではなく角部が位置していることから、損傷は角部からその角を構成している二面に広がるとい違いがあった。さらに基部に近い領域でこの広がりが大きく、三角形に損傷が進む傾向も見られた。

(2) 水平荷重-変位特性

実験により得られた載荷点位置における水平荷重-変位特性を図-4 に示す。ここでは、軸力が作用することによる $P-\delta$ 効果を考慮して補正をしたものを示している。

全体的な傾向に大きな差は見られないものの、RC-45 の方が最大耐力および最大耐力以降の耐力低下がやや大きい。耐力低下以前のかぶりコンクリートの破壊が始ま

表-1 供試体の実験時材料特性 (単位 N/mm^2)

	RC-00	RC-45
コンクリート強度	36.4	30.8
コンクリートヤング係数	2.99×10^4	2.97×10^4
軸方向鉄筋強度	373	391
軸方向鉄筋ヤング係数	1.72×10^5	1.86×10^5
帯鉄筋強度	362	409
帯鉄筋ヤング係数	1.74×10^5	2.06×10^5

るまでは外力の方向性の違いは小さいが、かぶりコンクリートの剥離、軸方向鉄筋の破断と段階が進むにつれて両者の差が大きくなることがわかる。

また、履歴曲線の形状で見ると、RC-45 の方が特に第二、第四象限がくびれた全体的に細長いループを描いていることから履歴吸収が小さいことがわかる。算出した履歴吸収エネルギー (各載荷ステップ 1 波目) の比較を図-5 に示す。いずれも $4\delta_0$ まではほとんど同じであるもののそれ以降で差が現れることから、この点からにもかぶりコンクリート剥落以降の破壊過程の違いが、両者の耐力・変形特性の相違につながっていることがわかる。

(3) 軸方向鉄筋のひずみ分布

各載荷ステップにおける軸方向鉄筋の引張側最大ひずみの鉛直分布を図-6 に示す。なお、ひずみの測定は図-2 に示した位置で行った。いずれのケースでも 150mm 付近のひずみが $2 \sim 3\delta_0$ の段階で大きなひずみになっており、この付近で早期から比較的大きなひびわれが見られたことと対応している。RC-45 の角部 (P45、M45) では $3\delta_0$ 以降で RC-00 よりも高い約 550mm の位置まで大きなひずみに達している。また、RC-45 の中間部 (PA45、MA45) ではそれほど大きなひずみでないものの、 $5\delta_0$ 以降は 350mm より低い部分のひずみが急激に大きくなっている。これは、軸方向鉄筋が見えるほどかぶりコンクリートが剥落した段階と対応している。

RC-00 のひずみはこれらの中間にあたる高さ位置までひずみが大きくなっている。このことから、RC-45 の載荷方向角部に位置する軸方向鉄筋のひずみは、同一の変位に対しては RC-00 の最外縁に比べて大きく、これが早期の破断につながっていることがわかる。

(4) 曲率分布と変形の要因分析

曲率は、RC-45 において信頼性のある値が得られた $6\delta_0$ までの比較を行った。ここでは、各載荷ステップ 1 波目正側の各区間の最大曲率を算出し比較した。なお、曲率測定および算出は文献³⁾と同様に次式より求めた。

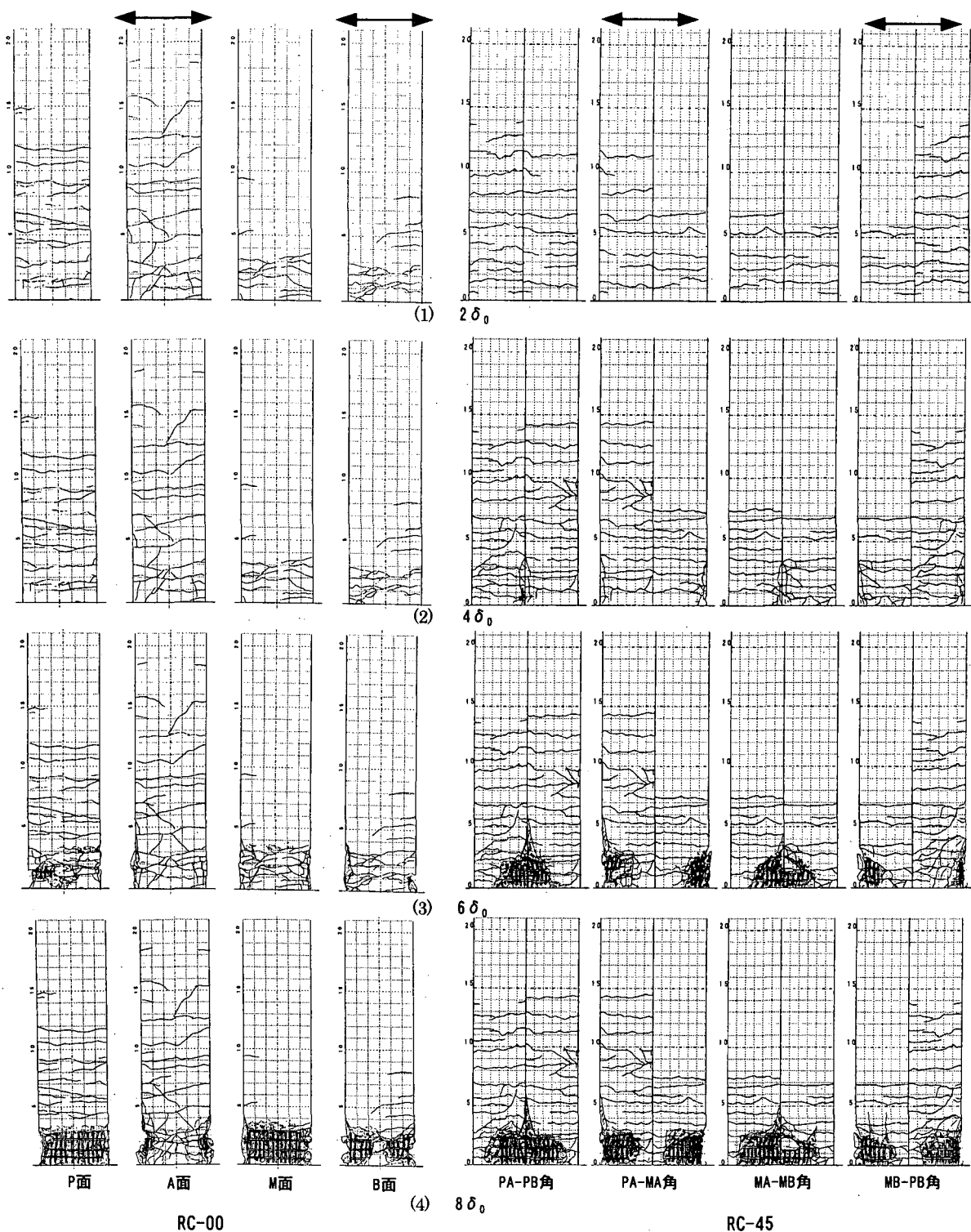


図-3 損傷の進展状況(矢印は載荷方向)

$$\phi = \frac{\Delta_T - \Delta_C}{D_t h}$$

ここで、 ϕ : 曲率
 Δ_T 、 Δ_C : 引張側側面および圧縮側側面の
 相対変位
 D_t : 引張側側面と圧縮側側面に配置
 された変位計の距離
 h : 計測区間長

両者の曲率分布を図-7に示す。これらを比較すると、
 載荷ステップが進むにつれて基部から上方へ曲率が大き
 くなる傾向があることや、 $4\delta_0$ までは基部から 300mm
 以上の高さの区間ではほとんど差はないという点で共通
 しているものの、載荷が進むにつれて柱基部からの位置
 が高い箇所での曲率にも差を生じている。ひび割れ位置
 により多少の凹凸はあるものの、全体的に RC-45 の曲率
 の方が小さくなっている。

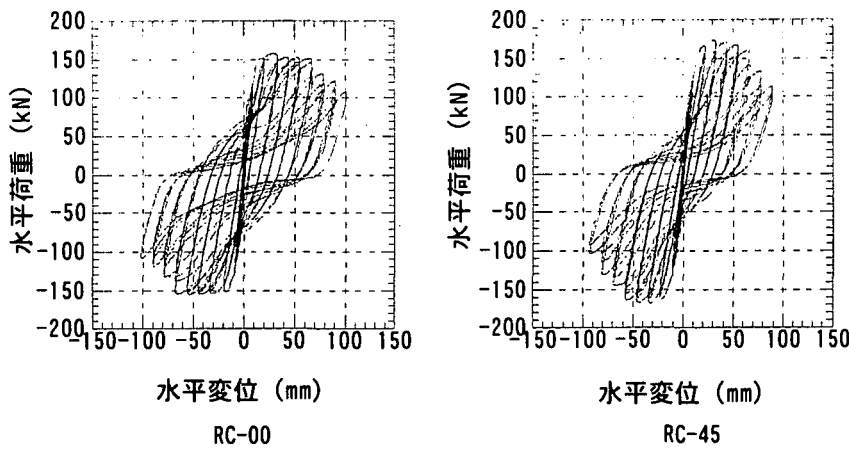


図-4 水平荷重-変位履歴曲線

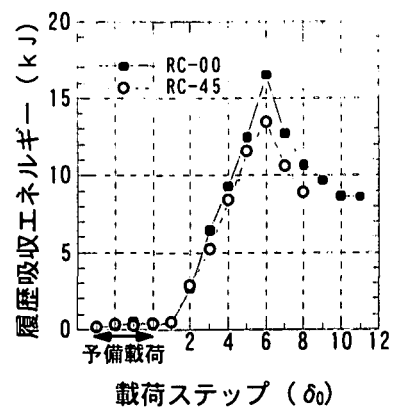


図-5 履歴吸収エネルギーの比較

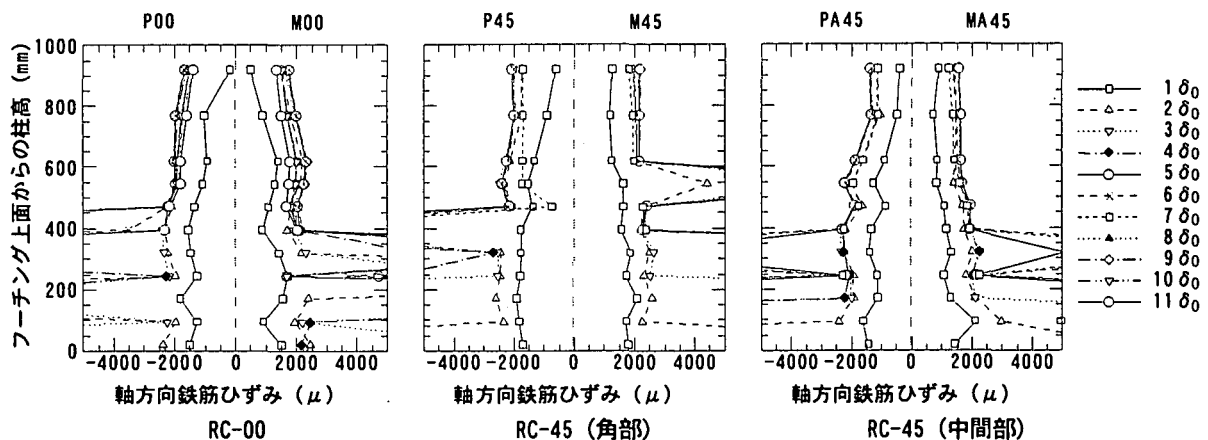


図-6 軸方向鉄筋の引張側最大ひずみの鉛直分布

ここで、柱天端に与えている変位は両者で同一にしているにも関わらず曲率分布に違いがあることを考慮すると、RC-45 では曲げではなく回転による変位が大きい可能性がある。そこで柱基部から 37mm に設置した変位計の記録から、次式により回転角を算出した。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta_T - \Delta_C}{D_t}$$

ここで、 θ : 回転角
 Δ_T 、 Δ_C : 引張側側面および圧縮側側面の相対変位
 D_t : 引張側側面と圧縮側側面に配置された変位計の距離

算出した回転角の波形を図-8 に示す。RC-45 では載荷ステップが進むにつれて基線がずれていることから厳密な比較はできないものの、全体的に回転角は RC-45 の方が大きくなっている。この原因も吸収エネルギーでの考察と同様に RC-45 の最外部に近い軸方向鉄筋のひずみが RC-00 の場合に比べて大きくなり、回転の要因となる伸び出しが生じやすくなっているためと考えられる。そこで、伸び出しの目安となる軸方向鉄筋のフーチング

内におけるひずみ分布(図-9)を比較する。RC-45 の最外縁鉄筋は RC-00 のそれに比べて早い載荷段階からフーチング内の深い位置までひずみが大きくなっており、RC-00 では載荷ステップが進んでもフーチング上面から 80mm 以深ではほとんどひずみの変化がないのに対し、RC-45 は $4\delta_0$ 以降においてフーチング上面から 130mm の深さまでひずみの大きな領域が広がっているという違いがある。このことから、RC-45 では RC-00 に比べて、より深い位置まで軸方向鉄筋の塑性化が進展しており、これが原因となって回転がより大きく作用していることがわかる。

曲げによる変位と回転による変位の割合に差が生じた原因としては、柱部の剛性の違いが考えられる。これは、強制変位を与えた場合、柱部が剛であるほど曲げ変形が生じにくくなり、それを補うために基部での回転が大きくなるためである。そこで、引張側のコンクリートを無視して、等価換算断面二次モーメントを求め比較した結果、RC-45 は RC-00 に比べて 3 割ほど大きくなった。このことから、変形要因の差は柱部の剛性の差によるものと推測できる。

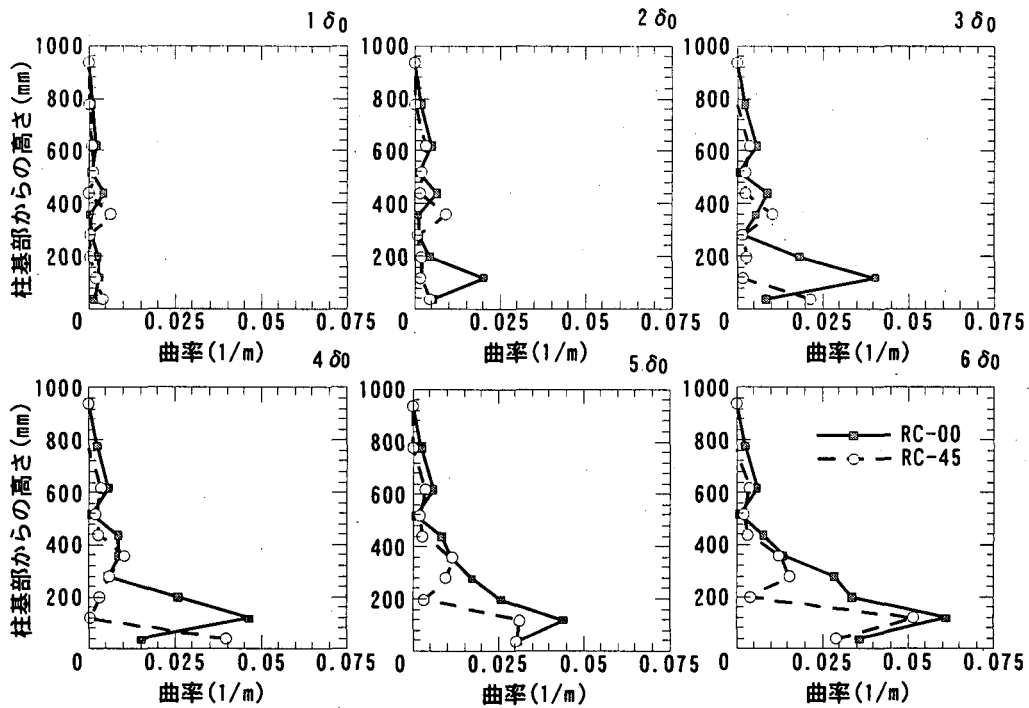


図-7 曲率分布の比較

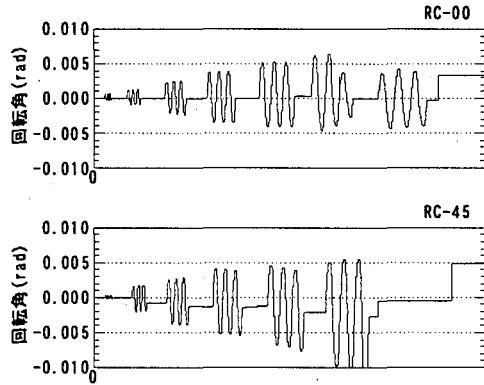


図-8 回転角波形の比較

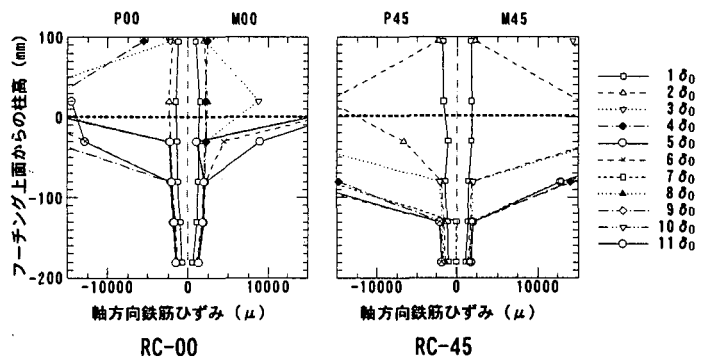


図-9 最外縁軸方向鉄筋のひずみ分布（フーチング内）

4. 保有水平耐力の計算結果と実験結果の比較

実験により得られた水平荷重－変位関係の包絡線と、道路橋示方書²⁾（以下「道示」）による保有水平耐力法の計算より求められる水平荷重－変位関係の比較を行う。

保有水平耐力法による計算は、実験での交番載荷回数が少ないことから繰り返し回数が少ないタイプⅡの保有耐力を、それぞれの供試体における実験時の材料強度（表-1）を用いて行った。

まず、材料強度の違いの影響を見るために、各実験時の材料強度における断面軸方向に対する保有耐力計算を行った。その結果、初降伏、降伏、終局とも変位は両者ほぼ同じであり、耐力は終局時で RC-45 材料強度の場合の方が 3%ほど大きくなった。このことから、解析値から見ると、材料強度の違いが耐力および変形特性に及ぼす影響は小さいといえる。

次に、実験値と保有水平耐力法計算の比較を行った。

RC-00 では、道示の定義通りに、RC-45 では、(1)引張側最外縁に位置する軸方向鉄筋（角部の 1 本）が降伏ひずみに達した時を初降伏、圧縮側最外縁に位置する軸方向鉄筋位置のコンクリートのひずみが

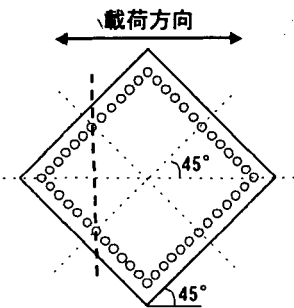


図-10 終局定義位置（太線）

タイプⅡの地震動に対応する終局ひずみに達した時を終局として求めた場合、(2)(1)の終局の定義位置を図-10の太線位置のように断面中心から載荷方向に対し 45° 方向に位置する鉄筋を載荷直角方向に結ぶ線上とした場合、の 2 つを比較した。

この結果を図-11 に示す。RC-00 については最大耐力および終局変位とも計算値と実験値はほぼ対応している。これに対し、RC-45 では、(1)の場合は終局変位が、(2)

の場合は最大耐力が実験値と比べて小さくなった。(1)の場合の終局変位が小さい理由としては、中立軸から終局ひずみ定義位置までの距離が RC-00 のような载荷ケースに比べて長く、同一変位に対する定義位置でのひずみが RC-00 に比べ大きくなりやすいためと考えられる。また、RC-45 の形状から終局ひずみ以上のひずみを有する圧縮側コンクリートの領域は角部のごく一部であり、かぶり部分も含めて圧縮域のコンクリートはほぼ全断面が有効とみなせること、鉄筋に関しても、断面軸方向载荷の場合には一辺を形成する軸方向鉄筋が多い(今回の実験では 13 本)ため引張降伏している鉄筋が多いのに対し、対角線方向载荷の場合は同じひずみ位置にある軸方向鉄筋の数が少ない(角部 1 本、その他 2 本)ため引張降伏している鉄筋が少ないことも理由として考えられる。よって、(1)の終局の定義では、部材としての終局状態とみなすには早いことが実験値との対応がよくなかった理由といえる。最大耐力の対応がよいのは、ひずみが小さいため、鉄筋の負担している耐力が小さいものの、コンクリートが負担する耐力が大きいためと考えられる。

これに対して(2)の場合は、終局変位は比較的良好に対応しているが、耐力については小さくなっている。耐力が小さくなった原因は、特に終局ひずみ以上に達している拘束コンクリートの圧縮力を見込まなかったためである。実際はこのひずみ域でもある程度圧縮力を負担すると考えられるが、終局ひずみ以降の拘束コンクリートの応力-ひずみ関係は道示では規定されていないこと、他にも様々な応力-ひずみ関係の提案式があるが、いずれが妥当であるかについては別途検討が必要であることから、ここではこのひずみ域での応力を考慮した検討は行わなかった。ただ、終局変位については比較的良好に対応している。これは終局定義位置が(1)に比べ図心に近かつ中立軸との距離が短くなるために、曲率が大きくなったことによると考えられる。

これらの結果を踏まえて、(3)終局の定義位置を(1)と(2)の中間位置にした場合、について保有耐力計算を行った。耐力はやや小さいものの、終局変位は実験による耐力低下開始前の段階にあり、全体的に(1)、(2)よりも耐力・変形とも実験値との対応がよい。このことから、対角線方向载荷の際の正方形断面を有する部材の耐力および変形特性を、道示による保有耐力法を前提として算出する際には、終局の定義位置をおおむねこの位置として算出した結果が目安となると考えられる。

5. 結論

载荷方向の違いが正方形断面を有する RC 柱の耐力・変形特性に及ぼす影響を検討するために、断面軸方向に载荷した場合と、対角線方向に载荷した場合について一

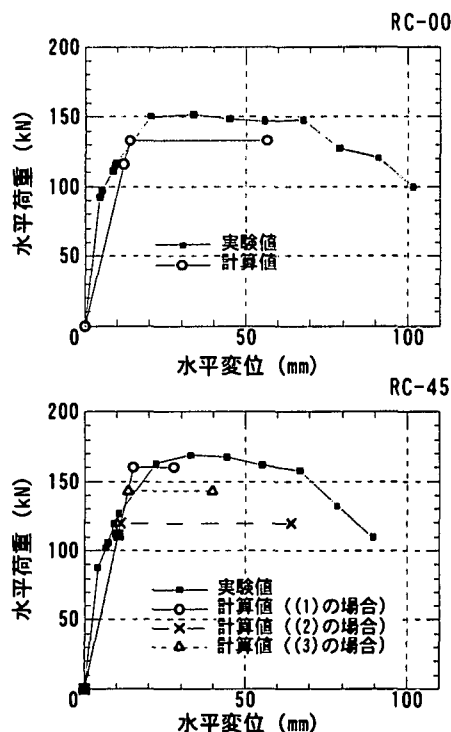


図-11 水平荷重-変位の保有耐力法計算と実験の比較

方向正負交番载荷実験を実施した。水平荷重-変位、軸方向鉄筋ひずみ分布、曲率、保有耐力法による計算を通じて両者を比較した結果、次のような結論を得た。

- (1) 最大耐力は、対角線方向に载荷した場合の方が通常考慮する方向に载荷した場合よりやや大きくなる。
- (2) 最大耐力後の耐力低下の割合は、対角線方向载荷の場合の方が大きい。
- (3) 変形要因を分析するために曲率および柱基部の回転角の算出をした。その結果、対角線载荷の場合は、断面軸方向载荷の場合に比べて曲げ変形(曲率)が小さく、回転変形(回転角)が大きいことがわかった。
- (4) 保有耐力法に基づく計算値と実験値を比較した結果、断面軸方向载荷の場合は、終局までの耐力および変形特性が比較的良好に対応するのに対し、対角線方向载荷の場合は、終局の定義位置を圧縮側最外縁鉄筋と断面中心から载荷方向に対し 45° 方向に位置する圧縮側鉄筋を载荷直角方向に結ぶ線上の中間として算出した場合により対応を示した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、1996.12
- 2) 例えば、Caltrans : Caltrans Seismic Design Criteria Version 1.1、1999.7
- 3) 星隈順一・運上茂樹・川島一彦・長屋和宏：載荷繰り返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法、構造工学論文集 Vol.44A、pp.877-888、1998.3