

論文 RC 主塔部材の 2 軸曲げ履歴復元力特性

一宮 利通*1・村山八洲雄*2・須田久美子*3・新保 弘*1

要旨：RC主塔部材を対象とした2軸曲げ交番加力実験より、2軸曲げ履歴復元力特性を調べ、ファイバーモデルにより精度よく予測可能であることを確認した。また、破壊曲線を用いることにより2軸曲げの降伏耐力および最大耐力を推定できることを確認した。更に、軸力が大きい方が耐力は大きくなるが、軸力が小さい方が柱筋の座屈が起こらないので破壊までに吸収するエネルギーは大きくなること、2軸曲げを受ける場合、1軸曲げの場合より吸収エネルギーが小さくなることがわかった。

キーワード：2軸曲げ、吸収エネルギー、RC主塔、履歴復元力

1. はじめに

斜張橋に2方向の地震力が作用すると、主塔部材には2軸曲げが生じる。また、逆Y型の主塔では、自重により一定の曲げモーメントが作用した状態で、その直角方向の地震力による交番曲げが生じる場合がある。高軸応力下における2軸曲げに関する研究は建築分野で盛んに行われているが、ほとんどが柱筋比および帯筋比の大きい正方形の柱部材に関するものである。そこで、本研究では、まず柱筋および帯筋の鉄筋比が小さく2辺の長さが異なる断面を持つ部材についてRC主塔部材を対象とした2軸曲げ交番加力実験を行い、その履歴特性を調べる。次に、ファイバーモデルを用いてシミュレーション解析を行い、その適用性を確認する。また、軸力の違いや2軸曲げが吸収エネルギーに与える影響を調べる。

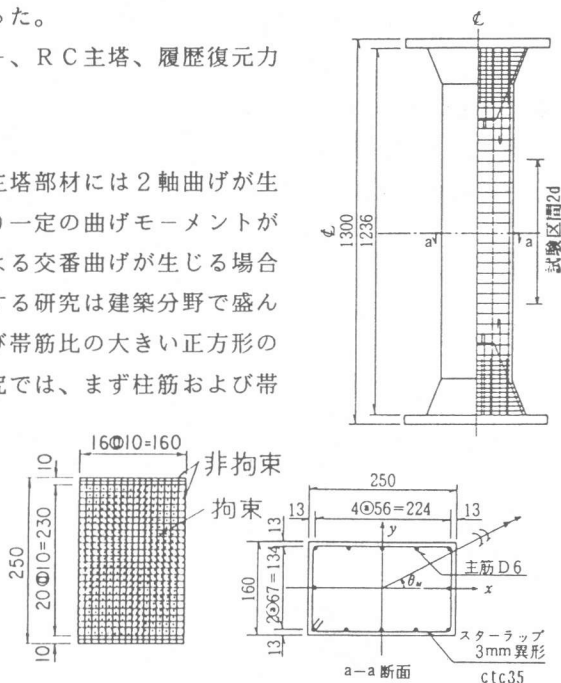


図-2 解析モデル

図-1 試験体諸元

表-1 実験配列および材料特性

試験体No	鉄筋比(%)		軸方向鉄筋		コンクリート			軸応力 (kgf/cm ²)	載荷方法
	軸筋	帯筋	降伏応力度 (kgf/cm ²)	降伏時ひずみ	強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	最大強度時ひずみ		
U 1	0.25	強軸	3,030	0.002	443	3.62×10^6	0.002	80	$\theta M = 0^\circ$
U 2					473	3.69×10^6		7	
B 1	0.95	弱軸			407	3.70×10^6		80	$\theta M = 45^\circ$
B 2					426	3.70×10^6		My 一定	
B 3					430	3.70×10^6			E1-Centro

*1鹿島建設(株)技術研究所第一研究部、工修(正会員)

*2鹿島建設(株)技術研究所第一研究部、専門部長、工博(正会員)

*3鹿島建設(株)技術研究所第一研究部、(正会員)

2. 実験および解析の概要

試験体の形状寸法を図-1に示す。長辺が25cm、短辺が16cmの長方形断面で、軸方向鉄筋はD6を12本 ($\rho_l=0.95\%$)、帯鉄筋は3mm 異形鉄筋を35mmピッチ ($\rho_{wx}=0.25\%$ 、 $\rho_{wy}=0.16\%$) で配している。加力は3本のジャッキを用いて上下の載荷板を介して任意方向に純曲げを与えられるようにした。曲率は試験区間上下端4隅の相対変形を測定し、平均曲率として求めた。実験配列を表-1に示す。U1およびU2は1軸曲げでそれぞれ軸圧縮力の違いによる影響を調べる試験体である。B1、B2およびB3は2軸曲げで、B1はx軸(強軸)およびy軸(弱軸)まわりのモーメント(M_x および M_y)が等しくなるように载荷したもの、B2は M_y

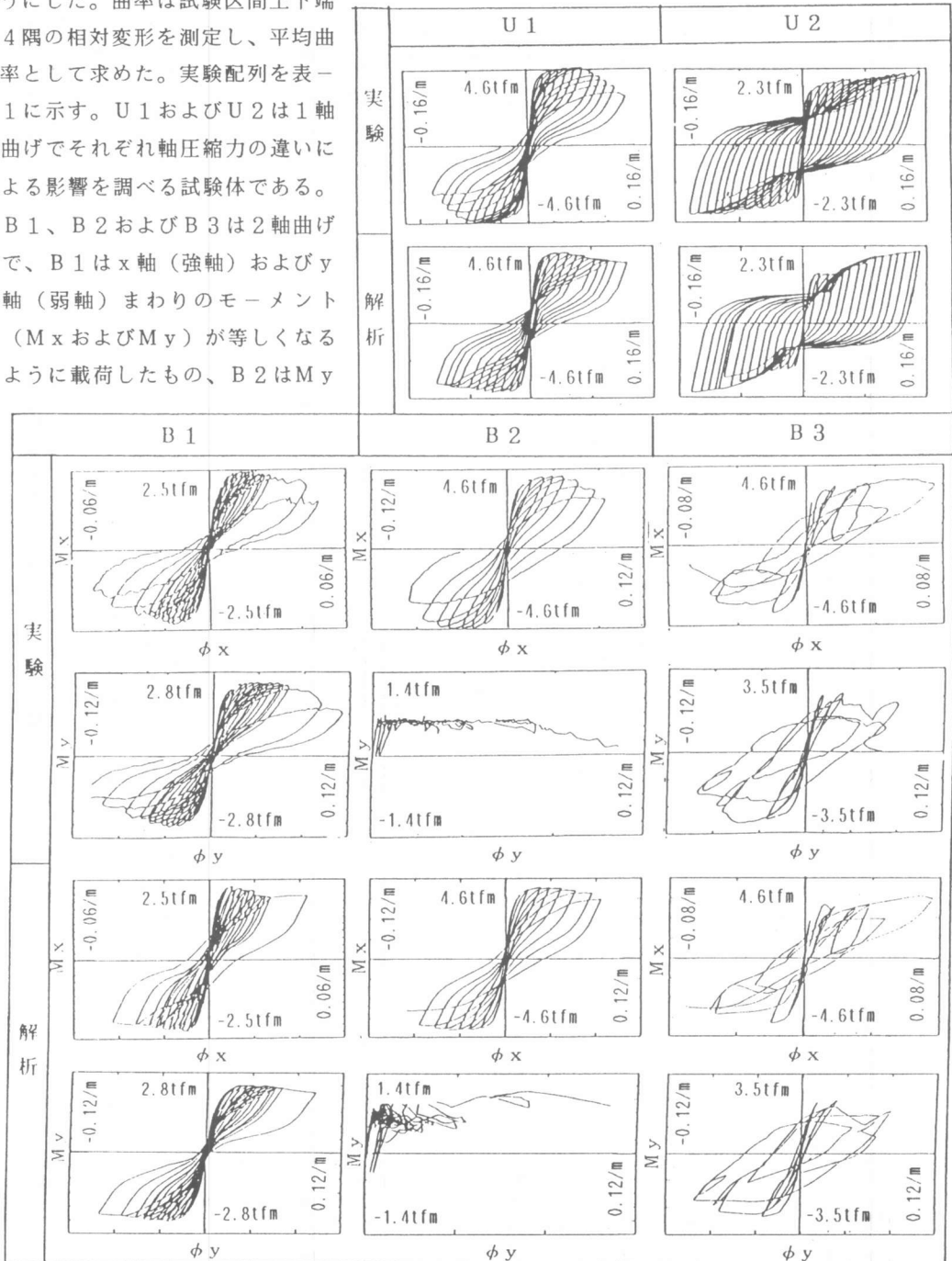


図-3 曲げモーメント-曲率履歴曲線

を一定（許容曲げモーメント）としてx軸まわりに交番载荷したものの、B3はEl-centro 加速度波形に比例する荷重を2方向にランダム载荷したものである。

解析はファイバーモデルを用いて行うこととし、図-2に示すように断面を分割した。コンクリートの応力ひずみモデルは、非拘束部分については1軸圧縮試験から直接求め、拘束部分についてはPark-Paulayの方法[1]を用いて修正した。ただし、最大強度までの曲線はPark-Paulayの方法[1]で放物線近似した。鉄筋モデルとしては、精度がよいといわれている加藤モデル[2]を用いた。解析方法の詳細については文献[1]を参照されたい。

3. 実験結果および考察

曲げモーメント-曲率関係の実験結果および解析結果を図-3に示す。全ての試験体について実験結果と解析結果はよく一致しており、ファイバーモデルを用いて1軸曲げおよび2軸曲げの交番载荷履歴をシミュレーションできることがわかる。

U1およびU2を比較すると、軸力の大きいU1では曲げモーメントが軸力の小さいU2の2倍程度に大きくなっているが、除荷に伴いくびれた形になっている。また、B1のx軸およびy軸、B2のx軸に投影した曲げモーメント曲率関係は軸力の等しいU1のものと形状がよく似ている。ただし、B1ではモーメントが小さくなっているが、Myが許容曲げモーメント程度のB2ではMxはU1とほとんど変わっていない。B1では、MxとMyが等しくなるように载荷しているが、長方形断面のためφy（弱軸まわりの曲率）がφx（強軸まわりの曲率）よりも2倍程度大きくなっている。B2では、x軸まわりに交番载荷するに従って、Myは一定であるにもかかわらず曲率だけが大きくなっていくのが特徴的である。B3では、x軸およびMyの比率の違いの影響でモーメント曲率関係の包絡線が他のものとはかなり異なったものとなっている。

図-4は解析で求めたx軸およびy軸まわりの降伏モーメントと最大モーメントをそれぞれ楕円で結んだもの（降伏曲線と破壊曲線[3]）である。これにそれぞれの試験体について実験結果をプロットしている。降伏モーメント、最大モーメントともよく一致している。また、B3については履歴軌跡の包絡線は降伏曲線に近いものとなっている。この方法でランダムを含めて任意方向の降伏モーメントおよび最大モーメントが予測可能であると思われる。ただし、最大耐力については計算値の方が概して低めになっている。

最大耐力および降伏耐力ともに吸収エネルギーは耐震性の重要な指標となっている。図-5にはU1およびU2について、実験から得られた試験区間における単位長さあたりの累積吸収エネルギー（各サイクルごとに曲げモーメント曲率履歴ループの面積として求めた吸収エネルギーを累積したものを曲率を横軸にとって示している。曲げモーメントについては軸力の大きいU1はU2のほぼ2倍であったが、吸収エネルギーは破壊までの各曲率でほぼ一致している。これは、軸力の大きいU1の方が耐力が大きくなっているが曲げモーメント曲率履歴曲線の原点付近がくびれているため、すなわち、軸力による耐力増分はループを描かないのでエネルギー吸収に寄与しないためである。また、U1はコンクリートの圧壊後鉄筋が座屈して耐力が低下しているため最終的にはU2の方が累積吸収エネルギーが大きくなっている。

各履歴ループの和として吸収エネルギーを求める方法は载荷ステップの大きさや繰返し数に結果が左右されるおそれがあるので、2軸曲げの結果については大略の傾向を知るために破壊時まで（耐力が降伏耐力となるステップまで）の包絡線が囲む面積（包絡面積と呼ぶ）で比較を行った。その結果を表-2に示す。ただし、B3についてはMxとMyの比率によって包絡線に凹凸が生じるが、ここでは凹凸に沿った線が囲む面積とした。1軸曲げを受けるU1とU2では包絡

面積がほぼ同じであるが、2軸曲げを受けるB1とB2では包絡面積が小さくなっている。解析で求めた弱軸回りの曲げ耐力は強軸回りの曲げ耐力の2/3倍程度で破壊時の曲率（耐力が降伏耐力となる曲率）はほぼ同じであるため、吸収エネルギーも2/3程度になっている。2軸曲げを受ける場合の包絡面積が小さくなったのは、弱軸の影響があることと、破壊が隅角部に集中するためであると思われる。また、B1ではB2よりも小さくなっているが、これはB1の方がより弱軸回りの曲率が大きく弱軸の影響が大きいことと、より破壊が隅角部に集中しやすいためと思われる。一方、ランダム載荷を受けるB3では、包絡面積がU1やU2よりも大きくなっている。1方向曲げ（2軸曲げの場合を含む）では側方筋のひずみは大きくなり得るために吸収エネルギーが大きくなっているものと思われる。ただし、入力波形が異なるとエネルギー吸収特性も異なるため一般的に論じるには様々な種類の波形を入力した場合の挙動を調べる必要がある。

4. まとめ

大きい軸力を受ける長方形断面のRC部材が2軸同時の交番繰り返し曲げを受けた場合および一定モーメントの直角方向に交番繰り返し曲げを受けた場合のモーメント-曲率履歴挙動を実験により調べた。本研究によって得られた結果は以下の通りである。

- ①ファイバーモデルを用いた解析により、2軸曲げの曲げモーメント-曲率履歴および吸収エネルギーを精度よく予測することができることを確認した。
- ②軸力が大きい場合耐力は大きくなるが、同一曲率の吸収エネルギーはほぼ同じである。また、軸力が小さい場合柱筋の座屈が起こっていないので破壊までに吸収するエネルギーは大きくなっている。
- ③破壊曲線を用いて交番荷重下においても2軸曲げの降伏耐力および最大耐力を推定できることを確認した。
- ④2軸曲げを受ける場合、1軸曲げの場合より吸収エネルギーが小さくなっている。これは、弱軸の影響を受けることと破壊が局所化するためであると思われる。

参考文献

- 1)村山、徳山、古市：2軸曲げを受ける柱部材のM-φ関係へのファイバーモデルの適合性、鹿島技術研究所年報、第39号、1991年10月、pp.57～64
- 2)Kato B., Akiyama H., and Yamanouchi Y.: Predictable Properties of Materials under Incremental Cyclic Loading, IABSE Reports, Vol.13, Lisbon, pp.119-124, 1973
- 3)Weber, D. C.: Ultimate Strength Design Charts for Columns with Biaxial Bending, Journal of ACI, pp.1205-1230, 1966.11

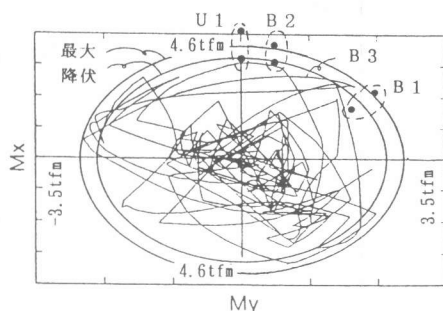


図-4 MxとMyの相関

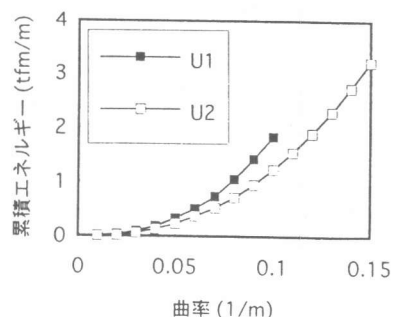


図-5 累積吸収エネルギー

表-2 包絡線の囲む面積

試験体No	包絡面積 (tfm/m) *		合計
	Mx-φx	My-φy	
U 1	0.625	0	0.625
U 2	0.639	0	0.639
B 1	0.117	0.191	0.308
B 2	0.449	0.023	0.472
B 3	0.327	0.385	0.712

