

(93) 構成則に基づいた変動高軸力RC柱の変形性能とハイブリッド地震応答実験

京都大学工学部 正会員 家村 浩和 京都大学工学部 正会員 山田 善一
 本四公団第二建設局 正会員 今井 清裕 京都大学大学院 学生員 清水 裕文

1. はじめに

斜張橋の塔や幅のせまい高層建築の柱などは、フレーム構造の変形による軸力変動の影響を無視することはできない。軸力変動下における鉄筋コンクリート部材の塑性領域における M (曲げモーメント) - ϕ (曲率) 関係を精算するためには、鉄筋や横拘束コンクリートの構成則を知る必要がある。本研究では、まず鉄筋および横拘束コンクリート供試体の繰返し載荷実験を実施し、RC部材構成材料の応力-ひずみ関係を示し、それらのモデルを検討した。さらに、変動軸力下でのRC柱正負交番曲げ実験を実施し、RC部材構成材料の応力-ひずみ関係から求めた M - ϕ 関係と実験結果を比較した。次に、変動高軸力下において入力波形、入力強度、鉄筋比がRC柱の弾塑性挙動に及ぼす影響を調べるため、HYLSERを用いたハイブリッド地震応答実験を実施し、 M - ϕ 関係の解析解の妥当性を検証するとともに、弾性応答時における劣化過程と破壊規範を検討した。

2. 鉄筋の構成則に関する実験

Fig.1 に示した $D13 \cdot SD35$ ・長さ25mmの異形鉄筋を供試体として、変位制御で引張圧縮の両側に繰返し載荷実験を行なった。Fig.2 に、Menegotto - Pintoモデル⁽¹⁾ に等方性ひずみ硬化の影響を考慮して修正した解析的な構成則を実線で示すとともに、実験値をプロットした。実験値が圧縮側で解析モデルの値よりもやや大きい値を示しているが、全体的には非常によい一致を示している。

3. 拘束コンクリートの構成則に関する実験

Fig.3 に、直径3mmの高強度鋼線のスパイラルフープにより横拘束した供試体を示した。コンクリートは、強度 450 kg/cm^2 を目標値として、配合設計を行った。変位制御で載荷実験を行なった。単調圧縮載荷時の応力-ひずみ関係を Fig.4 に示した。六車ら⁽²⁾ のモデルを修正した解析解を実線で示すとともに、実験値をプロットした。応力降下時に実験値と解析モデルの値の差が見られるものの、全体的によく一致している。

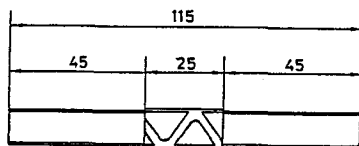


Fig.1 Specimen of a Reinforcing Steel Bar

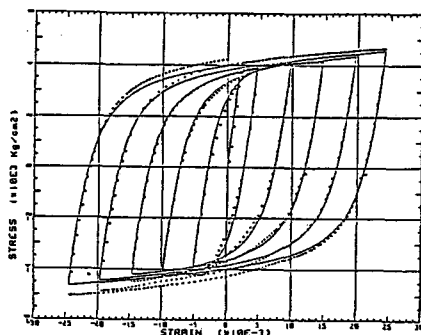


Fig.2 Stress-Strain Relation of Steel

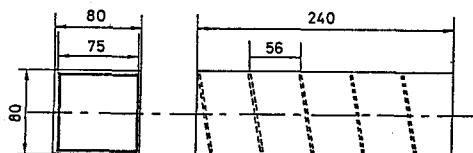


Fig.3 Specimen of Confined Concrete

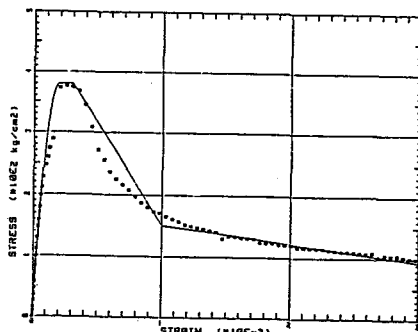


Fig.4 Stress-Strain Relation of Confined Concrete

4. 変動軸力下でのRC柱正負交番曲げ実験

実験供試体を、Fig.5 に示した。断面は一辺150mmの正方形複鉄筋断面とし、全長2090mmとした。主鉄筋は、鉄筋の構成則に関する実験と同じ D13 SD35 を用いた。横拘束筋として、Pitch 90mmのスパイラルフープ筋（直径5mm）を用いた。また、コンクリートの設計強度は、拘束コンクリートの構成則に関する実験と同じ450kg/cm²とした。著者らの開発したHYLSERシステムをFig.6 に示す⁽³⁾。実験システムは計測、制御、記録の3システムからなり16bit パソコンにより全体を制御している。軸力の変動量は、曲げ荷重に比例すると仮定し、軸力制御装置を荷重制御するとともに、曲げ荷重制御装置を変位制御で利用した。Fig.7 に、正負交番の荷重経路を示した。実験より得られたM-φ曲線をFig.10の破線で、軸力をFig.11の実線で示した。

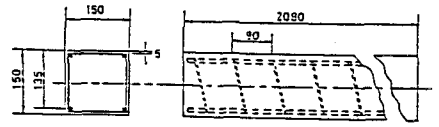


Fig.5 Specimen of Flexural Bar

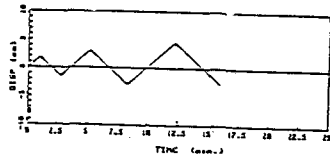


Fig.7 Loading Path

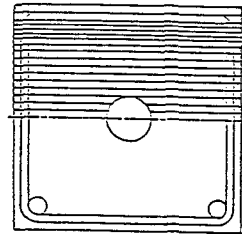


Fig.8 Fiber Elements of Cross Section

5. 構成則によるM-φの理論解析

断面をFig.8 のように分割し、38個のファイバー要素とする。RC柱の曲げ実験から得られた曲率と重心軸のひずみから、平面保持を仮定することによって各エレメントの平均ひずみが求められる。鉄筋と拘束コンクリートの構成則(Fig.2とFig.9)をもちいて、各エレメント応力から軸力と曲げモーメントを計算した。M-φの理論値をFig.10の実線で示

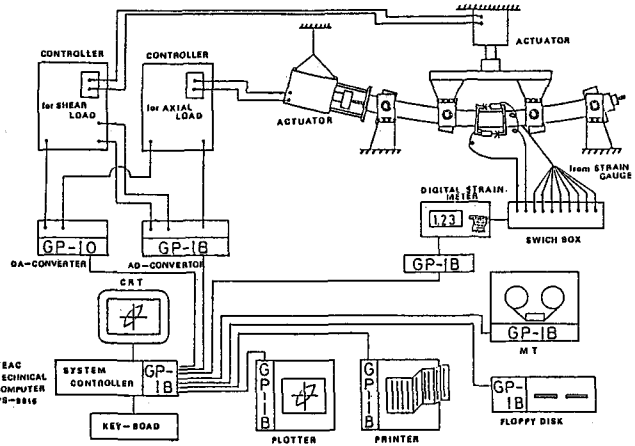


Fig.6 Diagram of the Experimental System (HYLSER)

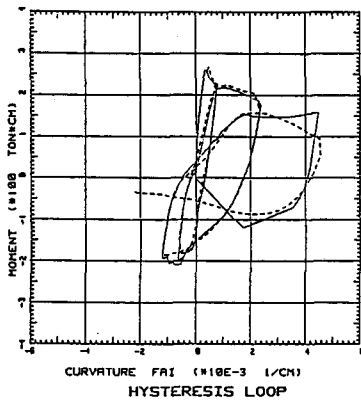


Fig.10 M-φ Relation

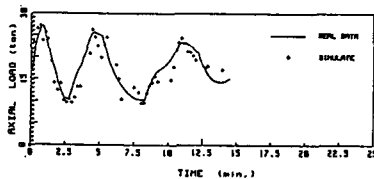


Fig.11 Axial Load Variation

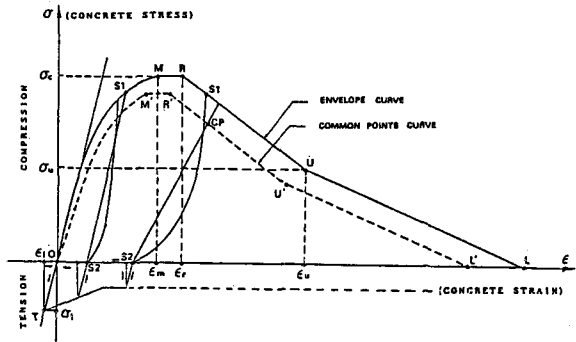


Fig.9 Supposed Stress-Strain Curve for Confined Concrete

し、軸力の理論値をFig.9 にプロットした。M-φ関係は、崩壊直前に至るまでの塑性域で解析解と実験値とが非常によく一致していることがわかる。軸力に関しては、解析解がややばらつきを示すものの、全体的傾向は一致していると考えられる。また、各ファイバー要素の応力-ひずみ曲線をFig.12に示した。

Fig.12によって、断面内各部のコンクリートと鉄筋がどのようなひずみ-応力履歴を描くかを明確に把握できる。

6. ハイブリッド地震応答実験概要

実験供試体は正負交番曲げ実験と同じ供試体(Fig.5)を用いた。横拘束筋として、Pitch 60mmと90mmの2種類を用いた。実験ケースは、入力波形、入力強度、鉄筋比の影響を調べるためTable.1 に示すように、11体作製した。入力地震動は、エルセントロ(NS)、八戸(NS)を採用した。この波形の周波数特性をエルセントロをFig.13、八戸をFig.14に示した。エルセントロ波形はパワースペクトルが一様に分布しており、また八戸波形は、0.4Hz付近が卓越している。供試体の弾性固有周期を0.5秒、減衰定数を2%とした。rは、部材の降伏加速度に対する最大入力加速度の比である。実験システムはFig.6 に示すHYLSERを用いた。

7. ハイブリッド地震応答実験の結果および考察

Fig.15にD-1 (El Centro r=1.3)、Fig.16にD-2 (El Centro r=2.0)、Fig.17にD-6 (八戸 r=1.3) Fig.18にD-8 (八戸 r=2.0)を示した。モーメントの正側で軸力を比例的に増加させ、負側で減少させた。r=1.3を入力したD-1およびD-6は、軸力減少側で塑性変形しているものの安定したループを描いている。一方、r=2.0 八戸入力のD-8は破壊し、エルセントロ入力のD-2は破壊しなかった。これは、八戸は長周期成分が卓越している。このため、部材劣化後固有周期が伸び、卓越した長周期成分と応答しやすくなったためと考えられる。D-1~D-11のエネルギー吸収分担率をFig.19に示した。Wc は減衰によって吸収するエネルギーでWh(up) は軸力増加側での履歴吸収エネルギー、またWh(down) は軸力減少側での履歴吸収エネルギーである。

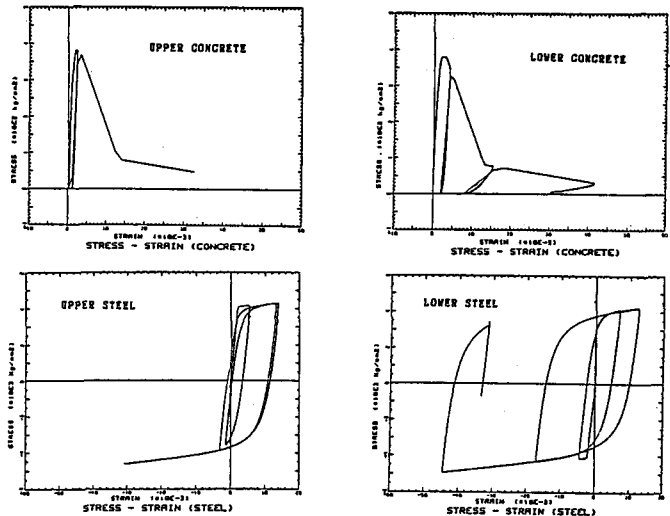


Fig.12 Hysteretic Stress-Strain Curves of Fibers

Table.1 Structural Characteristics

	Concrete Strength (kg/cm ²)	Steel Type	Transverse Reinforcement	入力波	r (入力加速度)
D-1	450.	D13	P. S SPIRAL	EL-CENTRO	1.3 (173gal)
D-2	600.	D13	P. S SPIRAL	EL-CENTRO	2.0 (265gal)
D-3	450.	D13	P. S SPIRAL	EL-CENTRO	1.3 (173gal)
D-4	450.	D13	P. S SPIRAL	EL-CENTRO	2.0 (265gal)
D-5	450.	D13	P. S SPIRAL	EL-CENTRO	2.3 (306gal)
D-6	400.	D13	P. S SPIRAL	八戸	1.3 (214gal)
D-7	400.	D13	P. S SPIRAL	八戸	2.0 (329gal)
D-8	450.	D13	P. S SPIRAL	八戸	2.0 (329gal)
D-9	470.	D13	P. S STUBBUP	八戸	2.0 (329gal)
D-10	470.	D10	P. S SPIRAL	八戸	1.3 (214gal)
D-11	470.	D10	P. S SPIRAL	八戸	2.0 (329gal)

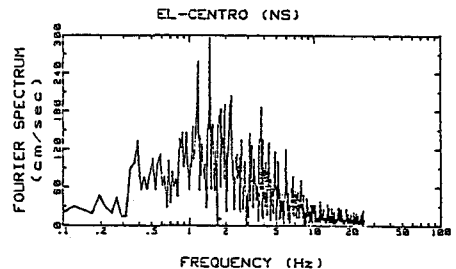


Fig.13 Fourier Spectrum HACHINOHE (NS)

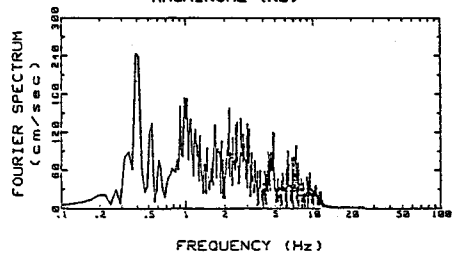


Fig.14 Fourier Spectrum

D-3~D-5に示されるように、入力強度が大きくなるに従って履歴によるエネルギー分担率が増加し、劣化が著しくなっている。なかでも入力強度が大きくなるにつれて軸力増加側でのエネルギー吸収率が増えており、この時、部材の劣化は激しくなっている。

8. 結論

本研究より以下の結論が得られた。

1) RC構成材料の実験結果からモデルの定数をきめることによって、変動軸力下のRC部材のM- ϕ 関係を精度よく計算できることが判明した。

2) 長周期成分の卓越した八戸波形入力の場合劣化後、この波と応答しやすくなり、部材の劣化は激しくなる。

3) 変動軸力下では、部材の劣化は、軸力増加側での挙動により特徴づけられる。入力強度が大きくなると履歴によるエネルギー分担率が増加し、しかも軸力増加側でのエネルギー分担率が増加し部材の劣化は激しくなる。

謝辞 本研究を実施するにあたって、文部省科学研究費および阪神高速道路公団、鹿島建設よりの研究助成をうけた。記して謝意を表する次第である。

参考文献 1) Menengotto, M. and Pinto, P., "Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plane Frames Including Changes in Geometry and Nonelastic Behaviour of Elements under Combined Normal Force and Bending", IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads, Final Report, Lisbon, 1973.

2) Mugeruma, H., Watanabe, F., Sakurai, K., and Nakamura, E., "Effect of Confinement by High Yield Strength Hoop Reinforcement Upon the Compressive Ductility of Concrete", Proceedings of the Twenty-Second Japan Congress on Materials Research, Kyoto, Japan 1979, pp.377-382

3) D.Ristic, Y.Yamada, H.Iemura, "Stress-Strain Based Modeling of Hysteretic Structures under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Loads", Kyoto University, School of Civil Engineering, Research Report, No.86-ST-01, March 1986

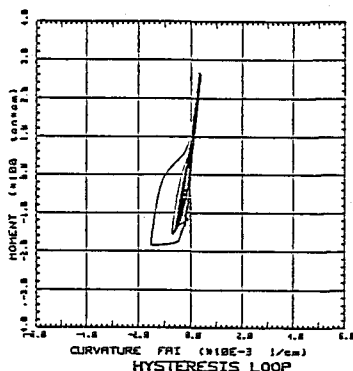


Fig.15 El Centro r=1.3

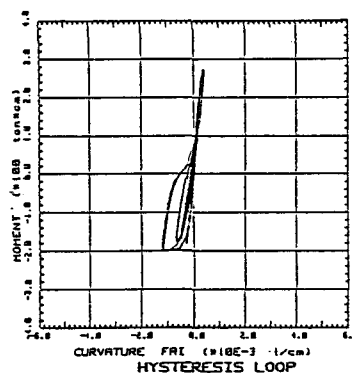


Fig.17 Hachinohe r=1.3

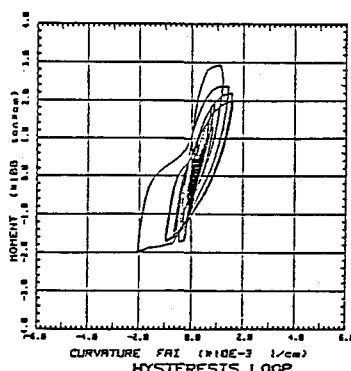


Fig.16 El Centro r=2.0

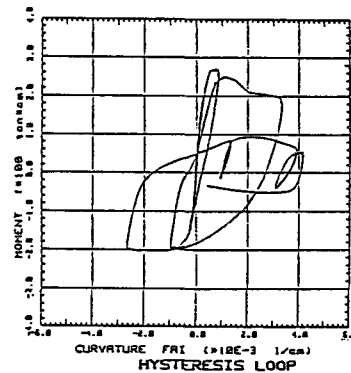


Fig.18 Hachinohe r=2.0

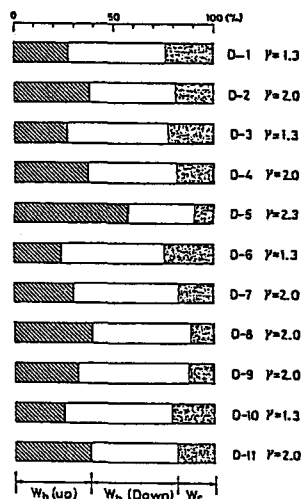


Fig.19 Energy Participation