

(83) 変動軸力下におけるRC柱模型のHYLSE Rによる弾塑性地震応答実験

京都大学工学部○正員 家村浩和 京都大学工学部 正員 山田善一  
 運輸省 正員 下司弘之 京都大学大学院 学生 今井清裕  
 京都大学工学部 Danilo Ristic

1. まえがき PC斜張橋タワー部のように高軸力を伴うRC柱では、軸力がじん性に及ぼす影響が大きく、また橋軸面外振動による軸力変動が考えられ、これらの軸力による影響を無視して耐震設計を行うことは妥当でない。本研究では、一定低軸力・一定高軸力・変動軸力作用下での、RC柱の静的曲げ載荷試験を実施し、さらに静的実験の結果にもとづいて、上記3種類の軸力作用下でのオンライン・ハイブリット地震応答載荷試験を実施した。

2. 実験装置と供試体 実験装置を Fig.1に示した。支点間距離は、1800mm、載荷方式は間隔600mmの2点載荷とし、両端支点及び載荷点では、水平移動及び回転移動を可能にし実験時の支持状態は、単純支持とした。実験供試体は Fig.2 に示すように 150mm X 150mm の正方形断面で全長 2090mm とし、配筋は主鉄筋として D13、横拘束筋として Pitch 90mm と60mmの2種類の高強度スパイラル・フープ筋を用いた。軸力は断面中央部のPC鋼棒をアクチュエーターで引き抜く反力により載荷してる。

3. 静的載荷実験と実験ケース Table.1 に示す4種類の実験ケースについて静的載荷実験を行った。S-2とS-3は軸力レベルの違いを調べるため、S-1とS-3は横拘束筋の拘束効果を、S-4は軸力の変動が部材強度・じん性に及ぼす影響を調べるために行った。載荷経路は Fig.3 に示すようにし、軸力レベルは実際のタワーにかかるであろうと予想される程度のコンクリート応力を採用した。軸力  $N=8.8\text{ton}$  の時  $\sigma_c = 35.0\text{ kg/cm}^2$  となり、 $N=26.5\text{ton}$  の時  $\sigma_c = 105.0\text{ kg/cm}^2$  となる。またS3は死荷重による軸力を  $N_0 = 17.7\text{ ton}$  とし、変動量は水平せん断力  $P$  に比例するものとした。実験から得られたモーメント-曲率関係を Fig.4 ~7 に示した。S-2とS-3を比べて、軸力が大きくなると降伏時の抵抗モーメントが大幅に増加するが、降伏後の変形能は急激に低下することがわかる。S-1とS-2から横拘束筋比の影響を判断すると、降伏時、最大耐力時の曲率がほぼ同じであるが、じん性に

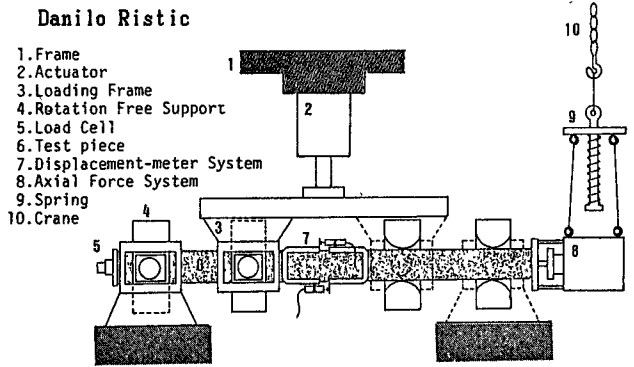


Fig.1 Loading System

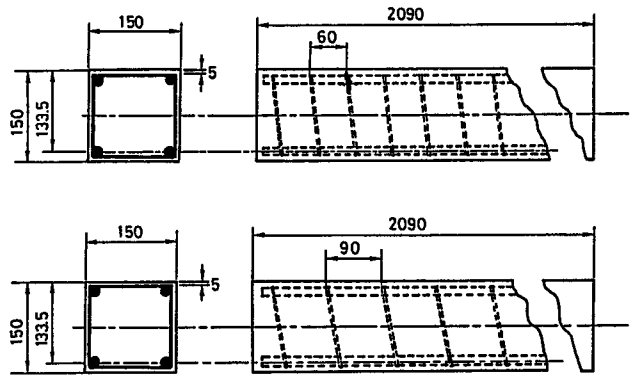


Fig.2 Specimen

Table 1 Test Cases of Static Loading

	Concrete Strength	Pitch	Axial Force (ton)
S-1	Normal	6	26.5
S-2	Normal	9	8.8
S-3	Normal	9	26.5
S-4	Normal	9	Time varying

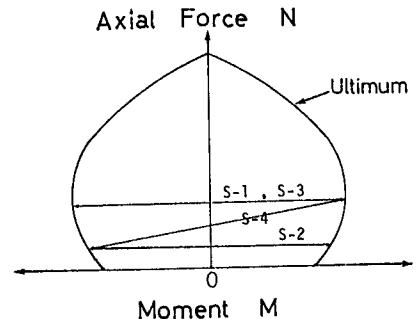


Fig.3 Axial Loading Pass

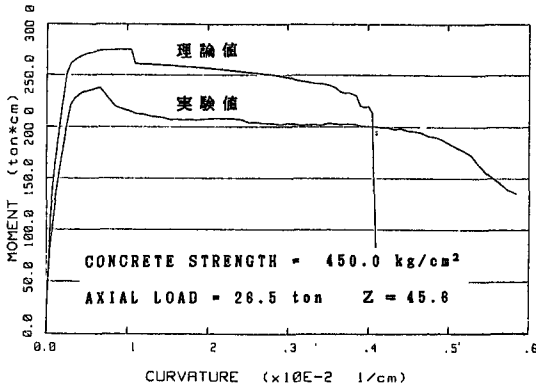


Fig. 4 M-φ Relation (S-1)

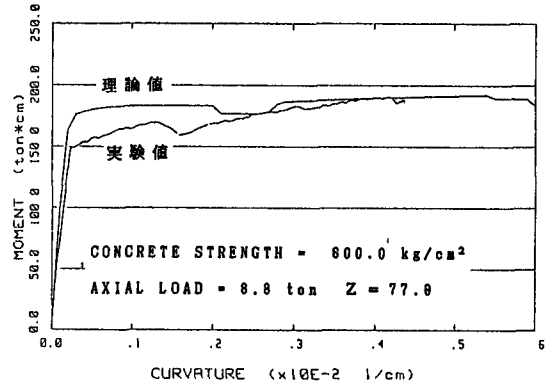


Fig. 5 M-φ Relation (S-2)

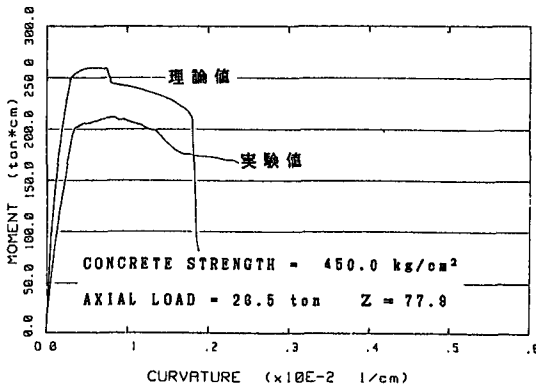


Fig. 6 M-φ Relation (S-3)

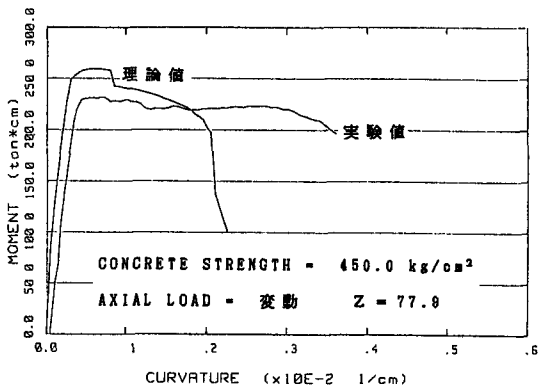


Fig. 7 M-φ Relation (S-4)

についてはS-1の方が優れている。このことから横拘束筋による効果はカバーコンクリート圧壊後に現れ、横拘束を密にすることでじん性を改善できることがわかる。次にS-4については、降伏耐力、最大耐力までは、S-3とほぼ同じレベルまで軸力が増加し、また外部コンクリート圧壊後は、抵抗モーメントの減少に応じて軸力が減少するため、S-3よりもじん性に富んだ復元力特性となっている。

**4. 理論解析との比較考察** 拘束コンクリートと主鉄筋の応力-ひずみ関係を各々 Fig. 8, 9のようにモデル化した。この2つのモデルを用いて、ParkとPaulayが提案した理論解析手法によって、各実験ケースについて求めた理論曲線を Fig. 4 ~ 7 に実験結果と共に示した。いずれのケースについても抵抗モーメントは理論値の方が大きい、終局じん性に関しては実験値の方が大きい。抵抗モーメントについて理論値の方が大きな値をとっている理由として次の3点などが考えられる。

1. 供試体の主鉄筋間の距離が設計よりも小さくなっている可能性がある。
  2. 供試体として打設したコンクリートの強度がシリンダー試験から得られる強度よりも低い可能性がある。
  3. モデル化したコンクリート及び鉄筋の降伏ひずみが実際とは一致しない可能性がある。
- 一方、実験結果の方がじん性に富んでいる理由としては拘束度を示すパラメーター、Zが拘束効果を過

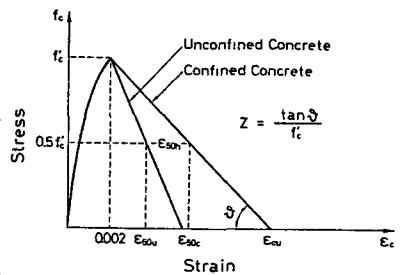


Fig. 8 Modeled  $\sigma$ - $\epsilon$  for Concrete

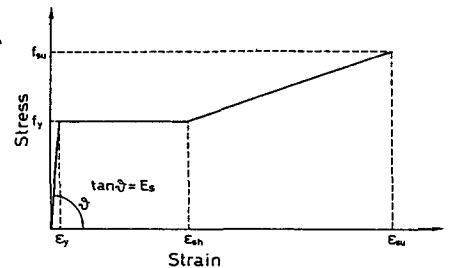


Fig. 9 Modeled  $\sigma$ - $\epsilon$  for Steel

小に評価していることが考えられる。

次に理論解析を用いて 1、最大耐力時 2、外部コンクリート圧壊時 3、主鉄筋降伏時 4、終局時についてのモーメント-軸力-曲率の Interaction Curve を求めた結果を Fig.10 に示した。ここで、終局とは拘束コンクリートの圧縮緑ひずみが圧縮限界ひずみ  $\epsilon_{cu}$  ( $Z=77.9$ の時  $0.0156$   $Z=81.2$ の時  $0.0148$ ) に達した時と定義した。この Interaction Curveにおいて、最大抵抗モーメントを与える軸力より大きな軸力が載荷される時は横拘束によるじん性の改善はみられず、最大抵抗モーメントを与える軸力より小さな軸力レベルでじん性の改善が期待できることがわかる。

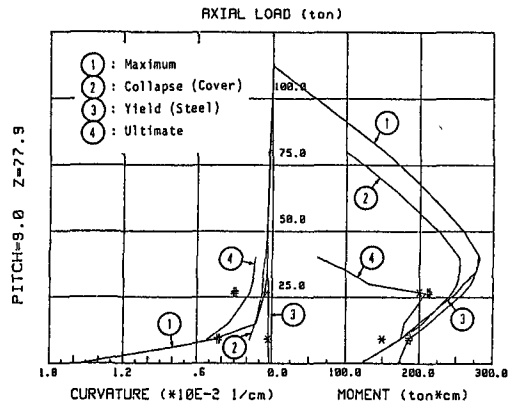


Fig.10 Interaction Curve

**5. 地震応答載荷実験システム** 本研究を実施するにあたり、オンライン・ハイブリッド地震応答載荷実験システム H Y L S E R (Hybrid Loading System of Earthquake Response) を新たに開発した。Fig.11 に全体図を示す。このシステムは、構造物の変位復元力関係を載荷実験より直接検出し、地震応答解析に取りこむシステムである。変動軸力載荷装置を荷重制御するとともに、地震応答曲げ荷重載荷装置を変位制御で利用した。実験制御信号および計測値はすべて各制御、計測記録機器が持つ GP-I B を通して、ハンドシェイクを行ないながら転送され、各作業は16ビットパソコン (TEAC PS 9816) により、自動的に実施される。

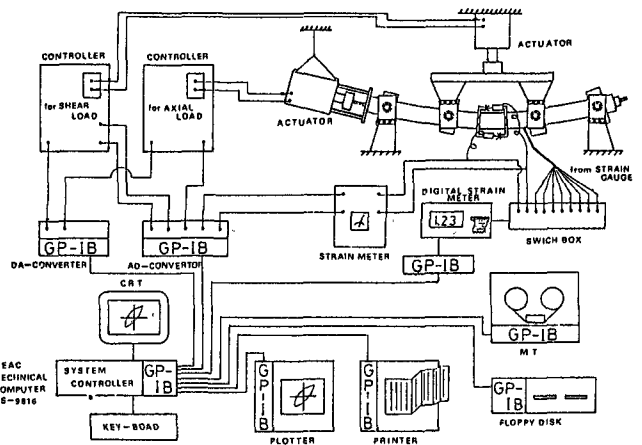


Fig.11 Diagram of the Online-Hybrid System

**6. 地震応答載荷実験のケース** 入力地震動としては Fig.12 に示したエルセントロ N S 記録 (1968) を採用した。供試体の弾性固有周期を 0.5秒、減衰定数を 2% とするとともに、載荷速度は実現象の 1/100 程度とした。実験ケースとしては、一定低軸力、一定高軸力、変動軸力について行ない、変動軸力については、変動量は復元力 P に比例させ、静的実験で示した M-N 相関曲線上を、直線的に移動する載荷経路を採用した。さらに、フープ筋のピッチの差を検討するため、Table.2 に示した合計17体の試験を実施した。γは部材が降伏する加速度に対する入力加速度の比である。

Table 2 Test Cases of Hybrid Loading

	Concrete Strength	Pitch	Axial Force (ton)	$\gamma =$ 入力加速度 / 降伏加速度	降伏加速度 (gal)
D-1	Normal	6	8.8	2.0	113.8
D-2	Normal	6	26.5	2.0	151.6
D-3	Normal	6	26.5	1.3	151.6
D-4	Normal	6	Time Varying	2.0	132.7
D-5	Normal	6	Time Varying	1.3	132.7
D-6	Normal	9	8.8	2.0	113.8
D-7	Normal	9	8.8	1.3	113.8
D-8	Normal	9	26.5	1.3	151.6
D-9	Normal	9	Time Varying	2.0	132.7
D-10	Normal	9	Time Varying	1.3	132.7
D-11	High	6	Time Varying	2.0	156.9
D-12	High	6	Time Varying	1.3	156.9
D-13	High	9	Time Varying	2.0	156.9
D-14	High	9	Time Varying	1.3	156.9
D-15	Normal	6	26.5	1.0	151.6
D-16	Normal	6	26.5	2.0	151.6
D-17	Normal	9	Time Varying	2.0	132.7

**7. ハイブリッド地震応答実験結果**

**7.1 一定軸力実験結果** Fig.13 には一定軸力が低く ( $N=8.8$ ton)、ピッチ間隔が大きく (90mm)、入力加速度が大きい ( $\gamma=2.0$ ) 場合 (ケース D-6) の地

震応答時におけるモーメント-曲率の履歴曲線を示した。軸力が比較的低いため、降伏モーメントも低いが、降伏後のじん性に富み、履歴ループも安定したものとなっている。一方 Fig.14 には、一定軸力が比較的高く ( $N=26.5\text{ton}$ )、ピッチ間隔が大き ( $90\text{mm}$ )、入力強度が小さい ( $\gamma=1.3$ ) 場合 (ケースD-8) の履歴曲線を示した。軸力が高いため、降伏モーメントが高くなっているが、降伏後の剛度はマイナスの値を取り、繰り返し荷重効果によるループの平均剛度の劣化が著しく、地震応答の途中で崩壊した。

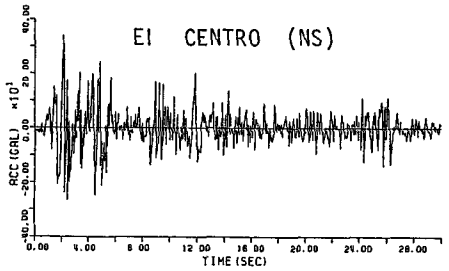


Fig.12 Input Earthquake Acceleration Record

このケースでは、降伏と同時にコンクリートの圧壊が始まり、降伏度が低いため、断面の欠落が著しく、じん性に極めて乏しい結果となった。

## 7.2 変動軸力実験結果

Fig.15 には、軸力が変動し、ピッチ間隔が大き ( $90\text{mm}$ )、入力強度が大きい ( $\gamma=2.0$ ) 場合 (ケースD-9) の結果を示した。モーメントの正側で軸力が増加し、負側で減少する。正側の降伏強度は高いが、繰り返しによるコンクリートの圧壊のため、ループのピーク値の低下が見られる。負側では、降伏強度は低いですが、抵抗値の劣化が見られない。Fig.16 には Fig.15 と同様のケースで入力強度を低くした ( $\gamma=1.3$ ) 場合 (ケースD-10) の結果を示したが、軸力が増加する側と低下する側とでは、全く異なった履歴ループを示すことがわかる。このように軸力が変動すると  $M-\phi$  関係も変動するので、地震応答を精度よく評価するためには、この効果を取り入れた解析が必要となる。

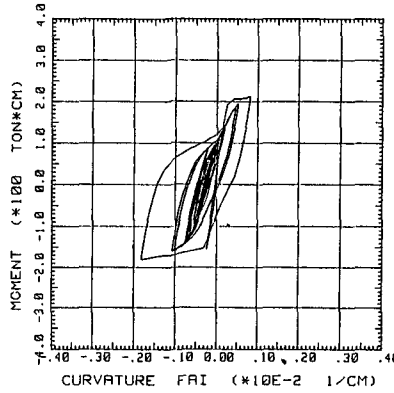


Fig.13 Hysteretic Response of D-6

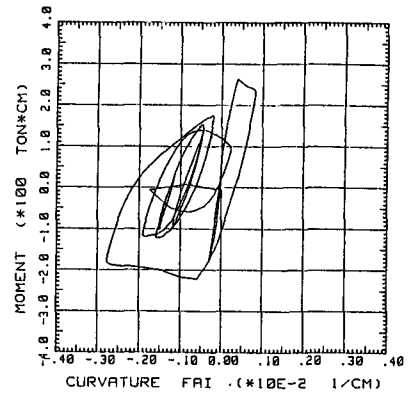


Fig.14 Hysteretic Response of D-8

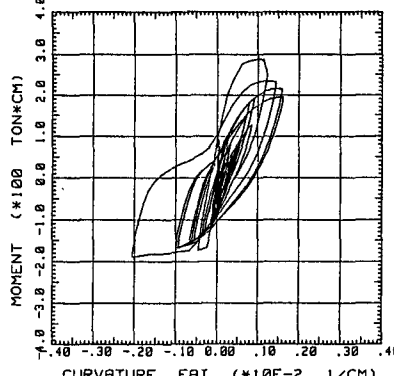


Fig.15 Hysteretic Response of D-9

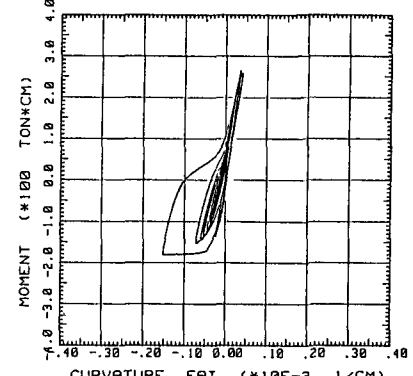


Fig.16 Hysteretic Response of D-10

**8. 結論・謝辞** 軸力と曲げを受けるRC柱は軸力の大きさによって鉄筋降伏時の抵抗モーメントが変動し、外部コンクリート圧壊後のじん性にも影響を与える。Interaction Curve 上で最大抵抗モーメントを与える軸力より低い軸力下で横拘束によるじん性の改善が見られ、部材の変形能による地震エネルギーの吸収が期待できる。RC柱の地震応答を解析する場合においては軸力変動による非対称な復元力特性を考慮しなければならない。本研究を実施するに当って文部省科学研究費や、阪神高速道路公団、鹿島建設土木設計本部よりの援助を受けた。記して謝意を表す。