

論文 コンクリート充填円形鋼管柱の曲げ性状に関する研究

崎野健治*¹・蜷川利彦*²・松本勝憲*³

要旨：日米共同構造実験研究の一環として行われたコンクリート充填円形鋼管の実験結果をもとに、中心圧縮実験結果より拘束効果を定量的に評価し、相互拘束効果を考慮した曲げモーメント-曲率解析を行った。解析結果は一定軸力下の純曲げ実験結果をほぼ予測できるものであったが、今後解析に取り入れるべき因子も明らかとなった。

キーワード：コンクリート充填円形鋼管柱、拘束効果、曲げモーメント-曲率解析

1. 序

日米共同構造実験研究の第5フェーズとして、ハイブリッド構造に関する研究が平成5年度より行われている[1]。その研究対象の1つとしてコンクリート充填鋼管(以下CFTと呼ぶ)構造がある。本論文では、日米共同構造実験研究における一連の実験結果[2]をもとに、円形断面柱の弾塑性性状について、コンクリートと鋼管の相互拘束効果に着目して検討を行う。中心圧縮実験結果より拘束効果を定量的に評価し、それを用いて相互拘束効果を考慮した曲げモーメント-曲率解析を行う。解析結果を一定軸力下の純曲げ実験結果と比較し、解析の妥当性を検証する。

2. 試験体および実験概要

日米共同構造実験研究では、実験変数の幅広い組み合わせの試験体について実験が行われている。即ち、鋼管の降伏応力度 σ_y は283, 578, 834MPa、コンクリートのシリンダー強度 σ_c の範囲は24.5~85.1MPa、径厚比 D/t の範囲は16.7~152.0である。本論文で対象とした試験体は中心圧縮が36体と純曲げが28体である。鋼管の長さは径の3倍で、両端にエンドプレートを溶接している。鋼管は冷間成形材で、残留応力除去焼鈍は施されていない。鋼材の機械的性質については文献[2]を参照されたい。鋼管は材質ごとに板厚を一定としており、 D/t により径が異なる。そのため、試験体の最大径($D=45\text{cm}$)は、最小径($D=10.8\text{cm}$)やシリンダー直径($D=10\text{cm}$)の4倍以上となり、(充填)コンクリートの強度をシリンダー強度で画一的に評価することには問題があると考えた。本論文ではスケールエフェクトを考慮したコンクリート強度 σ_c を用いることにし、その評価には米国開拓局の実験結果[3]を用いた(図1参照)。中心圧縮実験は(社)建築業協会と建設省建築研究所で実施された。試験体および実験について詳しくは文献[2]または文献[4]を参照されたい。純曲げ実験は九州大学で実施された。試験体一覧を表1に示す。図2には実験に用いた加力装置を示す。曲げモーメントは油圧ジャッキにより加力ビームを押し開くことにより载荷した。軸力はこのジャッキ

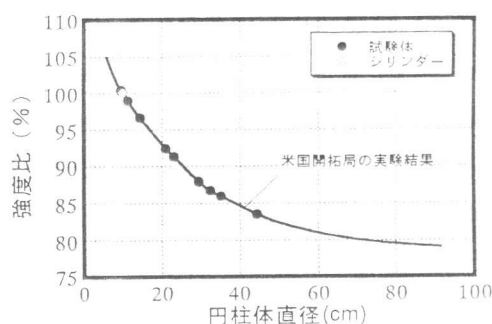


図1 試験体寸法のコンクリート強度に及ぼす影響[3]

*1 九州大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

*2 九州大学助手 工学部建築学科、工修(正会員)

*3 鹿島建設(株)、工修

と500ton油圧試験機により載荷することになるが、試験体に一定軸力を作用させるため、両者の荷重の和が一定値になるように調整した。実験について詳しくは文献[2]を参照されたい。

3. 中心圧縮実験結果による拘束効果の定量的評価

コンファインドコンクリートの圧縮強度 $c\sigma_{CB}$ が鋼管による拘束応力 σ_r の1次関数で表されるものとする、円形CFT柱の中心圧縮耐力 N_u は以下の式で表すことができる(図3参照)。ここで、応力は圧縮を正とする。

$$c\sigma_{CB} = c\sigma_p + k\sigma_r = c\sigma_p + k \cdot 2t_s \sigma_\theta / (D - 2t)$$

$$N_u = c\sigma_{CB} \cdot cA + s\sigma_z \cdot sA = N_0 + sN_0$$

$$k \cdot s \sigma_\theta (D - 2t) / 2 / (D - t) \cdot sA + s \sigma_z / s \sigma_y \cdot sN_0 = N_0 + \{-1.0 - \alpha \cdot k(D - 2t) / 2 / (D - t) + \beta\} sN_0$$

$$= N_0 + \lambda sN_0$$

$$N_u / N_0 = 1.0 + \lambda \cdot sN_0 / N_0$$

ここで、 k : 拘束係数

$c\sigma_p$: 無拘束コンクリートの軸圧縮強度

$$N_0 = cN_0 + sN_0 = c\sigma_p \cdot cA + s\sigma_y \cdot sA$$

$$\alpha = s\sigma_\theta / s\sigma_y \quad \beta = s\sigma_z / s\sigma_y$$

α 、 β が定数であれば、中心圧縮耐力 N_u と単純累加強度 N_0 の比 N_u/N_0 は鋼管の一軸圧縮強度 sN_0 と N_0 の比 sN_0/N_0 の一次関数(切片が1.0で傾き λ の直線)で表される。

図5に sN_0/N_0 と、 N_u/N_0 の実験値との関係を示す。 N_u は実験における最大耐力である。ほとんどの試験体で N_u/N_0 は1.0を上回っており、拘束効果による強い右上がりの傾向がみられる。ばらつきもさほど大きくはない。また、図には最小自乗法より求めた実験値の一次近似式を示している。近似式の切片はほぼ1.0となっているが、プレーン(無拘束)コンクリート試験体では耐力上昇は無い($sN_0/N_0=0$ で $N_u/N_0=1.0$)という条件を用いて一次近似すると、式は $N_u/N_0 = 0.229 \times sN_0/N_0 + 1.0$ となる。本論文ではこの式の傾き $\lambda=0.229$ を拘束効果とする。鋼管に Von

表1 試験体および実験結果一覧

試験体名	鋼管径 D (mm)	径厚比 D/t	鋼管の軸圧縮強度 $c\sigma_B$ (MPa)	コンクリートの軸圧縮強度 $c\sigma_p$ (MPa)	鋼管の軸圧縮強度 $s\sigma_y$ (MPa)	軸力比 N No	exMu (kN)	cMu (kN)
EC4-A-4-035	15.0	50.7			39.9	38.7	0.352	32.2
EC4-A-4-060							0.605	26.8
EC4-C-2-035					24.5	21.6	0.374	129.1
EC4-C-2-060							0.641	110.4
EC4-C-4-030							0.335	151.0
EC4-C-4-040	30.0	101.4	283.4 (0.69)		39.9	35.1	0.446	157.6
EC4-C-4-060							0.669	131.4
EC4-C-8-045					77.6	68.3	0.502	195.4
EC4-C-8-060							0.669	161.9
EC4-D-4-040	45.0	152.0			39.9	33.3	0.468	412.4
EC4-D-4-060							0.702	349.0
EC6-A-4-020	12.2	26.9			39.9	39.5	0.200	47.2
EC6-A-4-060							0.599	42.4
EC6-C-2-030					24.5	22.4	0.307	157.9
EC6-C-2-060							0.615	133.1
EC6-C-4-025							0.260	174.9
EC6-C-4-030	23.9	52.6	578.6 (0.90)		39.9	36.4	0.312	178.7
EC6-C-4-060							0.624	156.4
EC6-C-8-030					77.6	70.8	0.319	218.7
EC6-C-8-060							0.638	179.3
EC6-D-4-030	36.0	79.3			39.9	34.3	0.328	463.8
EC6-D-4-060							0.656	402.2
EC8-A-4-015	10.8	16.7			39.9	40.1	0.150	48.5
EC8-A-4-060							0.598	54.2
EC8-C-2-060			834.6 (0.95)		24.5	22.7	0.605	221.2
EC8-C-2-080							0.807	150.2
EC8-C-8-060	22.2	34.3			77.6	71.7	0.620	268.8
EC8-C-8-070							0.723	263.7

注) $c\sigma_B$: コンクリートのシリンダー強度
 $c\sigma_p$: スケールエフェクトを考慮したコンクリート強度
 $exMu$: 曲げ耐力実験値 $clMu$: 曲げ耐力計算値
 N : 載荷軸力 No : $c\sigma_p \cdot cA + s\sigma_y \cdot sA$
 ()内は $\phi D=2.5\%$ 以上で亀裂を生じたもの
 ()内は $\phi D=2.5\%$ 以下で亀裂を生じたもの
 ■試験体名の付け方
 $EC8-\Delta-4-0.6$
 ◎軸力比 0.6 : $N/No=0.6$
 △コンクリートのシリンダー強度 2 : 約20MPa
 鋼管径厚比 A : FAランク 4 : 約40MPa
 B : FBランク 8 : 約80MPa
 C : FCランク
 (中空鋼管の場合の下限値に相当)
 鋼管材質 4 : 40キロ鋼 6 : 60キロ鋼 8 : 80キロ鋼

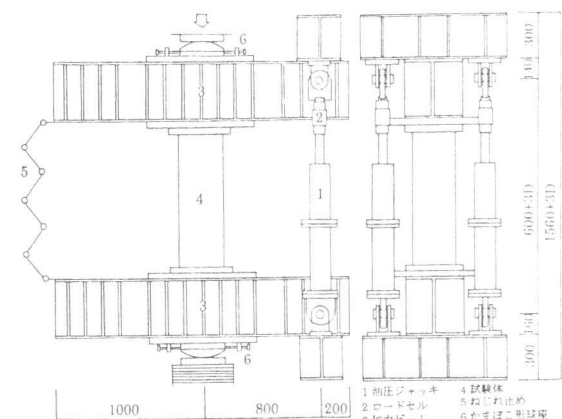


図2 加力装置

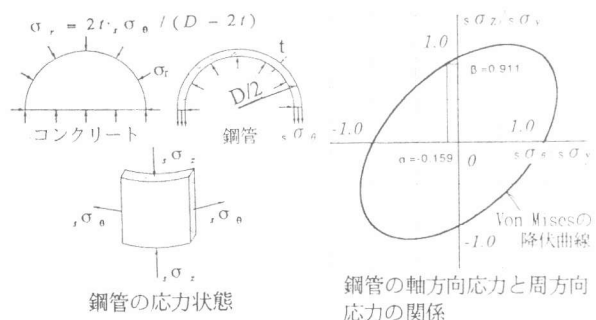


図3 充填コンクリートと鋼管の相互作用

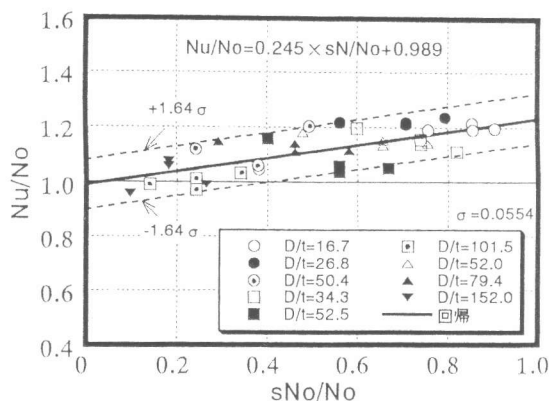


図4 中心圧縮柱の $N_u/No-sNo/No$ 関係と回帰式

Misesの降伏条件を用い、拘束係数 k はRichartの研究[5]より4.1とし、また鋼管の周方向応力および軸方向応力の降伏応力に対する比 α 、 β を定数と仮定して、 $\lambda = 0.229$ となる α 、 β の値を求めると、 $\alpha = -0.159$ 、 $\beta = 0.911$ となる。ただし、 $(D-2t)/(D-t)$ は、実験範囲の平均的な値をとり、0.976として計算した。参考のため、図5にはシリンダー強度を用いて求めた $sNo/No-N_u/No$ 関係を示す。

4. 中心圧縮柱の解析

前項で求めた拘束効果を用い、CFT短柱の軸圧縮力 N - ひずみ ε_c 関係の解析を行う。解析モデルを図6に示す。コンファインドコンクリートの軸方向応力 σ - ひずみ ε_c 関係には崎野・孫の提案式[6](図7参照)を用い、鋼管の σ - ε_c 関係は拘束応力に応じて軸方向強度を低減した完全弾塑性モデル(図8参照)を用いる。鋼管のひずみ硬化および局部座屈は考慮していない。図9に解析結果と実験結果[2]の比較の例を示す。その他の試験体および解析方法について詳しくは文献[4]を参照されたい。実験結果には高強度コンクリートを用いるか径厚比が大きい試験体にみられるように耐力低下の顕著なものから、コンクリート強度が小さく、径厚比の小さい試験体にみられるように耐力低下がほとんどないものまである。それぞれに対し解析結果はよい対応を示している。また、大変形時の $N - \varepsilon_c$ 関係に違いがみられるが、この理由の1つとしてはひずみ硬化の影響が考えられる。

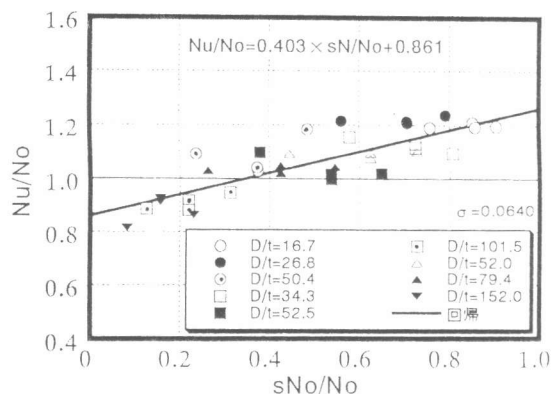


図5 中心圧縮柱の $N_u/No-sNo/No$ 関係と回帰式
(コンクリート強度にシリンダー強度を用いた場合)

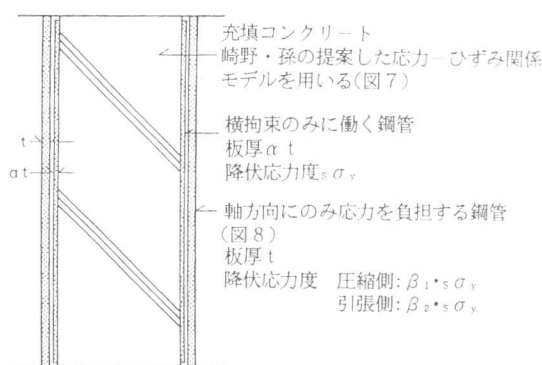
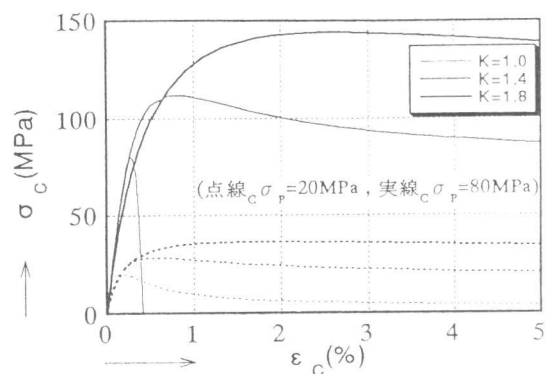


図6 柱のモデル化



$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{cB}} = \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2}$$

$$\sigma_{cB} = \sigma_p + k2t_s \sigma_0 / (D-2t)$$

$$X = \varepsilon_c / \varepsilon_{c0}, A = E_c \varepsilon_{c0} / \sigma_{cB}, K = \sigma_{cB} / \sigma_p$$

$$E_c = (0.69 + 0.332 \sqrt{\sigma_p}) \times 10^4, \varepsilon_{c0} = 0.94 (\sigma_p)^{1/2} \times 10^{-3}$$

$$\frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_0} = \begin{cases} 1 + 4.7(K-1), & K \leq 15 \\ 335 + 20(K-15), & K > 15 \end{cases}$$

$$D = 15 - 0.017 \sigma_p + 24 \sqrt{(K-1)} \sigma_p / 23$$

σ_c, ε_c : コンクリートの軸方向応力およびひずみ
 σ_{cB} : コンファインドコンクリートの強度
 ε_{c0} : コンファインドコンクリートの強度時のひずみ
 ε_0 : プレーンコンクリートの強度時のひずみ
 E_c : コンクリートのヤング係数(NewRC式)
 D : 応力-ひずみ関係の下り勾配係数

図7 解析に用いたコンファインドコンクリートの軸方向応力-ひずみ関係[6]

5. 純曲げ実験結果

各試験体の曲げモーメントー曲率関係を図10に示す。曲げモーメントは軸力による付加曲げモーメントを含んだ材軸中央断面の値であり、曲率 ϕ は検長(2.5D)間の平均曲率で、鋼管径Dを乗じて無次元化して示している。中心圧縮実験と同じく、耐力低下の顕著なものから耐力低下を生じないものまでであるが、 ϕ Dが1%以下で耐力低下を生じるD/t=101.3で $\sigma_r=77.6$ MPaの試験体(EC4-C-8-045, EC4-C-8-060)およびD/t=152.0の試験体(EC4-D-4-040, EC4-D-4-060)を除けば、 ϕ D=5%時の耐力は最大耐力の80%以上あり、変形能力は大きいといえる。図11には曲げ耐力実験値 $exMu$ と計算値 $clMu$ の比と、 sNo/N_0 との関係を示す。曲げ耐力実験値は実験における最大モーメントで、計算値は一般化累加強度式で求めた全塑性モーメントである。ほとんどの試験体で $exMu/clMu$ の値は1.0を上回り、また sNo/N_0 の値が大きくなるほど $exMu/clMu$ の値が大きくなる傾向がみられる。これらは相互拘束効果のためと思われる。

6. 純曲げ柱の解析および曲げ性状に関する考察

中心圧縮解析結果の実験値との対応は良く、解析モデルはほぼ妥当といえる。そこで同様のモデル(図6)を用い、曲げモーメントー曲率関係の解析を行う。ただし、鋼管の周方向応力は圧縮側と引張側で同じであるとし、二軸引張状態となる引張側の鋼管の応力ーひずみ関係は周方向応力に応じて軸方向強度を増大させた完全弾塑性モデル(図8参照)を用いる。コンクリートは引張力を負担しないものとする。解析は平面保持仮定を用い、鋼管とコンクリートの中立軸が一致するものとして行った。図10には解析で得られた曲げモーメントー曲率関係を示すが、解析結果は実験結果をほぼ評価しているといえる。しかし、大変形時においては、耐力低下のある場合、ない場合とも、ほとんどの試験体で解析結果は曲げモーメントを過小評価している。

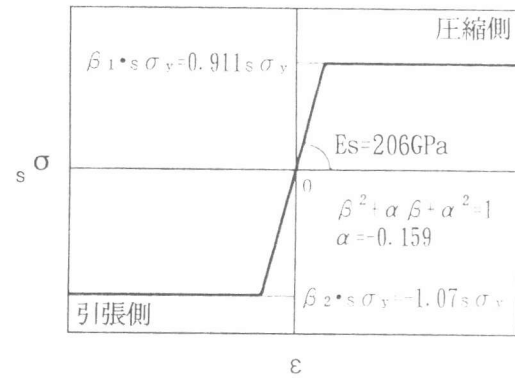
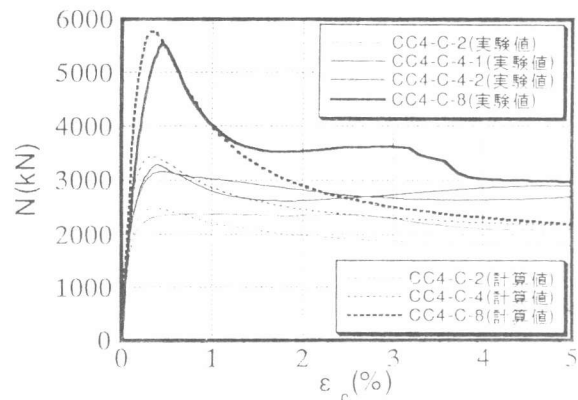
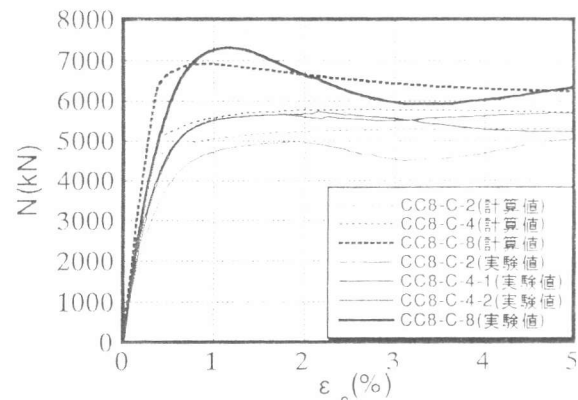


図8 解析に用いた軸応力負担用鋼管の応力ーひずみ関係



(a) D/t=101.5 $\sigma_y=283.4$ MPa



(b) D/t=34.3 $\sigma_y=834.6$ MPa

図9 軸圧縮力ーひずみ関係

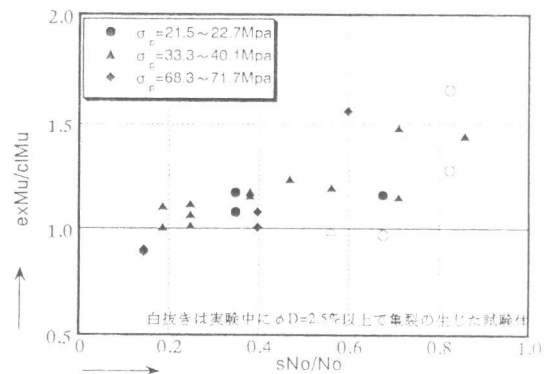


図11 曲げ耐力の実験値と計算値の比と sNo/N_0 との関係

注) 図中の▽印は目視により鋼管に局部座屈が確認された点、△印は鋼管とエンドプレートの溶接部に亀裂を生じた点を示す。

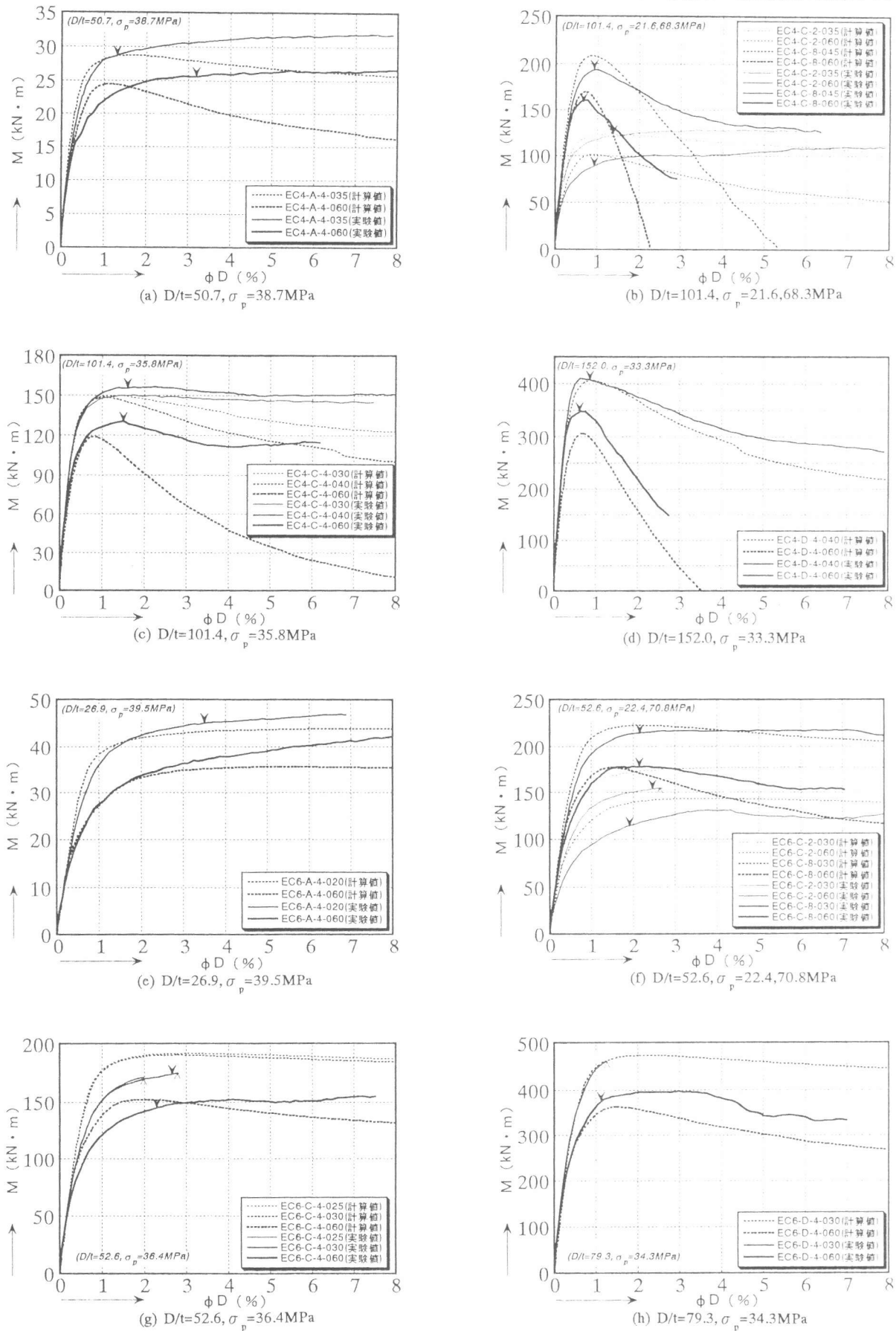


図10 曲げモーメント曲率関係

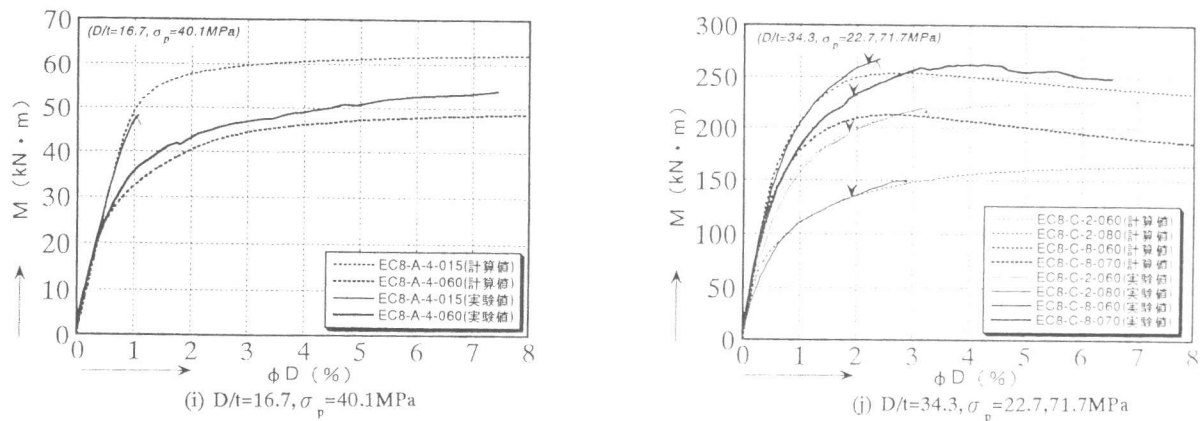


図10 曲げモーメント曲率関係(続き)

高張力鋼の試験体の方が対応がよい傾向がみられるが、その理由の1つとして、本実験で用いた高張力鋼の降伏比は高く、(解析では考慮していない)ひずみ硬化の影響が小さいことが挙げられる。また、中心圧縮解析より対応が悪いが、これはコンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼすひずみ勾配の影響と思われる。また、実験結果の方が剛性低下が早く始まっているのは残留応力の影響と思われる。

7. 結論および今後の課題

中心圧縮実験で得られた最大耐力をもとに定量的に求めた拘束効果を用い、コンクリート充填円形鋼管柱の相互拘束効果を考慮した曲げモーメント-曲率解析を行った。解析により、実験結果をほぼ予測できたが、より精度よく実験結果を評価するためには鋼管の残留応力、鋼管のひずみ硬化、コンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼすひずみ勾配の影響等を解析に取り入れる必要がある。また、今の所曲げ耐力実験値は実験における最大耐力を採っているが、最大耐力時の変形の大きさの幅は広く、かなり大きなものもある。したがって、耐力実験値にはひずみ硬化の影響が大きく含まれているものもあることや、実際の設計においては変形制限等もあることから、相互拘束効果を考慮した曲げ耐力の算定式を定式化するにあたっての考察には、解析結果も踏まえて曲げ耐力実験値を設定し直す必要があると考えている。

【謝辞】 本研究を実施するにあたりハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究 CFT分科会の委員には中心圧縮実験のデータを提供して頂いた。中心圧縮柱の解析について九州大学助手孫博士に貴重な意見を頂いた。純曲げ実験を行うにあたり九州大学文部技官川口晃氏および九州大学元4年生稲葉忠君(現東急建設)の協力を得た。ここに深く感謝致します。

【参考文献】

- [1] 山内泰之ほか：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究 その1～3，日本建築学会大会学術講演梗概集C，pp.1521～1526，1994.9
- [2] 向井昭義，崎野健治ほか：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究 CFT-1～8，日本建築学会大会学術講演梗概集C-1，pp.735～750，1995.8
- [3] R.F.Blanks, and C.C.Mcnamara: Mass Concrete Tests in Large Cylinders, ACI Journal, Procs. Vol.31, pp. 280～303, Jan.-Feb.1935
- [4] 崎野健治ほか：コンクリート充填鋼管短柱の中心圧縮性状に関する研究，日本建築学会研究報告 中国九州支部，第10号1，pp.693～700，1996.3
- [5] Richart et.al.:The Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression, Bulletin No.190, Engineering Experiment Station, University of Illinois, Feb.1929
- [6] 崎野健治，孫玉平：直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集 第461号，pp.95～104.1994.7