

論文

[2085] アンボンド型充填鋼管コンクリート構造の曲げせん断実験と弾塑性解析

正会員○佐藤孝典（清水建設技術研究所）

正会員 下戸芳寛（清水建設原子力本部）

1. はじめに

柱部材が高耐力、かつ高靱性であれば、設計上、①曲げ終局耐力(M_u)の向上、②構造特性係数(D_s 値)の低減、③柱と梁の強度比(cM_u/bM_u)の低減、④層間変形角(R)制限の緩和、⑤軸力比(N/N_0)制限の緩和、等に結びつけることができる。鉄筋コンクリート構造（以下、RC構造と略す）では、せん断破壊、曲げ圧縮部の脆性破壊、付着割裂破壊等の原因によって部材の靱性に乏しいため、これらの点で厳しい制約がある。これらを改善するために、筆者等は数年前より「アンボンド型充填鋼管コンクリート構造」（以下、UTC構造と略す）¹⁾²⁾³⁾を提案してきた。UTC構造はRC構造を円形鋼管で拘束したもので、コンクリートのコンファインド効果を期待している。さらにそれが最大限に発揮されるように、鋼管とコンクリートの界面に分離材が施されている。図-1に示すように、梁はRC構造、柱はUTC構造とすると、鋼管が充填コンクリートの軸変形に追従するように柱頭、柱脚に約30mmの変形吸収部を設けている。

本報告では高層建物の柱部材を模擬した1/2 縮小モデルの曲げせん断実験を行い、物理現象を説明する弾塑性解析モデルを提案し、動的解析用の復元力特性のモデル化に必要な折れ曲がり点を求める。この弾塑性解析は、材料の応力-歪関係を用い、平面保持の仮定に基づいて計算される。

その際、(a)コンクリートの応力-歪関係は、昨年報告したコンファインド効果を考慮したものを用いている点³⁾、また(b)断面の曲げ圧縮部コンクリートでは支圧効果($\sqrt{\frac{A_c}{A_1}}$, A_1 : 支圧面積、 A_c : 支承面積)を導入している点に特徴がある。

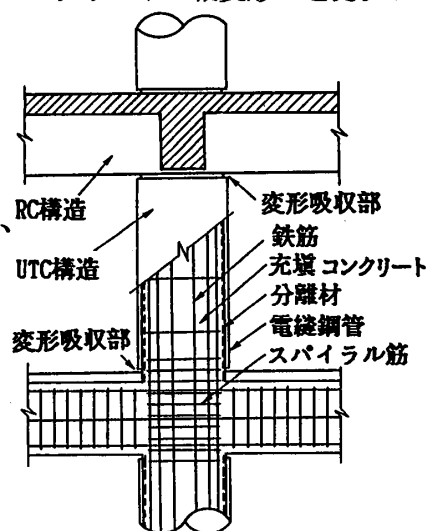


図-1 UTC構造柱とRC構造梁

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は変形吸収部を有するUTC構造柱部材の1/2 縮小モデルである。試験体一覧を表-1に示す。パラメータは、せん断スパン比(M/QD)、軸力比(N/N_0)、コンクリート強度($c\sigma_B$)、鉄筋量(P_g)、鋼管板厚(t)である。試験体の形状を図-2に示す。

表-1 試験体及び材料試験結果一覧

試験体 名称	せん断 スパン比 M/QD	軸力 比 N/N_0	コンクリート				鉄筋				鋼管				加力 方法	試験 結果
			N (t)	$c\sigma_B$ (kg/cm ²)	$c\epsilon$ (10 ⁻³)	ν	配筋 (鉄筋比)	σ_{T1} (kg/cm ²)	σ_{T2} (kg/cm ²)	σ_{T3} (kg/cm ²)	t (mm)	σ_{T1} (kg/cm ²)	σ_{T2} (kg/cm ²)	σ_{T3} (kg/cm ²)		
U10	2.0	0.4	428	574	3.25	0.192	10-D16 ($P_g=1.6\%$)	4190	5810	2.13	5.86	3760	4700	2.17	繰返	繰返
U100		0.0	0	560	3.52	0.199										
U108		0.8	856	574	3.56	0.200										
U104	0.4	0.4	359	408	3.45	0.217	10-D22 ($P_g=3.2\%$)	3630	5850	2.05	8.74	3580	4860	2.16	繰返	繰返
U103		0.0	428	560	3.61	0.206										
U109		0.8	478	577	3.44	0.192										
U10	1.0	0.4	428	551	3.32	0.212	10-D16 ($P_g=1.6\%$)	4190	5810	2.13	5.86	3760	4700	2.17	繰返	繰返
U104		0.0	359	408	3.45	0.217										
U103		0.8	428	545	3.43	0.187										
U109	0.4	0.8	478	574	3.56	0.200	10-D16 ($P_g=1.6\%$)	4190	5810	2.13	8.74	3580	4860	2.16	繰返	繰返

試験部位の上下端15mmは変形吸収部になっており、この部分では充填コンクリートは鋼管で被覆されていない。鋼管内面の分離材（アスファルト）の塗布はホットメルト式吹付法によった。その平均塗布厚は約 0.2mmであった。コンクリートの強度管理は $\phi 100 \times h200$ のテストピースの圧縮試験を毎週一回 5本行い、最大最小を除いた 3本の平均値を採用し、試験体の曲げ加力時の材令に対応させた。鋼管は残留歪を取り除くため焼鈍処理を行った。それぞれの材料試験結果一覧を表-1に示す。

2.2 加力装置及び計測方法

加力は、一定軸力下での逆対称曲げせん断加力とした。加力装置は、図-3に示すとおり、2台の軸変形制御用アクチュエータを用いたものである。所定の軸力を導入した後、加力ビームを介して正負交番繰返しせん断力を載荷した。繰返し回数は、部材角 $R=1/200, 1/100, 1/50$ で 3回ずつ、それ以外の変形で 2回ないし 1回とした。

水平変位は、上端スタブ及び下端スタブをそれぞれ不動点とした計測治具に沿って 4点または 8点で計測した。また軸変形は、上端スタブと下端スタブの間及び変形吸収部をまたぐ区間を計測した。

鋼管歪は、材軸方向の 5断面または 9断面の円周方向 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ の 5ヵ所の三軸歪を計測した。そして、鉄筋歪は、材軸方向の 5断面または 8断面の 4本または 6本の鉄筋の歪を計測した。

3. 実験結果

3.1 荷重-変形関係

UMN8以外は、加力装置の限界である部材角 $R=10\%$ まで所定の軸力を保持したまま安定した履歴ループを描いた。ここでは、図-4～図-9に一定軸力下におけるせん断力 (Q) - 部材角 (R) - 部材軸変形 (δ_N) 関係を点線 (---) で部材角 $R=4\%$ までの範囲を示す。図中には、鉄筋の圧縮降伏時 (Δ)、引張降伏時 ($\blacktriangle$)、鋼管の円周方向降伏時 ($\circ$)、最大せん断力時 ($\circ$)、最大曲げモーメント時 ($\bullet$) の点を示す。また、軸力による付加曲げモーメントを考慮する線 (---) も記入する。そして、後で述べる解析結果の履歴ループも実線 (—) であわせて示す。表-2に実験結果の一覧を示す。これらの図表により、以下のことがわかる。

- (a) UMN8、USR3以外は、部材角 $R=4\%$ を越えても最大せん断力時の曲げモーメント (M_{max}) は確保されており、安定した曲げ破壊をしている。USR3及びUMN8であっても、曲げモーメントは部材角 $R=2\%$ までは耐力低下をしない。
- (b) 鋼管降伏時 ($\circ$) のせん断力は、最大せん断力 ($\circ$) にほぼ等しい。
- (c) 鉄筋の圧縮降伏 (Δ) 現象は、部材の履歴ループにほとんど影響しない。

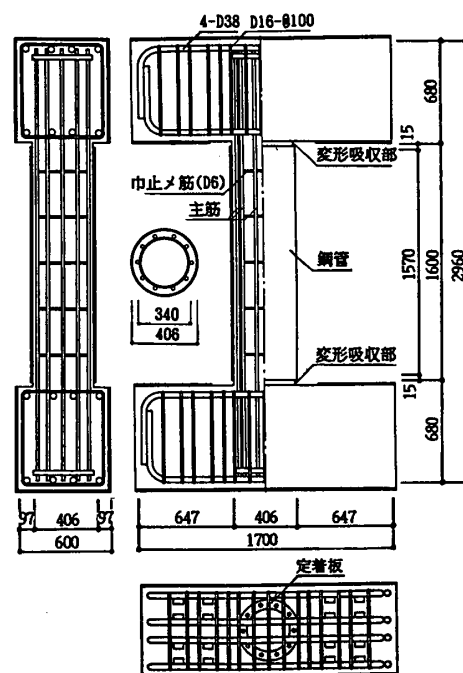


図-2 試験体形状 ($M/QD=2.0$ 時)

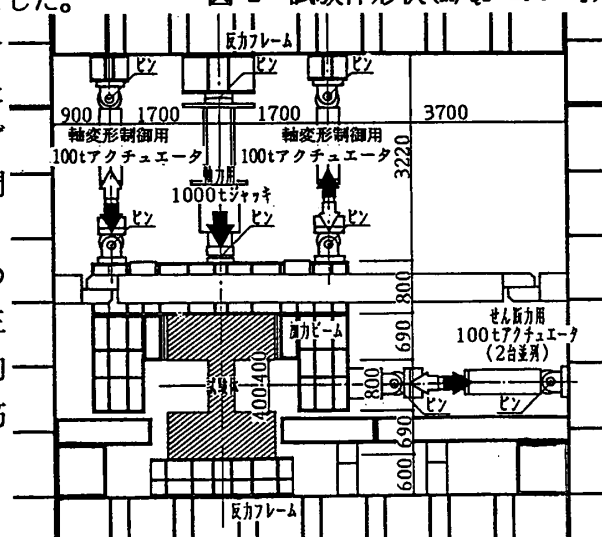


図-3 加力装置

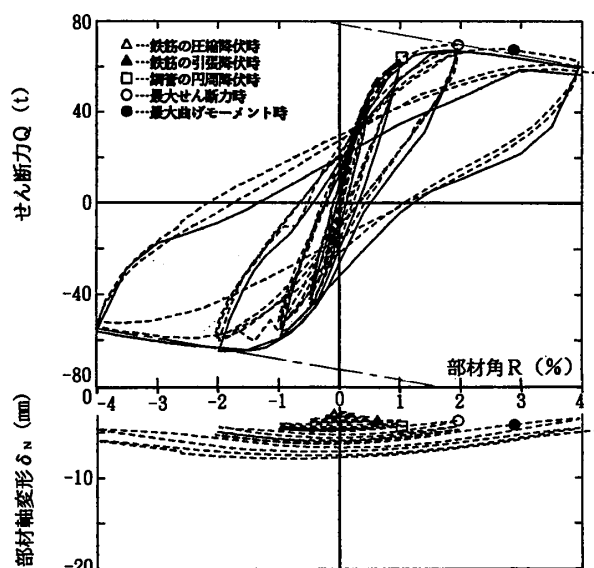


図-4 せん断力-部材角-部材軸変形(UM0)

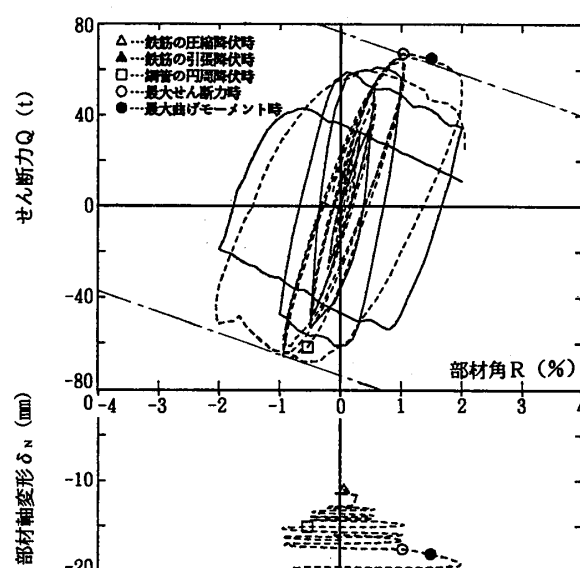


図-5 せん断力-部材角-部材軸変形(UMN8)

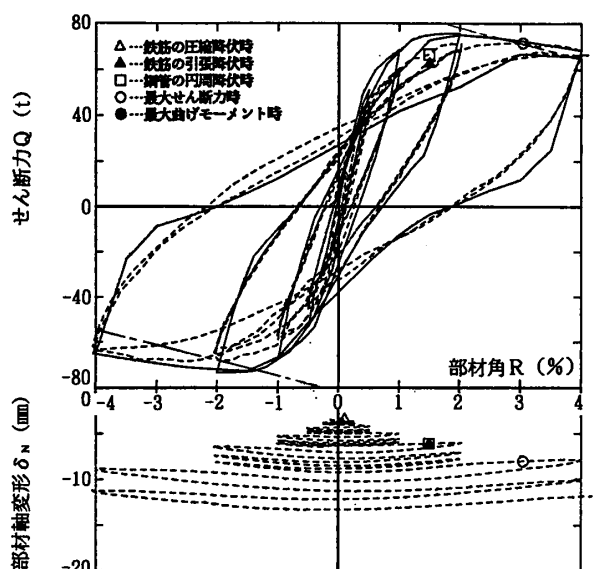


図-6 せん断力-部材角-部材軸変形(UMR3)

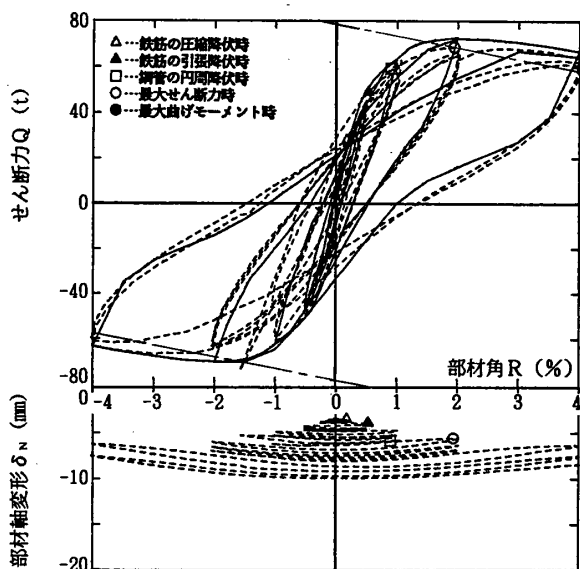


図-7 せん断力-部材角-部材軸変形(UMS9)

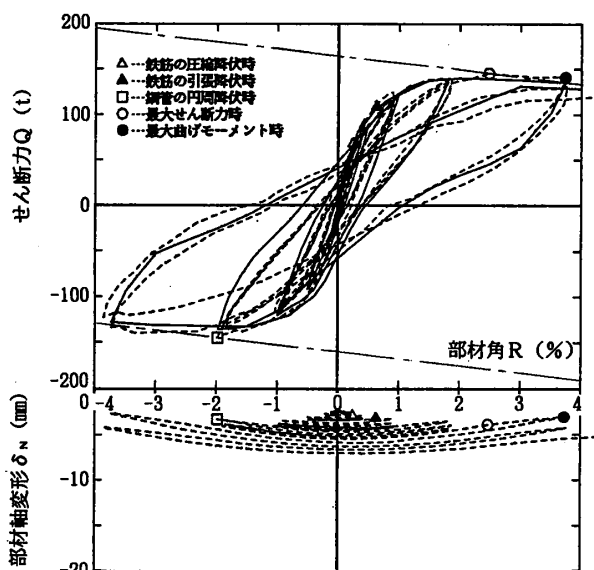


図-8 せん断力-部材角-部材軸変形(US0)

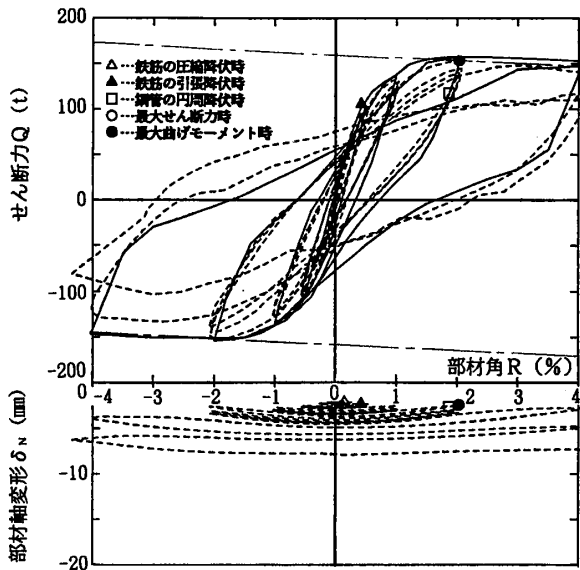


図-9 せん断力-部材角-部材軸変形(USR3)

(d)繰返しのループ形状は、ほぼ紡錘型の形状で、いずれのループも安定している。

(e)軸変形について、UMN8は部材角 $R=2\%$ 以降で急激な軸縮みを示すが、それ以外は繰返しに応じて徐々に縮む。

(f)部材角 $R=2\%$ 時の軸変形量は、軸力導入時の約2倍である。

表-2 実験結果一覧

試験体名称	N/N ₀	N(t)	鉄筋の圧縮降伏時 RCO	鉄筋の圧縮降伏時 M_{cr} (t-m)	鉄筋の引張降伏時 RCO	鉄筋の引張降伏時 M_{tr} (t-m)	鋼管の円周降伏時 RCO	鋼管の円周降伏時 M_{sc} (t-m)	最大荷重時 RCO	最大荷重時 M_{max} (t-m)	最大耐力時 RCO	最大耐力時 M_u (t-m)
UM0	0.4	428	0.10	13.7	0.62	44.2	1.03	54.8	1.96	62.4	2.88	63.9
UMN0	0.0	0	—	—	0.33	11.3	7.70	20.3	7.70	20.3	7.70	20.3
UMN8	0.8	856	0.00	0.0	—	—	0.54	55.0	1.03	60.7	1.50	62.4
UMC4	0.4	359	0.51	30.2	1.04	41.3	1.55	49.6	2.75	55.4	9.26	57.7
UMR3		428	0.10	11.0	1.50	55.2	1.49	58.5	3.04	67.8	7.83	71.4
UMS9		478	0.18	23.2	0.53	41.2	0.90	50.9	1.94	62.4	9.76	68.8
US0		428	0.24	27.7	0.63	44.7	1.98	61.5	2.48	62.5	3.74	63.1
USC4	0.4	359	0.50	30.3	1.15	43.2	2.19	50.7	4.24	57.7	8.09	59.6
USR3		428	0.15	19.5	0.42	42.9	1.86	50.1	2.03	64.9	2.03	64.9
USS9		478	0.16	22.5	0.51	39.6	1.97	63.5	1.97	63.5	7.82	71.8

注 1) M_{max} : 一定軸力下におけるせん断力が最大となるときである。
2) M_u : 軸力による付加曲げを考慮した曲げモーメントが最大となるときである。

3.2 鉄筋の降伏領域の進展

図-10 に一例としてUMR3の鉄筋の降伏領域の進展状況を示す。この図より、ヒンジゾーンは端部（変形吸収断面）から直径（D）の長さ区間と判断できる。これは他の試験体についても同様である。

3.3 包絡線の比較

図-11 に軸力による付加曲げを考慮した曲げモーメント（M）-部材角（R）関係を包絡線でM/QDが異なる場合の比較を示す。そして、後で述べる解析結果も実線（—）であわせて示す。この図より、せん断スパン比M/QDが異なっても、M-R 関係上ではほぼ一致する。

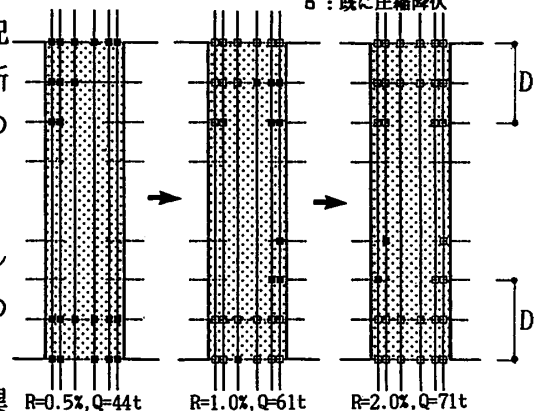


図-10 鉄筋の降伏領域の進展(UMR3)

4. 解析的検討

4.1 解析仮定

実験結果からわかるとおり、降伏以降の大変形領域においては、部材全体の变形はほとんど端部のヒンジゾーン(D)における変形と考え

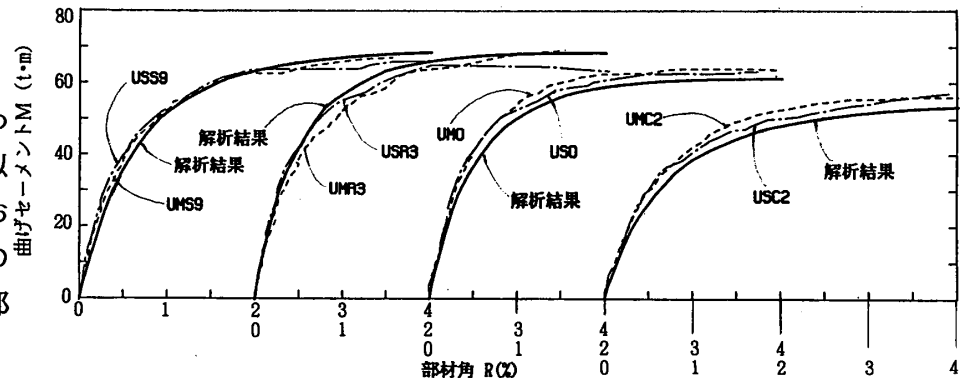


図-11 M/QDが異なる場合のM-R 関係包絡線の比較

ることができる。そこで材料の応力（ σ ）-歪（ ϵ ）関係をもとに曲げモーメント（M）-曲率（ ϕ ）関係をもとめ、曲率（ ϕ ）にヒンジ長さ（ L_p ）を乗じて部材角（R）とする弾塑性解析モデルを提案する。

(i) コンクリート及び鉄筋は中立軸を共有し、それらの歪は図-12 に示すとおり中立軸からの距離に比例する。（平面保持）

(ii) コンクリートは昨年報告した中心圧縮実験結果に基づいており、鋼管によるコンファインド効果を考慮し、応力-歪関係は図-13 に示すとおりである。図-14 に中心圧縮実験結果とこのモデルを比較する。なお、鋼管はこのコンファインド効果のみに寄与し軸方向応力は負担しないものとする。

(iii) 鉄筋は図-15 に示すとおりバイリニアとする。

(iv) 曲げ圧縮部のコンクリート強度は、図-16に示すようにコンファインド効果を生み出す鋼管

までの応力の広がりを考えて、拘束項のみに支圧係数($\sqrt{\frac{A_c}{A_1}}$)を乗じたものとする。

$$\bar{n}f_c = c\sigma_s + \sqrt{\frac{A_c}{A_1}} \cdot k \cdot f_2 \quad (1)$$

k : 拘束係数 f_2 : 拘束応力

図-17 において、支圧効果を考慮した場合としない場合の解析結果を比較する。

(v) 材端にヒンジゾーンがあり、その長さ(L_p)は部材直径(D)とする。そして、図-18 に示すようにその他の部位は剛体とする。

以上の仮定にもとづいて、軸力(N)、曲げモーメント(M)、曲率(ϕ)、部材角(R)は次のようにして求める。⁴⁾

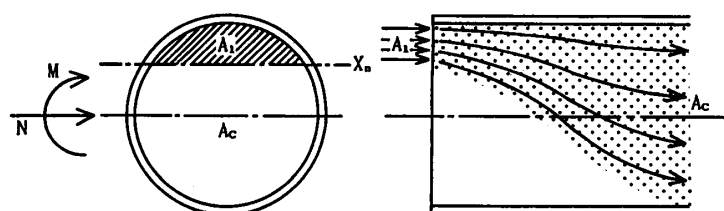


図-16 曲げ圧縮部コンクリートの支圧効果

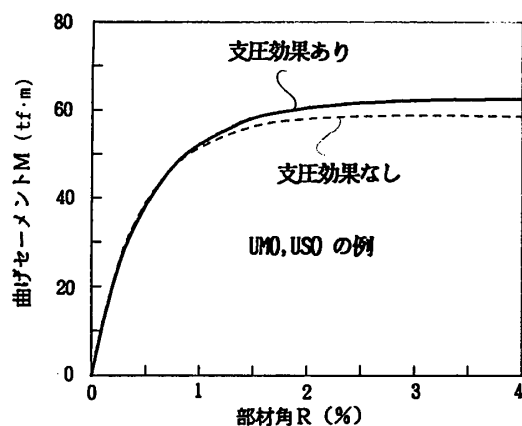


図-17 支圧効果あり、なしの解析結果の比較

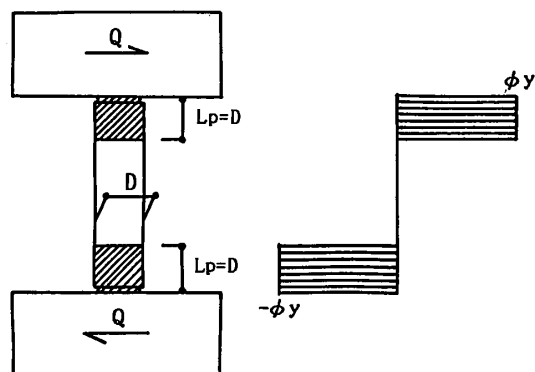


図-18 部材の曲率分布

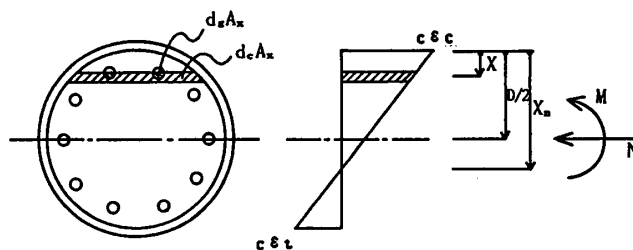


図-12 断面の平面保持

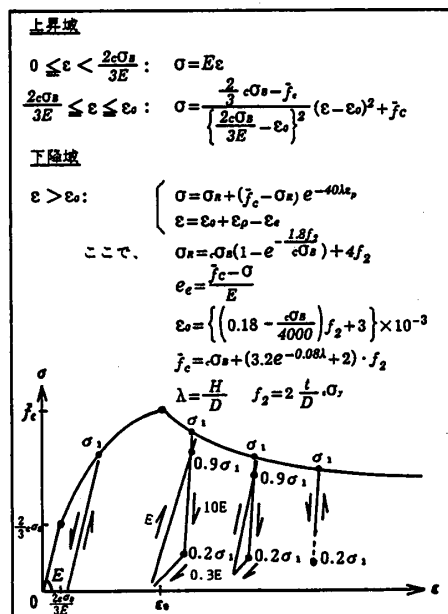


図-13 コンクリート材料の応力-歪モデル

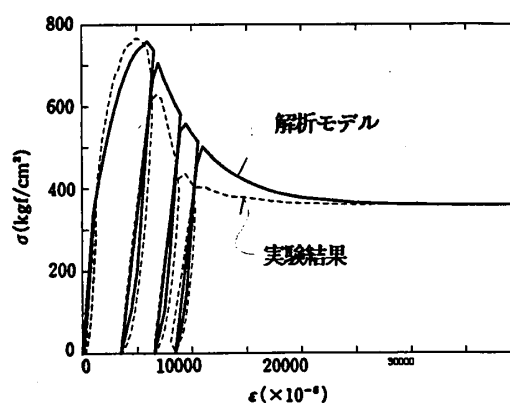


図-14 実験結果と解析モデルの比較

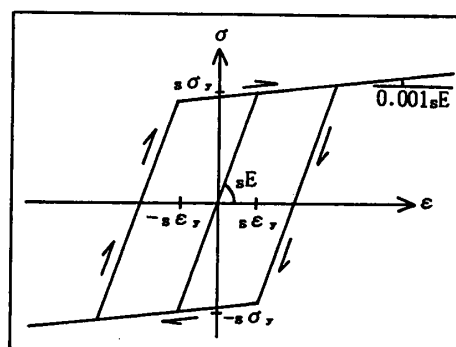


図-15 鉄筋材料の応力-歪モデル

$$N = \int c \sigma_z d_c A_x + \int g \sigma_z d_g A_x \quad (2)$$

$$M = \int c \sigma_z (x_n - x) d_c A_x + \int g \sigma_z (x_n - x) d_g A_x - N(x_n - \frac{D}{2}) \quad (3)$$

$$\phi = \frac{c \varepsilon_c - c \varepsilon_t}{D} \quad (4)$$

$$R = \phi \cdot D \quad (5)$$

4.2 解析結果

図-4～図-9に実験結果(---)と解析結果(—)の履歴ループの比較を示す。載荷及び除荷ともによく合っている。そして、高軸力のUMN8についても最大耐力を越えて下降域に至ってもうまく追従できている。

次に、断面内での物理現象を追跡するために図-19に軸力比(N/N_0)と部材角(R)の関係、図-20に軸力比(N/N_0)と曲げモーメント(M)の関係を示し、それぞれの図中に鋼管降伏時と最大耐力時の実験結果を示す。これは、UM0($\circ, \bullet$)、UMN0($\star, \star$)、UMN8($\square, \blacksquare$)、US0($\triangle, \blacktriangle$)に活用できる例である。UM0の解析結果($\diamond$)を読み取ると、鉄筋の圧縮降伏が(R, M)=(0.3%, 24tm)、引張降伏が(R, M)=(0.7%, 44tm)、鋼管の降伏が(R, M)=(1.8%, 56tm)、最大耐力が(R, M)=(3.3%, 60tm)となる。このように、部材の軸力レベルによって物理現象を順に追跡することができる。また、図中に示すように軸力が変動する場合(0→1→2→3→4)についても、応用することができる。また、動的解析用の復元力特性モデルを作成する際に必要な折れ曲がり点をこれらの各事象の発生点とすることができる。

5. まとめ

柱頭、柱脚に変形吸収部を有するUTC構造柱部材の一定軸力下における曲げせん断実験を行った(図-4～図-11)。そして、材料の応力-歪関係から部材の履歴ループを描く弾塑性解析モデルを提案し(図-12～図-18)、各種物理現象を順に追跡できる図を示し(図-19～図-20)、既存の動的解析用の復元力特性モデルの折れ曲がり点を求めた。

謝辞 本研究の実施に当たり、懇切なご教示をいただいた東京大学教授青山博之博士、大阪大学教授鈴木計夫博士ならびに当社プロジェクトメンバーに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 下戸、佐藤：“アンボンド型充填鋼管コンクリート構造の中心圧縮実験”第8回コンクリート工学年次講演論文集(1986年)
- 2) 佐藤、下戸、渡辺：“アンボンド型充填鋼管コンクリート構造のせん断伝達機構”第9回コンクリート工学年次講演論文集(1987年)
- 3) 佐藤、下戸、渡辺：“アンボンド型充填鋼管コンクリート構造の中心圧縮性状とその定式化”第10回コンクリート工学年次論文報告集(1988年)
- 4) 坂田、林、和田、黒正：“軸方向変形の拘束効果を考慮した鉄筋コンクリートはりの弾塑性性状に関する実験研究(1987.10)

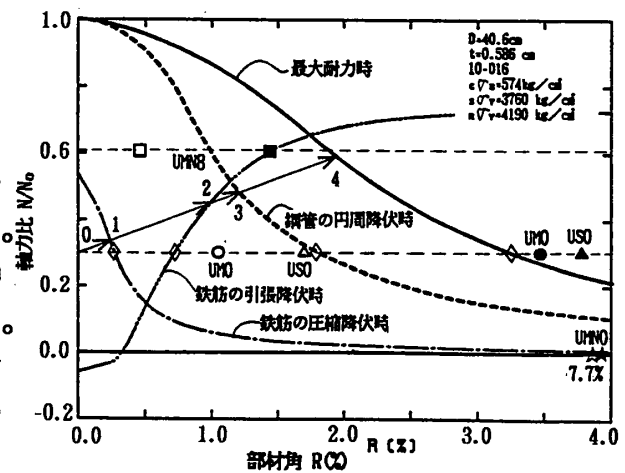


図-19 軸力比-部材角関係

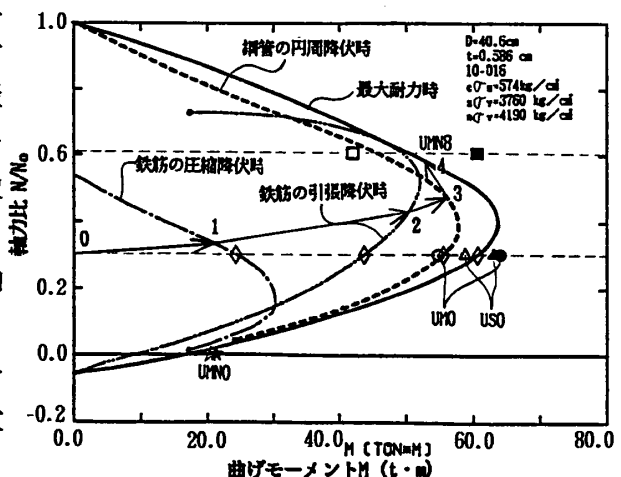


図-20 軸力比-曲げモーメント関係