

小型鋼管橋脚模型の弾塑性挙動に関する三曲面モデルの適用性

Applicability of Three-Surface Plasticity Model on Elasto-Plastic Behavior of
Small Steel-Pipe Pier Models

岸 徳光* 後藤芳顕** 小枝日出夫*** 小室雅人****

Norimitsu KISHI, Yoshiaki GOTO, Hideo KOEDA, and Masato KOMURO

* 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

** 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

*** (株)日本製鋼所研究員 室蘭研究所 (〒051-8505 室蘭市茶津町 4 番地)

**** 工修 室蘭工業大学助手 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

In this paper, an applicability of three-surface plasticity model for elasto-plastic analysis of steel-pipe pier models under monotonic and/or cyclic loadings is investigated by using ABAQUS code. FEM analyses are performed by varying radius-thickness ratio (R/t) and axial force ratio (P/P_y). Here, the isotropic hardening rule and the kinematic hardening rule are also investigated. Numerical analysis results are compared with the experimental ones with respect to the load-displacement curve and final deformation configuration. From these results, it is seen that the three-surface plasticity model can accurately predict the elasto-plastic behavior of steel-pipe piers, however isotropic hardening and kinematic hardening rules may not properly estimate the load-displacement curve and final deformation mode.

Key Words: elasto-plastic behavior, FEM analysis, three-surface plasticity model, steel-pipe pier

1. はじめに

兵庫県南部地震では、比較的靱性が高いと考えられていた鋼製橋脚にも多くの損傷が発生した。この損傷の原因は、上部工の自重による軸圧縮力と地震動による上部工の慣性力が作用したためとの見解が大勢を占めている。この地震を契機に、鋼製橋脚の耐震性の向上や合理的な耐震設計法の確立を目的として、鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する実験的・解析的研究が各研究機関で精力的に行われている^{1)~13)}。実験的研究としては、大型あるいは小型橋脚模型を用いた水平単調載荷実験や漸増繰返し載荷実験などの準静的実験^{1)~4)}が行われており、耐荷力や塑性率などを評価している。また、動実験に関しては、振動台を用いた実験⁵⁾あるいはハイブリッド地震応答実験^{6),7)}などにより終局状態での動的挙動特性等が明らかになりつつある。

一方、より合理的な耐震設計手法を確立するためには、実験的研究のみならず、実験を補足する意味も含めた数値解析的な研究も非常に重要である。平成8年に改訂された道路橋示方書 耐震設計編¹⁴⁾では、コンクリートを充填しない鋼製橋脚に関しては、動的解析を行って耐震性を判定するのが良いとされている。コンピュータ性能の飛躍的な向上や汎用構造解析プログラムの普及により、鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する数値解析が多く行われている^{8)~13)}。通常、汎用プログラムで提供されている構成則モデルのうち硬化則としては等方硬化則および移動

硬化則の2種類がある。繰返し荷重を受ける鋼製橋脚の弾塑性解析を行う場合には、後者の移動硬化則を使用することにより、最大耐荷力までは実験結果をほぼ再現できることが明らかになっている¹²⁾。しかしながら、最大耐荷力以降の劣化挙動までを適切に再現するためには、上記構成則モデルでは不十分であり、鋼材の繰返し塑性を精度良く再現可能な構成則モデルが必要となる。近年、この繰返し塑性を精度良く評価可能な構成則モデルがいくつか提案されている^{8),9),15)}。その中でも、後藤らによる三曲面モデル⁹⁾は、汎用構造解析プログラムに組み込むことにより、建設省土木研究所と鋼材倶楽部によって実施された大型鋼製橋脚の静的繰返し載荷実験結果をほぼ再現できることが報告されている。しかしながら、三曲面モデルを用いた鋼製橋脚に関する数値解析的検討は、現在限られた実験結果に対してのみ行われており、モデルの有用性を高めるためには多くの実験結果との比較により、その適用性を検討する必要があるものと考えられる。

このような観点より、本研究では先に著者等によって行われた径厚比および軸力比の異なる小型鋼管橋脚模型実験⁴⁾を対象として、三曲面モデルを用いた弾塑性有限変位解析を行い、単調および繰返し載荷実験結果との比較により、その適用性に関する検討を行った。本解析における検討項目は水平荷重-水平変位曲線、履歴吸収エネルギーおよび実験終了後の変形状態である。なお、

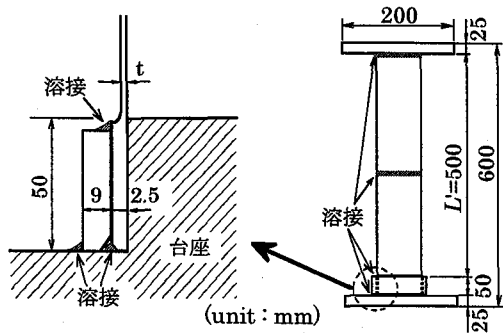
表－１ 試験体の形状寸法および各パラメータ

試験体名	荷重点高さ L (mm)	鋼管高さ L' (mm)	平均半径 R (mm)	板厚 t (mm)	細長比 パラメータ $\bar{\lambda}$	径厚比 パラメータ R_t
t15-	631.5	500	48.00	1.5	0.479	0.086
t20-			48.25	2.0	0.476	0.065
t25-			48.50	2.5	0.474	0.052

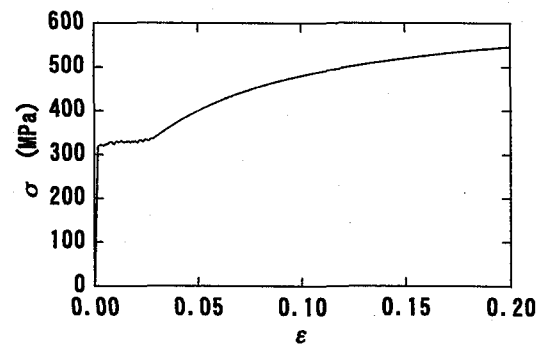
$$R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_y}{E_s} \sqrt{3(1-\nu_s^2)}, \quad \bar{\lambda} = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\sigma_y / E_s}$$

表－２ 鋼管の力学的特性

鋼 種	降伏応力 σ_y (MPa)	引張強さ σ_u (MPa)	伸 び (%)	硬化開始ひずみ ε_{st}	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
STPG370 90A	336	550	44.0	0.0294	206	0.3



図－１ 試験体形状



図－２ 真応力－真ひずみ関係

弾塑性有限変位解析には、汎用構造解析プログラムである ABAQUS¹⁶⁾ を使用している。

2. 実験の概要

円形鋼管橋脚の耐荷力と変形性能に大きく影響するパラメータとして、鋼種、細長比、径厚比、軸力、負荷履歴などが考えられる。本実験では、小型鋼管橋脚模型を製作し、それらに関する径厚比、軸力および水平荷重の負荷履歴の影響を検討するために、鋼種と細長比を固定し、1) 軸力を一定とし径厚比パラメータを変化させる場合、2) 径厚比を一定とし軸力を変化させる場合、3) 軸力と径厚比を一定とし載荷形態を変化させる場合について検討を行った。図－１には実験で使用了小型鋼管橋脚模型（以下、試験体）の形状を、表－１には本数値解析で対象とした試験体の形状寸法および各パラメータを示している。試験体はすべて圧力配管用炭素鋼鋼管（JIS G 3454 STPG370 90A 熱間仕上継目無鋼管）を所定の長さに切断し、旋盤により内外面を切削して製作した。板厚および径の加工公差は ± 0.05 mmである。鋼管の基部は、図－１に示すように凸状の台座に差し込み、さらに外側に板厚 9 mm の鋼製リングをはめ込んで溶接し固定している。また、鋼管の上端部には鋼管を載荷板に固定

するために、板厚 25 mm の鋼板を周溶接により取り付けられている。使用鋼管の機械的性質を調べるために、鋼管から JIS 6 号試験片を製作し引張試験を行った。表－２には材料試験結果を、図－２には真応力－真ひずみ関係を示している。図より、明確な降伏棚が確認できることより、試験体製作過程における塑性加工の影響は小さく、残留応力は無視できるほど小さいものと推察される。

実験は日本製鋼所および室蘭工業大学で実施した。図－３(a)、(b)には各研究機関で用いた実験装置の概略を示している。日本製鋼所では、所定の軸方向荷重を容量 100 kN の油圧サーボ式試験機により載荷している。一方、室蘭工業大学では、試験体の上部に全質量 1200 kg の鉛塊（800×800×185 mm）を設置することにより軸方向荷重を与えている。水平荷重は、両機関ともストローク 200 mm の電動式ジャッキを用いて所定の高さで載荷している。載荷速度は 0.39 mm/sec で一定とした。なお、水平方向荷重の載荷点は、試験体に生じる水平および軸方向の変位を拘束することなく、荷重の方向が極力水平を維持するような構造とした。本実験は、1) 水平方向変位を一方方向に与える単調載荷、2) 基部縁応力が降伏する時の載荷点水平変位 δ_y （以下、降伏水平変位）に基づいた漸増変動変位振幅載荷および 3) 変位振幅を一定とした定変位振幅載荷の 3 種類の載荷形態について

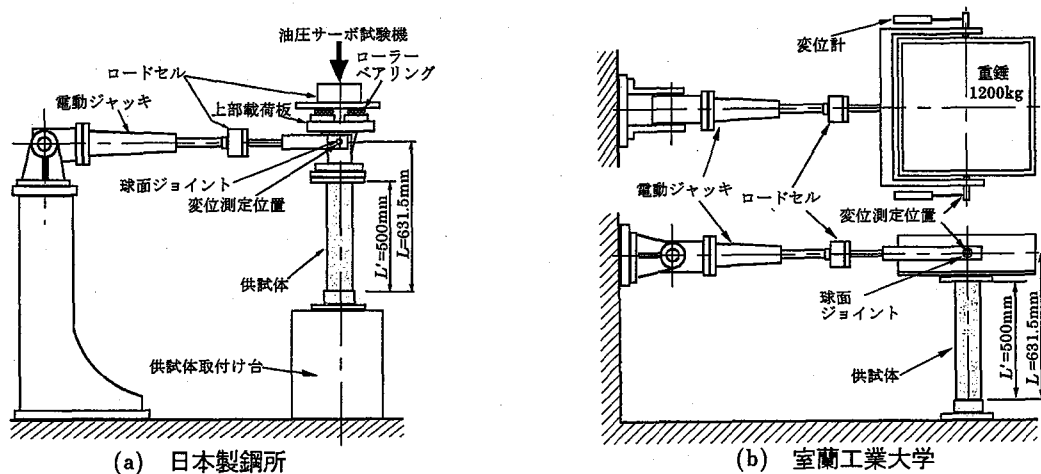


図-3 実験装置の概略

表-3 解析対象試験体一覧

試験体名	載荷形態	振 幅	軸 力			降伏水平荷重 H_y (kN)	降伏水平変位 δ_y (mm)
			P (kN)	P/P_y	載荷方式		
t15-N15	-m: 単調	-	22.8	0.15	油圧	4.84	3.79
t20-N15			30.6			6.49	3.75
t25-N15			38.4			8.16	3.71
t15-N0	-c: 変動変位振幅	-	0.0	0.00	-	5.70	4.45
t15-N8	定変位振幅	$1.5 \delta_y$	11.8	0.08	重錘	5.26	4.11
t15-N8-cc1		$2 \delta_y$					
t15-N8-cc2		$3 \delta_y$					
t15-N8-cc3		$4 \delta_y$					
t15-N8-cc4		$4 \delta_y$					

$$P_y = A\sigma_y, H_y = \frac{(\sigma_y - P/A) I_s}{(R+t/2)L}, \delta_y = \frac{H_y L^3}{3EI_s}$$

行った。表-3には本解析で対象とした試験体の名称および実験条件を示している。表中、 P_y : 鋼管降伏軸力、 I_s : 鋼管の断面2次モーメント、 H_y : 基部縁応力降伏時の水平荷重（以下、降伏水平荷重）である。

3. 数値解析仮定

3.1 試験体のモデル化

数値解析は、汎用構造解析プログラム ABAQUS¹⁶⁾を用いて行った。試験体のモデル化に関しては、試験体から上下鋼板および基部溶接部を除いた部分を対象とした。また、対称性を考慮して試験体の1/2をモデル化している。要素分割は解の収束性を考慮し、周方向の分割数を18とし、高さ方向の分割に関しては、基部より2mmピッチで高さ50mmまでを25分割、その上部に関しては徐々に分割数を減少させている。使用した要素は鋼管部を4節点厚肉シェル要素(S4R)とし、載荷治具のモデル化には3節点厚肉シェル要素(S3R)を使用した。図-4には要素分割状況を示している。総要素数および総節点数はそれぞれ965、1028である。境界条件は底部を完全固定とし、切断面においては連続性を考慮している。

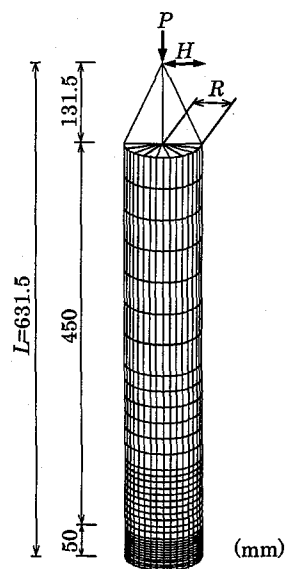


図-4 要素分割状況

解析方法は、実験と同様頂部に軸力を載荷した後、水平荷重を変位制御にて作用させることとした。なお、解析には初期不整および残留応力は考慮していない。これは、

1) 図-2 に示しているように試験体の真応力-真ひずみ曲線に明確な降伏棚があることより、塑性加工の影響による残留応力は小さいものと推察されること、2) 試験体の加工公差を $\pm 0.05\text{mm}$ としていることより、初期不整は小さいものと考えられること、3) 解析結果と実験結果が比較的一致しており、これらの影響は小さいものと考えられること、などから総合的に判断している。

3.2 三曲面モデル

本研究では構成則モデルとして、名古屋工業大学の後藤らによって提案された三曲面モデル⁹⁾を用い、実験結果との比較によりその適用性の検討を行うこととした。三曲面モデルは Dafalias-Popov¹⁷⁾によって提案された二曲面モデルを基に、ひずみ硬化、降伏棚、弾性域の縮小などを考慮できるように修正・拡張したものである。具体的には二曲面モデルの降伏曲面と境界面の間に不連続境界面を挿入することにより、ひずみ硬化係数の急激な変化にも対応できるようにしている。詳細については、文献9)を参照されたい。なお、構成則モデルによる鋼製橋脚の弾塑性挙動への影響を検討するために、三曲面モ

デルの他、ABAQUSで提供されている等方硬化則および移動硬化則を用いた場合についても解析を行っている。

各構成則の材料定数は、JIS 6号試験片による引張試験で得られた力学的特性(表-2)および真応力-真ひずみ関係(図-2)により決定している。三曲面モデルにおける材料パラメータの一つであるひずみ硬化係数は、図-2に示した真応力-真ひずみ関係と一致するように決定した。また、他の材料パラメータに関しては、文献9)および t15-N8-c 試験体に関する繰返し載荷実験結果と一致するように試行錯誤的に決定している。表-4に設定した材料パラメータの一覧を示す。なお、表中の各変数は、 ϵ_{yp} : 降伏棚のひずみ長、 f_b/σ_y : 縮小した弾性域の収束値と降伏応力の比、 H_{dc}^0/E_s : 不連続境界面上

表-4 三曲面モデルのパラメータ一覧

ϵ_{yp}	f_b/σ_y	β	H_{dc}^0/E_s
0.0278	0.65	50	0.05

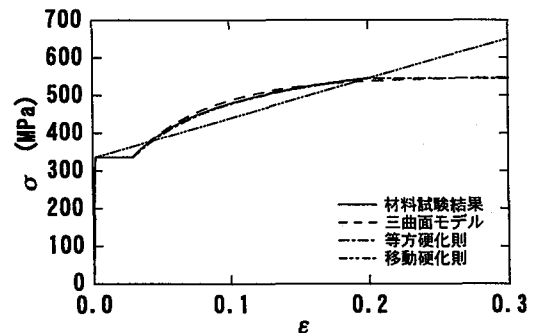
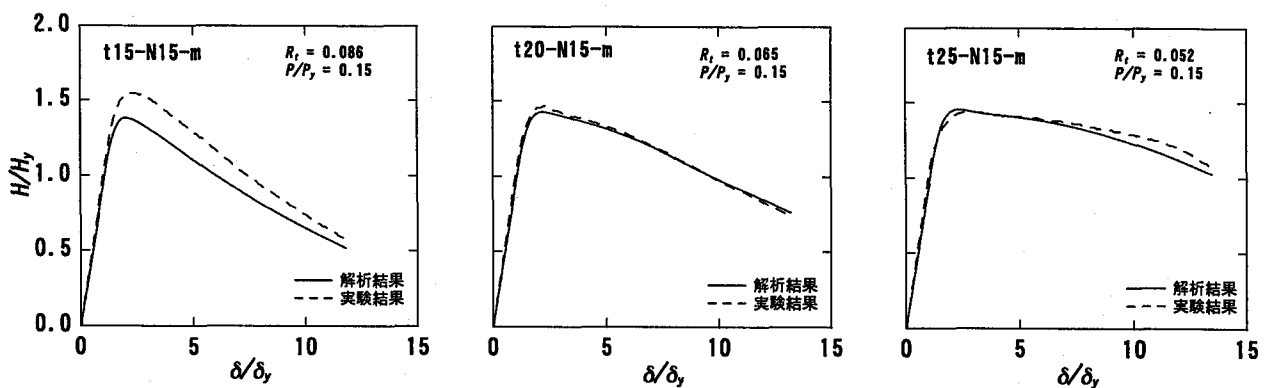
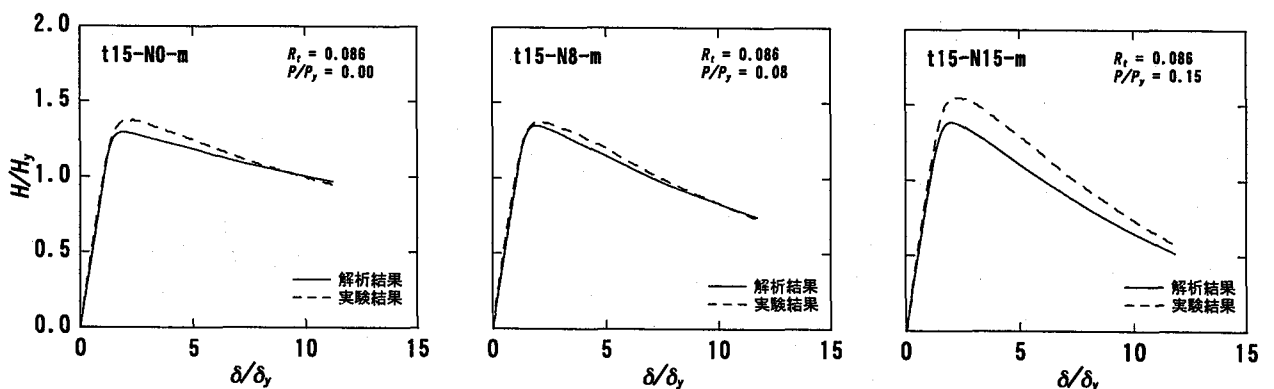


図-5 各構成則における真応力-真ひずみ曲線



(a) 軸力比を一定とし、径厚比パラメータを変化させた場合 ($P/P_y = 0.15$)



(b) 径厚比パラメータを一定とし、軸力比を変化させた場合 ($R_t = 0.086$)

図-6 単調載荷実験における解析結果(三曲面モデル)と実験結果の比較

表－５ 各構成則における解析結果と実験結果の比較

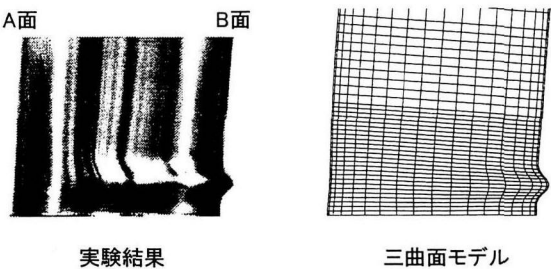
試験体名	実験結果	三曲面モデル		等方硬化則		移動硬化則	
	H_m/H_y	H_m/H_y	error (%)	H_m/H_y	error (%)	H_m/H_y	error (%)
t15-N15-m	1.55	1.38	-11.0	1.38	-11.0	1.42	-3.4
t20-N15-m	1.47	1.43	-2.7	1.42	-3.4	1.47	0.0
t25-N15-m	1.44	1.45	0.7	1.45	0.7	1.49	3.5
t15-N0-m	1.38	1.30	-5.8	1.29	-6.5	1.32	-4.3
t15-N8-m	1.38	1.35	-2.2	1.34	-2.9	1.38	0.0

内側の硬化係数比である。また、本研究ではこのように同定されたパラメータを全ての試験体に対して適用している。従って、各試験体に対するパラメータの同定は行っていない。図－５には本研究で使用した各構成則モデルの１軸状態における真応力－真ひずみ関係を材料試験結果とともに示している。なお、同図における材料試験結果の降伏棚は一定値に修正したものである。図より、三曲面モデルは $\varepsilon = 0.1$ 前後で材料試験結果より多少大きな応力を与えているものの、ほぼ試験結果を再現しているものと考えられる。また、ABAQUSにおける移動硬化則は降伏後の接線勾配が一定であるバイリニア型で定義されていることより、降伏点と真ひずみが $\varepsilon = 0.2$ における真応力を結んで得られる傾き ($E_t = E_s/195$) を接線勾配として設定した。

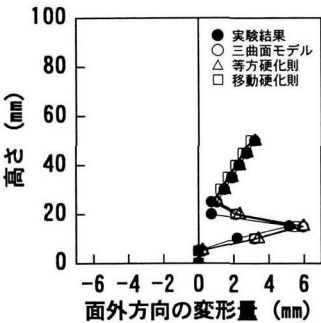
4. 数値解析結果

4.1 単調載荷実験との比較

図－６には単調載荷実験における解析結果と実験結果を比較して示している。図は縦軸に無次元水平荷重 H/H_y 、横軸に無次元変形量 δ/δ_y を取り整理している。なお、図は三曲面モデルを使用した場合の結果である。図より、最大水平荷重に着目すると、t15-N15-m試験体を除いて、解析結果は実験結果より若干小さな値を示している試験体 (t15-N0-m) も見られるが、ほぼ実験結果と一致していることがわかる。また、ピーク後の挙動に関しても、解析結果は実験結果と比較して強度低下が小さいものの、実験結果をほぼ再現できているものと考えられる。表－５には各構成則における無次元最大水平荷重 H_m/H_y を実験結果と比較して示している。表より、移動硬化則に

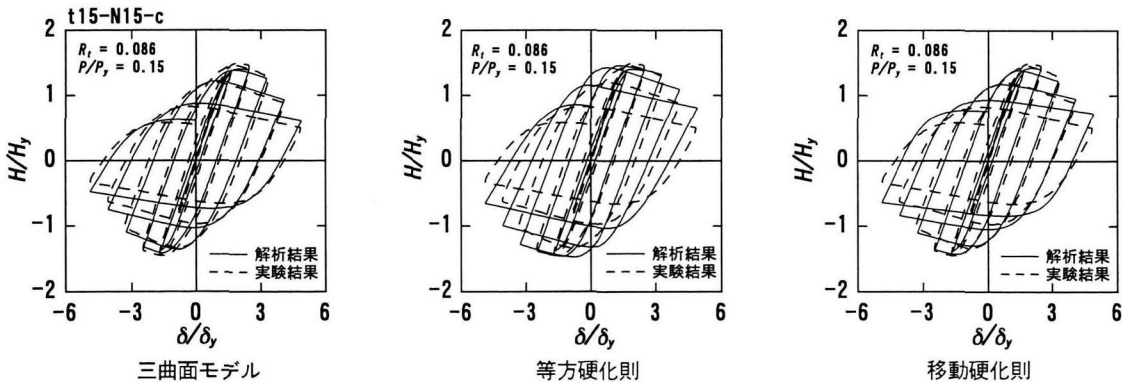


図－７ 変形状態の比較 (単調載荷実験：t15-N8-m)



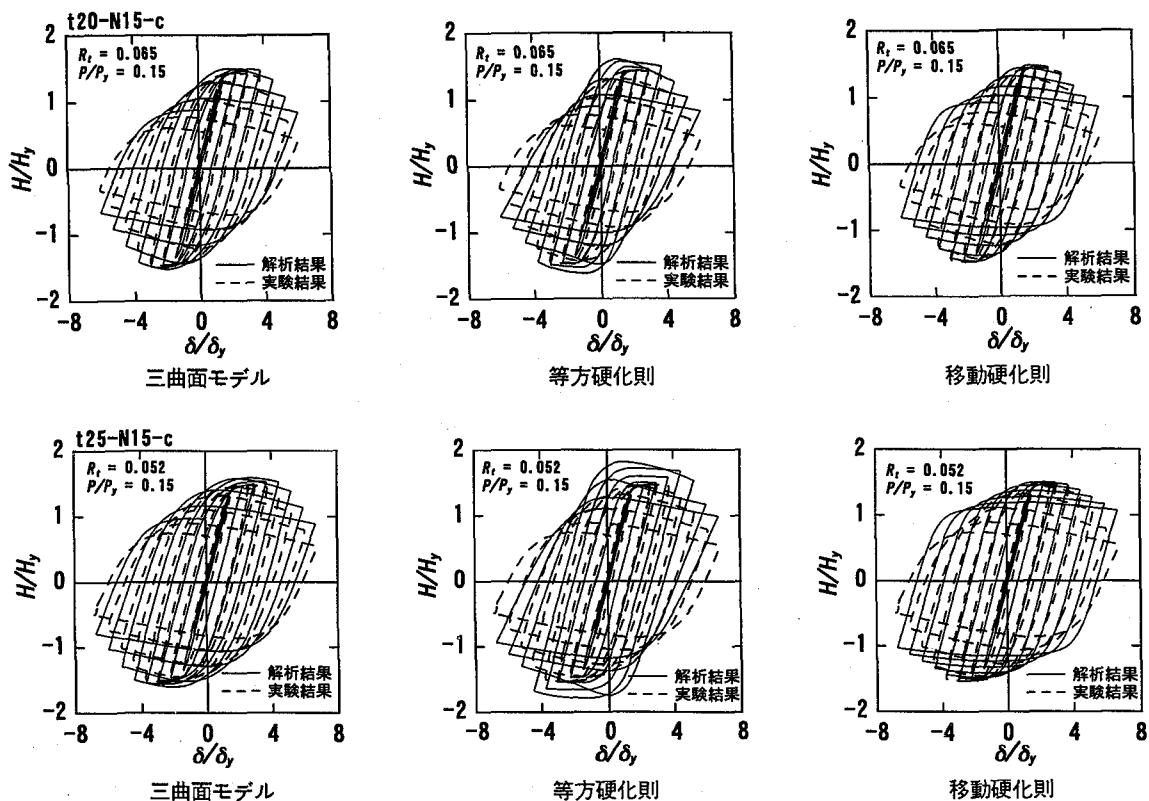
図－８ 局部座屈状態の比較 (外側：正)

おける最大値は他の２つの構成則よりも大きな値を示していることがわかる。これは、移動硬化則の応力－ひずみ曲線がバイリニア型に簡略化され、真ひずみが 0.2 以上において他の構成則より大きな応力を与えることに起因しているものと考えられる。しかしながら、いずれの構成則を用いた場合でも実験結果の最大値を 10% 程度の誤差内で評価できることがわかる。図－７には t15-N8-m 試験体における実験終了後の変形状態と三曲面モデルによる解析結果を比較して示している。また、図－８に

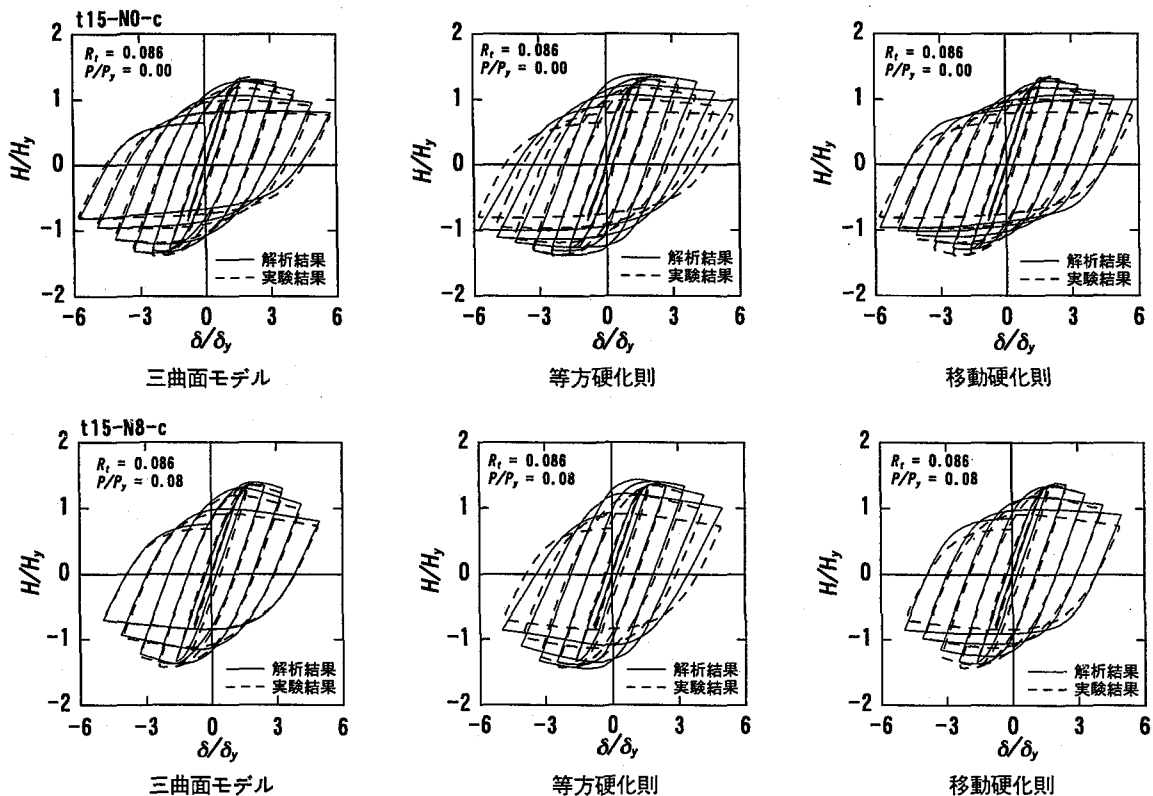


(a) 軸力比を一定とし、径厚比パラメータを変化させた場合 ($P/P_y = 0.15$)

図－９ 漸増変動変位振幅載荷における解析結果と実験結果の比較

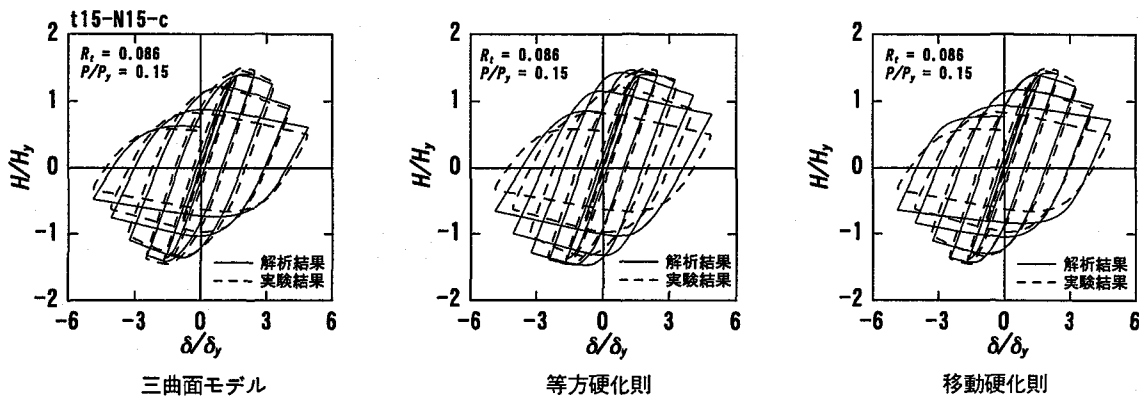


(a) 軸力比を一定とし、径厚比パラメータを変化させた場合 ($P/P_y = 0.15$)



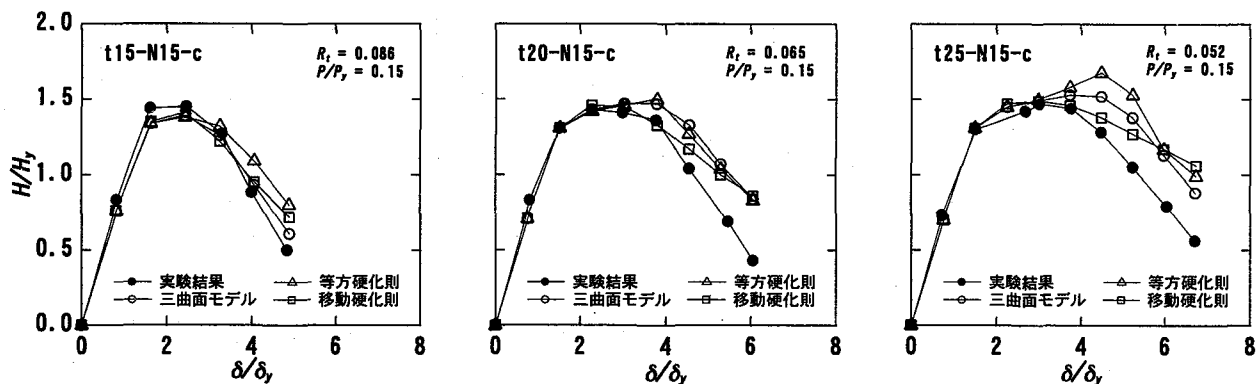
(b) 径厚比パラメータを一定とし、軸力比を変化させた場合 ($R_t = 0.086$)

図-9 (続き)

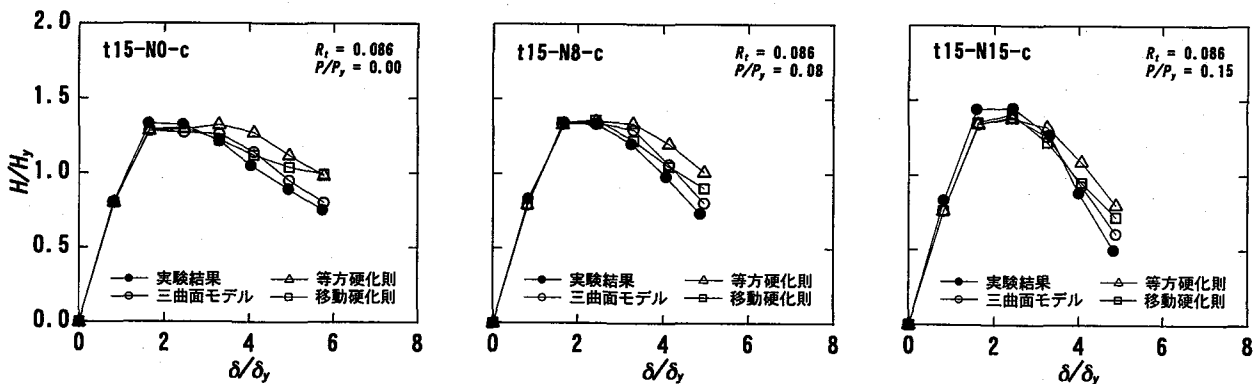


(b) 径厚比パラメータを一定とし、軸力比を変化させた場合 ($R_t = 0.086$)

図-9 (続き)



(a) 軸力比を一定とし、径厚比パラメータを変化させた場合 ($P/P_y = 0.15$)



(b) 径厚比パラメータを一定とし、軸力比を変化させた場合 ($R_t = 0.086$)

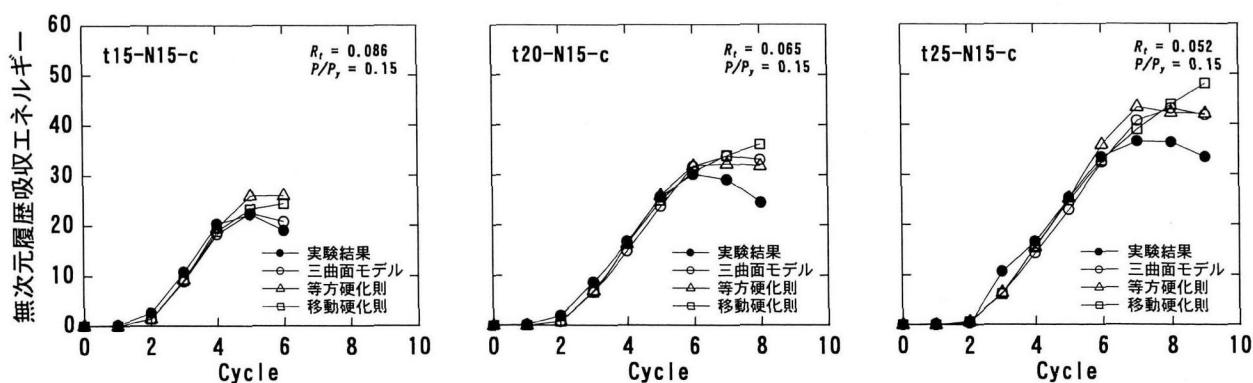
図-10 包絡線の比較

は各構成則による解析結果を定量的に比較している。図より、いずれの構成則を用いた場合でも、座屈高さ、座屈幅および変形量とも実験結果とよく一致していることがわかる。

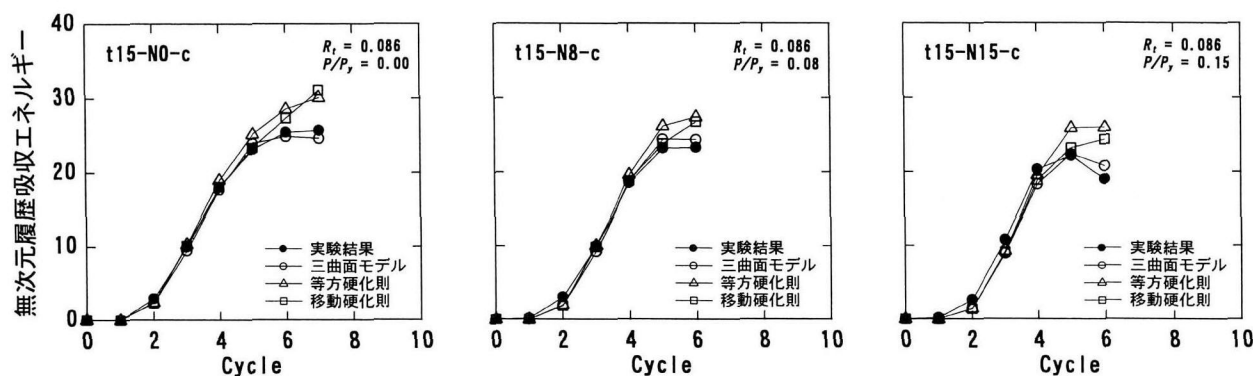
4.2 漸増変動変位振幅載荷実験との比較

図-9には全試験体に関する水平荷重-水平変位曲線の解析結果を実験結果と比較して示している。また、図-10には各試験体の包絡線を実験結果と比較して整理している。図-10の包絡線分布より、三曲面モデルを用

いる場合には、径厚比パラメータ R_t が小さい試験体 (t20-N15-c, t25-N15-c) における最大荷重およびその時の変位が実験結果より大きく評価されているものの、他の試験体に関しては実験結果の包絡線とほぼ一致しており、全体的には、径厚比パラメータや軸力比にかかわらず、実験結果の最大荷重および履歴ループ形状を大略再現できることがわかる。なお、径厚比パラメータ R_t が小さい場合における誤差は、板厚が厚くなることによって何らかの原因によって実験誤差が生じたものと推察される。



(a) 軸力比を一定とし、径厚比パラメータを変化させた場合 ($P/P_y = 0.15$)



(b) 径厚比パラメータを一定とし、軸力比を変化させた場合 ($R_t = 0.086$)

図-11 履歴吸収エネルギーの比較

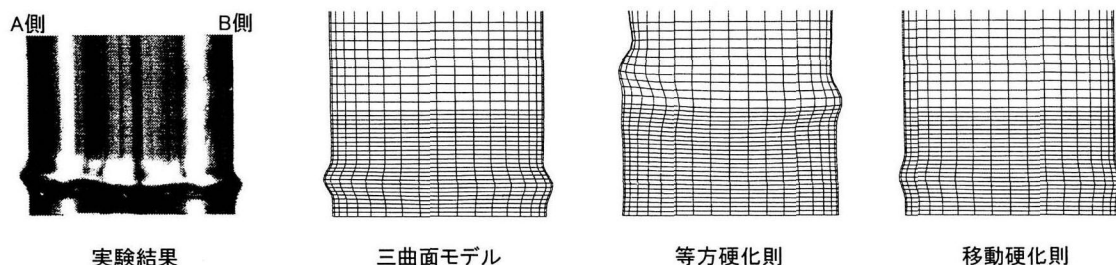


図-12 変形状態の比較 (漸増繰返し载荷実験: t15-N8-c)

一方、等方硬化則を用いた場合において、 $R_t = 0.086$ と板厚の小さい試験体では、最大荷重および包絡線は実験結果とほぼ一致している。しかしながら、 $R_t = 0.052$ の試験体 (t25-N15-c) では、最大荷重、履歴ループ形状および包絡線分布が、3構成則の中で実験結果と最も大きく異なっている。このことは、板厚が大きい試験体 ($R_t = 0.052$) に等方硬化則を適用する場合には注意が必要であることを示唆している。なお、移動硬化則に関しては、径厚比パラメータおよび軸力比にかかわらず三曲面モデルと類似の傾向を示している。

図-11は各試験体の履歴吸収エネルギーを実験結果と比較し示したものである。図は縦軸に各サイクルの履歴ループ面積より求まる吸収エネルギーを弾性エネルギー

$H_y \delta_y / 2$ で無次元化した値、横軸にサイクル数を取って整理したものである。図より、三曲面モデルによる結果は実験結果と良く一致していることがわかる。ただし、試験体 t20-N15-c および t25-N15-c に関しては、6サイクル以降で実験結果より吸収エネルギーを大きく評価している。これは履歴ループ形状はほぼ一致しているものの、若干荷重を大きく評価していることによるものと考えられる。しかしながら、7サイクルあるいは8サイクル目で吸収エネルギーの最大値を示しているなど、実験結果の特性を定性的には再現できているものと判断される。また、等方硬化則を用いた場合では、実験結果をほぼ再現できるものの、最終サイクルにおける吸収エネルギーに差が生じている。移動硬化則の場合には、応力-

ひずみ曲線がバイリニア型に簡略化され、大きなひずみ領域においても応力が増加する傾向を示すことより、履歴吸収エネルギーはサイクル数に比例して増大している。

図-12には t15-N8-c 試験体における実験終了後の基部近傍部の変形状態と解析結果を比較して示している。また、図-13には同一試験体の局部座屈状態を定量的に比較している。図より、三曲面モデルを用いる場合には、実験結果の座屈高さ、座屈幅および変形量等を精度良く再現していることがわかる。一方、等方硬化則を用いる場合には、局部座屈は実験結果より 30 ~ 50 mm 程度上方に発生している。これは、繰返し初期には基部近傍部に塑性化が生じるものの、ひずみ硬化の開始により弾性域が拡大するため、見かけ上降伏点が上方へ移行し、それに伴い局部座屈も上部に移行するものと考えられる。なお、この現象は数値解析時の各サイクルにおける局部座屈発生位置の推移からも確認している。また、移動硬化則を用いる場合には、座屈高さが実験結果とほぼ等しいものの、その大きさは若干小さいようである。

4.3 定変位振幅載荷実験との比較

図-14には定変位振幅載荷における実験結果と解析結果を示している。(a)図は定変位振幅 $\Delta = 1.5 \delta_y$ の場合、(b)図は定変位振幅 $\Delta = 3 \delta_y$ の場合である。なお、t15-N8 試験体の最大水平荷重時変位は $\delta/\delta_y \approx 2$ であること⁴⁾より、変位振幅 $\Delta = 1.5 \delta_y$ は水平荷重が最大値に達する以

前の状態、変位振幅 $\Delta = 3 \delta_y$ は水平荷重が最大値に達しかつ減少途中の状態である。また、図-15には、繰返し回数と最大変位時における水平荷重の変化を定変位振幅ごとに整理している。図-14(a), 15(a)より、変位振幅 $\Delta = 1.5 \delta_y$ の場合には、単調載荷時の最大荷重に達していない状態であることより、実験結果の水平荷重は 20 サイクル後もほとんど低減していない。また、三曲面モデルおよび移動硬化則の場合にも、実験結果と同様に水平荷重の低減は見られない。一方、等方硬化則の場合には、繰返し回数の増大とともに水平荷重も大きくなっている。これは、前述のように繰返し回数が増えることにより弾性域が拡大するため、基部近傍部における

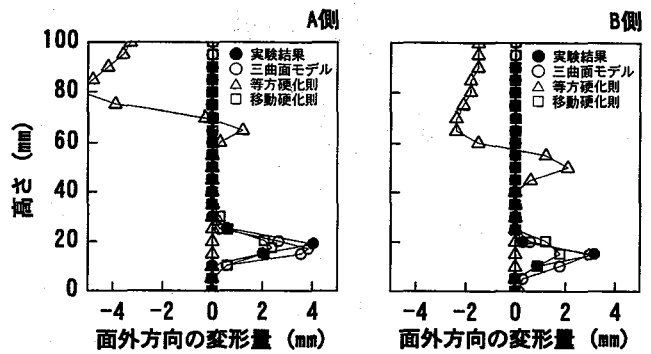
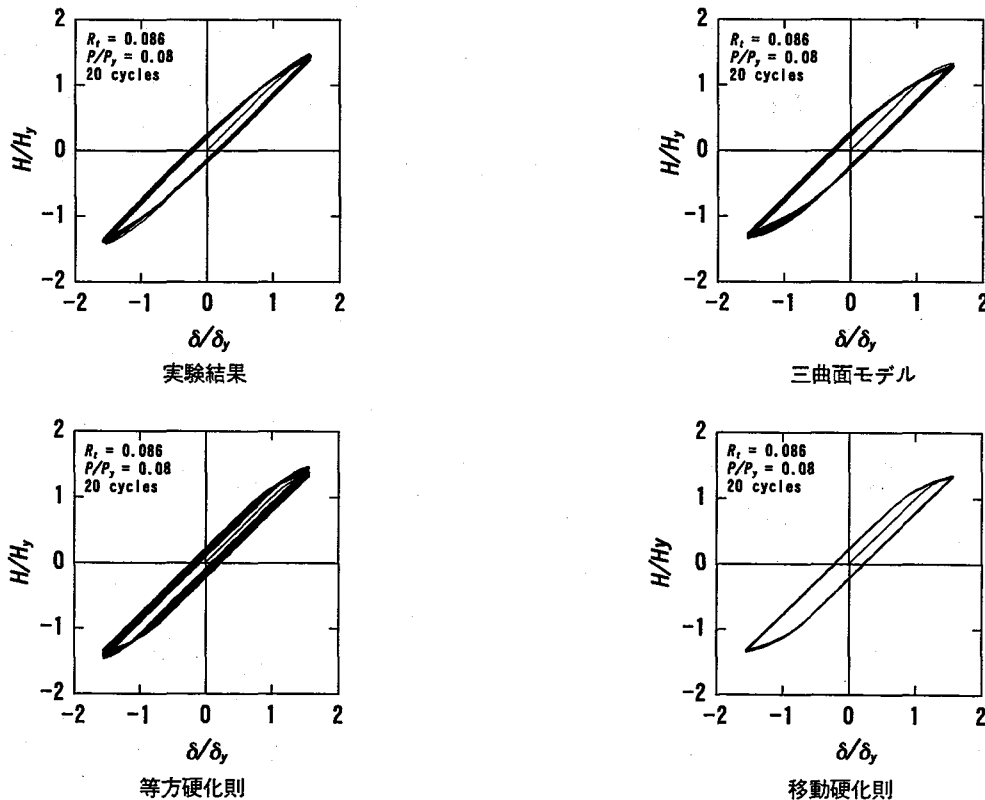
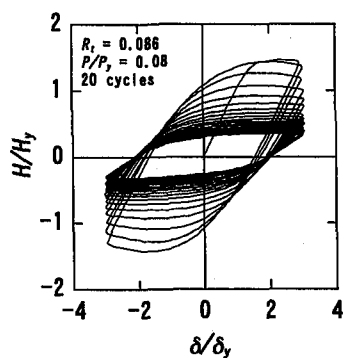


図-13 局部座屈状態の比較 (外側：正)

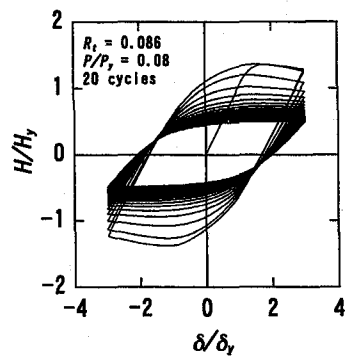


(a) 変位振幅 $\Delta = 1.5 \delta_y$ の場合

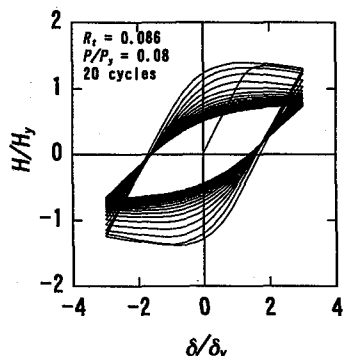
図-14 定変位振幅載荷における実験結果と解析結果の比較 (試験体：t15-N8-cc)



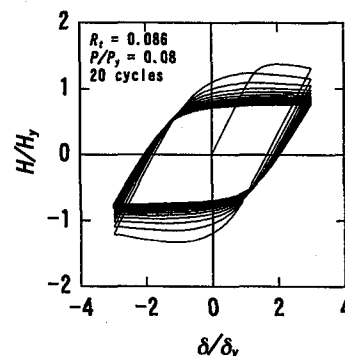
実験結果



三曲面モデル



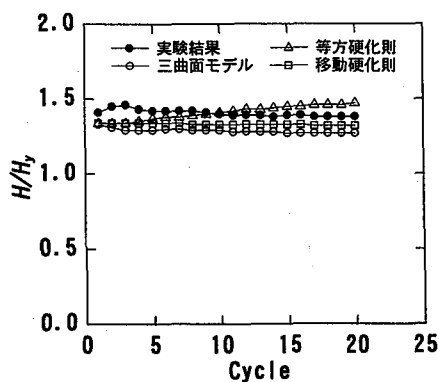
等方硬化則



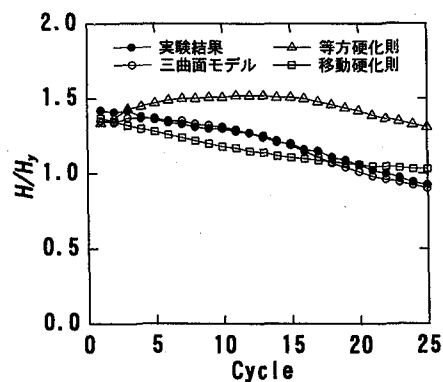
移動硬化則

(b) 変位振幅 $\Delta = 3 \delta_y$ の場合

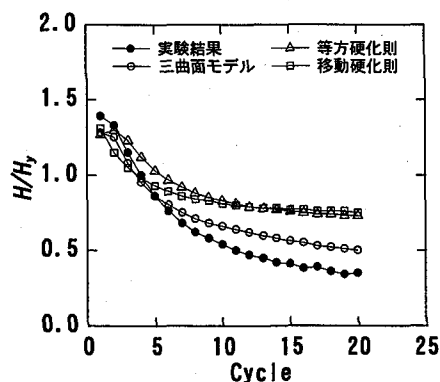
図-14 (続き)



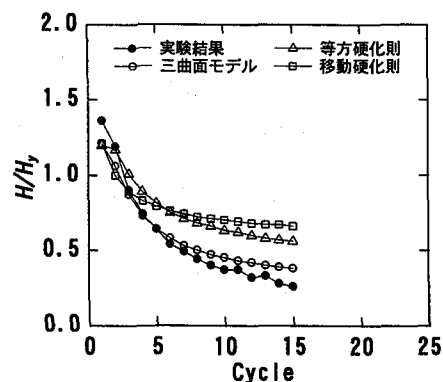
(a) $\Delta = 1.5 \delta_y$



(b) $\Delta = 2 \delta_y$



(c) $\Delta = 3 \delta_y$



(d) $\Delta = 4 \delta_y$

図-15 サイクル数と水平荷重の関係 (定変位振幅載荷)

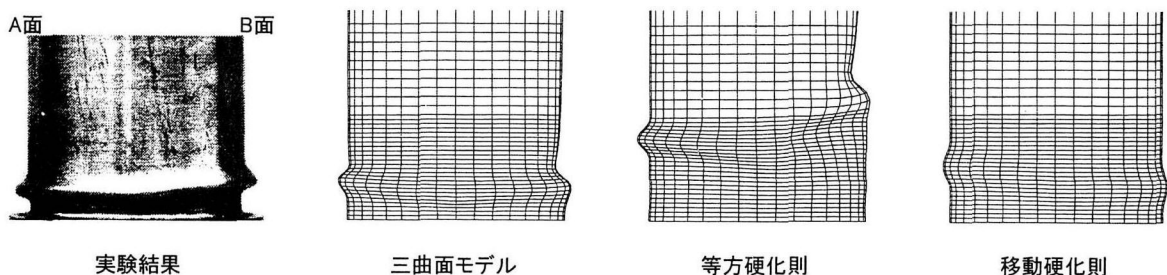


図-16 変形状態の比較 (定変位振幅載荷: t15-N8-cc3)

鋼管の降伏点が見かけ上上昇したことによるものと考えられる。

変位振幅 $\Delta = 2\delta_y$ の場合 (図-15(b)参照) では、実験結果と三曲面モデルによる結果はほぼ一致し、繰返し回数とともに水平荷重が緩やかに減少していることがわかる。また、移動硬化則の場合にも減少傾向を示すが、その減少率は異なっている。なお、等方硬化則の場合には、15 サイクル程度までは水平荷重が増大するが、それ以降は徐々に減少している。

変位振幅 $\Delta > 2\delta_y$ の場合 (図-14(b)および図-15(c), (d)参照) には、変位振幅が最大水平荷重時変位よりも大きい場合、実験結果は繰返し初期における水平荷重の減少率が大きく、やがて繰返し回数の増加とともに一定値に漸近している。また、この傾向は変位振幅が大きいほど顕著である。図より、移動硬化則および等方硬化則は繰返し初期における減少率が小さく、また最終サイクルで水平荷重が実験値の2倍以上の値となっている。一方、三曲面モデルの場合には、繰返し初期における減少率が他の2つの構成則モデルと比較して大きく、より実験結果に近い分布特性を与えていることがわかる。

図-16には、変位振幅 $\Delta = 3\delta_y$ における実験終了後の変形状態と解析結果を比較して示している。また、図-17には基部近傍の変形状態を定量的に示している。図より、等方硬化則の場合には t15-N8-c 試験体の場合と同様、局部座屈が実験結果より上方に発生している。また、移動硬化則の場合には局部座屈位置が非対称となっている。三曲面モデルの場合には、内側に陥り込むような座屈形状を示しているものの、局部座屈位置は実験結果と大略一致している。

5. まとめ

本研究では、鋼材の繰返し塑性を適切に評価可能な三曲面モデルを用いた弾塑性有限変位解析を行い、小型鋼管橋脚模型実験結果との比較により、その適用性に関する検討を行った。ここでは、軸力比、径厚比および負荷履歴の異なる条件に対する解析を行い、特に、水平荷重-水平変位曲線および実験後の変形状態に着目して検討を行った。また、一般的な構成則モデルとして汎用構造解析プログラム ABAQUS で提供されている等方硬化

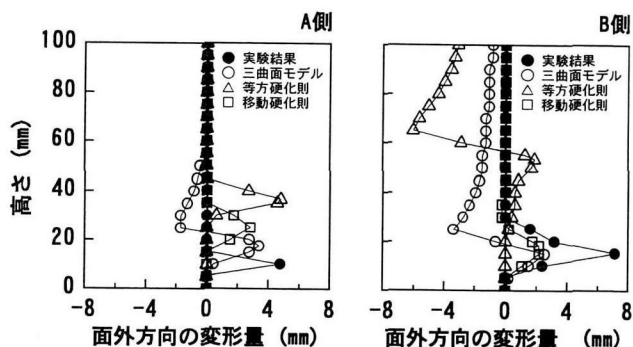


図-17 局部座屈状態の比較 (外側: 正)

則および移動硬化則を用いた解析も併せて行い、三曲面モデルとの比較・検討を行った。なお、ABAQUS で提供されている移動硬化則は応力-ひずみ曲線がバイリニア型に簡略化されている。本研究で得られた結果を整理すると、

単調載荷実験との比較より、

- 1) いずれの硬化則モデルを用いても水平荷重-水平変位曲線および変形状態をほぼ再現することが可能である。また、最大荷重は構成則によらず、実験結果をほぼ 10 % 程度の誤差内で評価できる。

漸増変動変位振幅載荷実験との比較より、

- 2) 三曲面モデルは、径厚比パラメータ、軸力比にかかわらず、水平荷重-水平変位曲線、履歴吸収エネルギーおよび変形状態などの弾塑性挙動を精度良く解析できる。
- 3) 等方硬化則は径厚比パラメータ $R_t = 0.086$ と板厚の小さい試験体では実験結果をほぼ再現できるものの、 $R_t = 0.052$ と板厚の大きい試験体の場合には最大耐荷力を過大に評価する傾向がある。
- 4) 移動硬化則は、応力-ひずみ曲線がバイリニア型に簡略化されていることより、エネルギー吸収量を過大に評価する傾向があるものの、最大荷重値までは実験結果を良く再現できることが確認された。

定変位振幅載荷実験との比較より、

- 5) 三曲面モデルでは水平荷重-変位曲線における劣化挙動、局部座屈の形状、発生位置等を定量的に精度良く評価することは難しいものの、その履歴特性は

定性的にはほぼ再現できる。

謝辞：本研究を行うにあたり、室蘭工業大学建設システム工学科 松岡 健一 教授ならびに九州工業大学建設社会工学科 山口 栄輝 助教授には貴重なご助言・ご指導を頂いた。また、室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻の梶山義晴君（現北電興業(株)）および市ノ渡誉将君にはデータ整理など多大なるご支援を頂いた。ここに記して深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 水谷慎吾, 宇佐美勉, 青木徹彦, 伊藤義人, 岡本隆：パイプ断面鋼圧縮部材の繰返し弾塑性挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 42A, pp. 105-114, 1996.
- 2) 西川和廣, 山本悟司, 名取 暢, 寺尾圭史, 安波博道, 寺田昌弘：既設鋼製橋脚の耐震性能改善方法に関する実験的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 42A, pp. 975-986, 1996.
- 3) 井浦雅司, 熊谷洋司, 小牧 理：横力と一定軸力を受ける円筒シェルの終局状態に関する研究, 土木学会論文集, No. 556/I-38, pp. 107-118, 1997.
- 4) 小枝日出夫, 岸 徳光, 佐藤昌志, 小室雅人：軸力と交番曲げを受ける円形鋼管柱の弾塑性挙動, 応用力学論文集 Vol. 1, 土木学会, pp. 549-558, 1998.
- 5) 岸 徳光, 佐藤昌志, 小枝日出夫, 小室雅人, 小野信市：正弦波加振を受けるコンクリート充填鋼管柱模型の弾塑性応答性状, 第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, 土木学会, pp. 185-192, 1998.
- 6) 北田俊行, 中井 博, 中西克佳, 竹野晃司：中空合成箱形断面を有する橋脚柱の耐震性に関する実験的研究, 土木学会, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 225-236, 1997.
- 7) 才塚邦宏, 宇佐美勉, 芳崎一也, 鈴木森晶：兵庫県南部地震観測地震波を用いたハイブリッド地震応答実験による鋼製橋脚の激震時挙動, 土木学会論文集, No. 556/I-38, pp. 119-129, 1997.
- 8) 葛 漢彬, 高 聖彬, 宇佐美勉, 松村寿男：鋼製パイプ断面橋脚の繰返し弾塑性挙動に関する数値解析的研究, 土木学会論文集, No. 577/I-41, pp. 181-190, 1997.
- 9) 後藤芳顯, 王 慶雲, 高橋宜男, 小畑 誠：繰返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と材料構成則, 土木学会論文集, No. 591/I-43, pp. 189-206, 1998.
- 10) 安波博道, 寺田昌弘, 名取 暢, 寺尾圭史, 西川和廣：弾塑性 FEM による鋼管柱載荷実験のシミュレーション解析, 鋼構造論文集, Vol. 3, No. 9, pp. 1-10, 1996.
- 11) 山口栄輝, 日野伸一, 阿部圭吾, 馬場 智, 村山隆之, 吉崎信之：繰返し水平荷重を受ける鋼製 R 付箱形断面橋脚柱の有限要素解析, 鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集, 土木学会, pp. 203-208, 1997.
- 12) 太田孝二, 中村聖三, 小林洋一, 中川知和, 水谷慎吾, 野中哲也：鋼製橋脚の耐震設計に対する構造解析ソフトウェアの適用性, 橋梁と基礎, pp. 33-39, 1997.
- 13) 後藤芳顯, 山口栄輝, 濱崎義弘, 磯江 暁, 野中哲也, 林 正拳：鋼製円形変断面橋脚の耐震性評価に関する解析的研究, 土木学会, 構造工学論文集, Vol. 45A, pp. 197-206, 1999.
- 14) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.
- 15) 西村宣男, 小野 潔, 池内智行：単調載荷曲線を基にした繰返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式, 土木学会論文集, No. 513/I-31, pp. 27-38, 1995.
- 16) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver. 5.6, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1997.
- 17) Dafalias, Y.E. and Popov, E.P. : Plastic internal variables formalism of cyclic plasticity, Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 43, pp. 645-651, 1976.

(1999年9月17日受付)