

繰り返し荷重を受ける鋼製橋脚の有限要素法解析と材料構成則

後藤芳顕、王慶雲、小畑誠、高橋宣男

名古屋工業大学社会開発工学科（〒466名古屋市昭和区御器所町）

繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素解析においては、鋼材の繰り返し塑性のモデル化が重要である。ここでは、有限要素への導入が容易になるように、できるだけ少ない材料パラメータ、内部変数で表現する構成則として三曲面モデルを提示した。このモデルでは、基本的な材料パラメータは単調引張り試験から決定できるように配慮している。他のパラメータは鋼種によらない一定値で鋼製橋脚の繰り返し実験結果をもとにキャリブレーションにより決定される。数値解析結果より、本構成則によると通常の移動硬化則や等方硬化則に比べ、鋼製橋脚の履歴挙動を大変形に至る全領域にわたり精度良く解析できることを確認した。

Key Words: *constitutive model, cyclic plasticity, steel pier, large deformation*

1. まえがき

まれに起こるような大地震に対して、鋼製橋脚の損傷を許容した機能保持型の耐震設計¹⁾を行う場合、その繰り返し荷重下の終局挙動特性を把握することが重要である²⁾。従来、その特性を理論的に予測するには薄板構造の複合非線形解析を行う必要があり、かなり困難な問題と考えられてきた。しかしながら近年、計算機能力の飛躍的な向上、非線形汎用コードの開発などにより、板要素の非弾性局部座屈挙動を考慮した複合非線形解析が比較的容易にできる環境が整っている^{3)~7)}。

板要素を用いた複合非線形解析を実用的な鋼製橋脚の解析に適用する場合、主として問題となるのは鋼材の材料構成則における繰り返し塑性の扱いであり、これにより解析結果は大きな影響を受ける。現在のところ通常の非線形汎用コードを用いるとき、利用可能なものは等方硬化則や弾性域を一定とした単純な移動硬化則であり、鋼材の繰り返し塑性の特性が十分反映されていない^{3)~7)}。

構造用鋼材の繰り返し塑性に関する構成則については、我が国においても、降伏棚、弾性域の縮小、硬化係数の変化などを鋼材の一軸試験にもとづき、塑性理論によるいくつかのモデルの提示がなされている^{8)~10)}。しかしながら、これらの塑性モデルは、ひずみの比較的小さい領域での一軸繰り返し載荷試験にもとづいているため、実際の鋼製橋脚を対象とした場合、その終局状態において繰り返し荷重下の塑性座屈モードの局所化現象によって生ずる100%を超える非常に大きな相当塑性ひずみ領域での精度の信頼性については疑問が残る。また、これらの塑性モデルは材料の一軸繰り返し挙動を忠実にカーブフィッティングする目的で多くの材料パラメータを含んでいるため、パラメーターの同定を含め一般的多軸応力下の実用解析に適用するのはかなり煩雑であるといえる。

著者らはより一般性を持った繰り返し塑性モデルを提案

するという立場からではなく、鋼製橋脚の繰り返し荷重下の終局挙動をなるべく簡単な構成則により精度良く解析すること目的として、鋼材の単調載荷試験を基本とし、材料定数が少ない三曲面モデルを提案した。つぎに、土木研究所で実施された鋼製橋脚の繰り返し載荷実験²⁾にもとづくキャリブレーションにより、三曲面モデルの2つのパラメータを決定し、大ひずみ領域まで適用可能な鋼材の繰り返しの構成則モデルを設定した。ここでは、三曲面モデルを用いて、上述の鋼製橋脚の静的繰り返し載荷実験を解析し、一般の汎用コードで利用可能な構成則である移動硬化則、等方硬化則を用いた場合の結果と比較する。ここでは、荷重変位関係とともに、とくに、繰り返し荷重下の劣化挙動に大きな影響がある局所変形モードを検討の対象とする。

2. 三曲面モデルによる繰り返し塑性の表現

鋼製橋脚の解析における鋼材の繰り返し塑性の構成則では、ひずみ硬化、降伏棚、そして弾性域の縮小の扱いが重要である。大きなひずみ領域での繰り返し現象を扱うには、これらの中でも特に、ひずみ硬化の扱いが重要である。著者らが提案する三曲面モデルでは、以上のような点全てに配慮してひずみの小さな領域から大ひずみの領域に至る鋼材の繰り返し塑性挙動を、なるべく少ない内部変数とパラメーターで表現することを試みている。また、通常の単軸繰り返し試験から知ることのできない相当塑性ひずみが非常に大きな領域の挙動を精度良く表すために、材質によらない2つのパラメータを鋼製橋脚の繰り返し実験によるキャリブレーションで決定するという特徴を有している。

三曲面モデルでは、不変の境界曲面と縮小と移動をずる降伏曲面の間に硬化係数の変化を表す不連続曲面を用いる。この不連続面は、応力点がこの面に到達し負荷すると拡大する。弾性域の縮小は、次式で表される。

$$f = [\alpha + (1 - \alpha)e^{-\beta \bar{\epsilon}^p}] \sigma_y \quad (1)$$

なお、内部変数としては、相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$ と二曲面モデル¹¹⁾の変数 δ のみを用いる。三曲面モデルの詳細については既に文献 6) に示しているののでここでは簡単な説明にとどめる。

3 材料パラメータとその決定法

本モデルの支配パラメータとその決定法を以下にをまとめる。まず、一軸引張試験より、ヤング係数 E 、ポアソン比 ν 、降伏応力 σ_y 、引張り強度 σ_u 、ひずみ硬化開始点での塑性ひずみ ϵ_{yp} 、ひずみ硬化係数 $H_{mon}^p (\epsilon_p - \epsilon_{yp})$ が決まる。一方、材料の繰返し載荷実験から定められるパラメータは、縮小した弾性域の収束値 f_b 、弾性域の縮小率のパラメータ β 、不連続境界面上内側の硬化係数比 H_{dc}^p / E である。ここで、 f_b は既存の実験結果^{10,12)}を参考に、残りの β 、 $H_{dc(n)}^p / E$ は鋼製橋脚の繰返し載荷実験と一致するように、試行錯誤的なキャリブレーションにより鋼種によらぬ一定値として決定する。したがって、解析に必要なパラメータは通常、材料の一軸引張試験のみによりすべて決定される。本三曲面モデルは従来の繰返し塑性モデルと比べ、材料パラメータ、内部変数はかなり少なくなっており扱いやすい形になっている。

4. 三曲面モデルによる鋼製橋脚の複合非線形解析

鋼製橋脚の有限要素法解析では、シェル要素や三次元はり要素を用いた複合非線形解析を実施するが、これらの要素を対象とした幾何学非線形解析については、多くの研究の蓄積があり既に商用汎用ソフトにおいて実用化がなされており、その信頼性も高い。従って、ここでは三曲面モデルに基づく材料非線形解析部分のみをプログラム化し FEM 解析の汎用ソフト ABAQUS の user subroutine に組み込み複合非線形解析を実施する。user subroutine は所定のひずみ増分に対して三曲面モデルに基づき応力増分を算定できるように作成するが、このとき構成則は微分関係として与えられているので、そのままでは増分後、応力点は降伏曲面上をはずれてしまい、数値計算の精度が低下する。ここでは、user subroutine において Return Mapping の手法を用いて、相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$ などを修正して増分解が降伏曲面上にのるようにしている

5. 材料構成則が鋼製橋脚の履歴挙動に与える影響

(1) 概要

三曲面モデルの繰返し荷重下の鋼製橋脚解析への適用性を検討するとともに、一般の汎用コードで利用可能

な構成則を用いた場合の精度についても調べる。

解析例としては、材料試験データが存在することから、建設省土木研究所と鋼材倶楽部で実施された鋼製橋脚の静的繰返し載荷実験⁴⁾を選ぶ。この解析例では三曲面モデルの材料定数 β 、 H_{dc}^p / E をキャリブレーションにより決定することも目的としている。

三曲面モデルと比較する既存の一般的な構成則としては、単調載荷曲線を多直線近似した載荷曲線に基づく等方硬化則 (ML等方硬化則) と移動硬化則 (ML移動硬化則) さらに硬化係数を一定とした移動硬化則 (BL移動硬化則) である。ML移動硬化則、BL移動硬化則の弾性域は一定で変化しない。なお、ML等方硬化則、BL移動硬化則は汎用ソフト ABAQUS に組込まれている構成則モデルであるため、解析ではそのままこれを用いて解析する。一方、ML移動硬化則は ABAQUS に組み込まれていないため、三曲面モデルと同様な手法により user subroutine を作成した。

(2) 解析モデルと解析方法

解析対象とした鋼製橋脚モデルは、建設省土木研究所ならびに鋼材倶楽部で実施された載荷実験で用いられた供試体の中から、一般的な形状寸法を持つものとして、建設省土木研究所での 3 体²⁾と鋼材倶楽部の 1 体⁴⁾を選んだ。供試体の概寸および断面形状は図-1、表-1 に示すとおりである。供試体 NO.2、KD-3 は縦リブ補強した矩形断面柱であり、供試体 NO.6、NO.8 は無補剛円形断面柱である。載荷条件としては、供試体の下端部を固定として、柱頭部には一定の軸力 (全断面降伏軸力の約 15%) を常時載荷し、その状態を保持したまま水平方向に漸増繰返し変位が与えられている。

解析モデルとしては、供試体の変形モードが左右対称であるとして、1/2 対称モデルを用いる。また、計算の効率化のために、局変形の大きい柱基部のみ 4 節点厚肉シェル要素 (S4R) で離散化し、上部は空間開断面 2 節点線形はり要素 (B310S) を用いる。矩形断面柱のリブについては横倒れ座屈が考慮できるはり要素 (B31) で近似する。残留応力と幾何学的初期不整については、これに関する情報がないため、本解析では無視する。

三曲面モデルの材料パラメータは 3. に述べる方法により決定した。三曲面モデルのパラメータ値は表-2 にまとめている。三曲面モデルと比較するマルチリニア等方硬化則、ML移動硬化則では、鋼材の単軸引張実験結果を基に真応力-対数ひずみ関係を図-3 に示すような多直線近似で表す。ここで、引張り試験結果によるといずれの鋼材もひずみの値が 20% で応力値がほぼピーク値に近づき一定値になることと、ピーク以後はネッキングにより一様変形にならないことから 20% 以降は一定値と仮定している。ML等方硬化則、ML移動硬化則ではこれらを相当応力-相当塑性ひずみの関係としてそのまま用いる。BL移動硬化則では、降伏後の接線剛性は $E_t = E/100$ と

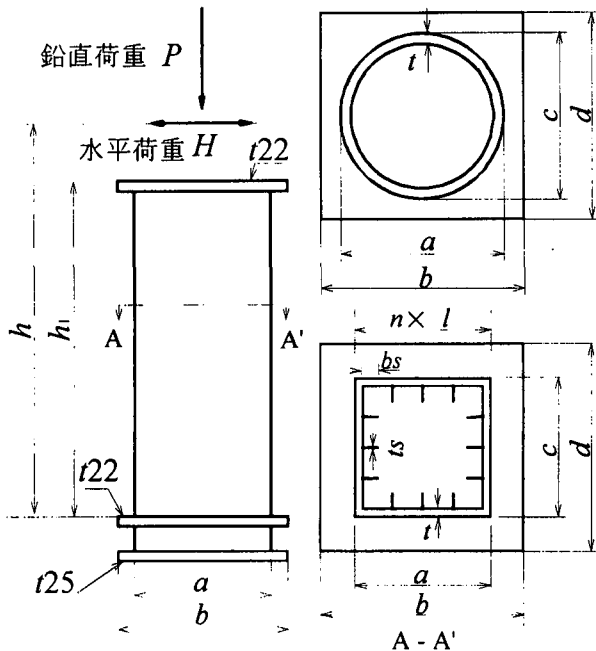


図-1 供試体形状・概寸

表-1 供試体のパラメータ値

供試体	NO.2	KD-3	NO.6	NO.8
鋼材	SM490	SM490	SM490	SS400
h(mm)	3403	3303	3403	3403
h ₁ (mm)	3173	3173	3173	3173
a(mm)	900	750	900	900
b(mm)	1300	1300	1300	900
t(mm)	9	12	16	9
bs(mm)	80	90	-	-
ts(mm)	6	9	-	-
n×l	4×225	3×246	-	-
R _i	-	-	0.076	0.115
R _f	0.56	0.46	-	-
λ	0.26	0.30	0.30	0.26
P/(σ _y A)	0.122	0.117	0.138	0.124
H _v (kN)	1039	931.5	848.6	414.9
δ _y (mm)	13.8	15.1	12.5	10.6

注: $H_y = (\sigma_y - P/A)z/h$, $\delta_y = H_y h^3 / (3EI)$

$$R_i = \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{k \sigma_y}{t E}$$

$$R_f = \frac{D}{nt} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{4\pi^2}}, \quad \lambda = \frac{2h}{\bar{\gamma}} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$$

する。

(3) 履歴挙動に関する解析結果

鋼材の構成則に三曲面モデルの他に通常のBL移動硬化則、ML移動硬化則、ML等方硬化則を用いた場合の鋼脚柱頂部の水平荷重-水平変位関係の履歴挙動を4種類の実験結果と比較する形で図-3に示す。図-3より、三曲面モデルを用いると、鋼材の単調引張試験結果のみで、鋼製橋脚の繰り返し挙動を全領域にわたってかなり精度

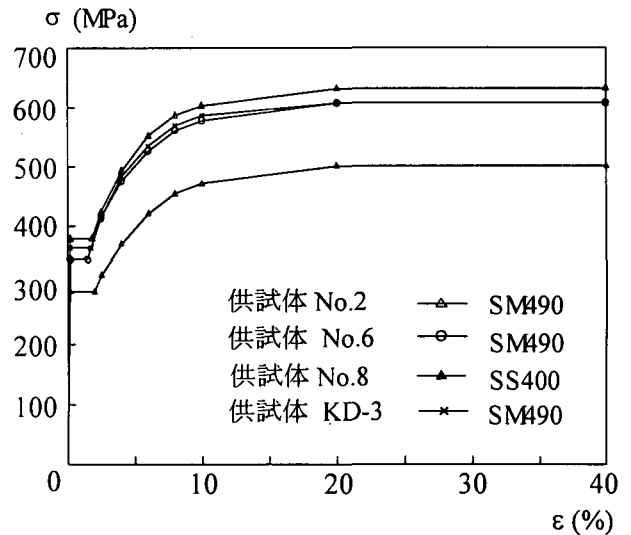


図-2 多直線近似の応力-ひずみ関係

表-2 三曲面モデルのパラメータ値

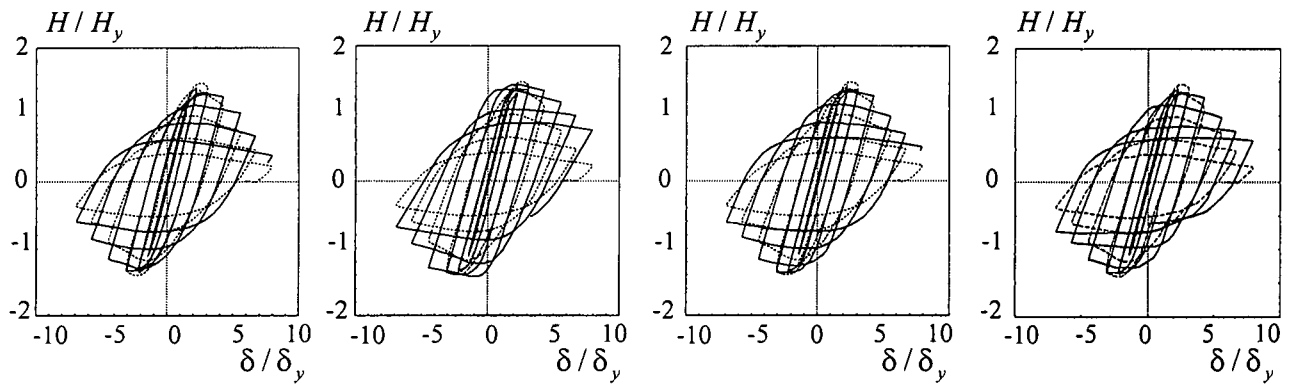
	NO.2	KD-3	NO.6	NO.8
E(GPa)	206	206	206	206
σ _y (MPa)	378.6	363.7	344.3	289.6
σ _u (MPa)	630.0	607.0	610.0	495.0
ν	0.3	0.3	0.3	0.3
ε _{yp}	0.0165	0.0159	0.0133	0.0183
f _b /σ _y	0.65	0.65	0.65	0.581
β	100			
H _{dci} /E	0.05			
H _{mon} ^p	多直線近似 (図-2 参照)			

良く解析できることがわかる。とくに、円形断面柱NO.6、NO.8および矩形断面柱KD-3については、繰り返し载荷の全領域で解析結果と実験結果は良く一致している。

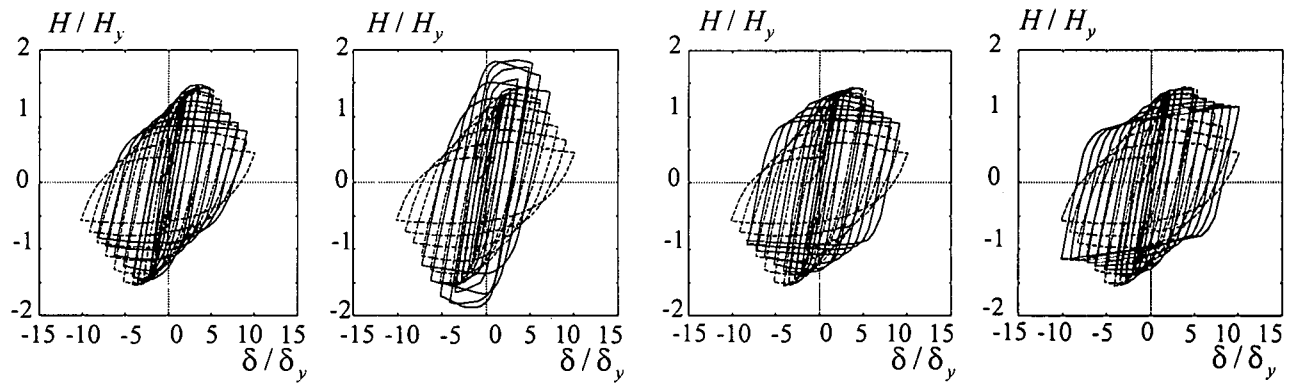
一方、既存の一般的な構成則としては、BL移動硬化則では、どの供試体においても履歴ループの包絡線の劣化勾配が最も小さく評価される。また、履歴ループの形状も実験結果とはかなり異なっている。とくに、変位振幅の大きな領域でこの傾向は強い。これは、BL移動硬化則では硬化係数が一定なため、ひずみが大きな領域で、硬化係数が低下する他の構成則と比べて材料剛性をかなり高めに評価することによる。

ML等方硬化則では供試体NO.8を除き鋼製橋脚の最大荷重を最も高く評価する。この傾向は、厚肉供試体であるKD-3、NO2において最も著しい。等方硬化則では塑性化、ひずみ硬化が生ずると弾性域が拡大するが、これが繰り返し荷重下の橋脚の最大体荷重の増加に関与するもの考えられる。また厚肉の供試体では、局部座屈変形が生じにくく構成則の影響がより直接的に現れるためと考えられる。

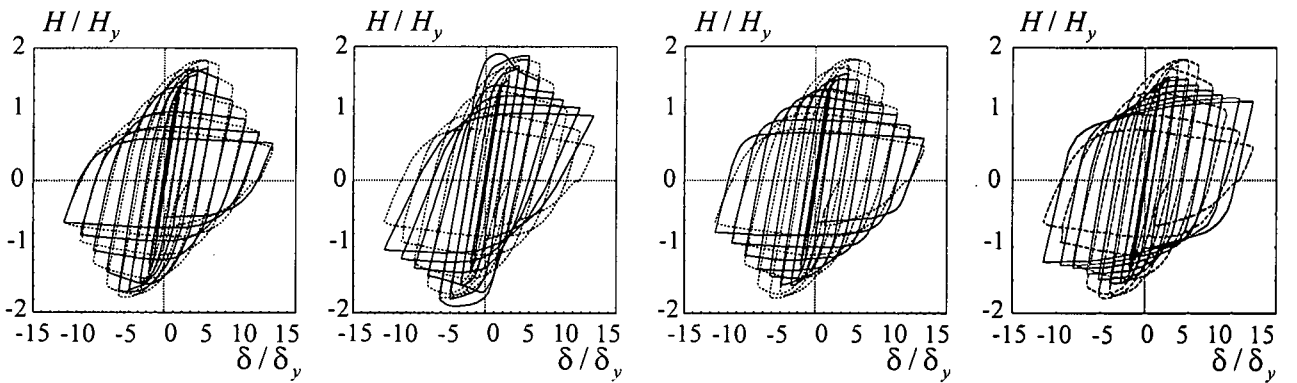
ML移動硬化則においては、履歴ループの包絡線の劣化勾配の評価の精度は比較的良好だが、弾性域の縮小を考慮していないため、除荷剛性が大きく履歴ループが角張っ



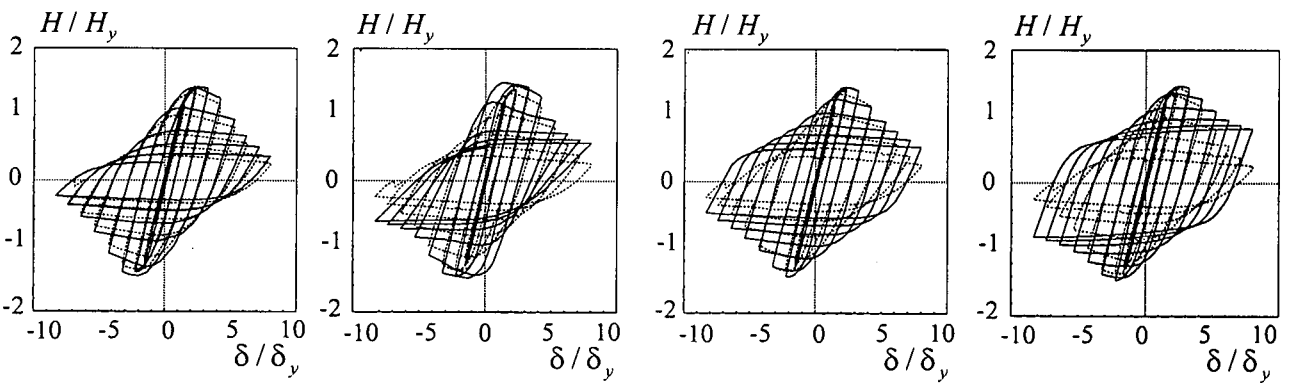
(a) NO.2



(b) KD-3



(c) NO.6



(d) NO.8

三局面モデル

ML等方硬化則

ML移動硬化則

BL移動硬化則

..... 実験 —— 解析

図-3 水平変位-水平荷重の履歴挙動

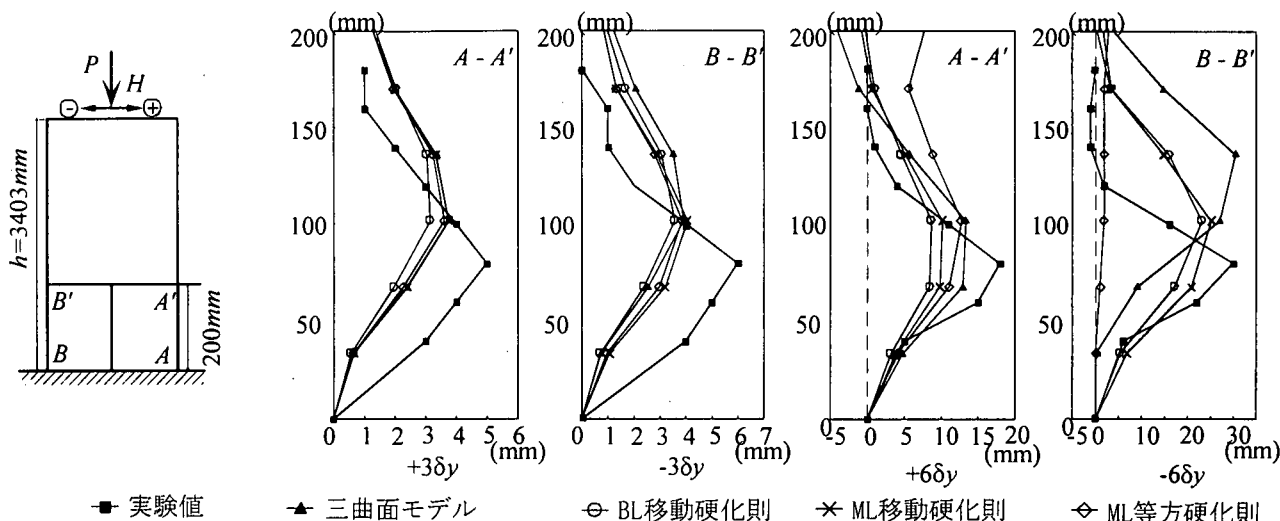


図-4 NO.8の半径方向の変形(外向き正)

た形となり履歴吸収エネルギーを高く評価する。また、既存の一般的な構成則の中では実験値に比較的良く一致する。

(4) 局部変形モードに関する解析結果

振幅 $3\delta_y, 6\delta_y$ での円形断面橋脚NO.8の半径方向の断面変形量を図-4に、繰り返し荷重実験結果と比較して示している。また、4種類の供試体について、各構成則で得られた終局状態の近傍における局所変形形状を図-5～8に描いている。ここで、NO.2, NO.8については実験での供試体の変形形状とも比較している。

図-4～8より繰り返し荷重下の局部座屈変形モードについて考察する。円形断面橋脚について、まず実験結果の得られている供試体NO.8の半径方向への断面変形量について図-4をもとに考察する。振幅 $\pm 3\delta_y$ においては、いずれの構成則を用いた場合もほぼ同じ結果が得られるが、実験結果に比べ、断面の最大変形量はやや小さく、はらみ出す位置も少し上方にずれている。一方、 $\pm 6\delta_y$ においては、三曲面モデル、BL移動硬化則、ML移動硬化則による断面変形性状は実験結果と良い一致を示しているが、等方硬化則によると局所変形ではらみ出す位置がかなり上方にずれ下端から上方へ200mmの区間は断面変形がほとんど現れていない。さらに大きな振幅 $+9\delta_y$ でのNO.8供試体の変形形状を各構成則ごとに図-5に示すが、ML等方硬化則では他の構成則と比べてかなり異なった変形モードを示す。すなわち、局部変形は上部に集中し、しかも内側にくびれるような変形形状を示す。等方硬化則の場合、図-4、5からわかるように、振幅が増大するにつれて局所的な変形は下部から上部に移行している。これは塑性化ははじめ下端で生ずるが、ひずみ硬化の開始により、弾性域が拡大するため、つぎの逆方向荷重では下端での見かけ上の降伏点は上昇する。したがって、はじめに降伏する点は上部に移行し、局部変形もこの点に移行するものと考えられる。ML移動硬化則、

BL移動硬化則、三曲面モデルではいずれも下端で外側への局部変形が生じているが、局部変形の集中は三曲面モデルが最も顕著である。図-5に示す実験終了時の変形形状も三曲面モデルによる解析結果と良く一致している。円形断面橋脚供試体NO.6については、図-6より、ML移動硬化則、BL移動硬化則、三曲面モデルでは先のNO.8と同様の局部変形特性を示すが、ML移動硬化則では、はじめは、NO.8のように下端が外側にはらみ出す変形を示すが、変位振幅が増大するにつれ、図-6に示すような内側にくびれるような変形モードに移行する。このような内側への変形は、はじめ圧縮応力で外側へ局部変形した箇所が、つぎの荷重で引張り応力を受け内側に塑性変形し、ここにさらに圧縮応力が作用することによって生ずる。

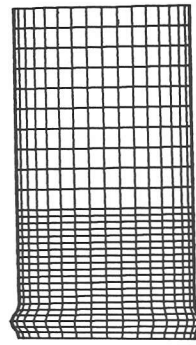
矩形断面橋脚については、図-9に示すように、NO.2供試体の実験では、フランジが内側に、ウェブが外側にそれぞれ局部変形しているが、この変形様式を三曲面モデルが最も良く表している。BL移動硬化則、ML移動硬化則もほぼ同様な変形様式を示すが、三曲面モデルに比べウェブの外側方向への局部変形が引張りフランジ側で小さく、実験のようなウェブのほぼ全幅にわたり様な外側へのはらみだしが表現されていない。ML等方硬化則は、矩形断面橋脚でも他の構成則とは異なった変形モードを示している。フランジは内側に局部変形が生じているが、局部変形の位置が、他の構成則の場合と比較しやや上部である。さらに大きな差異はウェブが圧縮フランジ側では外側にはらみだしているが、引張りフランジ側では内側に変形していることである。これは、円形断面橋脚のところでも述べたように、ひずみ硬化により弾性域が拡大することで局部変形位置が上部に移動し、固定端から離れ、引張りフランジ側のウェブで内側へ局部変形しやすくなることによるものと考えられる。供試体KD-3については、図-10から、いずれの構成則による解析結果もフランジが内側に、ウェブが外側にそれぞれ局部変形す



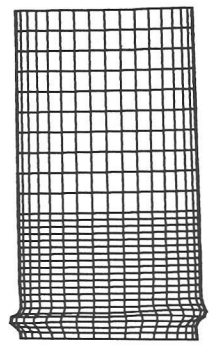
BL移動硬化則 ($9\delta_y$)



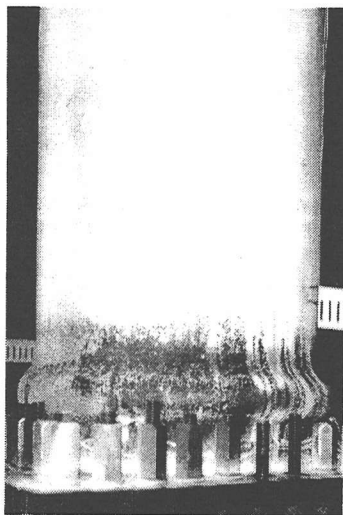
ML等方硬化則 ($9\delta_y$)



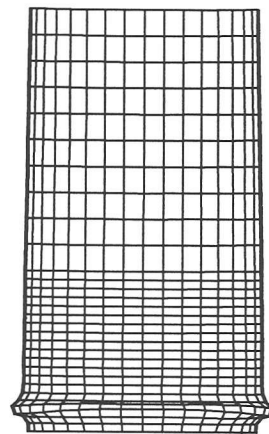
ML移動硬化則 ($9\delta_y$)



三曲面モデル($9\delta_y$)



実験結果 (終了時)



三曲面モデル (終了時)

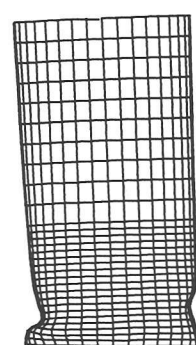
図-5 NO.8供試体の変形パターン



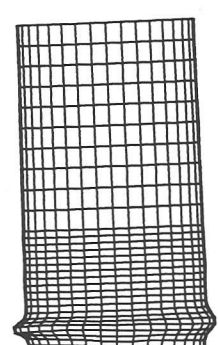
BL移動硬化則 ($10\delta_y$)



ML等方硬化則 ($10\delta_y$)

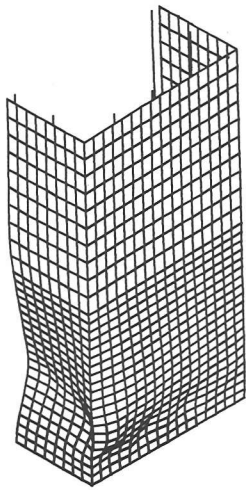


ML移動硬化則 ($10\delta_y$)

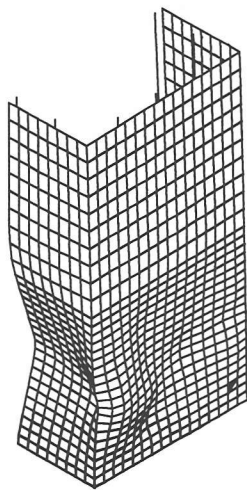


三曲面モデル($10\delta_y$)

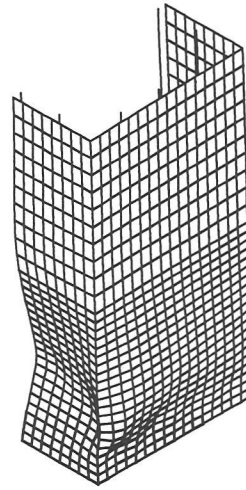
図-6 供試体NO.6の変形パターン



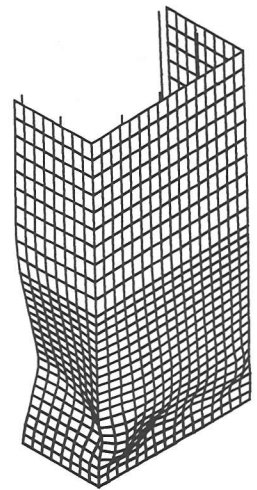
BL移動硬化則 ($7\delta_y$)



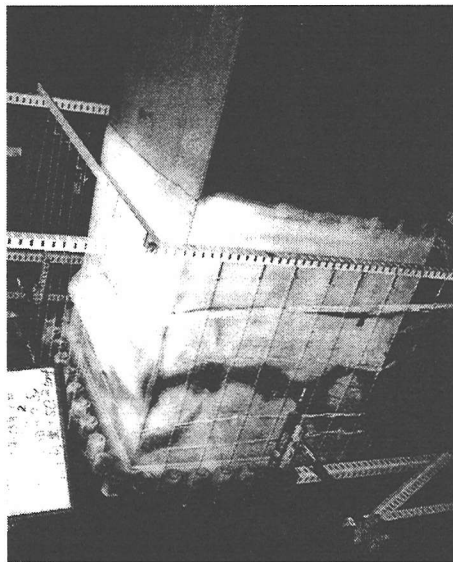
ML等方硬化則 ($7\delta_y$)



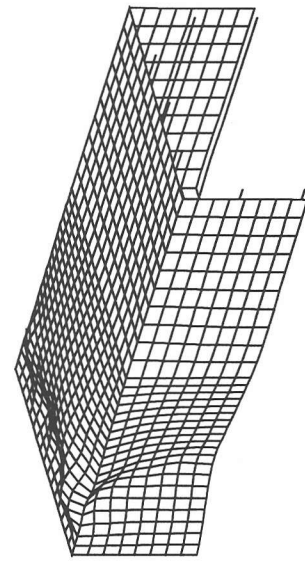
ML移動硬化則 ($7\delta_y$)



三曲面モデル ($7\delta_y$)

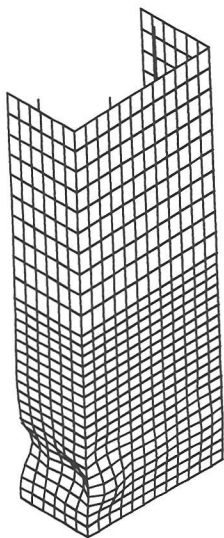


実験結果 ($7\delta_y$)

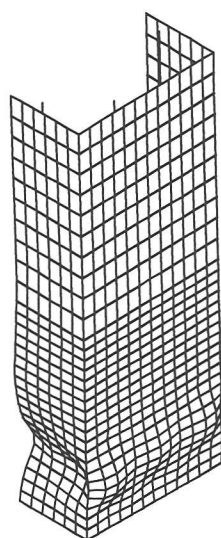


三曲面モデル ($7\delta_y$)

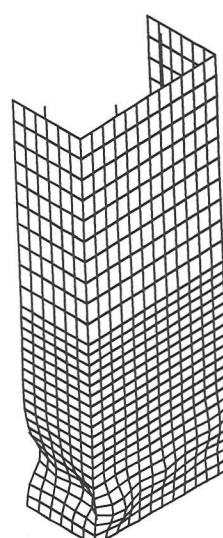
図-7 供試体No. 2の変形パターン



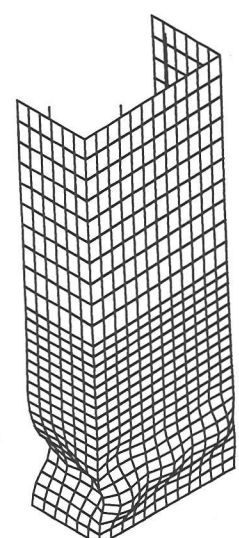
BL移動硬化則 ($11\delta_y$)



ML等方硬化則 ($11\delta_y$)



ML移動硬化則 ($11\delta_y$)



三曲面モデル ($11\delta_y$)

図-8 供試体KD-3の変形パターン

る変形様式を示している。この場合も、局部変形の大きさは三曲面モデルが最も大きく、BL移動硬化則、ML移動硬化則では小さい。ML等方硬化則による局部変形位置は、NO.2と同様、鋼製橋脚の固定端から、局部変形しやすいやや上部に移動するので、局部的な変形量は三曲面モデルとほぼ同等になっている。

5. まとめ

鋼製橋脚の地震荷重下の弾塑性解析を行うための鋼材の繰返し塑性の構成則について検討した。ここでは、有限要素解析への適用が容易になるように、できる限り少ない材料パラメータ、内部変数で表現しうる構成則を目標とし、三曲面モデルを提示した。このモデルでは、材料パラメータは基本的には、単調引張試験から決定できるように配慮している、他のパラメータは、鋼製橋脚の繰返し実験結果と一致するように帰納的な手法により鋼種によらない一定値として決定した。三曲面モデルによると鋼製橋脚の繰返し載荷実験の履歴ループの形状並びに、履歴ループの包絡線の劣化挙動、局部変形モードを全領域にわたってほぼ精度良く解析することも確認した。なお、本三曲面モデルでは一部のパラメータは鋼製橋脚モデルの繰返し載荷実験をもとに帰納的な手法により決定している。したがって、参照する実験の数が多いほどモデルの精度を向上させることができる。今後は、繰返し載荷実験データの蓄積につとめ、三曲面モデルのより一層の精度向上を検討したい。最後に、鋼製橋脚の実験データは建設省土木研究所ならびに鋼材倶楽部にご提供をいただいた。また、本研究の一部は、第1著者が鋼材倶楽部鋼製橋脚の耐震性に関する共同研究WG（大田孝二主査）において実施したもので、WGでは宇佐美勉名古屋大学教授ほか委員の皆様には貴重な助言・援助をいただいた。以上記して謝意を表す。

[参考文献]

1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計

編、平成8年

- 2) 西川ほか：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，Vol.42A，pp.975~986，1996.
- 3) 中川ほか：弾塑性有限変形解析による箱形鋼製橋脚の耐荷力と変形能の評価，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文，pp.599~604，1996.1.96-8，pp.138~141，1996.
- 4) 安波ほか：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.
- 5) 高久ほか：地震時の鋼製橋脚の弾塑性解析とベンチマークテスト，橋梁と基礎
- 6) 王、後藤、高橋、小畑：繰返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析について、第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp.369-376，1997.
- 7) 葛、高、宇佐美、松村：繰返しを受ける鋼製パイプ断面胸郭の強度と変形能に関する解析的研究、第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp.377-384，1997.
- 8) 皆川勝：構造用鋼材の弾塑性履歴挙動のモデル化とそれの構造部材への応用，学位論文，昭和63.
- 9) Shen, C., Mizuno, E. and Usami, T. : Development of cyclic two-surface model for structural steels with yield plateau, NUCE Report, No.9302, March, 1993.
- 10) 西村宣男，小野潔，池内智行：単調載荷曲をもと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.27~38，1995.4.
- 11) Dafalias, Y. E. and Popov, E. P. :Plastic internal variables formalism of cyclic plasticity, Journal of Applied Mechanics, Vol.43, pp.645~651, 1976.
- 12) 藤本ほか：構造用鋼材の多軸応力状態における繰返し応力一ひずみ関係一第一報，日本建築学会構造系論文報告集，第356号，pp.93~101，昭和60年

On FEM analysis of steel bridge piers under cyclic loading based on three-surface constitutive model

Yoshiaki GOTO, Qingyun WANG, Makoto OBATA ,Norio TAKAHASHI

The three surface model for cyclic metal plasticity was presented primarily in view of the application to the analysis of steel bridge piers under cyclic loading. This model is devised to include less material parameters and internal variables such that the model can be easily implemented in the FEM analysis. The present model is also characterized by the point that the two parameters independent of material types are calibrated by the cyclic loading tests for steel piers. As a result, the FEM analysis based on the three surface model can predict the hysteretic behavior of steel piers with considerable accuracy.