

繰り返しねじり力を受ける鋼構造物の終局挙動解析における材料硬化則の影響

Effect of hardening rules of steel on the analysis of cyclic behavior of steel structures

三好 喬*・崎元 達郎**・鶴田 栄一***・渡辺 浩****・廣田 武聖*****

Takashi Miyoshi, Tatsuro Sakimoto, Eiichi Tsuruta, Hiroshi Watanabe, Takenori Hirota

*株式会社横河ブリッジ(〒108-0023 東京都港区芝浦 4-4-44)

**工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科(〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

***天草工業高等学校 土木科(〒863-0043 本渡市亀場町亀川 38-63)

****博(工) 熊本大学助手 大学院自然科学研究科(〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

*****株式会社建設技術研究所(〒810-0041 福岡市中央区大名 2-4-12)

The effect of the hardening rules such as isotropic hardening, kinematic hardening, modified two-surface model on the numerical results of structural analysis is studied. The modified two-surface model is modified from Dafalias and Popov's two-surface model by Usami and Mizuno of Nagoya University based on the test results of Nagoya University. The arch model was tested in 1999 and the inverted L-shaped steel bridge pier model was tested in 2000. Numerical analysis is carried out by using ABAQUS/Standard (Ver.6.1), where isotropic hardening and kinematic hardening are installed as the default, and the modified two-surface model is installed in the user's subroutine. The numerical results are compared with experimental results. It is shown that the modified two-surface model can predict accurately the hysteretic behavior of the experimental test models.

Key Words: hardening, modified two-surface model, isotropic, kinematic

キーワード: 硬化則, 修正二曲面モデル, 等方硬化, 移動硬化

1. まえがき

地震による局部座屈破壊やエネルギー吸収を実験を用いることなく理論的数値実験により解明することは、耐震設計上大きな意味を持つ。局部座屈破壊のような大きな繰り返し塑性ひずみを伴う変形挙動を板要素を用いた有限要素法で評価する上で重要になってくるのは、鋼材の繰り返し応力-ひずみ関係をうまく表現できる材料構成則である。

現在、汎用の有限要素法解析ソフトでは、一般には単純な等方硬化則や移動硬化則しか利用できない状況であるが、これらの硬化則では鋼材の繰り返し塑性の特性が十分には反映されていない。

繰り返し荷重を受ける鋼材の力学的モデルとして、1967年に Mróz および Iwan がそれぞれ独自に開発した塑性力学多曲面モデル¹⁾や、1977年に Popov・Petersson が考案した Mróz とは異なる多曲面モデル²⁾

や、1976年に Dafalias・Popov によって開発された二曲面モデル³⁾を挙げることができる。しかしこれらのモデルはほとんどがひずみ硬化域での応力-ひずみ関係を対象にしており、比較的小さなひずみ領域で生じる局部座屈挙動などを解析する場合にはあまり適していない。そこで 1991 年頃から名古屋大学において Dafalias・Popov による二曲面モデルを、ひずみ硬化域のみならず降伏棚内での繰り返し挙動を精度よく予測することのできる塑性力学モデルとして修正した修正二曲面モデル⁴⁾⁵⁾の開発が試みられてきた。また同様の主旨で名古屋工業大学において三曲面モデル⁶⁾の開発がなされている。

これらの修正二曲面モデルや三曲面モデルを用いた解析結果の妥当性については圧縮と曲げを受けるような場合については数多く検証されている⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。しかし、圧縮と 2 軸曲げ、およびねじりが複雑に作用する場合については十分には検証されていない。

本研究では 1999 年、2000 年に本研究室で実験されたアーチリブや逆 L 形橋脚を解析対象とし、材料構成則を等硬化則、移動硬化則、修正二曲面モデルと変化させて解析を行い、繰り返しねじり力を受ける鋼構造物の終局挙動解析における材料硬化則の影響と解析精度について考察する。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (1)$$

b :全幅 t :板厚 σ_y :降伏応力 ν :ポアソン比
 E :ヤング率 k :座屈係数 ($=4n^2$)
 n :縦補剛材で区切られるパネル数

2. 面外繰返しを受ける鋼アーチ部材の解析

(1) 解析法

解析に用いたソフトは市販の汎用 FEM 解析ソフト ABAQUS/Standard(Ver.6.1)¹⁰⁾である。全ての解析における共通の条件を以下に示す。

- 1) 材料は弾塑性かつ等方性である。
- 2) von-Mises の降伏条件に従うものとする。
- 3) 収束計算は Newton 法を用いる。
- 4) 幾何学的非線形を考慮する。
- 5) 要素は 4 節点の S4R を用いる。
- 6) シェル要素の層方向の積分点は 5 箇所とする。
- 7) シェル要素の積分法は Simpson 則を用いる。

(2) 解析モデル

解析モデルは両端固定の単弦アーチである(図-1)。形状寸法は実験寸法に基づき図-2、表-1 に示すように支間 2500mm、ライズ 329mm、アーチライズ比は 0.13 となる円弧アーチとする。

断面形状は図-3 のような無補剛断面と補剛材を 1 本有する補剛断面とする。本研究では式(1)で表される幅厚比パラメータ R を主要パラメータと考え、幅厚比パラメータが比較的大きいと考えられる 0.7 と比較的小さいと考えられる 0.4 を目標として設計された断面を使用する。

解析モデル名は R の値を 100 倍したものを示し、頭に A を、末尾に無補剛断面には N を、補剛断面には S を表記するものとする。

解析モデルでは、局部座屈が発生すると予想されるクラウン部と基部付近のメッシュを細かく分割し、その他は多少粗く分割する(図-1)。分割数に関してはいくつか検討し、計算時間と結果をふまえて無補剛断面は板幅方向に 10 分割、補剛断面は補剛材間を 5 分割とした¹²⁾。残留応力や初期たわみは影響が少ないものとして考慮しない。

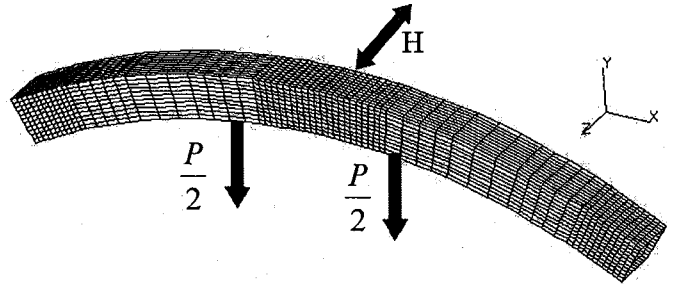


図-1 アーチ供試体の荷重方法とメッシュ分割

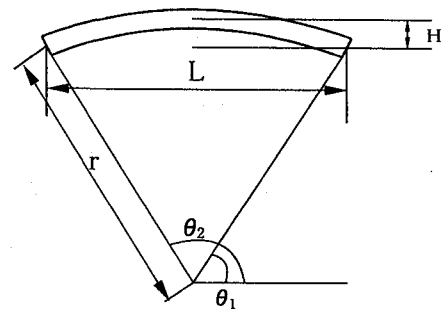


図-2 アーチ供試体の形状

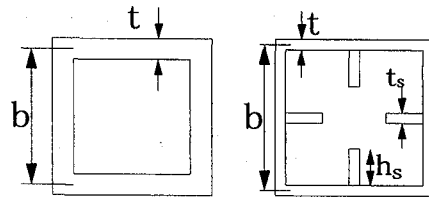


図-3 断面形状

(3) 材料条件

材料条件は基本的に実験供試体に使われた鋼材で引張試験を行ったため、その結果を使用するものとする。弾性係数、降伏応力、ポアソン比、ひずみ硬化開始ひずみを表-2 に示す。A65S のみひずみ硬化開始ひずみが示されていないのは、この供試体の鋼材のみ引張試験で降伏棚が見られなかったためである。

図-4 に示すように等硬化則、修正二曲面を用いる解析では引張試験結果をマルチリニアで近似したもの、移動硬化則を用いる解析では引張試験結果をトリリニアで近似したものを使用する。

表-1 アーチ供試体の寸法諸元

model	b (mm)	t (mm)	補剛材		R	L (mm)	H (mm)	r (mm)	θ_1 (rad)	θ_2 (rad)
			h_s (mm)	t_s (mm)						
A38N	180	9			0.38	2500	329	2537	1.06	2.09
A66N	200	6			0.66					
A37S	220	6	30	6	0.37					
A65S	280	4.5	25	4.5	0.65					

これは使用した汎用解析ソフト ABAQUS(Ver6.1)が、移動硬化則を用いる場合は降伏点と勾配がゼロになる点の 2 点しか定義できないためである。

表-2 アーチ供試体の材料定数

model	E (GPa)	σ_y (MPa)	ν	ϵ_{st}/ϵ_y
A38N	219	310	0.30	12.7
A66N	203	309	0.29	13.1
A37S	203	309	0.29	13.1
A65S	193	302	0.90	

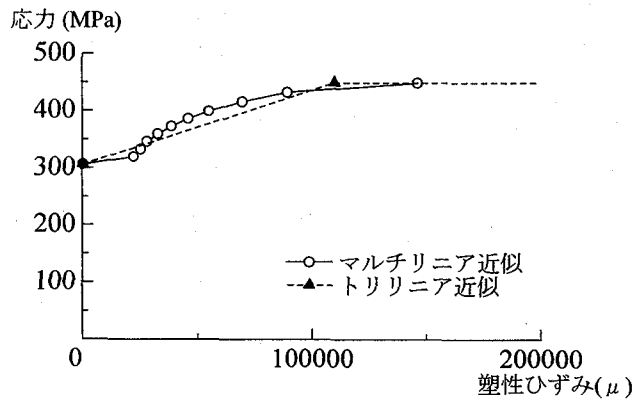


図 - 4 解析に用いる応力-ひずみ関係

(4) 荷重条件

上部構の死荷重を想定した鉛直方向力 P と地震力を想定した面外水平力 H を荷重する。

鉛直方向力は図-1 のように 2 点荷重とする。その大きさは実橋の調査¹³⁾等を参考に、軸力比 N/N_y が 0.2 となるように決定した。面外水平力は基部の断面一部分が降伏する際のクラウン部の水平変位を δ_y と定義し、 δ_y を基準としアーチクラウン部に図-5 のように繰り返し漸増荷重とする。また、そのときの水平力を降伏水平力 H_y 、アーチクラウンのねじり角を降伏ねじり角 θ_y と定義する。各値をモデルごとに表-3 に示す。

表-3 アーチ供試体の荷重条件

model	δ_y (mm)	H_y (kN)	θ_y (rad)	P (kN)
A38N	4.0	239.1	0.0037	213.0
A66N	3.4	194.0	0.0031	192.0
A37S	2.9	240.1	0.0028	153.0
A65S	2.6	333.2	0.0024	177.0

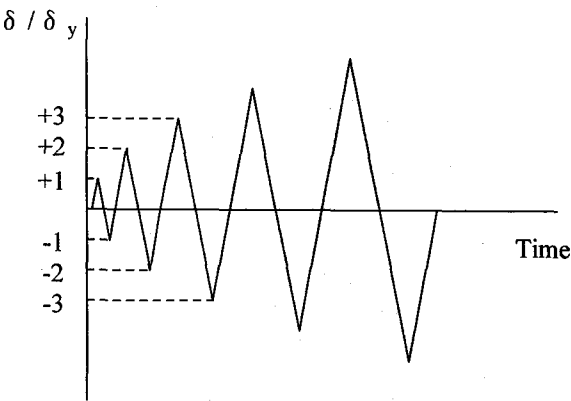


図-5 繰り返し荷重の方法

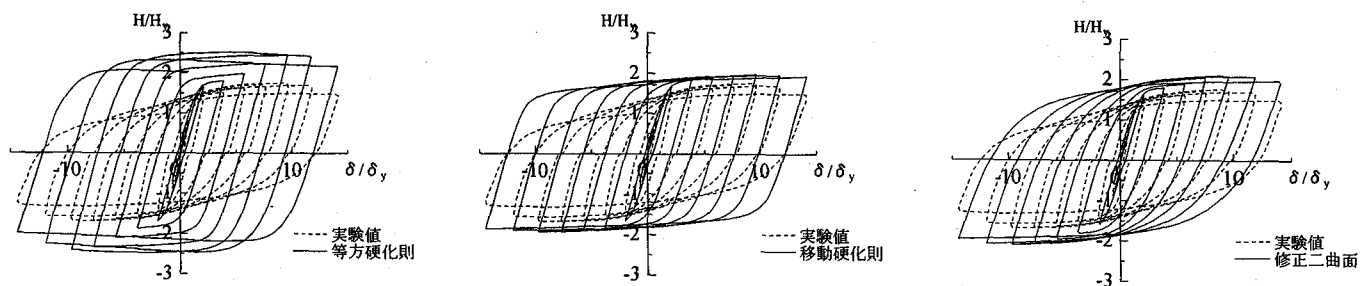
(5) 解析結果と実験結果の比較

(a) 荷重-変位関係¹²⁾

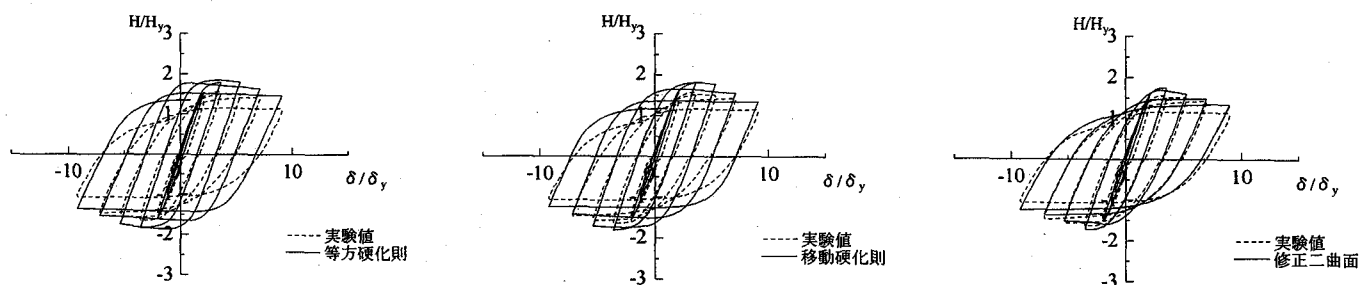
図-6 にアーチモデルそれぞれの面外力荷重点における荷重-変位関係を示す。図の縦軸は水平荷重を表-3 で示す降伏荷重 H_y で除したもの、横軸は水平変位を降伏水平変位 δ_y で除したものである。モデルごとに等方硬化則、移動硬化則、修正二曲面に関してそれぞれ実験結果と比較する。A65S に関しては修正二曲面を用いた解析の収れん性に問題があったので、等方硬化則と移動硬化則での結果のみを示す。

A38N や A37S では等方硬化則の解析は実験結果に比べて大きく出ている。これは等方硬化則が繰り返しの度に降伏曲面が拡大していき弾性域が大きくなるためであると考えられる。移動硬化則の解析は、最大荷重は誤差 10%以内で表せているものの、ループの形状に差が見られる。これは移動硬化則は降伏曲面が移動するのみで弾性域が減少することがないため、非線形になるのが遅れるためであると考えられる。それに比べ修正二曲面における解析は最大強度が誤差 10%前後であり、劣化の度合いがやや少ないものの、全体的に実験結果をよく表している。

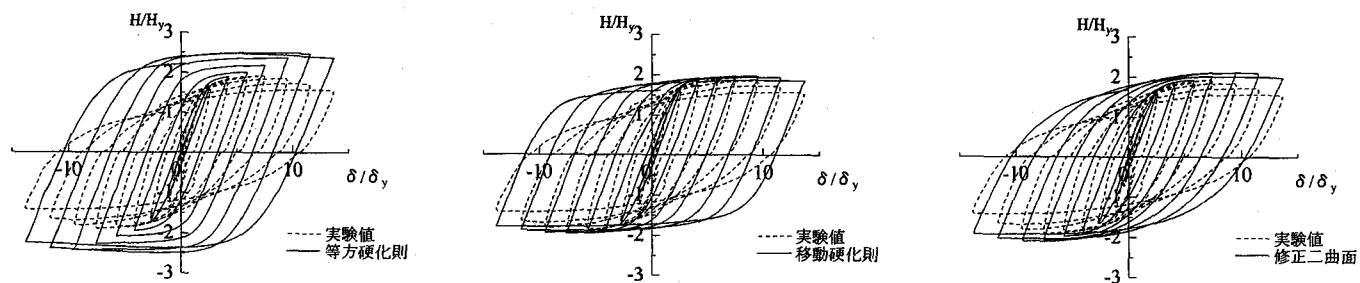
A66N や A65S は等方硬化則、移動硬化則ともに最大強度の誤差 10%強でありループの形状も等方硬化則と移動硬化則はよく似ている。これはこのモデルの R が大きいため、等方硬化則の降伏曲面が拡大する前に劣化が始まったためであると考えられる。いずれも、ループの形状は実験と比べると角張った形となっている。修正二曲面モデルでは最大強度も誤差 10%程度であり、ループの形状もよく一致していることが分かる。図-7(a)には荷重-変位関係のループの折り返し点を取り出した包絡線をモデルごとに示す。包絡線においては A38N と A37S の等方硬化則を除いてほぼどれも実験値と一致していることが分かる。したがって最大強度後若干強度が低下する程度までの包絡線を解析から得たい場合は移動硬化則でも実用的な問題は少ない。



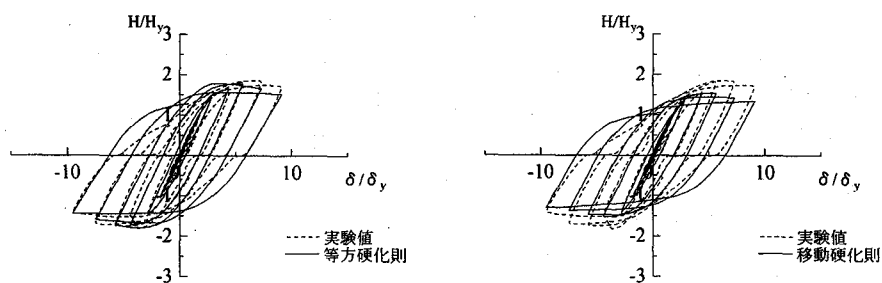
(a) A38N ($R=0.38, b=180, t=9$, 無補剛)



(b) A66N ($R=0.66, b=200, t=6$, 無補剛)

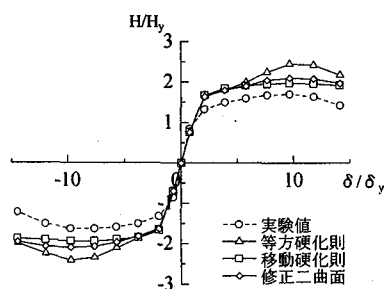


(c) A37S ($R=0.37, b=220, t=6$, 補剛)

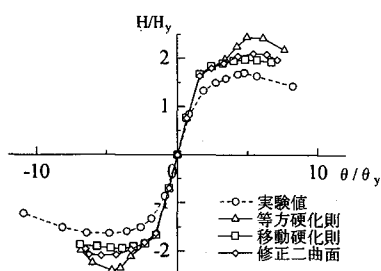


(d) A65S ($R=0.65, b=280, t=4.5$, 補剛)

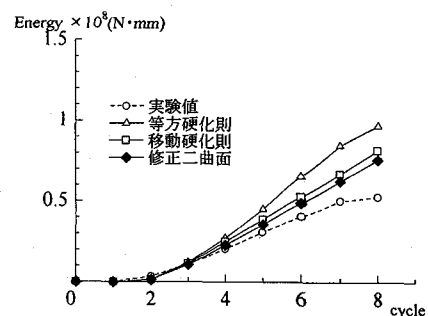
図-6 アーチ供試体の荷重-変位関係



(a) 荷重-変位関係包絡線

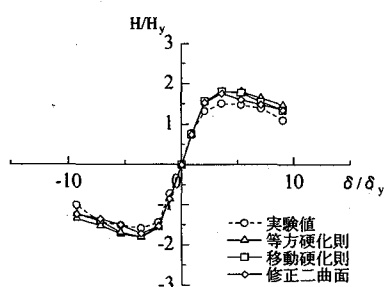


(b) 荷重-ねじり角関係包絡線

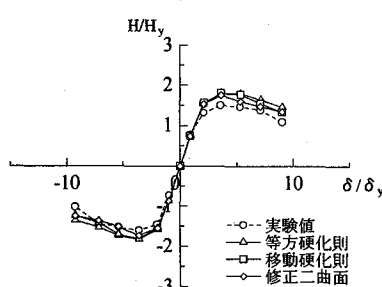


(c) エネルギー吸収量

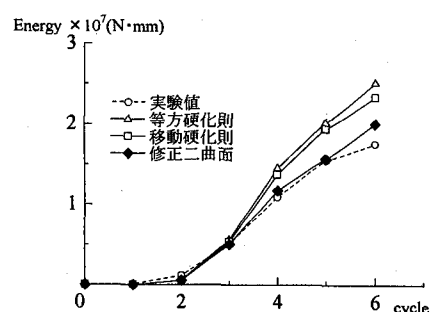
(I) A38N ($R=0.38, b=180, t=9$, 無補剛)



(a) 荷重-変位関係包絡線

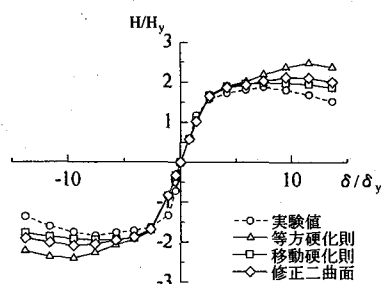


(b) 荷重-ねじり角関係包絡線

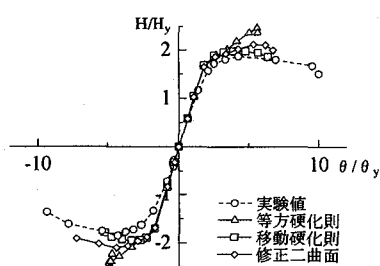


(c) エネルギー吸収量

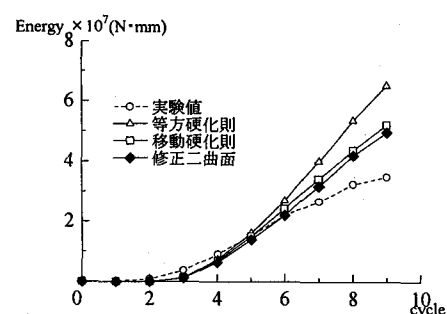
(II) A66N ($R=0.66, b=200, t=6$, 無補剛)



(a) 荷重-変位関係包絡線

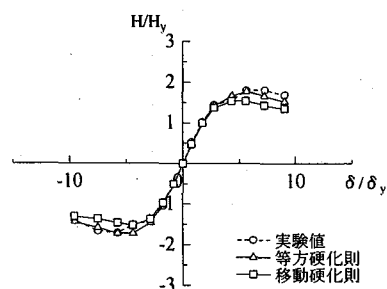


(b) 荷重-ねじり角関係包絡線

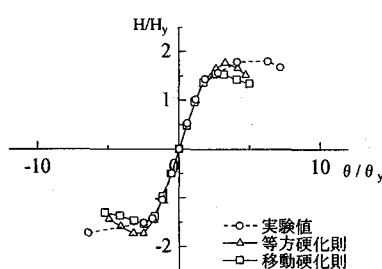


(c) エネルギー吸収量

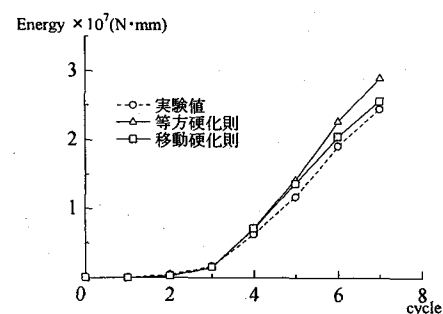
(III) A37S ($R=0.37, b=220, t=6$, 補剛)



(a) 荷重-変位関係包絡線



(b) 荷重-ねじり角関係包絡線



(c) エネルギー吸収量

(IV) A65S ($R=0.65, b=280, t=4.5$, 補剛)

図-7 各モデルの履歴特性

(b) 荷重－ねじり角関係とエネルギー吸収量

荷重－ねじり角関係を図－7(b)に示す。ねじり角はアーチクラウン、つまり載荷点のねじり角を示す。図の縦軸は水平力を降伏水平力 H_y で除したものの、横軸はねじり角を降伏ねじり角 θ_y で除したものである。

A38N と A37S の等方硬化則は荷重が大きく評価されている。その他のモデルは、どの硬化則においてもおおむね一致していることが分かる。

エネルギー吸収量をそれぞれモデルごとに 図－7(c)に示す。図の縦軸はエネルギー吸収量を示し、横軸はループのサイクルを示す。エネルギー吸収量は図－6の荷重－変位関係における囲む面積を求めることによって算出する。

どのモデルにおいても等方硬化則はループが繰り返しのたびに拡大しているので、実験値と大きく差があることが分かる。A38N、A37S に関しては移動硬化則も修正二曲面も実験値と離れているように見えるがこれは図－6 の荷重－変位関係からも分かるように最大強度が少し大きめに評価されているため、エネルギー吸収量を計算するとこのようになるのであると考えられる。だが、解析同士を比較すると修正二曲面モデルが最も実験値に近いことが分かる。

以上のことから、ループの形状、エネルギー吸収量まで考えると修正二曲面モデルが最も精度良く実験値に対応する解析結果が得られることがいえる。

3. 面外繰返し力を受ける鋼逆 L 形橋脚の解析

(1) 解析モデル

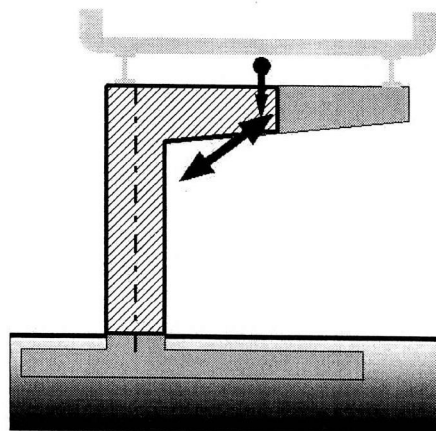
逆 L 形橋脚モデルは図－8 のように実橋脚において上部構の重量がかかると考えられる所までをモデルとし、そこまでを偏心量 e とする。式(2)で表される細長比パラメータ λ が 0.3 程度となるように高さ h を定め、偏心量 e は e/h で定義される偏心比が 0.4 となるように定める。

断面形状はアーチモデルと同様に図－3 に示す無補剛断面と補剛材を 1 本有する補剛断面とする。ここでも局部座屈に支配的と考えられるパラメータ、幅厚比パラメータ R (式(1)) を主要パラメータと考え、 R が 0.8 付近と 0.4 付近となるように設計された断面を使用する。それぞれの断面諸量を表－4 に示す。

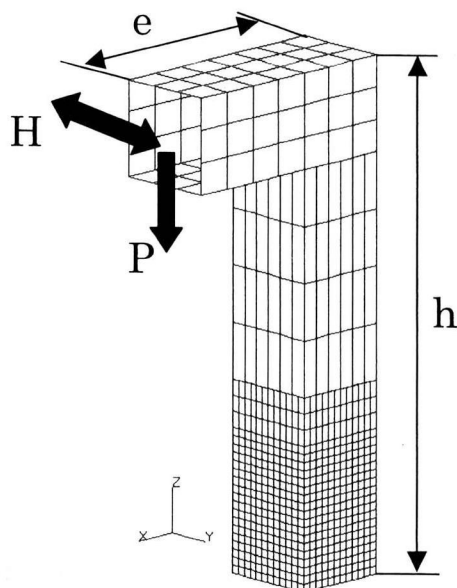
モデル名は R を 100 倍した値を基本に、頭に L を、末尾に無補剛断面には N を、補剛断面には S を表記するものとする。

解析モデルは図－9 のように局部座屈が発生すると予想される基部付近のメッシュを細かく分割し、その他の所は粗く分割する。分割数はアーチモデルと同様

いくつか検討を行った結果、無補剛断面は板幅方向に 12 分割、補剛断面は補剛材間を 6 分割とした¹⁴⁾。残留応力や初期たわみは繰返し載荷においては影響が小さいものと考え考慮しないものとする。



図－8 逆 L 形橋脚のモデル化



図－9 逆 L 形橋脚の解析モデル

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{l_e}{r} \quad (2)$$

σ_y : 降伏応力

E : ヤング率

l_e : 有効長さ

r : 断面 2 次半径

表－4 逆 L 形橋脚の寸法諸元

model	b (mm)	t (mm)	補剛材		R	h (mm)	e (mm)	λ
			hs (mm)	ts (mm)				
L40N	360	16			0.40	1750	700	0.26
L80N		9			0.76			0.28
L40S		9	43	6	0.38			0.28
L80S		4.5	45	6	0.80			0.30

(2) 材料条件

材料条件は基本的に実験供試体に使われた鋼材での引張試験結果を使用するものとする。モデルごとに弾性係数、降伏応力、ポアソン比、ひずみ硬化開始ひずみを表-5に示す。

逆L形橋脚の解析においてもアーチの解析と同様に図-4に示すように等方硬化則、修正二曲面を用いる解析では引張試験結果をマルチリニアで近似したものを、移動硬化則を用いる解析では引張試験結果をトリリニアで近似したものを使用する。

表-5 逆L形供試体の材料定数

model	E (GPa)	σ_y (MPa)	ν	ϵ_{st}/ϵ_y
L40N	219	255	0.31	12.0
L80N	211	284	0.33	11.8
L40S	211	284	0.33	11.8
L80S	210	303	0.29	7.6

(3) 载荷条件

下端部を固定としアーチモデルと同様に鉛直方向力Pと面外水平力Hを载荷する。

鉛直方向力の大きさの決定では、初期応力が許容応力度の90%以上となるように設定した。アーチモデルと同様に基部断面の一部が降伏する際の载荷点の水平変位を δ_y 、水平力を H_y 、载荷点の高さの柱部のねじり角を θ_y と定義する。 δ_y を基準とし図-5のように繰り返し漸増载荷とする。それぞれの値をモデルごとに表-6に示す。

表-6 逆L形供試体の载荷条件

model	δ_y (mm)	H_y (kN)	θ_y (rad)	P (kN)
L40N	6.6	211.3	0.0041	412.1
L80N	7.7	132.0	0.0049	258.1
L40S	8.6	152.7	0.0056	239.8
L80S	9.1	83.4	0.0060	137.3

(4) 解析結果と実験結果の比較

(a) 荷重-変位関係¹⁴⁾

図-10に逆L形橋脚モデルそれぞれの载荷点における荷重-変位関係を示す。図の縦軸は水平荷重を表-6で示した降伏水平荷重 H_y で除したものの、横軸は水平変位を降伏水平変位 δ_y で除したものである。モデルごとに等方硬化則、移動硬化則、修正二曲面に関してそれぞれ実験結果と比較している。図-11(a)には図-10に示す荷重-変位関係各ループの折り返し点の荷重-変位関係のみを取り出した包絡線をモデルごとにそれぞれ

れ示す。

L40N モデルでは等方硬化則の結果が強度劣化せずに実験値よりもかなり大きくなっていることが分かる。最大強度の誤差は約20%である。これは、等方硬化則は降伏曲面が拡大するのみで弾性域が大きくなる一方であることが原因であると考えられる。移動硬化則では荷重の折り返し点では非常によく一致しているといえる。最大強度の誤差は約2%である。これは図-11(a)の包絡線を見てもよく分かる。しかし、ループの形状が実験値に比べかなり角張っていることが見てとれる。この原因として、移動硬化則は降伏曲面が移動するのみで弾性域の減少を考慮していないため、除荷された際に剛性が大きく評価されるためであると考えられる。それに比べ修正二曲面モデルでは劣化の度合いが若干少ないものの包絡線、ループの形状ともよく一致していることが分かる。修正二曲面モデルは降伏曲面が拡大するのみの等方硬化則や、弾性域が減少することのない移動硬化則とは異なり、弾性域の減少やバウシinger効果がうまく表現されているため繰り返し挙動をよく表現できている。

L80N、L40S、L80Sではどの硬化則においても最大強度、劣化の度合いがよく表現されているといえる。最大強度の誤差もすべて5%~10%である。ループの形状は等方硬化則、移動硬化則ではややふくらみが大きいものの比較的一致しているといえる。これらの供試体に対しても全体的に考えると修正二曲面が精度よく一致していることが分かる。

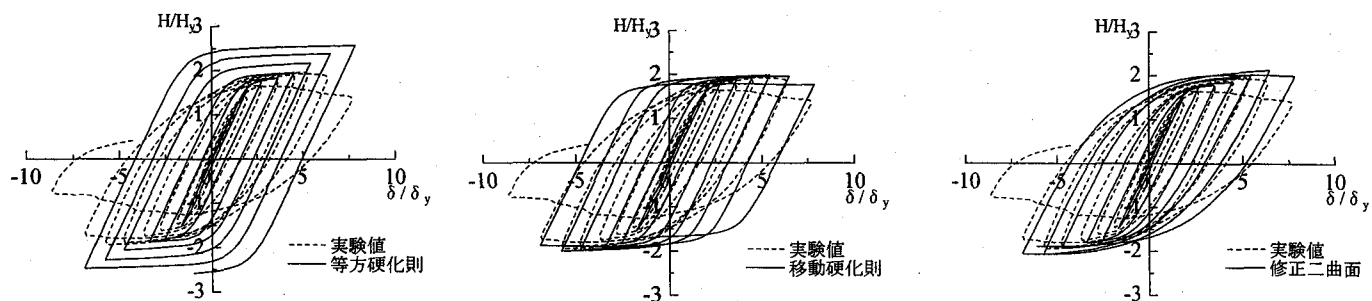
参考文献14)でL40Nは板厚が16mmであり、他のモデルに比べて板厚が厚いために移動硬化則による解析結果のループの形状が実験値のそれと大きな差異が生じていると報告されている。しかし、本解析のように修正二曲面モデルを使用して解析を行えば肉厚断面からなるモデルに対してもループ形状を含めて精度よく解析できることが明らかになった。

(b) 荷重-ねじり角関係とエネルギー吸収量

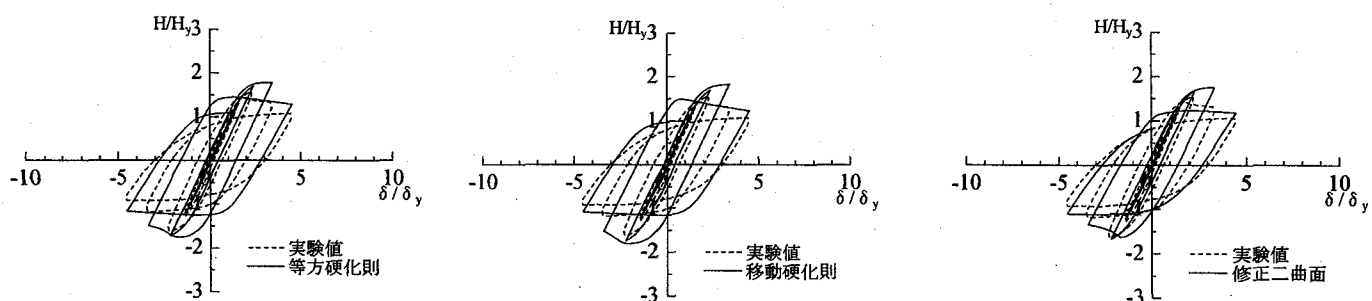
図-11(b)に各モデルについて荷重-ねじり角関係を示す。

どのモデルにおいてもおおむね一致することが分かる。しかし、L80Nモデルは実験値のみねじり角が大きく測定されている。これは実験において鉛直方向力を手動で载荷していたためサイクルが進んだ際に荷重が目標とする一定値に到達していなかったことが原因で、強度劣化が小さくなったのだと考えられる。全体的にみてどのモデルにおいてもすべての硬化則においてねじり角がよく一致しているといえる。

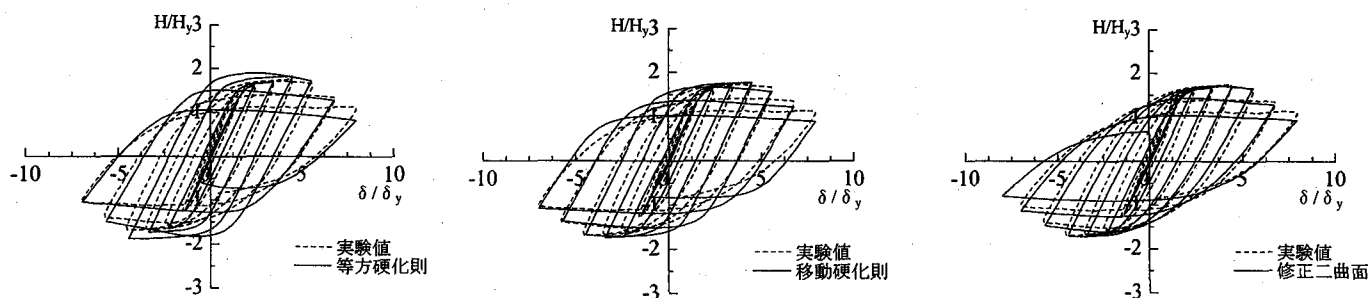
図-11(c)にエネルギー吸収量を示す。荷重-変位関係を見ても分かるようにサイクルが進行するにつれて



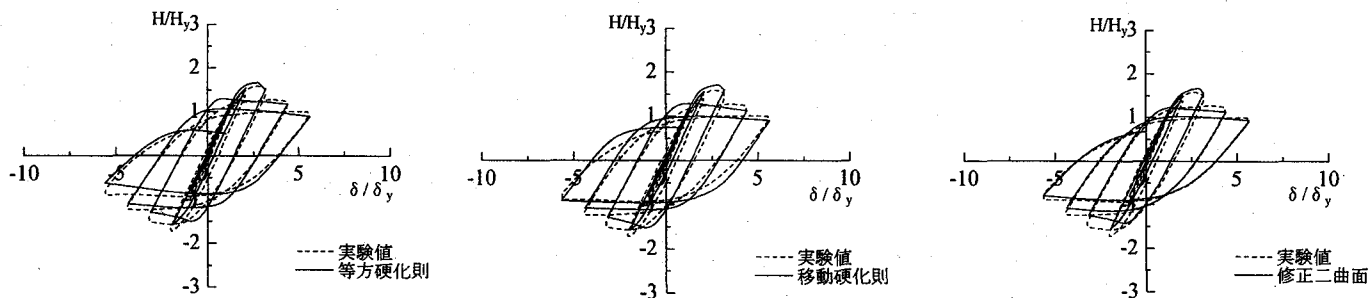
(a) L40N ($R=0.40, b=360, t=16$, 無補剛)



(b) L80N ($R=0.76, b=360, t=9$, 無補剛)

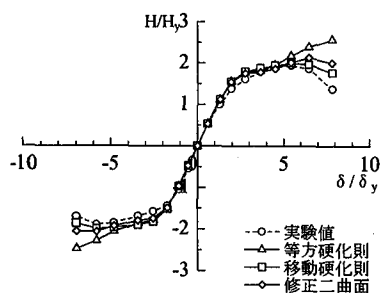


(c) L40S ($R=0.38, b=360, t=9$, 補剛)

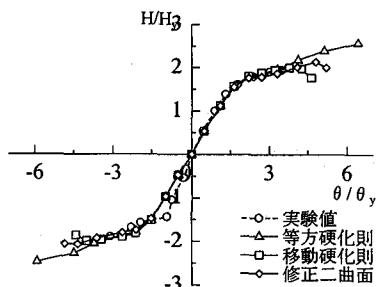


(a) L80S ($R=0.80, b=360, t=4.5$, 補剛)

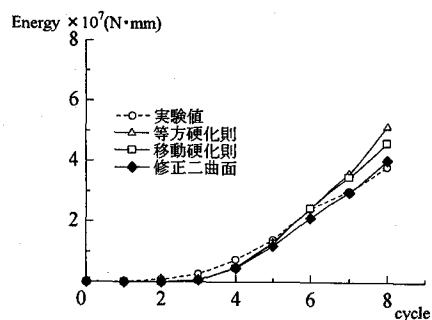
図-10 逆L形供試体の荷重-変位関係



(a) 荷重-変位関係包絡線

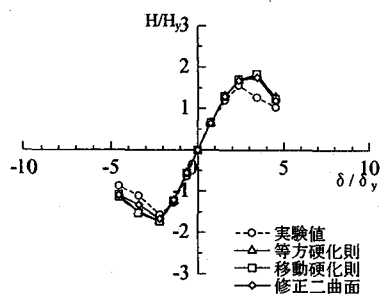


(b) 荷重-ねじり角関係包絡線

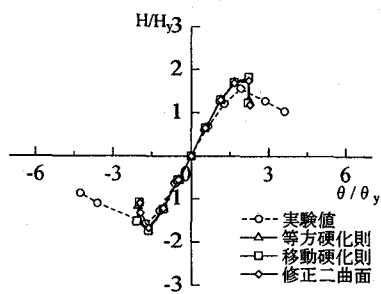


(c) エネルギー吸収量

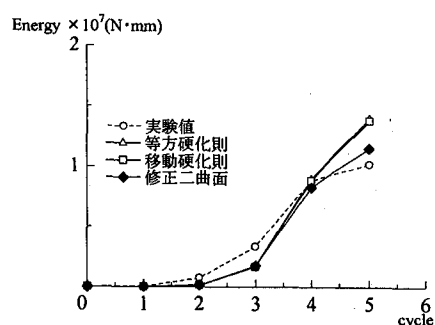
(I) L40N ($R=0.40, b=360, t=16$, 無補剛)



(a) 荷重-変位関係包絡線

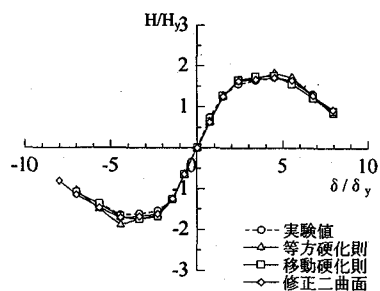


(b) 荷重-ねじり角関係包絡線

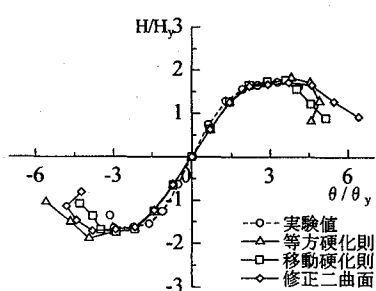


(c) エネルギー吸収量

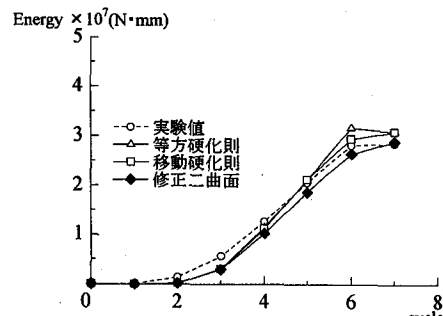
(II) L80N ($R=0.76, b=360, t=9$, 無補剛)



(a) 荷重-変位関係包絡線

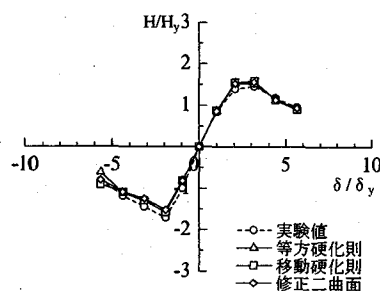


(b) 荷重-ねじり角関係包絡線

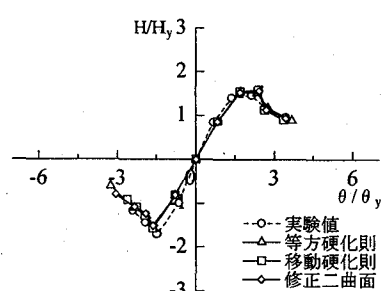


(c) エネルギー吸収量

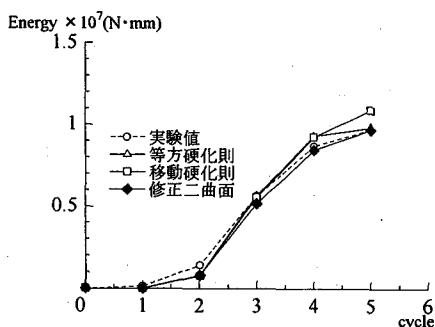
(III) L40S ($R=0.38, b=360, t=9$, 補剛)



(a) 荷重-変位関係包絡線



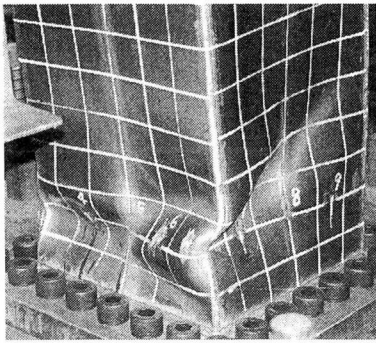
(b) 荷重-ねじり角関係包絡線



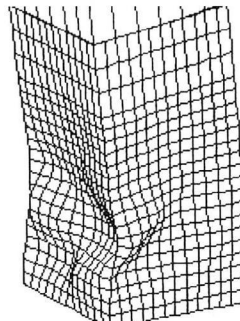
(c) エネルギー吸収量

(IV) L80S ($R=0.80, b=360, t=4.5$, 補剛)

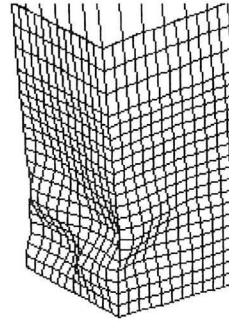
図-11 各モデルの履歴特性



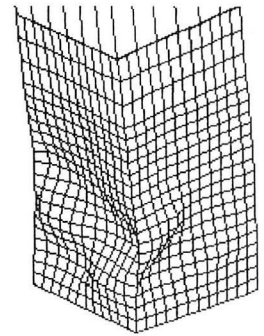
(a) 実験写真



(b) 等方硬化則

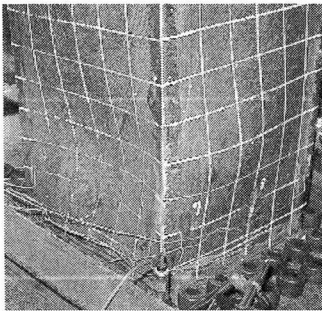


(c) 移動硬化則

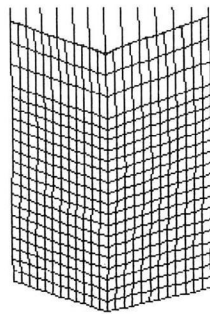


(d) 修正二曲面

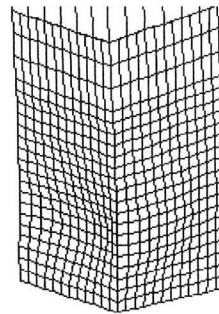
図-12 L80S 変形図($-5 \delta y$)



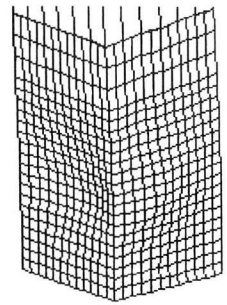
(a) 実験写真



(b) 等方硬化則



(c) 移動硬化則



(d) 修正二曲面

図-13 L40N 変形図 ($9 \delta y$)

等方硬化則や移動硬化則は実験値から離れていく傾向があるが、修正二曲面モデルにおいてはサイクルが進んでも実験値とよく合っていることが分かる。L40Nのように等方硬化則において降伏曲面がサイクルが進むにつれて拡大する場合に、修正二曲面が実験値に近いことが分かる。

以上より総合的に修正二曲面モデルを用いた解析結果が他の硬化則による解析結果に比べて実験値に一致しているが、移動硬化則によっても実用的には遜色がないことが分かる。

(c) 変形図

荷重-変位関係がどの硬化則においても実験を比較のとらえていた L80S の変形図を図-12に硬化則ごとに示す。この変形図はどれも終了直前の $-5 \delta y$ 時の変形を示す。格子の辺長は実験写真が 60mm、解析の変形図が 30mm である。図において左側が面内荷重に対して圧縮フランジになるパネルである。このパネルは軸力により常に圧縮を受けつつ、面外水平力によって圧縮と引張を繰り返し受けるパネルであり、逆 L 形橋脚において最も変形の大きなパネルであると考えられる。どの硬化則でも実験における変形をこのパネルにおいてよくとらえられていることが分かる。なお、L40S、L80N も同様の傾向がある。

次に荷重-変位関係が硬化則ごとに実験値と異なっ

たり一致したりしている L40N の変形図を図-13に硬化則ごとに示す。すべて終了時直前の $9 \delta y$ 時の変形を示す。等方硬化則の変形図はほとんど変形を表していない。これは荷重-変位関係からも分かるように降伏曲面が繰り返しの度に拡大し、全体的に硬化をしているためであると考えられる。移動硬化則は変形位置、モードともよくとらえている。同様に修正二曲面も変形量が少し小さいもののよくとらえている。

4. 結論

本論文の結論を以下にまとめる。

- (1) アーチモデル、逆 L 形橋脚モデルともに幅厚比パラメータ R が比較的大きなモデル（薄肉断面を有するモデル）に関しては修正二曲面モデルの解析が最も精度良く解析できるものの、移動硬化則を用いて解析を行っても比較的精度良く解析できる。
- (2) A38N、A37S、L40N のような厚肉断面を有するモデルは、等方硬化則では実験結果よりも強度を大きく評価してしまう。これに対し修正二曲面モデルを用いると荷重-変位関係（ループの形状も含めて）を最も精度良く表すことができる。
- (3) A38N、A37S、L40N のような厚肉断面を有するモデルにおいて、移動硬化則はエネルギー吸収量を

やや大きく評価するが、荷重-変位関係の包絡線は実験結果を良く表すことができる。

- (4) HP V class PA-8200 を用いて解析した場合、等方硬化則、移動硬化則で5.6時間の解析モデルでも、修正二曲面モデルを適用すると4、5日間必要であった。修正二曲面モデルによる解析は等方硬化則、及び移動硬化則の解析に比べて解析に要する時間が長い。

謝辞：修正二曲面モデルの ABAQUS ユーザーサブルーチンを提供していただいた名古屋大学の宇佐美勉教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) Mroz, Z : An Attempt to describe the Behavior of Metals under Cyclic Loads using a More General Workhardening Model, Acta Mechanica, Vol.7, pp.199-212, 1969.
- 2) Popov, E. P. and Peterson, H. : Cyclic Metal Plasticity : Experiments and Theory, Proc. of ASME, Vol.104, No.EM6, pp.1371-1388, 1978.
- 3) Dafalias, Y.F. and Popov, E.P. : Rate-independent Cyclic Plasticity in a Plastic Internal Variables Formalism, Mechanical Research Communication, Pergamon Press. , Vol.3, pp33-38, 1976.
- 4) Shen, C., Mizuno, E. and Usami, T. : A Generalized Two-Surface Model for Structural Steels under Cyclic Loading, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.10, No.2, July, 1993, pp. 59s-69s
- 5) Shen, C., Mamaghani, I. H. P., Shen, C., Mizuno, E. and Usami, T. : Cyclic Behavior of Structural Steels. I: Theory, J. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 121, No.11, pp.1165-1172, 1995
- 6) 後藤芳顯, 王慶雲, 小畑誠, 高橋宣男 : 繰り返し荷重を受ける鋼製橋脚の有限要素解析と材料構成則, 鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集 pp.209-210,1998
- 7) 葛漢彬, 高聖彬, 宇佐美勉 : 鋼構造物の繰り返し弾塑性解析用構成則の実験データによる検証、構造工学論文集 Vol.44A 201-210,1998,3
- 8) 葛漢彬, 高聖彬, 宇佐美勉 : 鉛直荷重が偏心して作用する鋼製橋脚の繰り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.654/I52,271-284,2000.7
- 9) 葛漢彬, 宇佐美勉, 高聖彬 : 鋼製補剛箱形断面橋脚の繰り返し弾塑性挙動に関する解析的研究、構造工学論文集 Vol46A 109-118,2000,3
- 10) 後藤芳顯, 王慶雲, 高橋宣男, 小畑誠 : 繰り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-43,189-206,1998,4
- 11) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver6.1, 2001
- 12) 崎元達郎, 鶴田栄一, 木下照章, 三好喬, 渡辺浩 : 局部座屈とねじりを考慮した箱形断面を有する骨組の終局挙動解析法、構造工学論文集 Vol.46A,2002,3
- 13) 長大鋼橋研究委員会 第2次報告書 アーチ橋の実橋調査報告書 (社) 建設コンサルタンツ近畿支部 pp140-141
- 14) 崎元達郎, 中山雅文, 川畑智亮, 渡辺浩, 江山栄一 : 面外繰り返し力を受ける逆 L 形鋼製橋脚の履歴挙動、土木学会論文集 No.696/I-58,215-224,2002.1

(2002年9月13日受付)