

報 告

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

Applicability of Non-Linear Structural Analysis Software to Seismic Design of Steel Bridge Piers

Ohta Koji Nakagawa Tomokazu
大 田 孝 二* 中 川 知 和****

Nakamura Shozo Mizutani Shingo
中 村 聖 三** 水 谷 慎 吾*****

Kobayashi Yoichi Nonaka Tetsuya
小 林 洋 一*** 野 中 哲 也*****

ま え が き

1995年に発生した兵庫県南部地震により、じん性が高いと考えられる鋼製橋脚にも被害が生じた。この被害の多くは、橋脚に軸圧縮力が作用した状態で、繰返し水平荷重が作用したことにより発生したとされている。これを契機に、鋼製橋脚の耐震性について精力的に各方面で研究がなされている。

大地震時における鋼製橋脚の弾塑性挙動を解明するには、実験だけでは自ずと限界があり、実験に加えて数値解析的な検討が必要になってくる。また費用および時間的にも解析的な手法は有効であると考えられる。このことから、最近では、この解析的研究が多く行われている。例えば、鈴木¹⁾は汎用非線形構造解析ソフトウェア MARC を用いて、箱形断面鋼製橋脚に対し単調増大の荷重を作用させた弾塑性有限変位解析を行い、強度と変形能について研究を行っている。中川²⁾は汎用非線形構造解析ソフトウェア ABAQUS を用いて、繰返し荷重を受ける箱形断面鋼製橋脚に対し、等方硬化則で弾塑性有限変位解析を行い、断面形式の変形能に及ぼす効果を調べている。安波³⁾は、MARC を用いて、繰返し荷重を受ける円形断面鋼製橋脚に対し等方硬化則と移動硬化則で弾塑性解析を行い、実験との比較を行っている。

また、一般の汎用解析ソフトウェアで利用可能な構成則では、構造用鋼材の繰返し弾塑性の特性が十分に反映されないとして、宇佐美⁴⁾は、修正2曲面モデルを開発している。さらに、後藤⁵⁾も大ひずみ領域でも精度が高い3曲面モデルについての研究を行っている。

従来、非線形解析は、一部の解析者が行っていたが、コンピュータの性能の飛躍的向上、汎用解析ソフトウェアの普及により、設計者が比較的容易に行えるようになってきた。このことから、この汎用解析ソフトウェアの適用性と限界を知ることは、非常に重要と考えられる。

本文では、代表的な汎用非線形構造解析ソフトウェアを用い、構成則として一般的な等方硬化則、移動硬化則、さらに修正2曲面モデル、3曲面モデルを加えて、円形断面鋼製橋脚の弾塑性有限変位解析を実施し、実験との比較検

討を行うことにより、汎用解析ソフトウェアの弾塑性有限変位解析への適用性と限界について述べる。

1. 解析対象モデル

1-1 実験供試体の諸元

解析対象の円形断面鋼製橋脚の供試体を図-1に示す。これは、建設省土木研究所で行われた実験のNo.8と呼ばれる供試体である(表-1)⁶⁾。

$$R_t = \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{\sigma_y}{E} \frac{D}{2t} \dots\dots\dots(1)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{2h}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 R_t ：径厚比パラメーター

ν ：ポアソン比

σ_y ：降伏応力

E ：弾性係数

D ：直径

t ：板厚

$\bar{\lambda}$ ：細長比パラメーター

h ：柱の高さ

r ：断面2次半径。

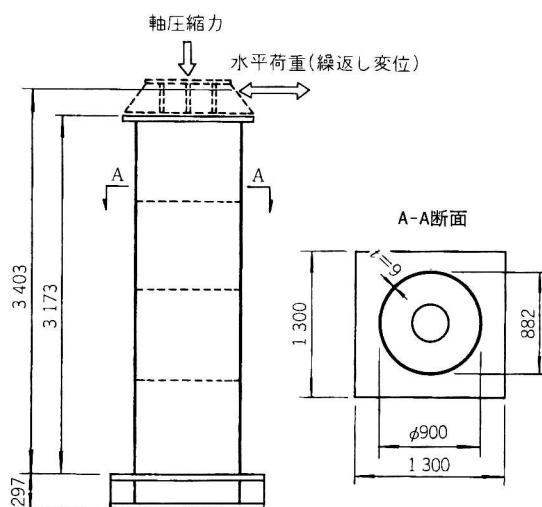


図-1 実験供試体

表-1 実験供試体の諸元

材 質	σ_y (kgf/cm ²)	R/t	R_t	$\bar{\lambda}$
SS400	2 950 (実験値)	50	0.110	0.26

*元新日本製鐵㈱ 建材開発技術部 土木建材技術グループ 部長代理

**川崎製鐵㈱ 鋼構造研究所 主任研究員

***住友金属工業㈱ 土木・橋梁技術部 土木鉄構開発・設計室 担当課長

****神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所 構造強度研究室 主任研究員

*****NKK 基盤技術研究所 都市工学研究部 研究員

*****大和設計㈱ 情報システムグループ 課長

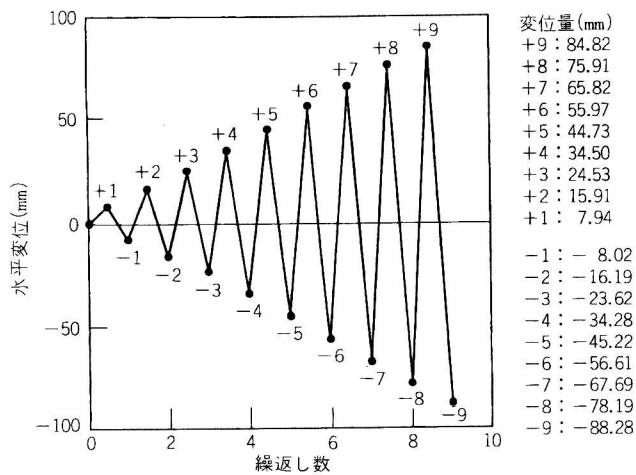


図-2 繰返し荷重

1-2 載荷条件

円形断面鋼製橋脚の柱頭部に全断面降伏軸力の15% (90.7tf) の一定軸圧縮力を作用させた状態で、水平方向に単調増大变位 (単調載荷) または繰返し増大变位 (繰返し載荷) を与える。

単調載荷の解析は、各解析ソフトウェアにおける解析モデルのチェックおよび構成則以外の特性 (要素の特性、降伏条件、幾何学的非線形性など) を評価するために行う。

繰返し増大变位は、図-2 に示すような降伏変位 δ_y を基本にした漸増繰返し (+1 δ_y , -1 δ_y , +2 δ_y , -2 δ_y , +3 δ_y , ...) の強制変位である。ただし、この強制変位量は正確には δ_y の整数倍にはなっておらず、解析においても実際の載荷実験の変位量に合わせた。

2. 解析方法

2-1 解析モデル

解析時間を短縮させるため、解析モデルは図-3 に示すように直径の2倍の高さまでをシェル要素でモデル化し、残りを梁要素でモデル化した。橋脚基部は、局部座屈が考慮できるように、さらに細かく要素分割を行った。シェル要素と梁要素の結合部は、柱の断面形状が不変と仮定して連続条件を設定している。境界条件として、柱下端部は完全固定とした。また、構造および荷重条件の対称性を考えて、1/2モデルで解析を行った。なお、この解析には、初期不整および残留応力は考慮していない。

汎用解析ソフトウェアは、真応力-真ひずみ関係を入力する必要があるため、工学応力 σ_E と工学ひずみ ϵ_E から次式より真応力・真ひずみを算出した。

$$\sigma = \sigma_E (1 + \epsilon_E) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\epsilon = \ln (1 + \epsilon_E) \quad \dots\dots\dots (4)$$

こうして算出した曲線を、図-4 に示すように2直線または多直線で近似した。

2-2 解析ソフト

解析に使用した汎用非線形構造解析ソフトウェアは、ABAQUS (5.5), MARC (K 6), ADINA (6.0), ANSYS (5.1) である。各解析ソフトウェアで使用したシェル要素を表-2 に示す。

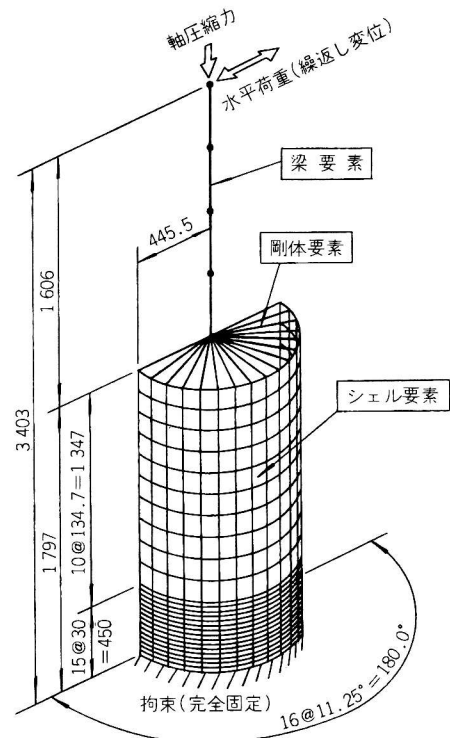


図-3 解析モデル (単位 mm)

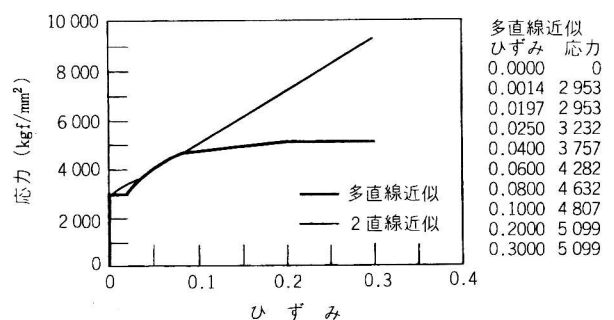


図-4 仮定した応力-ひずみ曲線

2-3 構成則

構成則として、汎用解析ソフトウェアで利用可能な等方硬化則と移動硬化則、宇佐美らが開発した修正2曲面モデル、後藤らが開発した3曲面モデルを用いて解析を行った。修正2曲面モデルおよび3曲面モデルの詳細については、文献4), 5) を参照されたい。

なお、ABAQUS の解析において、移動硬化則で応力-ひずみ関係を多直線近似した場合と、修正2曲面モデルおよび3曲面モデルを用いた場合は、ユーザーサブルーチンを作成して解析を行った。

2-4 解析条件

共通の材料条件を表-3 に示す。

これ以外の解析条件 (例えば、収束の判定条件、荷重ステップ数、幾何学的非線形性の考慮、降伏条件など) は、

表-2 使用要素

ソフト名	使用したシェル要素名
ABAQUS	4 節点低減積分シェル要素
MARC	4 節点厚肉シェル要素
ADINA	4 節点曲面シェル要素
ANSYS	四辺形塑性シェル要素 (4 節点)

表-3 材料条件

材 質	SS400
ヤ ン グ 率	$2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
ポ ア ソ ン 比	0.3
降 伏 応 力	2950 kgf/cm^2 (実験値)

各解析ソフトが推奨する方法で各々行った。

3. 解析結果

3-1 単調載荷の結果

単調載荷で解析を行ったときの各解析ソフトウェアの比較結果を図-5に示す。この場合、応力-ひずみ関係を多直線近似(M)および関数定義(2S:修正2曲面モデル, 3S:3曲面モデル)している。この図からわかるように、最大耐荷力までは、解析ソフトウェアによらずよく一致している。また、最大耐荷力を過ぎた劣化域においては、ABAQUS(修正2曲面モデル, 3曲面モデル), MARC および ANSYS の結果が同じになるが、ABAQUS(多直線近似)は劣化度合いが多少小さく、また、ADINA は反対に大きくなっている。

ABAQUS を例に、応力-ひずみ関係を、2直線近似、多直線近似および関数定義(修正2曲面モデル, 3曲面モデル)したときの解析結果の比較を図-6に示す。全変位領域において2直線近似の耐荷力が他の場合より多少大きくなる傾向を示し、とくに最大耐荷力が大きくなっている。これは、最大耐荷力のときが応力-ひずみ関係の降伏棚の部分にあたり、応力-ひずみ関係を2直線近似した場合に、高い応力値で計算することになったためと思われる。

3-2 繰返し載荷の結果

構成則として、移動硬化則(修正2曲面モデル, 3曲面モデルも含む)と等方硬化則を用いて、繰返し載荷で解析した結果を実験値⁹⁾と対比して示す。

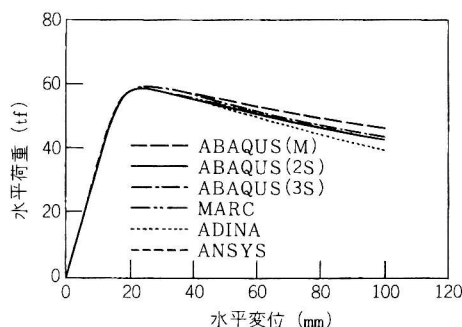
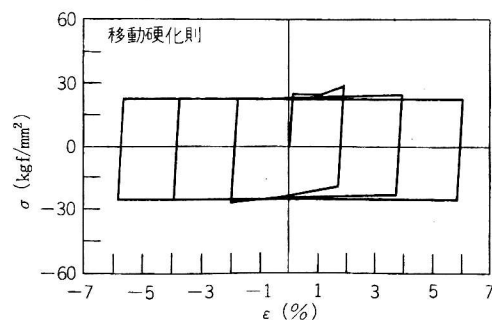
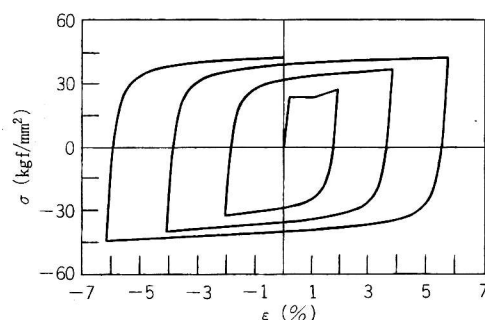


図-5 荷重-変位曲線(単調載荷)



(a) 多直線近似モデル



(b) 修正2曲面モデル

図-7 1要素のヒステリシス曲線

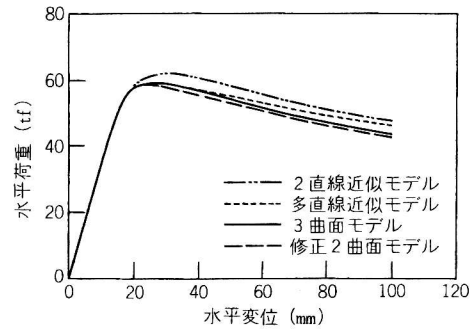


図-6 ABAQUSの荷重-変位曲線(単調載荷)

3-2-1 移動硬化則

1) 多直線近似, 修正2曲面モデル, 3曲面モデル

まず、各解析ソフトウェアの移動硬化則の特性を調べるために行った解析結果を、図-7に示す。この解析結果は、1要素に対し漸増繰返し変位を与えたときのヒステリシス曲線である。図-7(a)は、多直線近似したときの結果で、MARCとADINAは同じ結果になった。ANSYSについては、他の解析ソフトウェアと異なり、除荷後の逆負荷過程においても降伏棚ができるような特性を示すことが確認されている。この図から、降伏曲面は拡大せず、Bauschinger効果とMasing効果がほとんど考慮されていないことがわかる(その結果、弾性域が縮小していない)。図-7(b)は、修正2曲面モデルの結果である。この図から、弾性域の縮小および降伏曲面の変化を考慮しているのがわかる。なお、3曲面も修正2曲面と同様な傾向を示した。

次に、各解析ソフトウェアについて前述した解析モデルに対する解析結果(図-8~10)を以下に示す。

① ABAQUS

応力-ひずみ関係を多直線近似したときのABAQUSの解析結果を図-8(a)に示す。この図からわかるように最大耐荷力については実験値とよく一致している。劣化域についても、耐荷力は5 δ_y まではよく一致しており、これ以降は、多少高くなる傾向を示している。図-9の包絡線において、この解析ソフトウェアに限らず初期勾配については実験の方が小さくなっているのがわかる。これは、供試体の初期不整の影響や実験装置の弾性変形に対する補正が不完全であったためと思われる。履歴ループの形については、実験と異なり、角張った紡錘形になっている。これは、この構成則が弾性域の縮小を考慮していないためと思われる。その結果、図-10のように、履歴吸収エネルギーが実験値と比較して高くなっている。なお、この履歴吸収

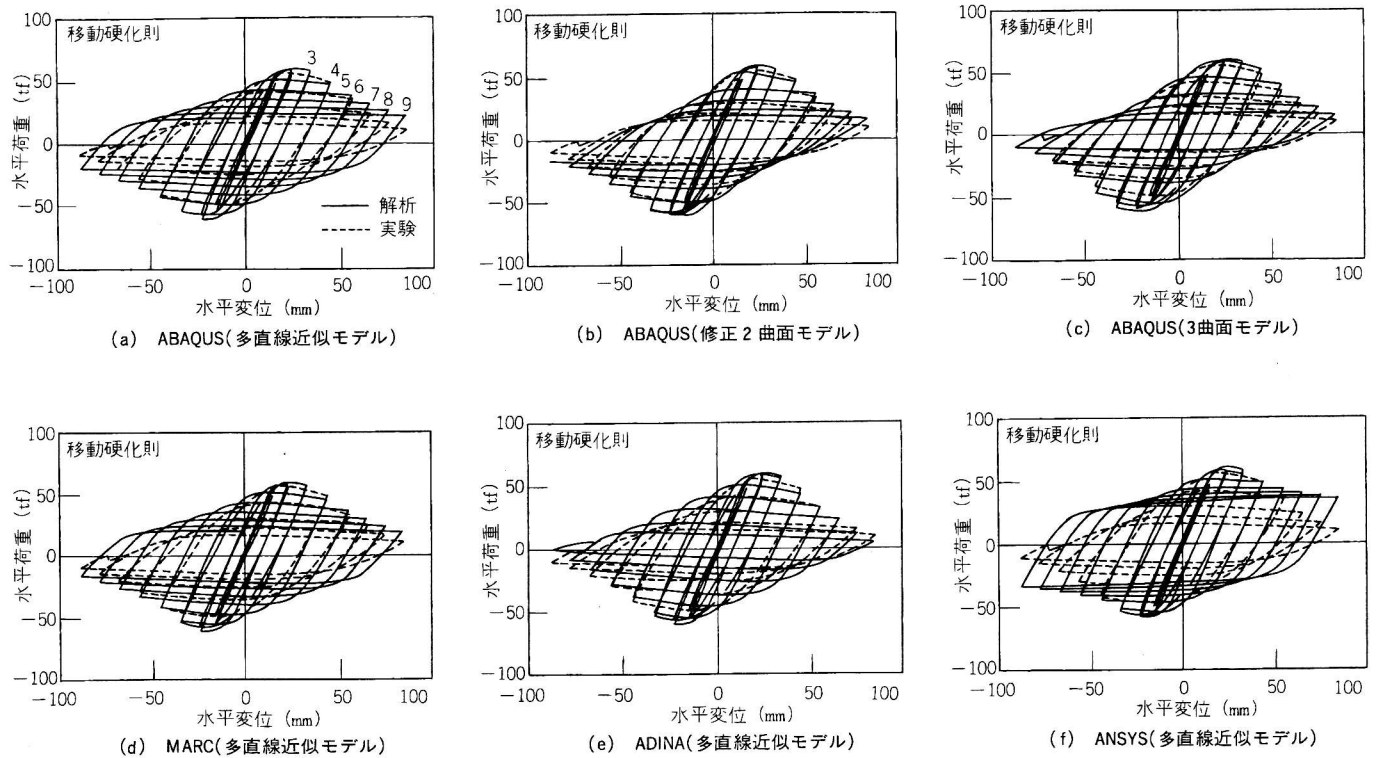


図-8 ヒステリシス曲線 (多直線近似モデル, 修正2曲面モデルおよび3曲面モデル)

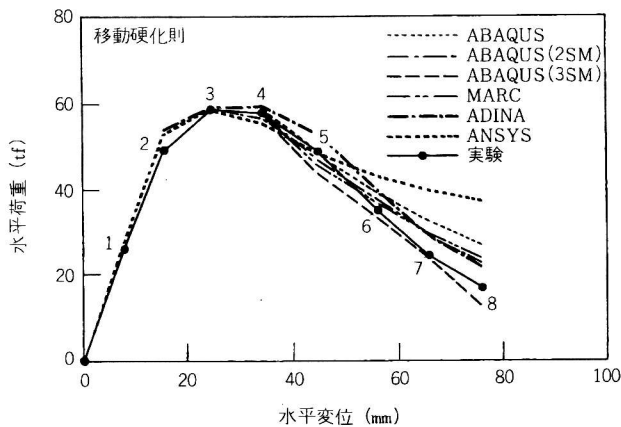


図-9 包絡線

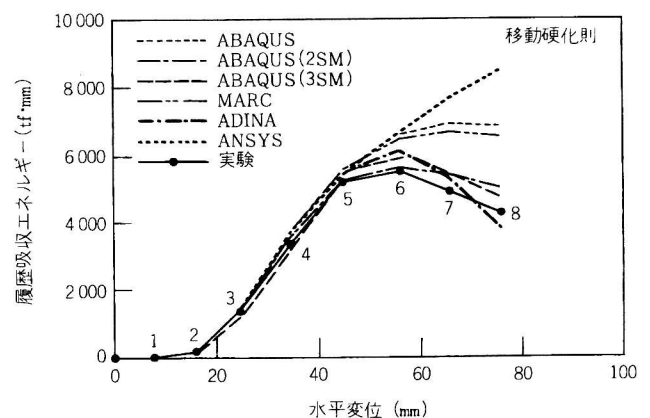


図-10 履歴吸収エネルギー

エネルギーは、図-11に示したようにヒステリシス曲線の各ループで囲まれた面積で表される。

修正2曲面モデルをABAQUSに組み込み、解析した結果を図-8(b)に示す。この図から最大耐荷力については実験値とよく一致しているのがわかる。劣化域についても、耐荷力は実験値と一致している。7 δ_y からは多少高くなっているが、これはこのモデルが大ききなひずみの場合を前提に作られていないためである。ヒステリシス曲線の形についても、実験と一致しており、履歴吸収エネルギーも図-10からわかるように6 δ_y までは実験値とよく一致している。

3曲面モデルをABAQUSに組み込み、解析した結果を図-8(c)に示す。この図から最大耐荷力が実験値とよく一致しているのがわかる。全劣化域についても実験値と概ね一致している。これは、このモデルが鋼製橋脚の実験結果を基にして作られているからである。ヒステリシス曲線の形および履歴吸収エネルギーについても、全変位領域において実験と概ね一致している。

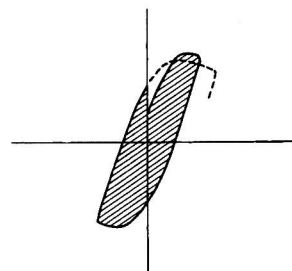


図-11
1ループの履歴
吸収エネルギー

② MARC

応力-ひずみ関係を多直線近似したときのMARCの解析結果を図-8(d)に示す。この図からわかるように、最大耐荷力については実験値とよく一致している。劣化域についても6 δ_y まではよく一致しており、これ以降は多少高くなる傾向を示している。ヒステリシス曲線の形については、実験と異なり、ABAQUSの多直線近似の場合と同様に角張った紡錘形になっている。その結果、図-10に示すように履歴吸収エネルギーが実験値と比較して高くなっている。

③ ADINA

応力-ひずみ関係を多直線近似したときの ADINA の解析結果を図-8(e)に示す。この図からわかるように最大耐力力については実験値とよく一致している。劣化域についても、7 μ まではよく一致しており、これ以降は、多少低くなる傾向を示している。本解析ソフトウェアだけが、このように実験値よりも低くなる傾向を示している。単調载荷のときも同様の傾向を示し、使用した要素の定式化などが他のソフトと異なるものと思われる。ヒステリシス曲線の形については、実験と異なり、ABAQUS の多直線近似の場合と同様に角張った紡錘形になっている。しかし、劣化傾向が強いため、結果的には、図-10のように履歴吸収エネルギーは他の解析ソフトウェアにおける多直線近似の場合に比べ実験値に近くなっている。

④ ANSYS

応力-ひずみ関係を多直線近似したとき ANSYS の解析結果を図-8(f)に示す。この図からわかるように最大耐力力については実験値とよく一致している。劣化域についても、5 μ まではよく一致しており、これ以降は高くなる傾向を示している。ヒステリシス曲線の形については、実験と異なり、ABAQUS の多直線近似の場合と同様に角張った紡錘形になっている。しかし、劣化傾向が弱いため、図-10のように履歴吸収エネルギーは、他のソフトと異なり増加し続けて減少しない。これは、多直線近似の移動硬化則が他のソフトと異なるためと思われる。

2) 2 直線近似

応力-ひずみ関係を2直線近似したときの ABAQUS の解析結果を図-12に示す。この図からわかるように最大耐力力については実験値と概ね一致している。劣化域については、耐力力は高くなっている。これは、応力-ひずみ関係を2直線近似で定義しているため、大ひずみになると応力が実際より大きくなってしまっているからである。

他の解析ソフトウェアを含めて、包絡線と履歴吸収エネルギーを図-13, 14に示す。これらの図からわかるように、耐力力は全変位領域において実験より高くなり、履歴吸収エネルギーも実験より高く、劣化が進んでも減少しない傾向を示している。また、多直線近似の場合(図-9, 10参照)では、各解析ソフトウェアで解析結果が異なっているのに対し、2直線近似の場合では、ほぼ同じ傾向になることがわかる。

3) 多直線近似と2直線近似の比較

ABAQUS を例にとり、多直線近似と2直線近似の場合を比較してみると、図-15, 16からわかるように最大耐力力までは耐力力、履歴吸収エネルギーともに概ね一致しているが、劣化が進むにつれて2直線近似した場合の方が高くなる傾向を示している。

3-2-2 等方硬化則

等方硬化則で応力-ひずみ関係を多直線近似したときの ABAQUS の解析結果を図-17に示す。この図からわかるように耐力力は全変位領域において実験値より高くなっている。これは、この構成則の特徴である降伏曲面の拡大が大きく影響したためである。ただし、図-18に示した除荷

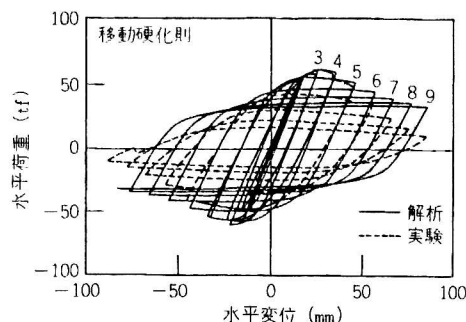


図-12 ヒステリシス曲線 (2直線近似モデル)

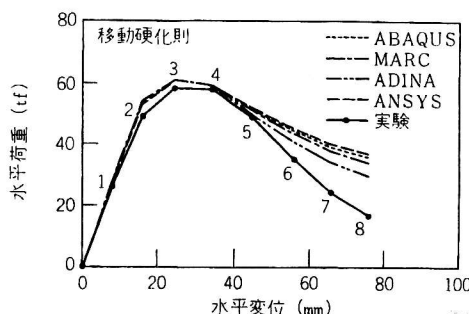


図-13 包絡線 (2直線近似モデル)

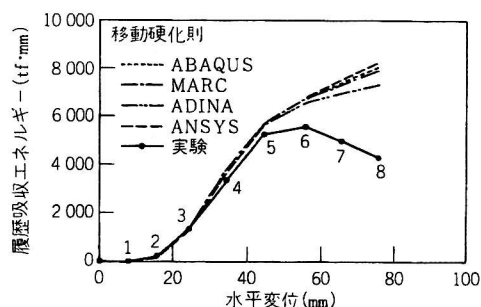


図-14 履歴吸収エネルギー (2直線近似モデル)

時の折返し点を結んだ包絡線においては、最大値は実験値と一致している。ヒステリシス曲線の形については、移動硬化則で示した角張った紡錘形にはならず、実験に近い形になっている。履歴吸収エネルギーについては、図-19に示すように定性的には実験結果を再現しているが、全変位領域において耐力力が実験値より高いため、この分高くなっている。

3-2-3 移動硬化則と等方硬化則の比較

応力-ひずみ関係を多直線近似したときの移動硬化と等方硬化の相違について、ABAQUS の場合を例にとり比較した結果を図-20, 21に示す。除荷時の折返し点を結んだ図-20の包絡線においては、最大の水平荷重が移動硬化則と等方硬化則で概ね一致している。しかし、ヒステリシス曲線(図-8, 17)から求められる最大耐力力については、移動硬化則が等方硬化則より低くなっている。包絡線の劣化域においては、移動硬化の方が、実験に近い傾向を示す。ただし、劣化が進むと移動硬化と等方硬化の差はなくなる。また、図-21の履歴吸収エネルギーにおいては、どちらも実験値より高い値を示すが、劣化の傾向は、等方硬化の方が実験に近くなっている。

3-3 座屈モード

修正2曲面を用いて ABAQUS で解析したときの座屈

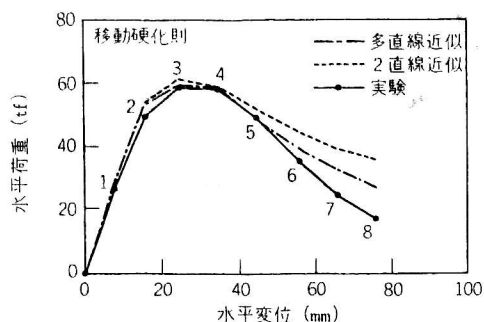


図-15 包絡線の多直線近似と2直線近似の比較

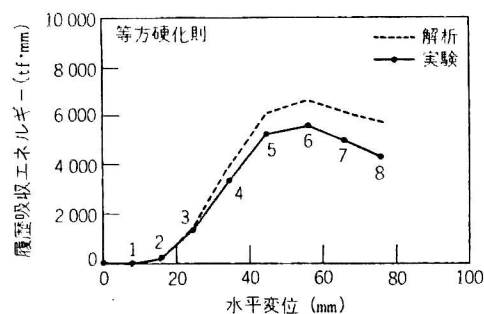


図-19 履歴吸収エネルギー (多直線近似)

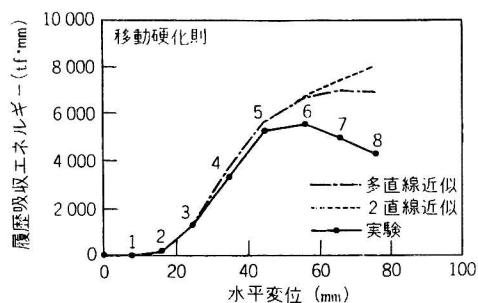


図-16 履歴吸収エネルギーの多直線近似と2直線近似の比較

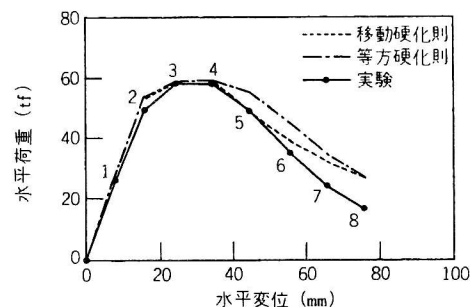


図-20 包絡線の移動硬化則と等方硬化則の比較

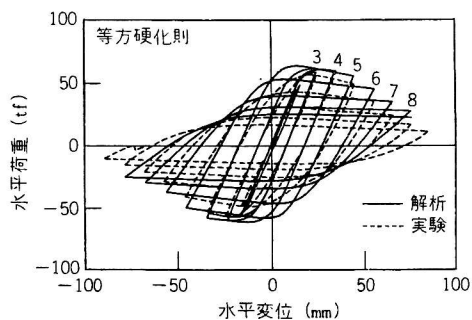


図-17 ヒステリシス曲線 (多直線近似)

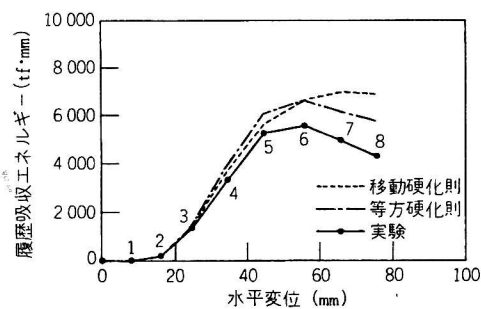


図-21 履歴吸収エネルギーの移動硬化則と等方硬化則の比較

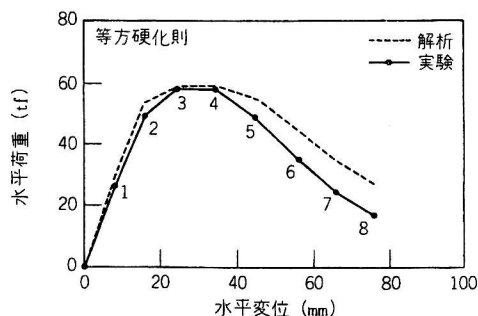


図-18 包絡線 (多直線近似)

モードの例を図-22に示す。この図から橋脚基部に局部座屈 (ちょうちん座屈) が発生しているのがわかる。

各解析ソフトウェアについて、局部座屈の座屈モードの解析結果を実験と対比して図-23に示す。この図は、局部座屈がかなり進行した6 δ_y のときの座屈モードである。ABAQUSは、修正2曲面モデルを用い、他の解析ソフトウェアは、移動硬化則で応力-ひずみ関係を多直線近似した場合の解析結果である。

この図からわかるように、各解析ソフトウェアの結果は、概ね実験と一致している。とくに、包絡線および履歴吸収エネルギーが6 δ_y まで実験と一致している修正2曲面モデルにおいては、最大変形量、座屈モードの形状ともに実

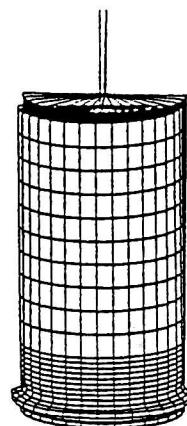


図-22
座屈モード

験とよく一致している。

また、解析ソフトウェアの局部座屈モードが実験と概ね一致していることから、橋脚基部の要素分割は、図-3の解析モデルで示したような分割サイズで十分であったことがわかる。

4. ま と め

汎用非線形構造解析ソフトウェア ABAQUS, MARC, ADINA, ANSYS を用い、構成則として一般的な等方硬化則、移動硬化則、さらに修正2曲面モデル、3曲面モデル

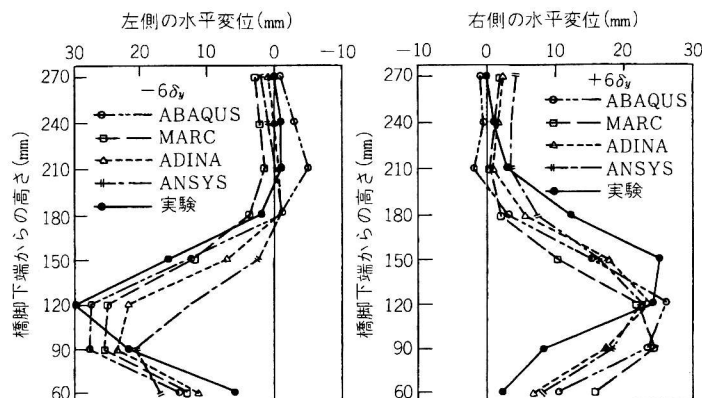


図-23 橋脚基部座屈モードの解析と実験の比較

ルを加えて、円形断面鋼製橋脚の弾塑性有限変位解析を行い、実験との比較検討を行った。その際、包絡線（最大耐力および劣化域の耐力）、ヒステリシス曲線の形、履歴吸収エネルギー、および座屈モードに着目した。

比較検討した結果をまとめると以下のようになる。

- ① いずれのソフトウェアにおいても、応力-ひずみ関係を2直線近似し、構成則として標準的に組み込まれている移動硬化則を用いれば、最大耐力（ $3\delta_y \sim 4\delta_y$ ）付近まで実験結果を再現できる。
- ② さらに、材料試験結果をもとに応力-ひずみ関係を多直線近似すると、最大耐力を過ぎ劣化域に入っている $5\delta_y$ 程度まで、耐力、履歴吸収エネルギーおよび座屈モードが実験値と概ね一致する。
- ③ $6\delta_y$ 以上の劣化域まで実験値と一致させるためには、汎用非線形構造解析ソフトウェアに組み込まれている構成則では不十分であり、より精緻な構成則である修正2曲面モデル、3曲面モデルが必要になってくる。

単調荷重については、実験との比較を行っていないが、繰返し荷重の比較検討結果から、次のような推察も可能であろう。

- ④ 単調荷重の最大耐力は、応力-ひずみ関係を多直線近似すれば、ここで取り上げた解析ソフトウェアで求めることができる。

以上述べたように、汎用非線形構造解析ソフトウェアに精緻な構成則である修正2曲面モデル、3曲面モデル等を組み込むことにより、円形断面鋼製橋脚の準静的繰返し荷重試験を劣化域まで再現することが可能である。しかし、これらの構成則は汎用ソフトのユーザーサブルーチンを利用してプログラミングしなければならないのに加え、材料特性を表現するパラメータを求めるための材料試験を必要とするため、劣化域を含めた円形断面鋼製橋脚の弾塑性挙動を研究するには極めて有用であるが、現段階で実設計に用いるのは難しいと言える。一方、標準的に組み込まれている移動硬化則を用いた場合でも、材料の引張り試験から得られる応力-ひずみ曲線を多直線近似すれば、設計で用いる最大耐力をわずかに超えた付近まで実験結果とほ

ぼ一致させることができる。この方法は、材料の応力-ひずみ関係さえ与えられれば、新たにプログラミングすることなく、容易に荷重-変位関係を得ることができるため、実設計にも適用可能であると考えられる。

あとがき

道路橋示方書 V 耐震設計編（平成8年12月）において、コンクリートを充填しない鋼製橋脚に対しては動的解析を行うのがよいという規定があり、そのために必要な荷重-変位関係は繰返し荷重実験などから求めることになっている。しかし、荷重実験のデータは数に限りがあり、また設計ごとに実験を行うのは非現実的であることから、実験以外の方法で荷重-変位関係を求める必要がある。前述したように、汎用非線形構造解析ソフトウェアは、こうした目的に利用可能である。従来、弾塑性有限変位解析は計算時間がかかるものとされていたが、今回の繰返し荷重の弾塑性解析に要した計算時間は、例えば、解析ソフトウェア MARC で、パソコン（Pentium プロセッサ200MHz）を使用して3時間程度である。この程度の計算時間であれば十分実用的であろう。

今回、取り上げた汎用非線形構造解析ソフトウェアは、ABAQUS, MARC, ADINA, ANSYS である。これ以外の解析ソフトウェアでも鋼製橋脚の弾塑性有限変位解析に対して適用できるものがあると思われる。その適用性を検討するときに、本文の解析条件（解析の入力データを作成するのに必要な条件は記述したつもりである）を参考にしていきたい。

最後に、本研究は、鋼材倶楽部に設けられた鋼製橋脚耐震検討 WG（主査：大田孝二）で実施したものである。この WG では、名古屋大学宇佐美勉教授、名古屋工業大学後藤芳顕教授にご指導ならびに ABAQUS（修正2曲面モデル、3曲面モデル）の解析を行っていただいた。誌面を借りてお礼申し上げます。

〔参考文献〕

- 1) 鈴木, 宇佐美: 軸圧縮力と横力を受ける箱形断面鋼片持柱の強度と変形能に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.41A, pp. 265~276 (1995)
- 2) 中川, 安波, 小林, 橋本, 水谷, 森脇: 弾塑性有限変位解析による箱形鋼製橋脚の耐力と変形能の評価, 第1回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.599~604 (1996, 1)
- 3) 安波, 寺田, 名取, 寺尾, 西川: 弾塑性 FEM による鋼管柱荷重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)
- 4) Shen, C., Usami, T. and Mizuno, E.: Development of a Cyclic Two-Surface Model for Structural Steels with Yield Plateau, NUCE Research Report, No. 9302, Department of Civil Engineering, Nagoya University, 1993.
- 5) 王, 後藤: 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 (1997, 1)
- 6) 西川, 山本, 名取, 寺尾, 安波, 寺田: 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)