

第2章 鋼材の材料構成則

鋼材の材料構成則としては、応力-ひずみ関係を2直線近似（バイリニアモデル）して、硬化則に移動硬化則を採用した基本的な（古典的な）構成則が実務でもよく用いられる。本報告書の解析例においても、この材料モデルを基本にしている。しかし、この材料モデルは、非常に簡単であるが、最大荷重以降で荷重を高く評価する傾向があり、繰り返し塑性履歴が考慮できていないなどの欠点がある。それらを解決した高精度な材料モデルとして、修正二曲面モデル¹⁾、BMCモデル²⁾、三曲面モデル³⁾がある。しかし、これら材料モデルは、局部座屈が発生しひずみが大い領域まで考慮する必要がある鋼製橋脚を対象にしたモデルであり、鋼アーチ橋、鋼トラス橋の対傾構等の鋼部材を対象としていない。そこで、本委員会活動期間中に、比較的簡略化した鋼アーチ橋、鋼トラス橋の鋼部材向けの材料モデルである多軸マルチリニアモデル^{4),5)}を開発した。多軸マルチリニアモデルは、前述した鋼製橋脚を対象にした高精度な材料モデルと比較して大ひずみ領域までは対象にしていないが、繰り返し塑性履歴を考慮した解の収束性がよい実務的な多直線近似の材料モデルとなっている。また、この多軸マルチリニアモデルの塑性理論、パラメータ設定等を理解すれば、共通点の多い他の高精度な材料モデルの理解を深めるのにも役立つはずである。本章では、基本的な材料構成則および高精度な材料構成則の概要を述べた後に、多軸マルチリニアモデルについて詳細に述べている。

2.1 応力-ひずみ関係

代表的な鋼材 SS400 の引張試験結果を図 2.1.1 に示す。解析では、この荷重-変位曲線を、図 2.1.2 のように近似して用いる。実務等で最も利用されるのは、ひずみ硬化を考慮した同図(a)のバイリニアモデルである。第5章で後述する一方向載荷解析（Pushover 解析）では、繰り返しの影響を考慮する必要がないので、図 2.1.1 で示したような実験の応力-ひずみ関係を、図 2.1.2(c)、(d)のように降伏棚も含めて正確に近似した方が解析の計算精度は向上する。

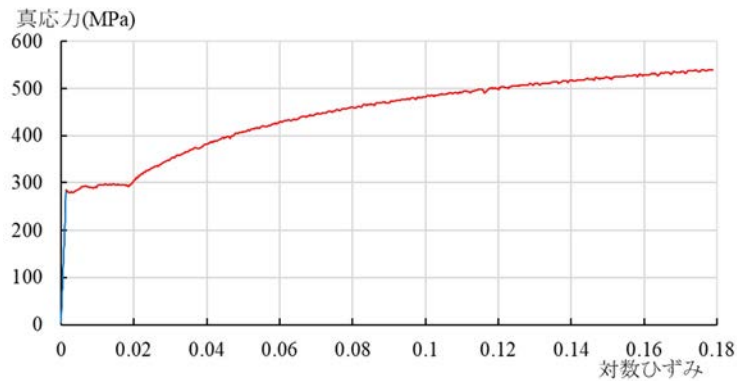


図 2.1.1 鋼材 SS400 の引張試験結果

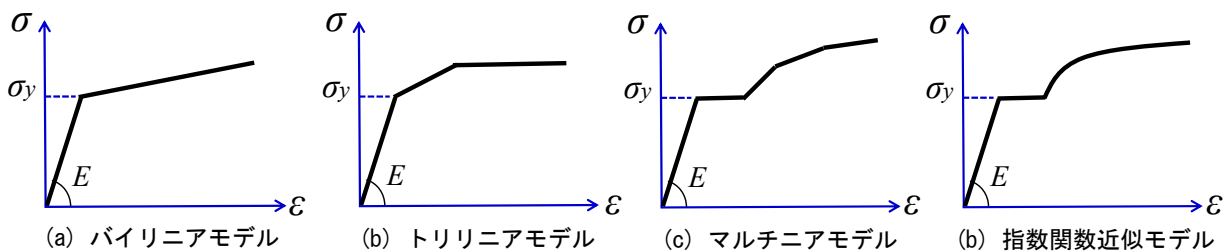


図 2.1.2 応力-ひずみ関係の近似

2.2 基本的な（古典的な）材料構成則

昔からある基本的な硬化則として、図 2.2.1 に示すように移動硬化則と等方硬化則がある。この2つの硬化則を組み合わせた複合硬化則もある。前述した応力-ひずみ関係と組み合わせると、材料モデルが決定される。実務でもっと使用されているのは、バイリニアモデル+移動硬化則である。ただし、このバイリニアモデル+移動硬化則は、ひずみが大きくなると応力が同じ増加率で上昇しつづけて、応力（荷重）を高く評価することになる。例えば、ブレース材に対してバイリニアモデル+移動硬化則を使用すると、最大荷重以降、実験と比較して応力（荷重）が高くなる傾向を示す。

その応力上昇を抑える目的で、トリリニアモデルやマルチリニアモデルと移動硬化則の組合せが考えられる。しかし、この組み合わせは推奨できない。例として、移動硬化則でバイリニアモデルとト

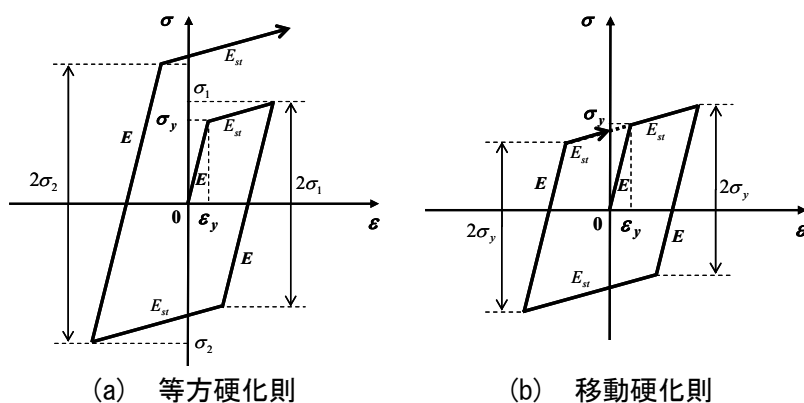


図 2.2.1 応力-ひずみ関係の近似

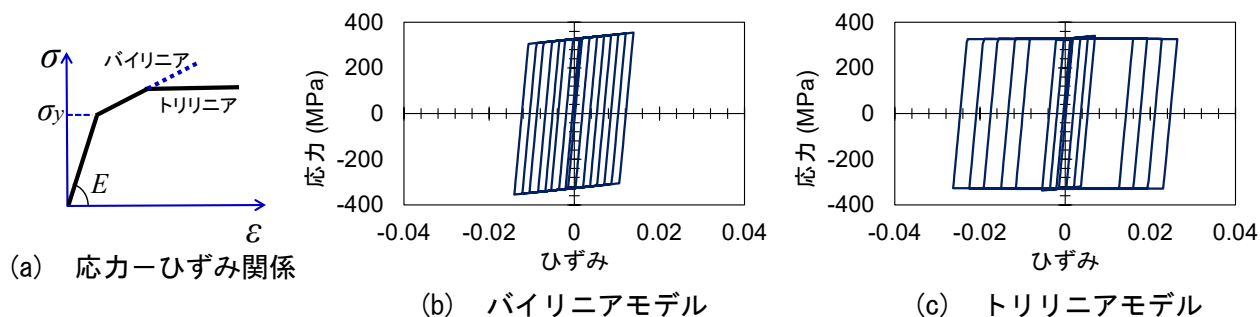


図 2.2.2 移動硬化則のバイリニアモデルとトリリニアモデルの比較

リリニアモデルに対して同じ繰り返し荷重を作用させた場合の解析結果を図 2.2.2 に示す。それぞれの応力-ひずみ関係は同図 (a) のように定義している。同図 (b) がバイリニアモデル、同図 (c) がトリリニアモデルの解析結果である。この結果からトリリニアモデルが途中から応力が増加せず、一定になっているのがわかる。その理由を図 2.2.3 に示している。同図 (a) は、定義した応力-ひずみ関係であり、一方向荷重解析 (Pushover 解析) では、定義した通りの応力-ひずみ関係

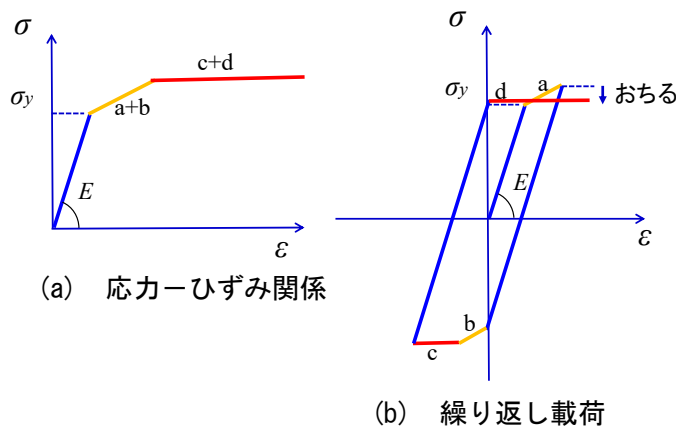


図 2.2.3 移動硬化則+トリリニアモデル

を描く。しかし、繰り返し解析になると、同図(b)のようになる。例えば、2次勾配(黄色線)の载荷中に逆载荷が起り、再度降伏すると黄色線の長さは**b**となって、3次勾配(赤色線)に移る。このように処理が進むと、同図(b)に示すように応力が赤色線になると、結果的に応力がおちる現象が起きる。すなわち、ひずみは累積で評価することに注意されたい。なお、等方硬化則については繰り返しにより応力が過大になり、設計上、好ましくないとの理由から、実務ではほとんど使用されていない。

2.3 繰り返し载荷試験

鋼材SS400の繰り返し载荷試験の結果を図2.3.1に示している。図内の色は、後述する3つの領域(等方的に拡大する塑性領域①:赤色, 繰り返しにより縮小する弾性域②(=オフセット法で同定した弾性域):青色, 領域①と領域②を接続する遷移領域③)で区別している。前述した引張試験結果(図2.1.1)も同様に領域①②を色付けしている。なお、図2.3.1内の赤色の領域①が、圧縮側(対数ひずみが負)で明確に現れて、引張側で部分的にしか現れていない。これは、本繰り返し载荷試験において、正確に両振幅の試験になっていないためであり、僅かなずれでもこのように片寄ってしまう。この試験結果から、前述した基本的な硬化則と比べると、傾向的には移動硬化則よりは等方硬化則に近いことがわかる。ただし、等方硬化則は塑性域が縮小しないため、どうしても応力を高く評価してしまう。

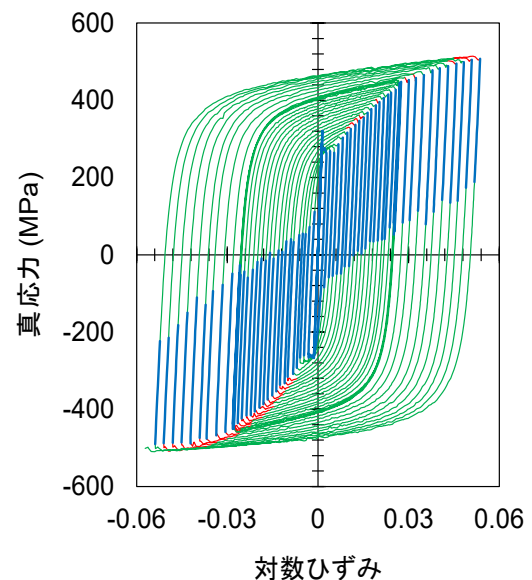


図 2.3.1 SS400 繰り返し载荷試験結果

実務でよく使用されているバイリニアモデル+移動硬化則は、この領域①~③が表現できないため、繰り返し塑性履歴が考慮されていないことになる。

2.4 高精度な材料構成則の概要

材料構成則として重要な項目は、降伏関数、流れ則、硬化則の3つである。鋼材の場合は、一般的に降伏関数として von Mises 降伏関数、流れ則として J2 流れ則が使われるので、材料構成則の特徴付けるものは残りの硬化則である。

高精度な材料構成則を分類すると、大きくは(A)と(B)の2つに分けられる。

- (A) 降伏曲面の移動範囲を表す境界曲面を用いたモデル
 - ・二曲面モデルをベースにしたモデル
修正二曲面モデル, 三曲面モデル
 - ・単調载荷曲線をベースにしたモデル
BMC モデル
- (B) 背応力の非線形性を考慮した非線形移動硬化則モデル
 - ・Armstrong-Frederick(A-F)モデル
 - ・Chaboche-Rousselier(C-R)モデル

(B)については、文献6)でまとめられているので参照されたい。ここでは、鋼製橋脚ですでに多くの実績がある(A)について、簡単に説明する。どのモデルでも前述した領域①~③は当然、考慮されている。

中の点3での多軸応力空間での状態を示す。多軸マルチリニアモデルは弾性域と、塑性域での2つの領域（遷移領域、等方拡大的な塑性領域）の計3つの領域（2.3で示した領域①～③）を持ち、降伏曲面、記憶曲面がそれぞれの境界となる。なお、本モデルの多軸応力状態への拡張については、文献4)に詳述している。

(2) 記憶曲面と等方拡大的な塑性領域

記憶曲面は半径を履歴最大の相当応力として等方的に拡大するものとし、中心は原点のまま移動しない。すなわち、初期の記憶曲面は降伏曲面と一致し、降伏後は移動する降伏曲面を常に包含するように拡大する。これにより、繰り返し塑性により鋼材の応力が等方的に上昇することを表現する。記憶曲面の外側である等方拡大的な塑性領域での硬化係数は、図2.5.1の繰り返し履歴から等方拡大的な塑性領域のみを取り出して、図2.5.2の相当応力 $\bar{\sigma}$ －塑性ひずみ（有効相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_p^{ef}$ ）関係としたものが単調引張载荷曲線の真応力－塑性ひずみ関係と一致するように、硬化係数を決定する。ここで、有効相当塑性ひずみとは、等方拡大的な塑性領域のみでの塑性ひずみ増分の和として定義する。なお、数値解析では単調载荷での真応力－塑性ひずみ関係を多直線近似して与えている。

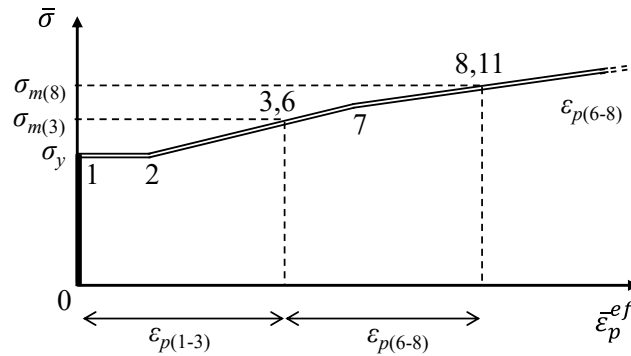


図 2.5.2 等方拡大的な塑性領域での相当応力－有効相当塑性ひずみ関係

(3) 降伏曲面と弾性域

降伏曲面半径を以下の式(2.5.1)のように、有効相当塑性ひずみの関数として表現することにより、弾性域の縮小を表現する。

$$\kappa = \kappa_{\infty} + (\kappa_0 - \kappa_{\infty}) \exp\left(-\frac{\bar{\varepsilon}_p^{ef}}{a\varepsilon_y}\right) \quad (2.5.1)$$

ここで、

κ_0 : 初期の弾性域の大きさ（初期降伏応力の2倍）

κ_{∞} : 弾性域の大きさ収束値

a : 弾性域の減少度合いを表す係数

ε_y : 初期降伏ひずみ

(4) 遷移領域

遷移領域は降伏曲面と記憶曲面の間の領域であり、除荷時や再载荷時において、弾性域を超えた後、履歴最大応力に到達するまでの領域である。図2.5.1(a)に示すこの領域での塑性ひずみ $\Delta\varepsilon_p^t$ は有効相

当塑性ひずみに比例すると仮定する.

$$\Delta \varepsilon_p^t = b \bar{\varepsilon}_p^{ef} \quad (2.5.2)$$

また、鋼材の実挙動としては徐々に剛性が連続的に低下するが、モデルを簡易化するため図 2.5.1(a) のように 2 直線による折れ線として表現し、中間点の位置は、係数 c により与える. これを多軸空間で表すと中間点は中間曲面として表現され、中間曲面内外での硬化係数 H_1^t 、 H_2^t はそれぞれ、以下の式で表される.

$$H_1^t = \frac{c}{1-c} \frac{\Delta \sigma^t}{\Delta \varepsilon_p^t} \quad (2.5.2a)$$

$$H_2^t = \frac{1-c}{c} \frac{\Delta \sigma^t}{\Delta \varepsilon_p^t} \quad (2.5.2b)$$

ここで、係数 c は文献 4) では一定としていたが、载荷の進行に伴い値が上昇する傾向が見られたため、 c_0 、 c_1 をパラメータに持つ 1 へ漸近する指数関数として表すよう修正を行った.

$$c = 1 - (1 - c_0) \exp\left(-\frac{\bar{\varepsilon}_p^{ef}}{c_1 \varepsilon_y}\right) \quad (2.5.3)$$

なお、中間曲面は等方拡大的な塑性領域からの除荷時の毎に設定され、再度記憶曲面へ到達するまでは半径は一定である. 降伏曲面が中間曲面の内側にあるときは移動せず、降伏曲面が中間曲面に接したのちは常に降伏曲面を包含するように記憶曲面内を移動する.

2.6 多軸マルチリニアモデルの材料パラメータの同定

(1) 概要

実験の再現解析や実構造物の地震応答解析には、本来、その構造物から切り出した鋼材（材料試験片）の材料試験により構成則のパラメータを定めるべきであるが、実務の耐震設計等において、単調引張試験はともかく、繰り返し材料試験を毎回実施するのは現実的ではない. また、板厚の薄い鋼材では圧縮時に早期に座屈が生じて実験そのものが困難である. そこで、本委員会活動中に、実務設計での使用を考慮して、鋼材の種類を選定すれば構成則のパラメータが設定できるように、既往の一軸の片振り・両振り繰り返し材料試験⁷⁾の結果を整理して繰り返しパラメータの同定を行うことを進めてきた（活動終了後も継続）.

(2) 材料試験片

材料試験に用いた試験片は、2.8 で後述する支柱模型実験での鋼種 SM400 と溶接性以外の機械的性質が同等な鋼板（SS400、板厚 35mm）から切削加工して製作した. 形状は図 2.6.1 に示す円形断面のダンベル型試験片とし、一軸繰り返し試験での圧縮時の座屈を抑制するため、中央の平行部を JIS4 号試験片よりも太く短いものとしている.

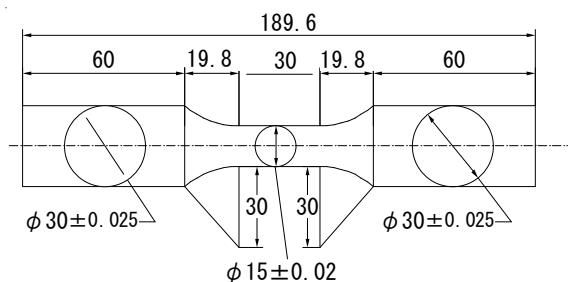


図 2.6.1 一軸繰り返し材料試験片

(3) 載荷方法

繰り返し載荷試験としては、引張と圧縮ひずみを等しく漸増させる両振り漸増載荷試験と、小振幅の繰り返しを伴いながら引張側へと載荷を行う試験の2種類を実施した。両振り漸増載荷試験では、降伏ひずみ ε_y を基準振幅として、その整数倍に振幅を漸増させる。小振幅の繰り返しを伴う引張試験では、図2.6.2に示すように、圧縮時のひずみ振幅は $2\varepsilon_y$ と固定し、引張時のひずみ振幅を $2.2\varepsilon_y \sim 5\varepsilon_y$ として圧縮時のひずみ振幅よりも大きくし、全体として引張側に推移していく載荷としている。なお、降伏ひずみ ε_y およびパラメータ同定に必要なヤング率、降伏応力等は、同ロットの鋼板から製作したJIS4号試験片による引張試験より同定している。

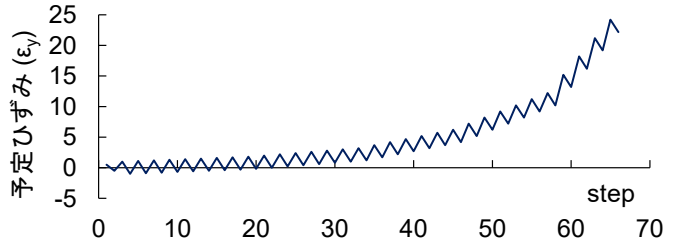
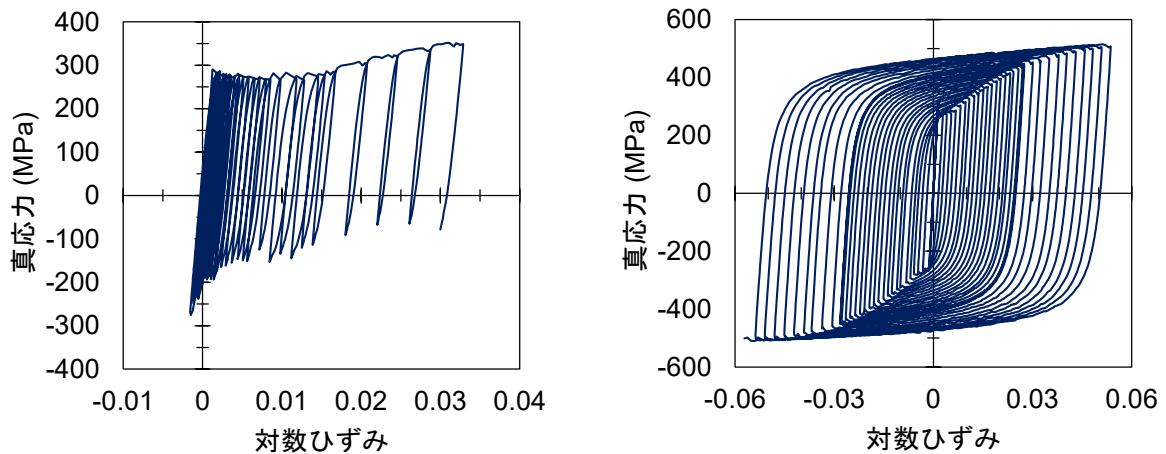


図 2.6.2 小振幅の繰り返しを伴う引張試験で与えるひずみ履歴

(4) 実験結果および繰り返し材料パラメータの同定

図2.6.3に各繰り返し載荷試験により得られた真応力-対数ひずみ関係を示す。図2.6.3(a)の小振幅の繰り返しを伴う引張試験結果において、オフセット法により弾性域を同定し、無次元化した弾性域の大きさ κ/κ_0 と有効相当ひずみの関係を図2.6.4(a)のように求め、 κ/κ_0 と a を同定した。

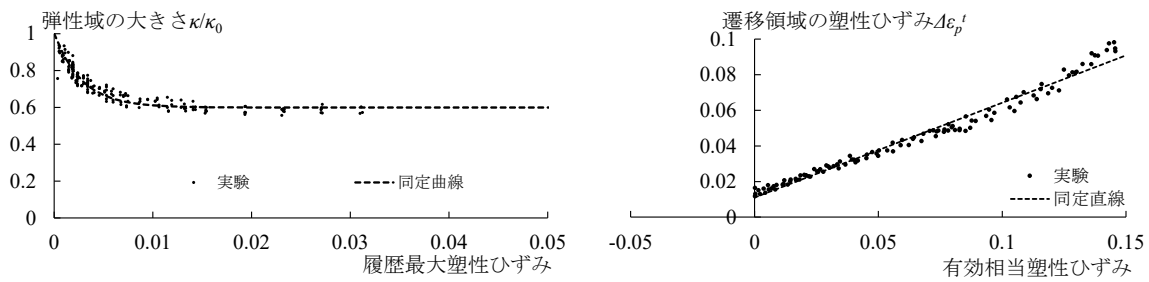
また、図2.6.3(b)の両振り漸増載荷試験から、遷移領域の塑性ひずみ-有効相当塑性ひずみ関係(図2.6.4(b))および中間曲面位置を表す係数 c -有効相当塑性ひずみ関係(図2.6.4(c))を整理し、材料パラメータ b , c_0 , c_1 を同定した。これらのパラメータはいずれも無次元量であり、同定値を表2.6.1に整理して示す。この表は、鋼材SS400の同定値であり、他の鋼材についても材料パラメータの同定が進んでいる。



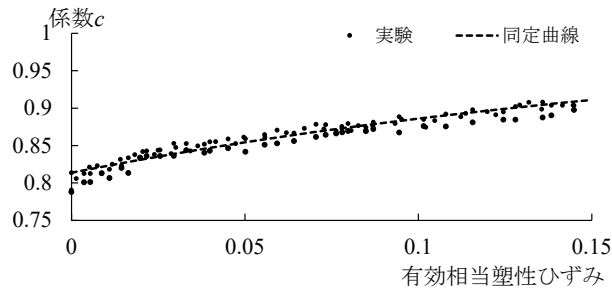
(a) 小振幅の繰り返しを伴う引張試験

(b) 両振り漸増載荷試験

図 2.6.3 繰り返し材料試験で得られた真応力-対数ひずみ関係



(a) κ/κ_0 —有効相当ひずみ関係 (b) 遷移領域の塑性ひずみ—有効相当ひずみ関係



(c) 係数 c —有効相当ひずみ関係

図 2.6.4 繰り返し材料パラメータの同定

表 2.6.1 同定された材料パラメータ

弾性域	弾性域の大きさの収束値 κ/κ_0	0.600	
	縮小の係数 a	2.15	
遷移領域	ひずみの大きさに関する係数 b	0.535	
	中間点位置に関する係数	c_0	0.814
		c_1	148

2.7 アーチ橋支柱の地震時挙動

(1) 対象橋梁とモデル化

前節で多軸マルチリニアモデルの材料パラメータの同定が終わったので、鋼アーチ橋の部材に対して多軸マルチリニアモデルの適用を試みる。その前に、対象とする高アーチ橋のアーチ支柱の地震時挙動を確認することにした。

検討対象のアーチ橋は、図 2.7.1 に示すような上路式鋼アーチ橋であり、後述する 5.3 等で示している橋梁である。着目する支柱は、図内に赤線で示している箱形断面の鋼部材である。モデル化については、学会示方書を参考にして、はり要素（ファイバー要素）による 3 次元骨組モデル（図 2.7.1）とし、塑性化する鋼部材を細かく要素分割した。なお、鋼材の材料構成則については、ここではバイリニアモデルの移動硬化則とした。

使用材料		
アーチリブ	: SMA490	($\sigma_y = 355MPa$)
下横構	: SS400	($\sigma_y = 235MPa$)
端柱	: SMA490	($\sigma_y = 355MPa$)
対傾構	: SS400	($\sigma_y = 235MPa$)
補剛桁	: SMA490	($\sigma_y = 355MPa$)
支柱(C2)	: SS400	($\sigma_y = 235MPa$)

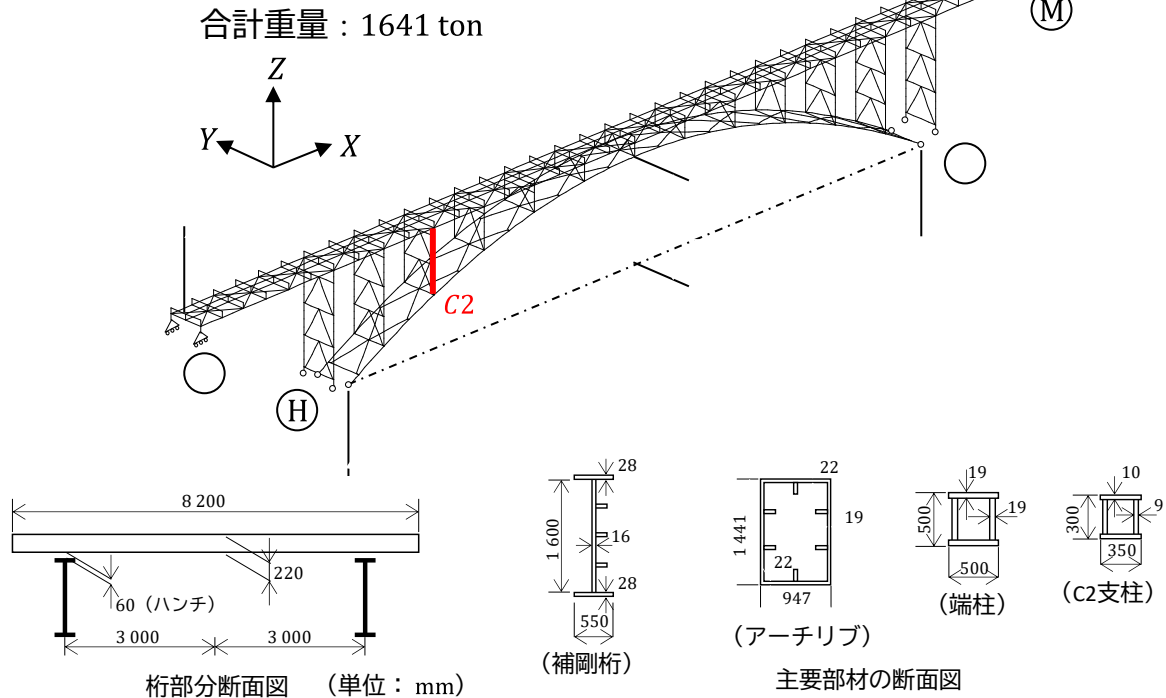


図 2.7.1 対象橋梁と 3次元骨組モデル (単位: mm)

(2) 解析条件

作用させる地震動として、兵庫県南部地震の観測波形 JMA を用いて、NS 成分の波形を橋軸方向 (X 軸方向)、EW 成分の波形を橋軸直角方向 (Y 軸方向) に作用させる同時 2 方向加震とした。着目する支柱を明確に塑性化させるため、観測波形を 1.5 倍にして加震した。その他の解析条件の解析手法 (動的弾塑性有限変位解析) や減衰等についても、学会示方書の通りとした。

(3) 解析結果

同時 2 方向载荷の地震応答解析結果を図 2.7.2 に示す。この図は、変形状態をわかり易くするため変形表示倍率を 10 倍して、応答ひずみを降伏ひずみで正規化した色 (降伏は赤色) で示している。着目している支柱は、上下端で塑性化しているのが確認でき、支柱上部付近で最大圧縮ひずみが $3.47\varepsilon_y$ 、最大引張ひずみが $2.73\varepsilon_y$ となった。この支柱の上端と上端から 2.5m 位置の相対変位の時刻歴グラフを図 2.7.3 に示す。同図 (a) の橋軸方向 (X 軸方向) に最大 22mm、同図 (b) の橋軸直角方向 (Y 軸方向) に最大 20mm 変位していることがわかる。また、それらの 2 方向の応答変位をグラフにすると、図 2.7.4 のようになり、支柱が 2 方向に変位していることも確認できる。最後に支柱の軸力の応答履歴を示すと、図 2.7.5 のようになる。この図から、軸力が大きく変動し (引張力も生じ)、最大圧縮軸力が降伏軸力 N_y の 0.4 倍にも達していることがわかる。以上ら、直目している支柱は、大きく変動する高軸力作用下で、同時水平 2 方向に変位することによって塑性化したことになる。すなわち、支柱が多軸応力状態にて塑性化したといえる。

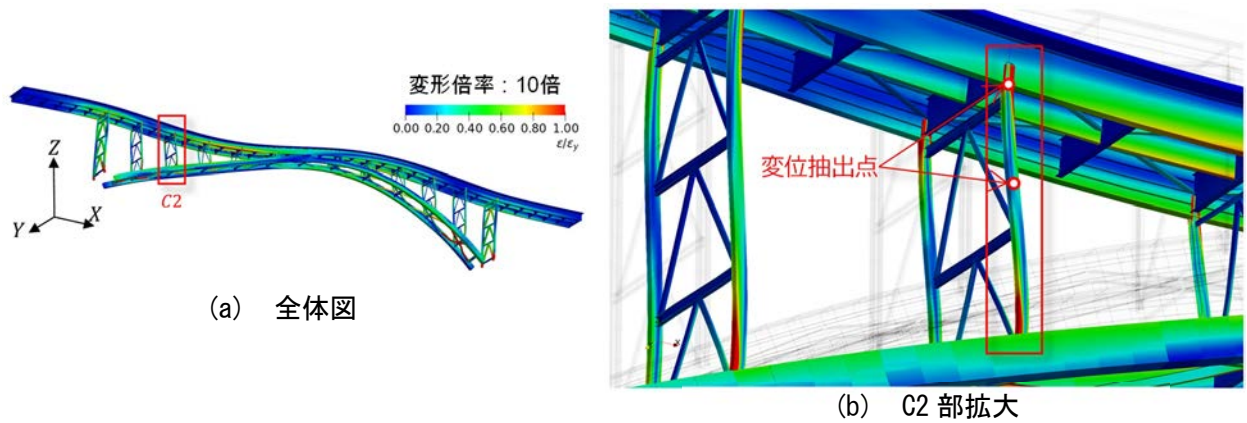


図 2.7.2 ひずみコンター変形図（変形表示倍率：10倍）

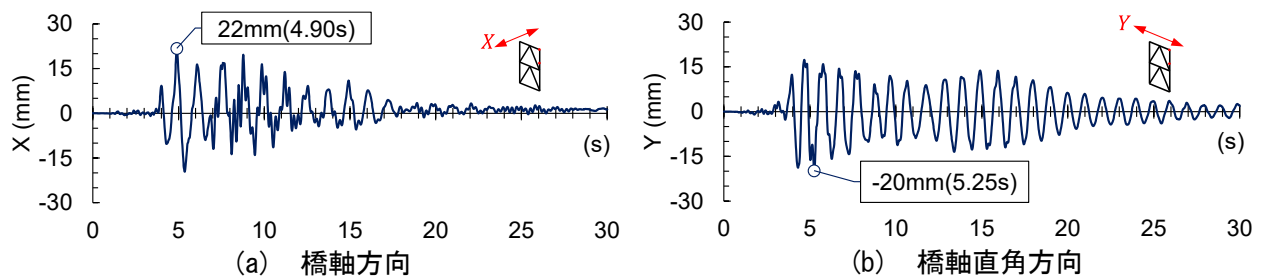


図 2.7.3 応答変位の時刻歴

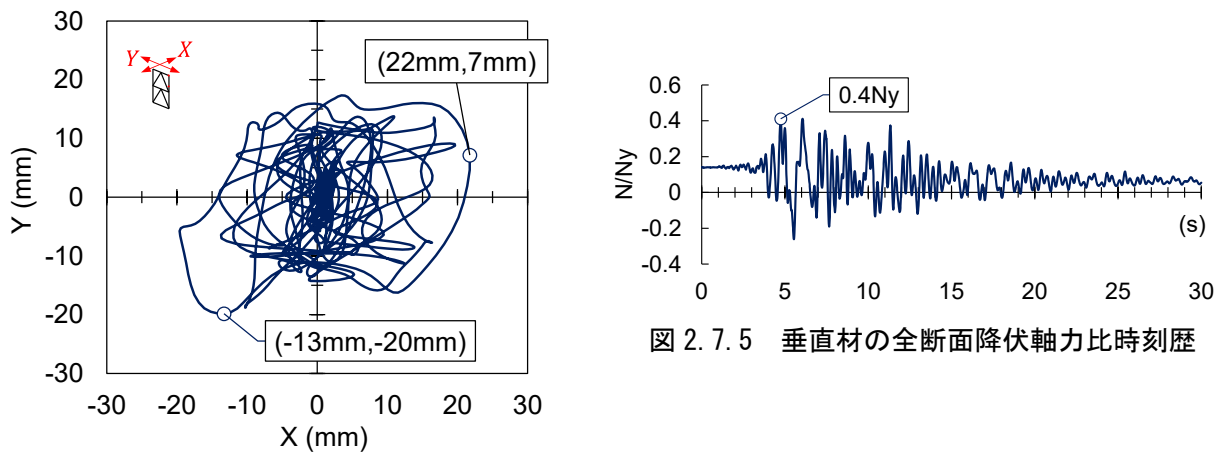


図 2.7.4 2方向応答変位

2.8 地震時の荷重履歴に基づく支柱の3次元載荷実験

(1) 供試体および載荷方法

実験供試体は、図 2.8.1 に示すように前述した図 2.7.2(b) の実構造 C2 の 1/2 スケールとし、セットアップ状況を図 2.8.2 に示す。載荷装置の境界条件としては、図中供試体の左端が固定端であり、図 2.7.2 でのアーチ橋支柱の上端に対応する。また、供試体の図中右側に荷重載荷点があり、供試体と荷重載荷点の間は十分剛な治具により連結されている。ヒンジ構造である載荷点はモーメント 0 点であり、近似的に 2.7 での実大アーチ橋解析での支柱の変曲点に相当し、図 2.7.2 での上端から 2.5m の点近傍に対応するものである。

載荷方法としては、3.7(3)のアーチ橋全体の地震時応答解析から得られた支柱の変位・荷重履歴をそのまま静的に与えた。すなわち、実際の支柱の多軸応力状態をそのまま再現することになる。具体的には、鉛直荷重は図2.7.5での値を縮尺比に従い1/4、水平2方向変位は図2.7.3での値を1/2として3軸制御を行った。なお、載荷時間の短縮のため、比較的応答の大きい2.7s~12.0sでの応答を約2mm/minの静的載荷となるようステップを調整した。また、供試体は取り付け部等が多少変形するため、載荷点に与えた変位と比べて支柱部に実質的に作用する変位が減少してしまうことから、事前の弾性載荷における供試体剛性と2.9で後述する解析モデルによる弾性剛性を比較して、載荷点の制御変位を1.4倍として与えることとした。

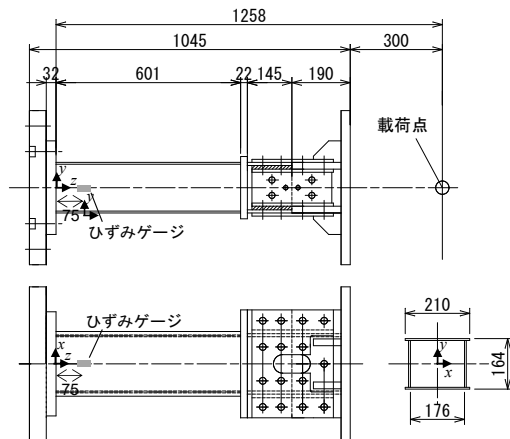


図 2.8.1 支柱実験供試体



図 2.8.2 支柱試験セットアップ状況

(2) 実験結果

実験で得られた水平荷重—水平変位を図2.8.3に示す。この図の実験結果から、橋軸方向(X軸方向)、橋軸直角方向(Y軸方向)ともに履歴挙動を描き塑性化していることが確認できる。ただし、明確な荷重低下には至らなかった。また、固定端から75mmの位置に貼付したひずみゲージでは、最大圧縮ひずみが、橋軸方向の+X方向面で $4.8\varepsilon_y$ 、-X方向面で $14.1\varepsilon_y$ 、橋軸直角方向の+Y方向面で $1.5\varepsilon_y$ 、-Y方向面で $3.7\varepsilon_y$ を計測しており、両面とも塑性化が生じているのを確認した。前述した地震応答解析結果も塑性化し、ひずみ値(はり要素であるため平均化された値)は、これらの値より低めになっている。実験終了後に、塑性化した供試体の表面を観察、計測を行ったが、局所的な凹凸は明確には観察できなかった。

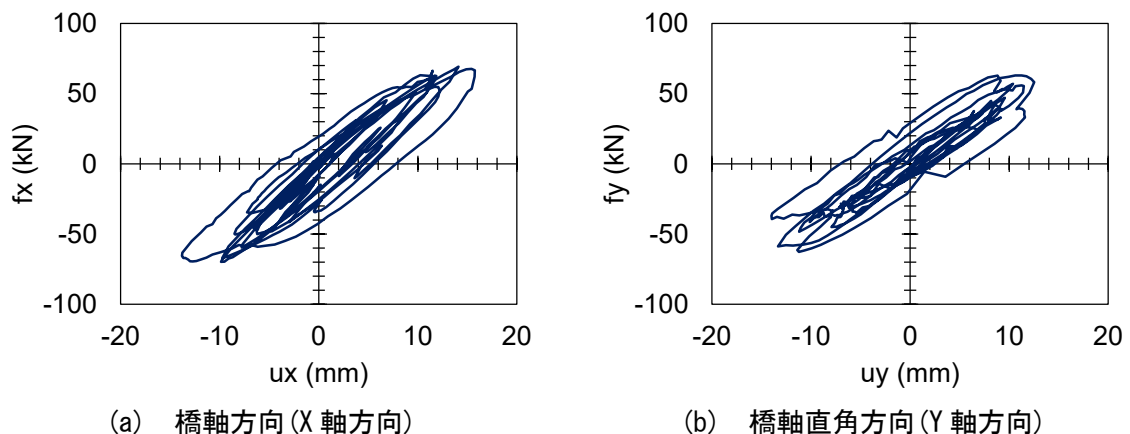


図 2.8.3 支柱実験の荷重—変位関係

2.9 多軸マルチリニアモデルによる支柱実験の再現解析

(1) 解析モデルおよび荷重条件

再現解析の解析モデルを図 2.9.1 に示す。供試体に対応する部分をシェル要素で、荷重治具等の部分を剛体はり要素でモデル化した。供試体のシェルモデルの材料構成則は、前述した多軸マルチリニアモデルとし、単調引張挙動については支柱供試体素材の引張試験結果を多直線近似した図 2.9.2 を用い、繰返しに関する材料パラメータは 2.6 にて同定した表 2.6.1 の値を使用した。要素分割については、局部座屈が表現できる程度に要素分割した。本解析モデルの境界条件として、解析モデルの下端を拘束し、上端には実験と同様に鉛直方向に荷重履歴、水平方向に同時 2 方向で強制変位履歴を与えた。

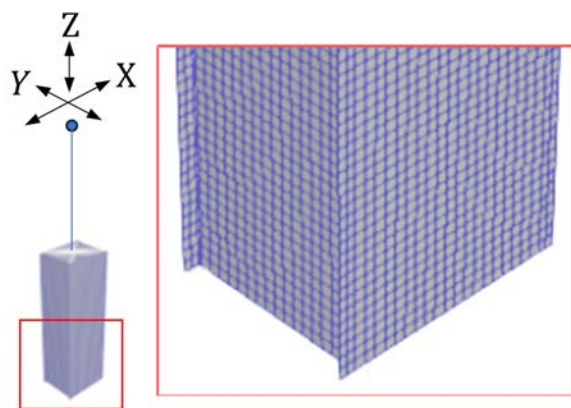


図 2.9.1 供試体の解析モデル

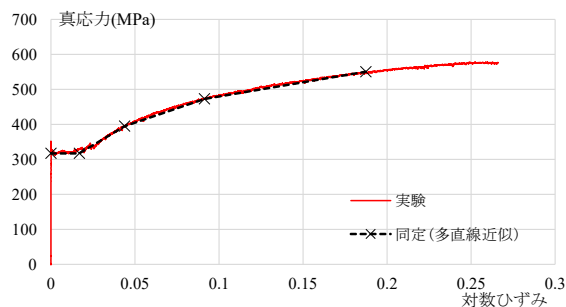


図 2.9.2 解析に用いた真応力-対数ひずみ関係

(2) 再現解析結果（荷重-変位曲線）

解析結果の荷重と荷重点変位の関係を、図 2.9.3 に実験結果と合わせて示している。この図から、橋軸方向 (X 軸方向)、橋軸直角方向 (Y 軸方向)、両方向ともほぼ実験結果を再現できているといえる。実験の方が多少荷重が小さいのは、荷重治具の変形やガタ等によるものと考えられる。

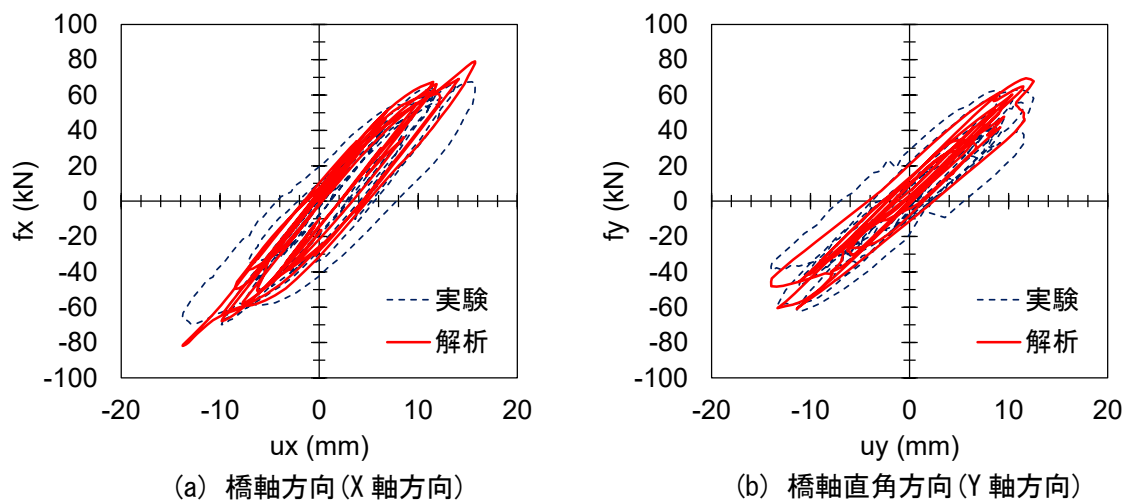


図 2.9.3 支柱実験の荷重-変位関係

次に、多軸マルチリニアモデルモデルが繰り返し塑性履歴を表現できているかを確認するため、橋軸方向の荷重履歴を载荷 step でグラフにすると、図 2.9.4(a) のようになった。この図から、正負最大荷重は前述したように多少解析の方が高くなっているが、実験で最大荷重を示した 130step 以降の解析結果はかなりの精度で実験を再現できているといえる。比較のために、材料構成則としてバイリニアモデル+移動硬化則に変更して解析した結果を同図(b)に示す。この図から、バイリニアモデル+移動硬化則では実験の最大荷重以降（例えば、点線青丸印）、多軸マルチリニアモデルと比較して、実験の再現性が悪いことがわかる。両モデルの差から、多軸マルチリニアモデルが、繰り返し塑性履歴を考慮できていると考えられる。

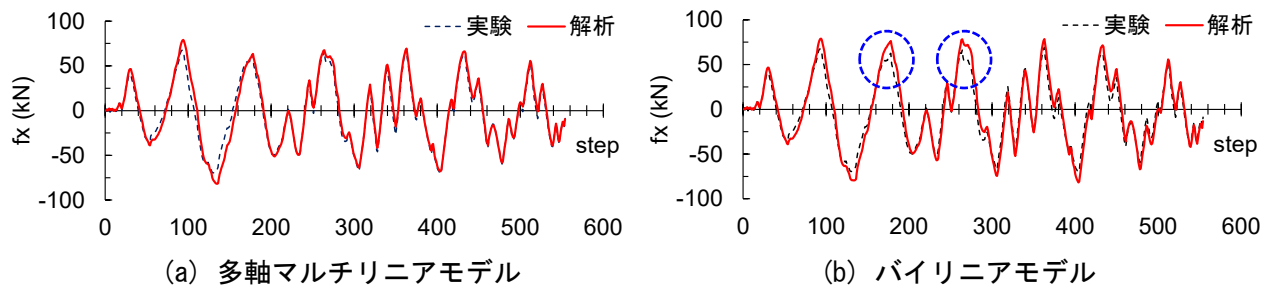


図 2.9.4 X 軸方向水平力の推移

(3) 再現解析結果（変形状態）

解析結果の局部座屈等の変形が、実験と同様に見た目上、確認できなかったため、変形表示倍率を 100 倍にして表示させると、図 2.9.5(a) のようになった。この図から、支柱基部付近においてフランジ面（橋軸方向に対して垂直な面）が外側へ変形し、ウェブ面では中央部が内側へ凹んでいるのが確認できる。比較のために、荷重条件について、一定軸力下で 1 方向繰り返し漸増载荷へ変更した解析結果を同図(b)に示す。1 方向载荷では、フランジ面が内側に凹んで、ウェブ面全体が外側へ局部座屈するという一般的な変形挙動を示している。本実験では、明確な変形が確認できなかったが、通常行われている一定軸力下での繰り返し漸増载荷の場合と異なる変形状態になると考えられる。

(表示変形倍率：100倍)

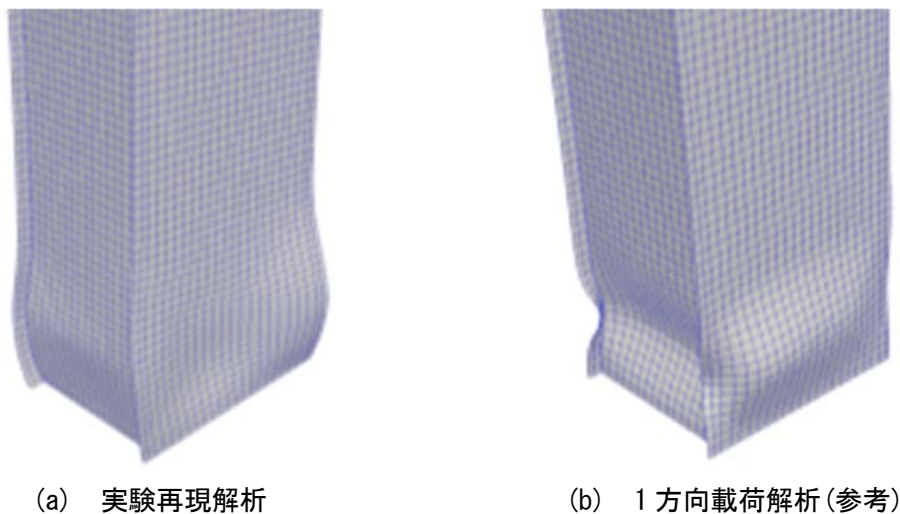


図 2.9.5 変形状態（変形表示倍率：100倍）

2.10 まとめ

本報告書では、まず、基本的な材料構成則および高精度な材料構成則についてモデルの特徴や注意点等について簡単に述べ、例としてSS400の材料試験結果についても示した。次に、多軸マルチリニアモデルについて、モデル概要、材料パラメータの同定、鋼アーチ橋の支柱の地震時挙動の確認および再現実験を行い、最後に、実験の再現解析を行って、鋼アーチ橋の鋼部材への適用を試みた。ここでは支柱を対象としたが、支柱の対傾構のH形鋼についても、文献1)で検討している。しかし、実務者が実橋へ本モデルを適用するには、これまでの検討だけでは不十分であるため、引き続き鋼部材の載荷実験、実験再現解析、材料試験、材料パラメータの同定、種類の異なる実橋への適用等を進めていきたい。

参考文献

- 1) Shen, C., Mizuno, E. and Usami, T. : A generalized two-surface model for structural steels under cyclic loading, Proc. of JSCE. Structural Eng. / Earthquake Eng., Vol.10, No.2, pp.22-33, 1993.
- 2) 西村宣男, 小野潔, 池内智行: 単調載荷曲線を基にした繰り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.
- 3) 後藤芳顕, 江坤生, 小畑誠: 2 方向繰り返し荷重を受ける薄肉円形断面鋼製橋脚柱の履歴特性, 土木学会論文集, No.780/I-70, pp.181-198, 2005.
- 4) 海老澤健正, 野中哲也, 吉野廣一, 馬越一也, 山田忠信: 繰り返し塑性履歴を受ける H 形鋼の構成則およびその適用, 構造工学論文集, Vol. 69A, 2023.
- 5) 海老澤健正, 野中哲也, 山田忠信, 馬越一也: アーチ橋の地震時挙動予測に基づく 3 方向荷重を用いた鋼支柱の繰り返し載荷試験と再現解析, 第 26 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp. 315-322, 2023.
- 6) 日本鋼構造協会: JSSC テクニカルレポート No.119, 鋼橋の設計・評価技術の高度化, 2020.
- 7) 後藤 芳顕, 海老澤 健正, 佐々木 克仁, 神田 信也, 松原 拓朗, 田嶋 仁志: コンクリートを充填した SM570 材による鋼製橋脚の繰り返し荷重下の終局挙動の FE 解析, 土木学会論文集 A1, Vol.75, No.2, pp.175-191, 2019.