

繰り返し塑性履歴を受ける鋼橋支柱の材料構成則と模型実験の事前解析

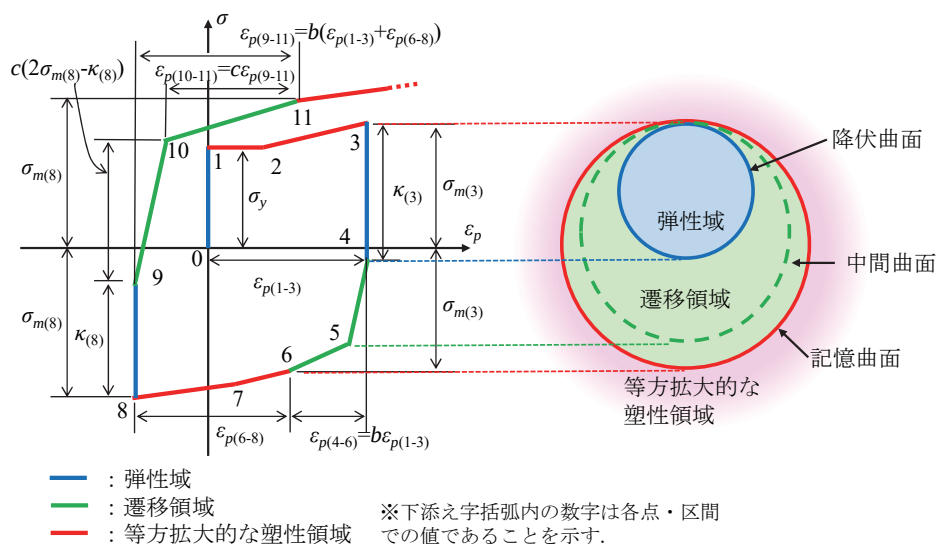
名古屋工業大学 正会員 ○海老澤 健正 正会員 野中 哲也
 株式会社地震工学研究開発センター 正会員 馬越 一也 非会員 吉野 廣一
 株式会社 IHI インフラシステム 正会員 山田 忠信 非会員 廣澤 直人

1. はじめに

既設の上路式アーチ橋・トラス橋に対して、レベル2地震動による地震応答解析を実施すると端支柱やブレース材が損傷する場合が見られる。これらの部材は現時点では塑性化は許容されていないが、今後、合理的な耐震設計を進める上でそれを許容する場合には、最大荷重を算出できる程度の範囲まで塑性時の挙動を高精度に再現できる構成則が必要となる。しかし、現在一般的に用いられるバイリニア移動硬化則は地震動下での繰り返し塑性特性を十分な精度に反映しているとは言い難い。一方、鋼製橋脚においては局部座屈を伴う大変形領域まで精度よく再現する各種モデルが提案・検証されているが、特殊橋梁への適用性については確認されていない。本研究では、著者らが研究開発を進めてきた多軸マルチリニアモデル¹⁾をこれら特殊橋梁の耐震性能評価へ適用することを目指し、支柱模型実験との比較のための事前解析を実施した。

2. 材料構成則の概要

局部座屈を伴う塑性が生じる部材ではシェル要素を用いたモデル化が必須であり、要素は必然的に多軸応力状態となる。本構成則も多軸応力に対応したものである。図1に構成則の概要として一軸繰り返し下での挙動と、図1(a)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つの領域を持ち、降伏曲面、



(a) 一軸繰り返しでの応力-ひずみ関係 (b) 多軸応力空間での状態
 図1 多軸マルチリニアモデル

記憶曲面がそれぞれの境界となる。等方拡大的な塑性領域は、履歴最大相当応力を超えた際の領域であり、一軸の単調引張挙動に準じた挙動を示し単調引張での応力-ひずみ関係の多直線近似として定義される。また、弾性域は式(1)のようにその縮小を考慮する。

$$\kappa = \kappa_{\infty} + (\kappa_0 - \kappa_{\infty}) \exp\left(-\frac{\bar{\epsilon}_p^{ef}}{a\epsilon_y}\right) \quad (1)$$

表1 材料パラメータ

κ/κ_0	a	b	c
0.600	2.15	0.535	0.863

ここで、 κ_0 ：初期の弾性域の大きさ、 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、 $\bar{\epsilon}_p^{ef}$ ：有効相当塑性ひずみ（等方拡大的な塑性領域での相当塑性ひずみ）
 遷移領域はこれら2つの領域を繋ぐもので、遷移領域の塑性ひずみは有効相当塑性ひずみに比例（比例係数 b ）するものとしてモデル化される。また、遷移領域内での剛性変化を表現するため、補助的に中間曲面を持ち、その位置はパラメータ c により決定される。

キーワード 材料構成則、多軸応力、繰り返し塑性、鋼橋支柱
 連絡先 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 TEL052-735-5021

3. 一軸繰り返し材料試験による材料パラメータの同定

実験の再現解析や実構造物の地震応答解析には、本来、供試体に用いた鋼材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、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、本研究では既往の一軸の片振り・両振り繰り返し材料試験²⁾の結果を整理し、表1に示すパラメータ同定を行った。なお、この材料試験の試験片は、後述する支柱模型実験に用いる鋼種と同一のSS400鋼板（板厚35mm）から切削加工したものである。

4. 支柱模型実験の概要

模型供試体は実構造の1/2スケールとし、JSSCの上路式鋼アーチ橋モデル³⁾の支柱を参考に図2のように形状を決定した。境界条件は図中供試体の左端を固定端とし、供試体の右の荷重載荷点に一定軸力を与えた上で一軸繰り返し漸増載荷を行うものである。なお、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。

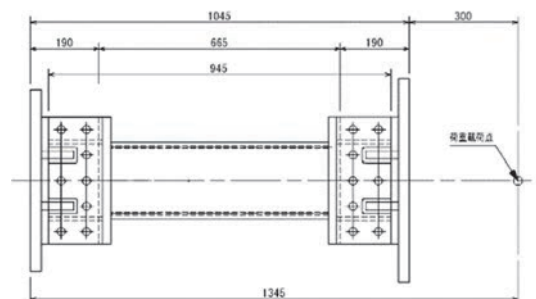


図2 支柱模型実験供試体

5. 支柱模型実験の事前解析

模型供試体をシェル要素でモデル化し、材料構成則に多軸マルチリニアモデルを適用して事前解析を行った。載荷点での荷重－変位関係を、従来のバイリニア移動硬化則を用いた結果とともに図3に示す。多軸マルチリニアモデルでは直線的に荷重低下が生じるが、バイリニア移動硬化則ではピーク荷重後の数サイクルは多軸マルチリニアモデルと同様の傾向であるものの、変位0.03m以降では一定値に収束するような不自然な挙動となっている。これは、バイリニア移動硬化則では2次勾配が一定のため、ひずみの増大に従い応力が比例的に上がり続けてしまうことに起因するものと考えられる。図4に示す変形形状（+0.04m載荷時）では、多軸マルチリニアモデルではウェブ・フランジに局部座屈が生じているのに対し、バイリニア移動硬化則では全体的に座屈変形が小さく引張縁フランジの局部座屈がほぼ解消されている。そのため、従来のバイリニア移動硬化則は局所的な変形を過小評価する可能性が考えられる。

6. まとめ

本研究では、特殊橋梁における支柱やブレース材の塑性時の挙動を高精度に評価するために、多軸マルチリニアモデルの適用性について検討を行った。1軸繰り返し材料試験により定めた材料パラメータを用いた支柱模型の事前解析の結果、バイリニア移動硬化則と比べて妥当な解析結果を得ることができた。

参考文献：1) 海老澤健正ら：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。2) 後藤芳顕ら：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。3) 日本鋼構造協会：ファイバーモデルを用いた鋼橋の動的耐震設計の現状と信頼性向上，JSSCテクニカルレポート，No.93，2011。

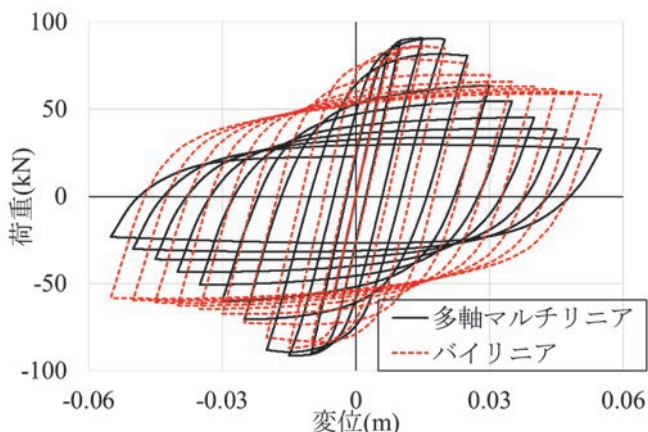
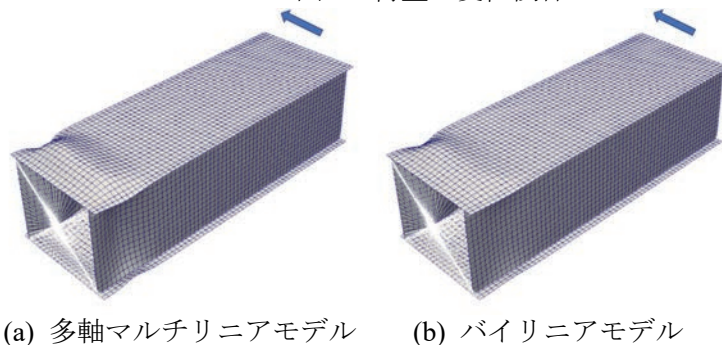


図3 荷重－変位関係



(a) 多軸マルチリニアモデル (b) バイリニアモデル

図4 変形形状（変位+0.04m載荷時）