

I-23

繰り返し荷重を受ける鋼管橋脚模型の弾塑性挙動解析

室蘭工業大学	正員	岸 徳光
(株)日本製鋼所	正員	小 枝 日出夫
(株)日本製鋼所	正員	小 野 信市
室蘭工業大学	正員	小 室 雅人
室蘭工業大学	学生員	梶 山 義晴

1. はじめに

平成7年1月に発生した兵庫県南部地震では、比較的靱性が高いと考えられていた鋼製橋脚にも多大な被害が生じた。これらの損傷の多くは、上部工の重量に起因する軸圧縮力と地震力による水平方向の繰り返し荷重によるものと考えられている。近年、このような荷重条件下における鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する実験的、解析的研究が精力的に行われている^{1),2)}。しかしながら、このような挙動特性を把握するためには、大規模な実験装置を必要とし、同時に多大な費用を要することより、耐震設計に反映可能な実験データの収集には限りがある。したがって、実験結果を精度良く再現評価可能な解析手法の確立が望まれている。この際、鋼材の繰り返し塑性を正確に評価する構成則が問題となる。一般的な構成則としては等方硬化則、移動硬化則が存在するが、これらは弾性域の縮小を考慮していないこと等より、繰り返し塑性を適切に評価することは困難となっている。一方、名古屋工業大学の後藤は、この弾性域の縮小を考慮できる三曲面モデル³⁾を開発し、同モデルを用いることにより、実験結果を精度良く再現できることを確認している。

本研究では、円形断面鋼製橋脚の耐震性評価のための基礎研究として、繰り返し荷重を受ける鋼管橋脚模型に関する弾塑性挙動に関し、三曲面モデルを主体として、等方硬化則および移動硬化則を用いた数値解析を行い実験結果との比較によってそれらの適用性について検討を行った。本数値解析の検討項目は、鋼管頂部の水平力-変位関係および実験終了後の座屈形態である。なお、本研究では構造解析用汎用コードであるABAQUS⁴⁾を使用して解析を行っている。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1に本実験に用いた鋼管橋脚模型の概形図を示す。試験体は全て圧力配管用炭素鋼鋼管(JIS G 3452 STPG370 90A 熱管仕上継目無鋼管)を所定の長さに切断し、旋盤により内外面を切削して製作した。試験体の上部には、軸力載荷用の鋼板を周溶接により取り付けている。また、基部においては剛体変形をできるだけ小さくするために、厚さ9mmの鋼管を用いて試験体基礎定着部を補強し、3箇所を周溶接している(図-1参照)。表-1に試験体の名称、寸法(外径、内径、板厚等)および各パラメータを示す。なお、試験体の名称は、第1項が板厚、2項が軸力比、3項が載荷方法を示している。試験体の力学的特性に関しては、鋼管模型よりJIS6号試験片を製作し引張試験を行い、降伏応力 $\sigma_{ys}=336.5$ (MPa)、引張強度 $\sigma_u=550.4$ (MPa)、ポアソン比 $\nu=0.3$ を得ている。

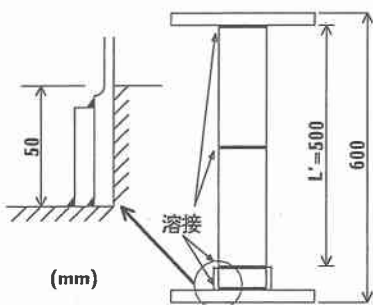
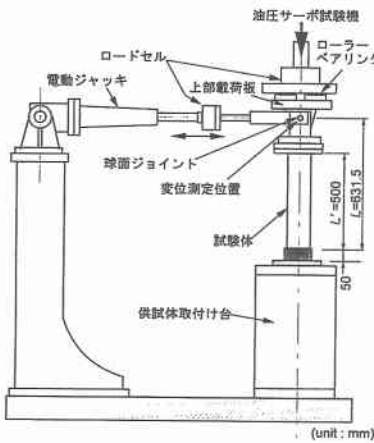


図-1 試験体の概要図

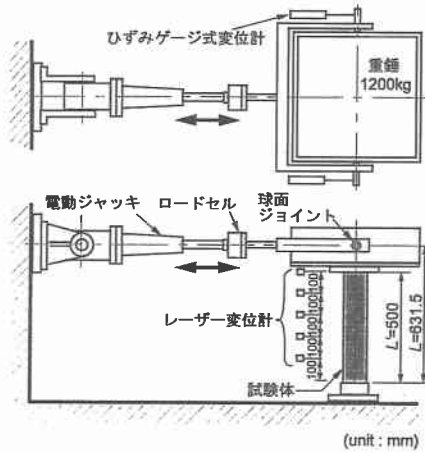
表－１ 試験体一覧

試験体名	鋼管高さ L' (mm)	高さ L (mm)	半径 R (mm)	板厚 t (mm)	細長比 λ	径厚比 R/t	軸力比 P/P_y	降伏水平荷重 H_y (kN)	降伏水平変位 δ_y (mm)
t15-N0-m t15-N0-c	500	631.5	48	1.5	0.479	0.086	0.0	5.688	4.454
t15-N8-m t15-N8-c	500	631.5	48	1.5	0.479	0.086	0.08	5.256	4.109
t15-N15-m t15-N15-c	500	631.5	48	1.5	0.479	0.086	0.15	4.843	3.786
t20-N15-m t20-N15-c	500	631.5	48.25	2.0	0.476	0.065	0.15	6.493	3.747
t25-N15-m t25-N15-c	500	631.5	48.5	2.5	0.474	0.052	0.15	8.162	3.709

ただし、 $H_y = \frac{(\sigma_{ys} - P/A) I}{R L}$ 、 $\delta_y = \frac{H_y L^3}{R L}$ 、 $R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_{ys}}{E} \sqrt{3(1-\nu)^2}$ 、 $\bar{\lambda} = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_{ys}}{E}}$ である。



(a) 日本製鋼所

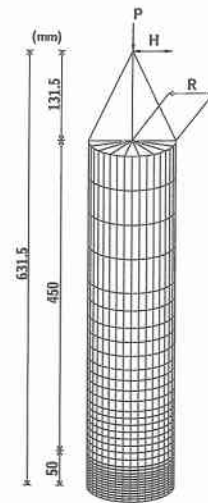


(b) 室蘭工業大学

図－２ 各機関における実験概要

2.2 実験装置

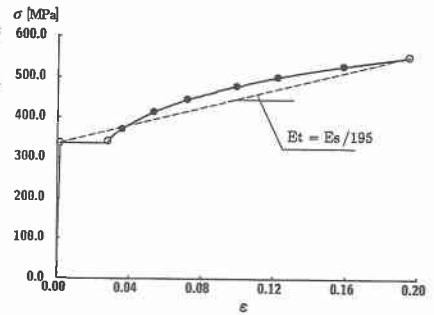
本実験は、日本製鋼所および室蘭工業大学で実施した。図－２(a), (b)に各機関での実験装置の概略を示す。日本製鋼所では、所定の軸方向荷重を容量 100kN の油圧サーボ式試験機により載荷している。一方、室蘭工業大学では、試験体の上部に質量1.2tonの鉛塊を設置することにより軸方向荷重を与えている。水平方向変位に関しては、両機関ともストローク200mm、容量 19.6kN の電動式ジャッキによる変位制御方式とし、載荷速度は 0.39mm/sec で一定とした。なお、水平方向荷重の載荷点は、試験体に生じる水平および軸方向の変位を拘束することなく、荷重の方向が極力水平を維持するような構造とした。実験は水平方向変位を一方に与える単調載荷実験および降伏水平変位 δ_y に基づいた漸増繰り返し載荷実験を行った。なお本実験は、板厚を 1.5mm と固定し軸力を変化させた場合と、軸力比を 15% と固定し板厚を変化させた場合について検討を行った。



図－３ 要素分割状況

表－２ 三曲面モデルのパラメータ

E_s (MPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ν	ε_{yp}	f_b/σ_{ys}	β	H^p_{dc}/E	ξ
2.06E5	336.5	550.4	0.3	0.0278	0.65	50	0.05	0.8



図－４ 真応力－真ひずみ曲線

3. 数値解析仮定

3.1. 試験体のモデル化

本研究では、構造解析汎用プログラム ABAQUS を用いて数値解析を行った。解析対象は鋼製橋脚模型から上下鋼板および溶接部を除いた部分である。なお、対称性を考慮して鋼管の 1/2 をモデル化している。要素分割は解の収束性を考慮し、周方向の分割数を 18 とし、高さ方向の分割に関しては基部より

2mm ピッチで高さ 50mm まで 25 分割し、その上部においては徐々に分割数を減少させている。図－3 に要素分割状況を示す。なお、総要素数、総節点数はそれぞれ 965、1028 である。計算に用いた要素は 4 節点および 3 節点厚肉シェル要素 (S4R, S3R) であり、板厚方向の積分点は 11 としている。解析は底部を完全固定とし、切断部においては連続性を考慮した境界条件としている。なお数値解析は、実験状況を考慮し頂部に軸力および水平変位を変位制御で与えることにより行った。

3.2 材料構成則

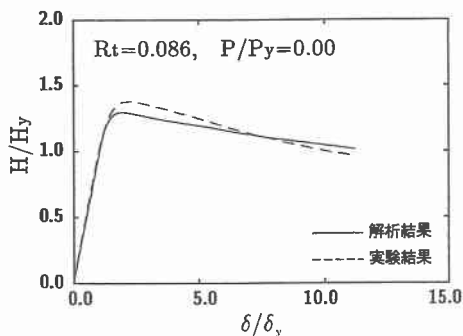
本研究では、名古屋工業大学の後藤により開発された三曲面モデル³⁾を用いて解析を行い、実験結果との比較により解析結果の妥当性の検討を行った。また、構成則の違いによる挙動特性への影響を検討するために、あらかじめ ABAQUS に組み込まれている等方硬化則、移動硬化則を用いた場合についても解析を行っている。材料定数は、JIS 6 号試験片による引張試験で得られた真応力－真ひずみ関係により決定している。図－4 に応力－ひずみ曲線を示す。

三曲面モデルの各パラメータは真応力－真ひずみ曲線を近似するように決定した。図－4 における●印は三曲面モデルにおける近似点である。表－2 に三曲面モデルのパラメータを示す。本解析では、これらのパラメータを全試験体に対して一定としている。ABAQUS における移動硬化則は、降伏後の接線剛性を一定としている。本研究では、降伏点と真ひずみ 20% 時の応力を直線で結んで得られる傾き ($E_t = E_s/195$) を接線剛性として使用した (図－4 参照)。

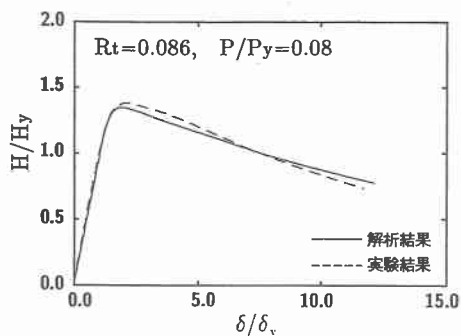
4. 数値解析結果

4.1 単調載荷実験

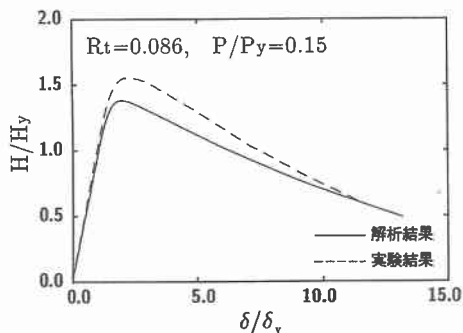
図－5 (a)～(e)には全試験体の単調載荷実験における実験結果と解析結果を示している。図は、縦軸に無次元水平力 H/H_y 、横軸に無次元変位量 δ/δ_y を取り整理している。ここで、 H_y は降伏水平荷重、 δ_y は降伏水平変位である。また、実験値の無次元化は剛体変形を除去する形で行っている。なお、t15-N15-m 試験体に関しては、実験値が他の試験体と比較して明らかに不自然であり、実験中に何らかの原因により実験誤差が生じたものと考えられることより、考察の対象から除いている。図より、最大荷重値に着目すると、解析結果は t15-N0-m 試験体において若干過小評価となるものの、他の試験体においては実験結果とほぼ一致していることがわかる。また、ピーク後の挙動に関しても、解析値は実験値に比べて強度低下が小さいもののほぼ再現できるものと考えられる。図－6 には、t15-N8-m 試験体の実験終了後の座屈形態と、解析結果の変形状態と比較して示している。図より、解析結果は座屈高さ、座屈幅、および水平方向変位とも実験結果を精度良く再現しているものと判断される。



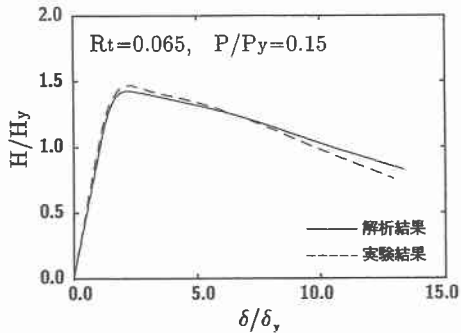
(a) t15-N0-m



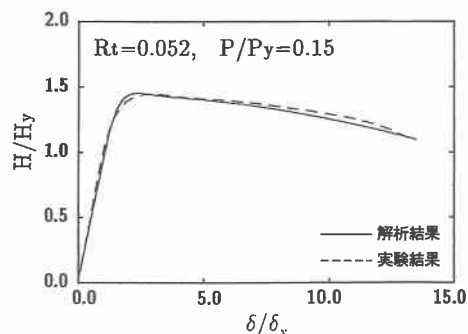
(b) t15-N8-m



(c) t15-N15-m

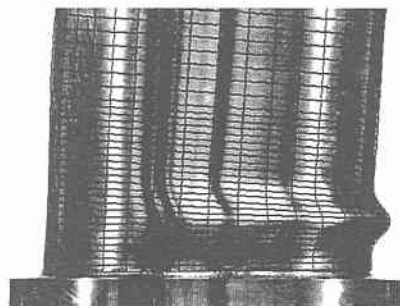


(d) t20-N15-m



(e) t25-N15-m

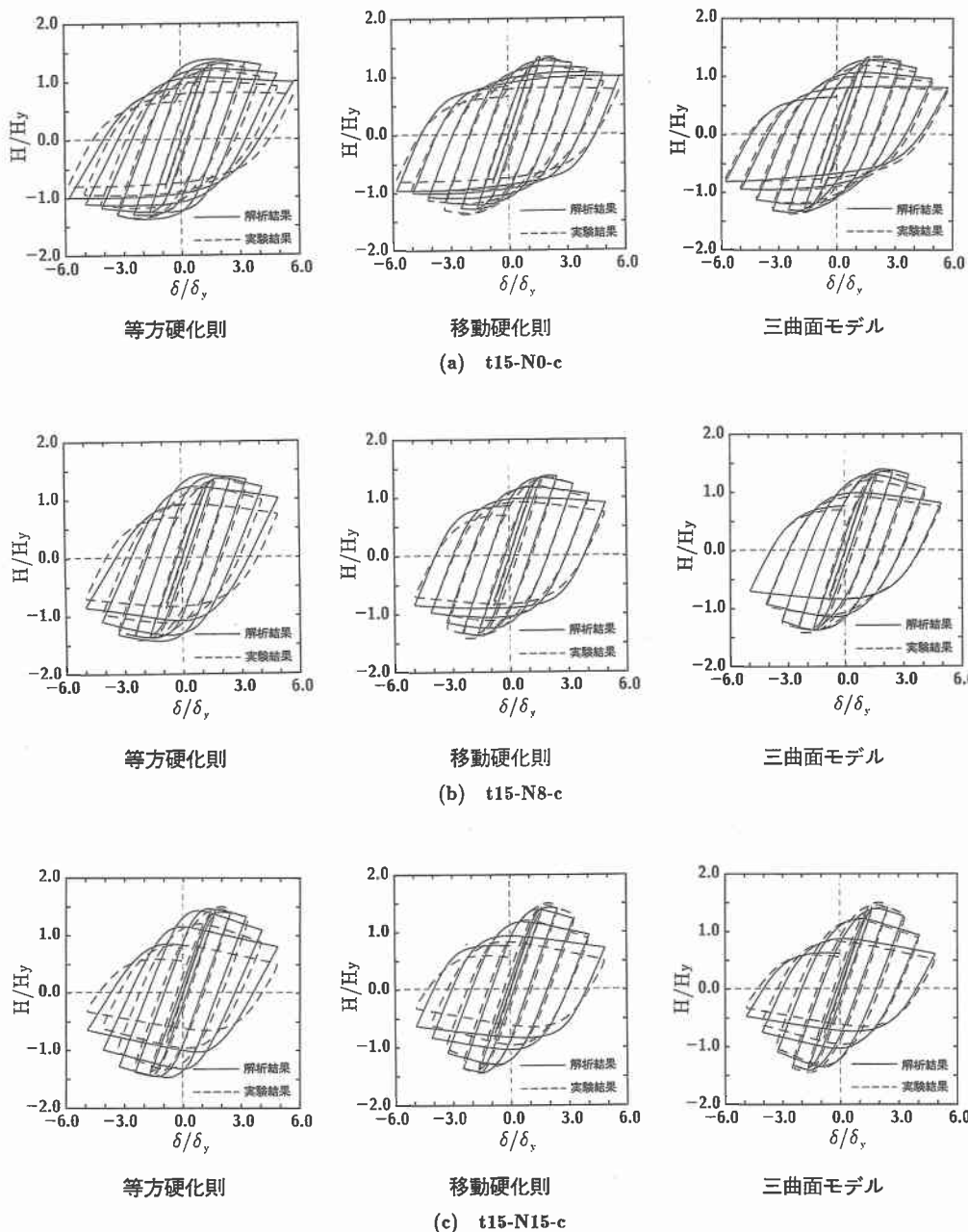
図一五 単調載荷結果と解析結果の比較



図一六 実験終了後の変形状態

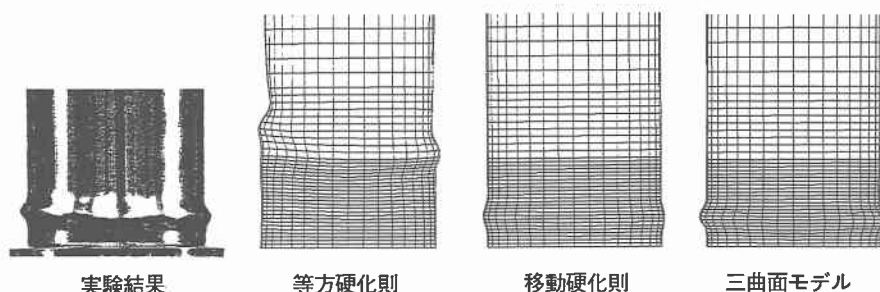
4.2 繰り返し載荷実験

図一七に軸力比の異なる板厚 1.5mm の 3 試験体に関する繰り返し載荷時の解析結果を実験結果と比較して示す。図より、いずれの試験体においても等方硬化則を用いた場合には最大荷重後の荷重や弾性域を大きく評価し、履歴ループの形が実験結果と異なっていることがわかる。また、移動硬化則を用いた場合には最大荷重まではほぼ実験結果と一致しているが、弾性域の縮小を考慮していないことよりピーク後の剛性低下が少なく履歴吸収エネルギーを高く評価しているようである。一方、三曲面モデルを用いた場合には、等方硬化則および移動硬化則の中間の値を示し最大荷重、履歴ループ等の繰り返し挙動をかなり精度良く解析できることがわかる。



図一七 軸力比 15 % の試験体における各構成則による解析結果と実験結果の比較

図一八には、t15-N8-c 試験体における実験終了後の座屈形態と各構成則による解析結果を比較している。等方硬化則を用いた場合、実験結果とは異なり座屈位置は上方に発生している。また、移動硬化則を用いた場合、座屈位置は実験結果とほぼ一致しているものの、変形量を小さく評価している。一方、三曲面モデル



図－8 実験終了後の座屈形態および解析結果の変形状態

を用いた場合には、実験結果の座屈高さ、座屈幅、変形量等を正確に再現していることがわかる。以上の結果より、三曲面モデルは鋼材の繰り返し硬化則として非常に有効なモデルであるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、円形断面鋼製橋脚の耐震性評価のための基礎研究として、繰り返し荷重を受ける鋼管橋脚模型に関する弾塑性挙動解析を行った。本数値解析の検討項目は、鋼管頂部の水平力－変位関係および実験終了後の座屈形態である。また、繰り返し載荷時の挙動特性における構成則の違いによる影響を検討するために、三曲面モデルの他等方硬化則および移動硬化則を用いた解析を行い各構成則の適用性について検討を行った。

検討結果、単調載荷について、いずれの試験体においても三曲面モデルは実験結果を精度良く再現できることが明らかになった。また、繰り返し載荷については、等方硬化則、移動硬化則の場合はいずれも履歴ループが実験結果と異なるのに対して、三曲面モデルの場合には履歴ループおよび座屈形状等において実験結果を精度良く再現していることが明らかになった。

以上より、三曲面モデルは鋼材の構成則として非常に有用であるものと判断される。

謝辞

名古屋工業大学の後藤芳顕教授には、本論文で使用した三曲面モデルのユーザーサブルーチンの提供など多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 西川和廣，山本悟司，名取 暢，寺島圭史，安波博道，寺田昌弘：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，Vol. 42A，pp.975-986，1996.
- 2) 水谷慎吾，宇佐美勉，青木徹彦，伊藤義人，岡本 隆：パイプ断面鋼圧縮部材の繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 42A，pp.105-114，1996.
- 3) 王 慶雲，後藤芳顕，高橋宣男，小畑 誠：繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限変位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.
- 4) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver.5.6, 1996.