

I-64

実規模二径間連続桁橋模型の鋼製橋脚に関する弾塑性解析

室蘭工業大学	正員	岸 徳 光
北海道開発局	正員	佐 藤 昌 志
(株)日本製鋼所	正員	小 枝 日出夫
室蘭工業大学	○学生員	市ノ渡 誉 将

1. はじめに

平成7年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おいても多くの損傷が発生した。この損傷は、鋼管や補剛板に発生した局部座屈や割れ等であり、これらの原因としては上部工の自重による軸圧縮力と地震動による慣性力が作用したためと考えられている。この地震を契機に、耐震性の向上や合理的な耐震設計法の確立を目的とし、鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する実験的・数値解析的研究が各研究機関で精力的に行われるようになった^{1)~6)}。実験的研究としては、鋼製橋脚を模擬した鋼管柱モデルの水平単調載荷実験や繰り返し載荷実験等の準静的実験^{1),2)}、また振動台を用いた起振実験やハイブリッド地震応答実験等の動的実験が行われており、終局状態での挙動特性や径厚比、細長比等のパラメータの耐震性に及ぼす影響が明らかになりつつある。一方、解析的研究では実現現象を精度良く再現するための数値解析手法を確立することを目的として、主として汎用の構造解析コードを用いた数値シミュレーションに関する研究が各機関で盛んに行われている^{3)~6)}。しかしながら、繰り返し荷重を受ける鋼製橋脚の弾塑性解析を行う場合には、鋼材の繰り返し塑性が重要な問題となり、一般的な構成則である等方硬化則および移動硬化則では、この繰り返し塑性を精度良く再現できないことが報告されている。近年後藤らによって三曲面モデル³⁾等の鋼材の繰り返し塑性を精度良く評価可能な構成則モデルがいくつか提案され⁴⁾、これらのモデルを使用することにより鋼製橋脚模型の繰り返し載荷実験結果をほぼ正確に再現可能になった。

しかしながら、これらの研究の多くは、スケールダウンされた小型の鋼製橋脚模型に関するものがほとんどであり、大がかりな実験装置や多大な費用を要することにより実橋規模における鋼製橋脚モデルに関する研究例は極めて少ない。従って、橋脚の上部工による拘束効果の影響を考慮した場合の鋼製橋脚の挙動特性に関しては未だ明らかにされていないのが現状である。

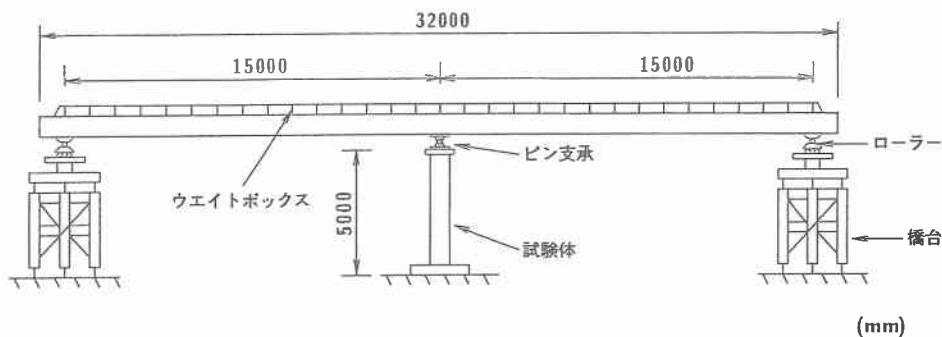
このような観点より、本研究では上部工を有する実規模の二径間連続桁橋模型の鋼製橋脚に関する実験を行うことに先立ち、橋軸方向に単調および繰り返し荷重を受ける場合のその挙動特性を把握することを目的とし、上部工の影響を考慮した全体系モデルと上部工の影響は無視し片持ち柱にモデル化した場合に関して数値解析を行った。なお、本数値解析には、汎用構造解析プログラムであるABAQUS⁷⁾を使用している。

2. 数値解析仮定

2.1 実規模二径間連続桁橋模型の概要

図-1に本数値解析で対象とした実規模二径間連続桁橋模型の概要を示す。上部工は二径間連続桁橋(支間割:15m×2, 主桁間隔:1.8m, H形鋼2主桁)である。着目する鋼製橋脚は二柱形式で桁中間に設置し、ピン支承により主桁を支持している。また、主桁の両端は橋台上の各2個のローラーで可動支持されており、上部工に作用する水平荷重のすべてを中間橋脚が受け持つ構造となっている。また、主桁の上部にはコンクリートを充填した覆工板を設置している。なお、上部工の総重量は104.6tonであり、したがって中間橋脚一体当たりが受け持つ上部工の死荷重は32.7tonとなる。

Elasto-Plastic Static Analysis on a Steel Pier of Large Scale Two Span Continuous Beams
by Norimitsu KISHI, Masashi SATO, Hideo KOEDA and Takamasa ICHINOWATARI



図－１ 実規模二径間連続桁橋模型の概要図

表－１ 試験体の寸法および各パラメータ

荷重点高さ L' (mm)	鋼管高さ L (mm)	板厚中心半径 R (mm)	板厚 t (mm)	細長比 パラメータ $\bar{\lambda}$	径厚比 パラメータ 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)
4718	4536	396.75	18.5	0.379	0.044	0.027	476.8	22.3

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

表－２ 鋼管の力学的特性

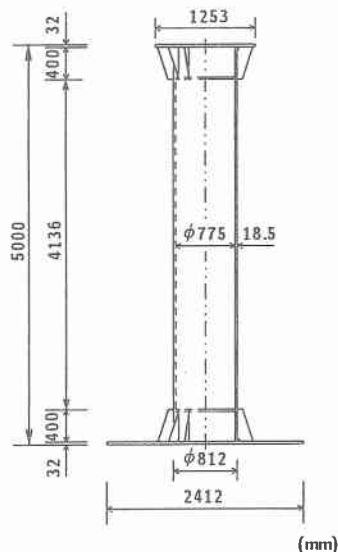
降伏応力 σ_y (MPa)	引張強度 σ_u (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
258	524	206	0.3

2.2 試験体の概要

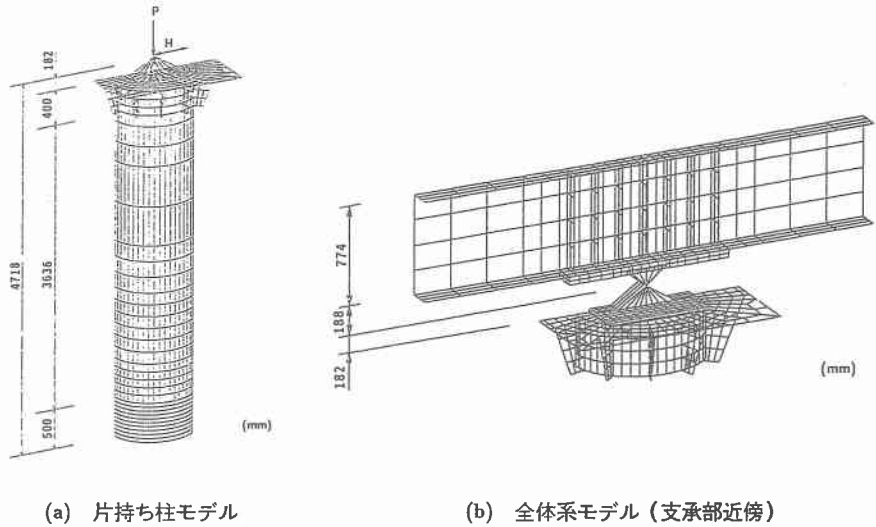
本研究では、円形断面鋼管橋脚を対象とした。表－１に試験体の寸法および各パラメータを、図－２に試験体の形状を示す。ただし、鋼管高さは下部リブプレート上端から試験体の上部ベース板の下端までとし、荷重作用点は支承の高さの中心とした。試験体は一般構造用炭素鋼鋼管（JIS G 3444 STK400-A アーク溶接鋼管）を使用した。また、試験体の上下部は、内ダイヤフラムおよびリブプレートを取り付け剛性を高めている。なお、鋼管以外の板材は溶接性を考慮し、全て SM400 を使用した。使用鋼管の力学的特性を求めるために、鋼管から丸棒試験片を製作して引張試験を行った。表－２に材料試験結果を示す。

2.3 数値解析モデル

本研究では、上部工の影響に関して比較検討を行うために、上部工の影響を無視し片持ち柱にモデル化した場合と上部工の影響を考慮した全体系モデルに関して数値解析を行った。



図－２ 試験体の概要図



図－３ 要素分割図

2.3.1 片持ち柱のモデル化

図－３(a)に片持ち柱モデルの要素分割図を示す。片持ち柱のモデル化に関しては、試験体の対称性を考慮し 1/2 断面を解析対象とした。要素分割は解の収束性を考慮し、周方向を 24 分割とし、高さ方向に関しては下端より高さ 500mm までを 20mm ピッチで 25 分割し、その上部においては徐々に要素分割を粗くしている。解析に用いた要素タイプは、試験体においてはすべて 4 節点厚肉シェル要素 (S4R) とし、試験体上端から荷重作用点までの載荷治具のモデル化には 3 節点厚肉シェル要素 (S3R) を使用した。また、シェル要素における板厚方向の積分点はすべて 11 としている。総節点数および総要素数はそれぞれ 1779, 1714 である。境界条件は試験体の底部を完全固定とし、対称切断面においては法線方向変位および法線直角方向の回転を拘束し連続性を考慮した条件を定義している。荷重条件に関しては、荷重作用点に上部工の死荷重による支点反力に相当する鉛直荷重を定常的に作用させた後に、水平荷重を変位制御で作用させることにより行った。

2.3.2 全体系のモデル化

図－３(b)に全体系の支承部近傍の要素分割図を示す。全体系のモデル化に関しては、試験体、中間支承および主桁を解析対象とした。解析では橋軸方向に載荷しているため、橋軸直角方向の影響は小さいものと仮定し横桁等のモデル化は無視している。従って、それぞれの 1/2 断面をモデル化している。主桁部に使用した要素タイプは 4 節点厚肉シェル要素であり、支承部には 6 節点あるいは 8 節点 3 次元固体要素 (C3D6, C3D8R) を使用した。また、主桁上部には 3 次元固体要素を用いて実橋模型のウェイトボックスと等価な分布重量を与えている。試験体部の要素分割および要素タイプは、片持ち柱モデルと同様である。総節点数および総要素数はそれぞれ 3241, 2786 である。境界条件は試験体の下端を完全固定とし、主桁の両端に関しては可動支持の条件を、また対称切断面においては連続性を考慮した条件を定義している。支承部における上下間の接点には、ピン結合の多点拘束を定義している。また、支承の上板と主桁および支承の下板と試験体上板の要素間には、ボルト部の節点を共有させ、面と面の微小滑りおよび剝離を考慮した接触面を定義している。荷重条件に関しては、自重解析を行った後に片持ち柱モデルと同様に水平荷重を変位制御で作用させることにより行った。

単調載荷においては、主桁が降伏応力に達する時点で解析を終了し、また繰り返し載荷に関しては膨大な計算時間を要するため水平荷重のピークが H_y まで低下した時点で解析を終了している。なお、本数値解析では幾何学的初期不正および残留応力は考慮しないものとしている。

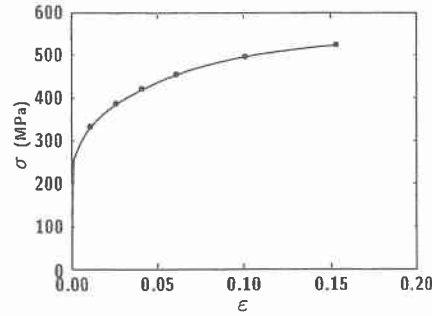
2.4 構成則モデル

本数値解析では、鋼管部の構成則モデルとして名古屋工業大学の後藤らによって提案された三曲面モデルおよびあらかじめ ABAQUS に組み込まれている等方硬化則を用いて行った。各構成則の材料定数は、引張試験で得られた力学的特性および真応力－真ひずみ関係により決定している。図－4 に真応力－真ひずみ曲線を示す。図中の●印は三曲面モデルにおけるひずみ硬化後の硬化係数を決定する際の近似点である。表－3 に本数値解析に用いた三曲面モデルのパラメータを示す。なお、本数値解析では鋼管部以外は弾性体と仮定し行っている。また、三曲面モデルを用いた場合の繰り返し載荷に関して解析を試みたが、膨大な計算時間を要することになり、従って本研究では行ないものとする。

3. 数値解析結果

3.1 単調載荷

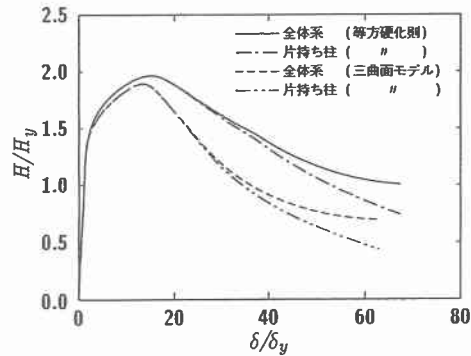
図－5 には単調載荷における各解析ケースの載荷点における水平荷重－水平変位関係を示している。図は縦軸に無次元水平荷重 H/H_y ，横軸に無次元水平変位量 δ/δ_y を取り整理している。図より片持ち柱モデルと全体系モデルに関して比較すると両者の解析モデルは最大荷重値までは全く一致しており、またピーク後の挙動に関しても降伏水平荷重付近まではほぼ一致している。しかしながら、それ以降は全体系モデルでは片持ち柱モデルに比べ強度低下の減少率が徐々に小さくなっていることが明らかとなった。ただし、各解析モデルに対し三曲面モデルを用いた場合と等方硬化則を用いた場合の解析結果を比較すると、三曲面モデルの場合では等方硬化則の場合に比べ最大荷重値および最大荷重時の変位を若干小さく評価しており、またピーク後の強度低下がかなり大きいことがわかる。しかしながら、各解析モデルにおける挙動特性はほぼ類似の解を与えている。



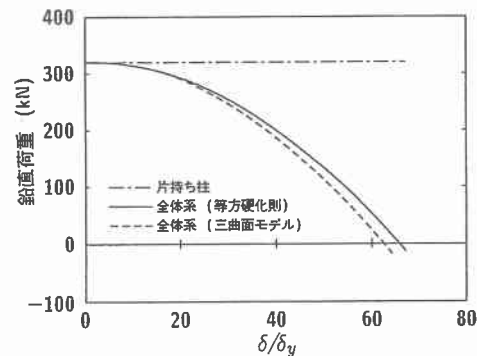
図－4 真応力－真ひずみ曲線

表－3 三曲面モデルのパラメータ

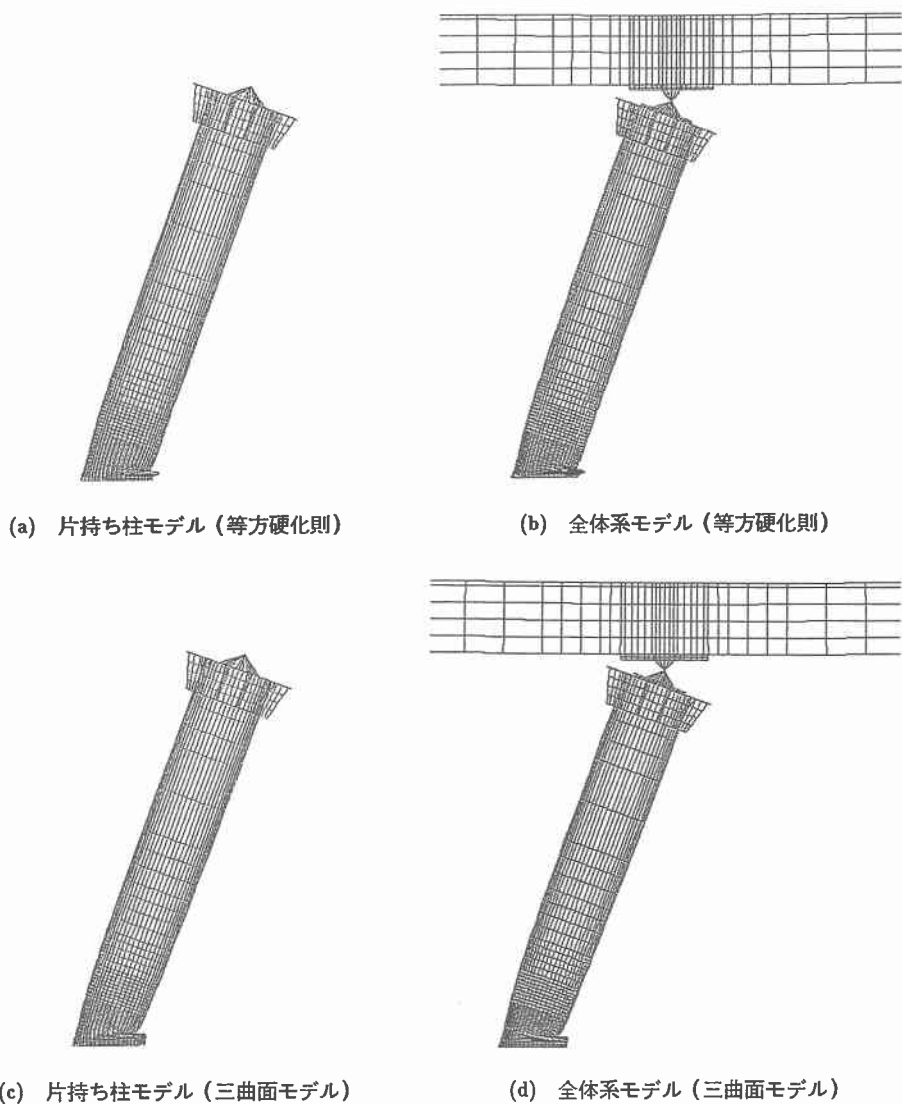
ε_{yp}	f_b/σ_y	β	H^p_{dc}/E	ξ
0.0	0.65	100	0.05	0.4



図－5 水平荷重－水平変位関係
(単調載荷)



図－6 鉛直荷重－水平変位関係
(単調載荷)



図一七 解析終了時の変形状態

図一六には各解析ケースの載荷点における鉛直荷重－水平変位関係を示している。なお、鉛直荷重は鉛直下向きを正としている。図より片持ち柱モデルにおいては軸力を定常的に作用させているため鉛直荷重は一定である。一方全体系モデルでは自重解析を行って軸力を作用させており、水平荷重を与えることによって鉛直荷重は低下している。解析は主桁が降伏した時点で終了しているが、図より鉛直荷重がゼロ付近で主桁が降伏していることがわかる。また、図一七には各解析ケースの解析終了時における変形状態を示している。図より基部においては構成則モデルによって異なっているが、その上部においては各解析ケースとも同様な変形状態となっていることがわかる。

3.2 繰り返し載荷

図-8には繰り返し載荷における水平荷重—水平変位関係を示している。なお、繰り返し載荷に関しては等硬化則を用いて最大水平荷重値が降伏水平荷重値に減少するまで解析を行ったが、全体系モデルと片持ち柱モデルは全く同様な結果となった。

4. まとめ

本研究では、実規模二径間連続桁橋模型における鋼製橋脚に関し、橋軸方向に単調および繰り返し荷重を受ける場合のその挙動特性に関して、上部工の影響を考慮した全体系モデルおよびその影響を無視し片持ち柱にモデル化した場合に関して数値解析を行い、各解析モデルによって得られた結果を比較し検討を行った。

本研究で得られたことを要約すると、

- 1) 単調載荷における各解析モデルの水平荷重—水平変位関係は、最大水平荷重以降の降伏水平荷重付近までは両者はほぼ一致し、その後の挙動に関しては異なる結果となり上部工の影響を受けているものと考えられる。
- 2) 繰り返し載荷において、本研究では水平荷重のピーク値が降伏水平荷重付近に低下するまで解析を行ったが、各解析モデルによる結果は全く同様なものとなった。

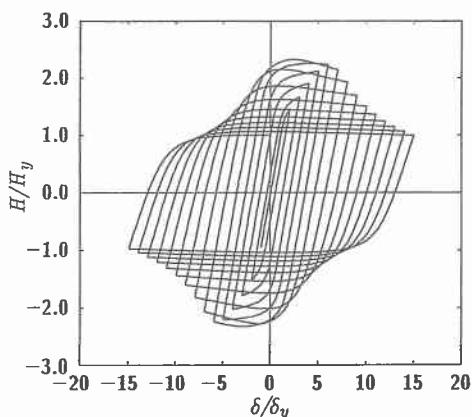


図-8 水平荷重—水平変位関係
(繰り返し載荷)

参考文献

- 1) 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
- 2) 小枝日出夫, 岸 徳光, 佐藤昌志, 小室雅人: 軸力と交番曲げを受ける円形鋼管柱の弾塑性挙動, 応用力学論文集 Vol.1, pp.549-558, 1998.8
- 3) 後藤芳顕, 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, pp.189-206, 1998.4
- 4) 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, pp.201-210, 1998.3
- 5) 山口栄輝, 日野伸一, 阿部圭吾, 馬場 智, 村山隆之, 吉崎信之: 繰り返し水平荷重を受ける鋼製 R 付箱形断面橋脚柱の有限要素解析, 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.203-208, 1997.
- 6) 太田孝二, 中村聖三, 小林洋一, 中川知和, 水谷慎吾, 野中哲也: 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, 橋梁と基礎, pp.33-39, 1997.
- 7) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver.5.6, Hibbitt, Kalsson & Sorensen, Inc., 1997.