

I-72

正弦波加振を受ける鋼管柱模型の弾塑性応答解析

室蘭工業大学	正 員	岸 徳 光
北海道開発局	正 員	池 田 憲 二
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おいても多くの損傷が発生した。この損傷の原因は、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。このような内陸型大地震に対する鋼製橋脚の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・数値解析の研究が各研究機関で精力的に行われている。解析的研究としては、実現象を精度良く再現するための数値解析手法の確立を目的として、主として汎用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盛んに行われている。しかしながら、繰り返し荷重を受ける鋼製橋脚に関する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、一般的な材料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¹⁾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ており、これらのモデルを使用することにより鋼製橋脚模型の静的繰り返し載荷実験結果をほぼ正確に再現可能になった。一方、鋼製橋脚の動的応答解析に関する研究は、主に1自由度モデルを用いて行われており、有限要素法による非線形動的応答解析に関しては、膨大な計算時間を要するため、ほとんど行われてないのが現状である。しかしながら、1自由度モデルの場合では局部座屈の影響を考慮することができず、正確な動的挙動をシミュレートするためには、有限要素法等を用いた詳細な解析が必要であるものと考えられる。

このような観点より、本研究では鋼製橋脚における非線形動的解析手法の確立を目的とし、基部に正弦波加振を受ける鋼管柱模型の弾塑性応答解析を行った。また、材料構成則は三曲面モデルを主体とし、等方硬化則および移動硬化則についても検討を行っている。各材料構成則の適用性に関する検討は、別途実施した単一加振実験結果との比較により行っている。なお、本数値解析には、汎用構造解析プログラムであるABAQUS²⁾を使用している。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1に本実験に用いた試験体の形状寸法を、また表-1に試験体の寸法および各パラメータを示す。試験体の鋼管部は圧力配管用炭素鋼鋼管(JIS G 3454 STPG370 90A 熱間仕上継目無鋼管)を所定の長さに切断し、旋盤加工により内外面を切削して製作した。なお、試験体の製作精度を保つために、2本の鋼管を突合せ溶接して所定の長さに行っている。鋼管の基部は剛体変形を極力防ぐために凸状の台座に鋼管を差し込み、さらに外側に板厚9mmの鋼製リングをはめ込み溶接し固定している。また鋼管の上端部には橋梁上部工の質量を模擬した鉛塊を固定するために幅200mm、板厚25mmの鋼板を周溶接により

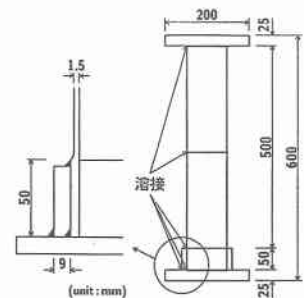


図-1 試験体の形状寸法

Elasto-Plastic Dynamic Analysis of Steel-Pipe Pier Models under Sinusoidal Wave Exciting
by Norimitsu KISHI, Kenji IKEDA, Hideo KOEDA and Takamasa ICHINOWATARI

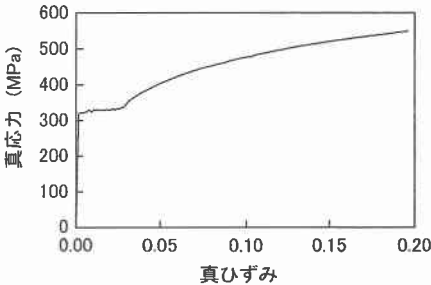
表－１ 試験体の寸法および各パラメータ

荷重点高さ L (mm)	631.5
鋼管高さ L' (mm)	500
板厚中心半径 R (mm)	48.0
板厚 t (mm)	1.5
細長比パラメータ $\bar{\lambda}$	0.479
径厚比パラメータ R_t	0.086
軸力比 P/P_y	0.08
降伏水平荷重 H_y (kN)	5.26
降伏水平変位 δ_y (mm)	4.11

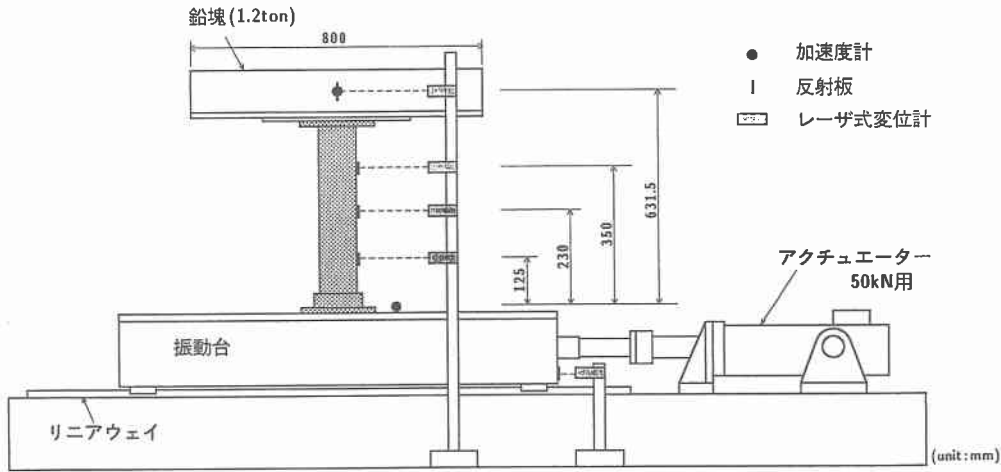
$$\bar{\lambda} = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}, \quad R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_y}{E} \sqrt{3(1-\nu^2)}$$
$$H_y = \frac{(\sigma_y - P/A)I}{(R+t/2)L}, \quad \delta_y = \frac{H_y L^3}{3EI}$$

表－２ 鋼管の力学的特性

降伏応力 σ_y (MPa)	引張強度 σ_u (MPa)	硬化開始ひずみ ϵ_{st}	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
336	550	0.0294	206	0.3



図－２ 真応力－真ひずみ関係



図－３ 実験装置の概要図

取付けている．使用鋼管の力学的特性に関しては，鋼管から JIS 6 号試験片を製作して引張試験を行い算定している．表－２に引張試験結果を，また図－２に真応力－真ひずみ関係を示す．

2.2 実験装置および実験方法

図－３に簡易振動台を用いた実験装置の概要を示す．簡易振動台は 2 本のリニアウェイ上に設置しており，ボールジョイントを介して最大荷重 50 kN のアクチュエーターに接続されている．また，試験体上部には橋梁上部工の質量を模擬した全質量 1.2 ton の鉛塊を設置している．測定項目は，1) 振動台および鉛塊の高さ方向重心位置における加振方向加速度，2) 振動台，試験体および鉛塊の高さ方向重心位置における加振方向変位，3) 試験体の軸方向ひずみである．実験は，試験体の最低次固有振動数を測定した後，静的単調載荷実験³⁾より得られた最大耐力力を参考にして設定した入力加速度を振動台に与えることにより実施している．表－３に本数値解析で対象とした試験体の名称および実験条件を示す．なお，試験体 f2.5-S はほぼ弾性挙動を示し，試験体 f3.0-S は塑性化し倒壊に至った実験である．

表－３ 実験条件

試験体名	固有振動数 (Hz)	加振周波数 (Hz)	入力加速度 (gal)
f2.5-S	4.13	2.5	375
f3.0-S	4.16	3.0	

3. 数値解析仮定

3.1 試験体のモデル化

本数値解析では、試験体から下部固定板を除いた部分および鉛塊を解析対象とし、対称性を考慮して 1/2 断面をモデル化した。図-4 に要素分割図を示す。鋼管部の要素分割は解の収束性を考慮して、周方向の分割を 18 とし、高さ方向に関しては下端より鋼管高さの 1/4 までは 5mm ピッチで分割し、その上部においては徐々に要素分割を粗くしている。使用した要素タイプは、鋼管部が 4 節点厚肉シェル要素 (S4R) であり、その他は全て 8 節点三次元固体要素 (C3D8R) である。総節点数および総要素数はそれぞれ 2423, 2016 である。また、シェル要素における板厚方向の積分点は 11 としている。境界条件は鋼管の底部において加振方向変位成分以外の全ての自由度を拘束し、対称切断面に関してはその面の法線方向変位成分および法線直角方向の回転成分を拘束し連続性を考慮した条件を定義している。粘性減衰に関しては、質量比例型減衰を考慮しており減衰定数 h は最低次固有振動数に対して 2% を設定した。なお、解析モデルにおける最低次固有振動数 f_0 は 4.43 Hz である。解析方法は、自重解析を行った後に、鋼管の底部に入力加速度として実験で得られた振動台の加速度を与えることとした。図-5 に入力加速度波形の一例 (試験体 F2.5-S) を示す。また、解析は自動時間増分法を用いており、最大時間増分は 4msec としている。解析時間は、試験体 F2.5-S で 18 秒とし、試験体 F3.0-S の場合には実験において倒壊に至ったため 10 秒とした。なお、本数値解析では幾何学的初期不整および残留応力は考慮していない。

3.2 材料構成則

本数値解析では、鋼管部の材料構成則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¹⁾の他、ABAQUS²⁾にあらかじめ組み込まれている等方硬化則および移動硬化則を用いて行っている。各構成則の材料パラメータは、引張試験で得られた力学的特性 (表-2) および真応力-真ひずみ関係 (図-2) により決定している。なお、ABAQUS²⁾にあらかじめ組み込まれている移動硬化則は降伏後の硬化係数 H が一定であるパイリニア型で定義されていることより、降伏点と真ひずみ $\varepsilon = 0.2$ における真応力を結んで得られる傾き ($H = E/195$) を硬化係数 H として設定した。

4. 数値解析結果

4.1 応答加速度および応答変位

表-4 に各解析ケースにおける最大応答加速度および最大応答変位の一覧を実験結果とともに示す。ただし、試験体 F3.0-S における最大応答変位に関しては、試験体が倒壊に至る直前の値を示している。表より、各材料構成則による解析結果を比較すると、ほぼ弾性挙動を示した試験体 F2.5-S では、最大応答加速度および最大応答変位とも全く同様な値を示し、材料構成則による差異はみられないことがわかる。一方、倒壊

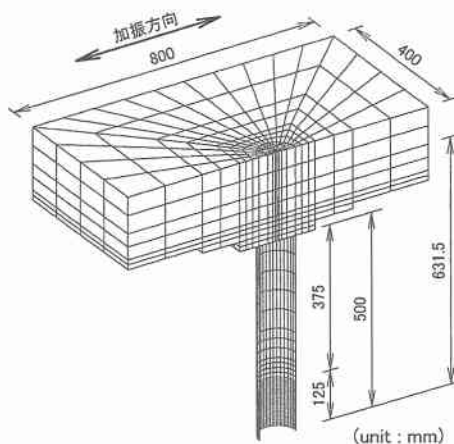


図-4 要素分割図

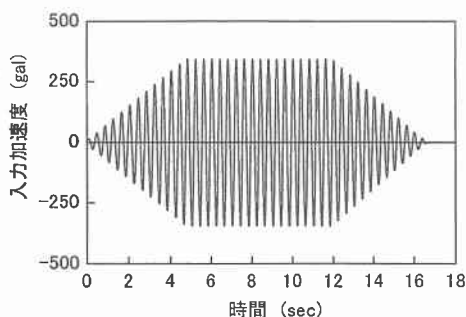


図-5 入力加速度波形の一例 (F2.5-S)

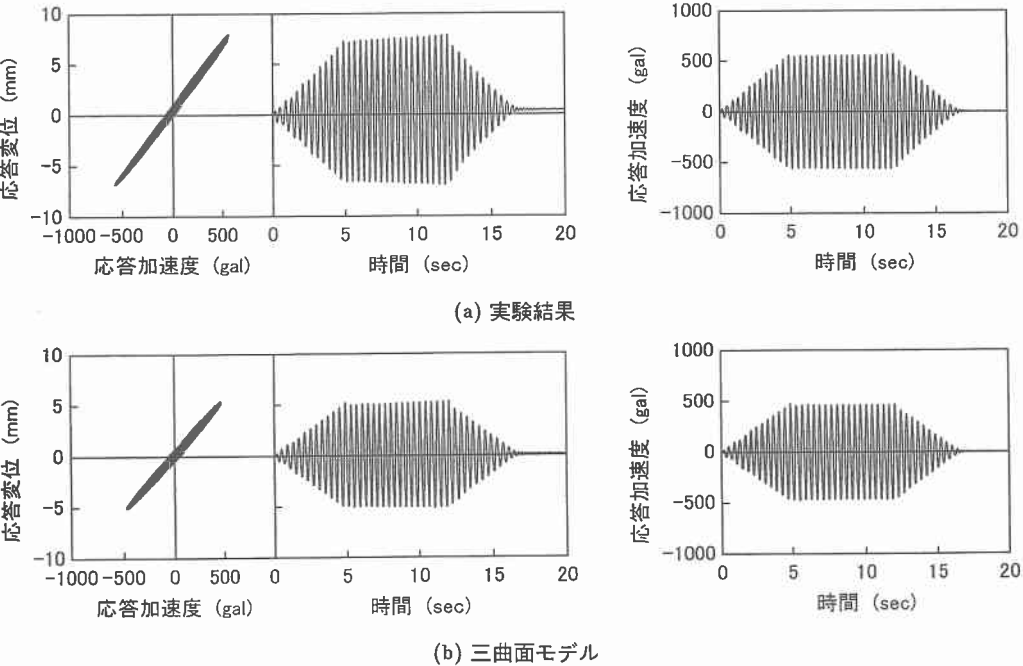
に至った試験体 f3.0-S の場合では、最大応答加速度については各モデル間でほぼ一致するものの、最大応答変位に関しては、三曲面モデルが他の材料構成則よりも大きく示されている。また、解析結果と実験結果を比較すると、実験で得られた最大応答加速度および最大応答変位は、いずれの解析結果よりも大きな値を示している。これは、1) 実験では剛体変形が生じており、本数値解析ではこれを考慮していないこと、2) 実験による最低次固有振動数 ($f_e=4.14\text{ Hz}$) と解析モデルによる最低次固有振動数 ($f_a=4.43\text{ Hz}$) に若干のずれがあり、そのため応答倍率に差異が生じること、によるものと推察される。以下では、このことを前提として両者の比較検討を行う。

表一 4 最大応答値一覧

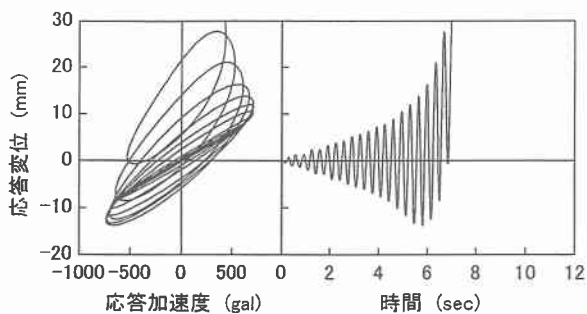
試験体名		最大応答値		加速度 応答倍率
		加速度 (gal)	変位 (mm)	
f2.5-S	実験結果	568	7.5	1.64
	三曲面モデル	478	5.3	1.38
	移動硬化則	478	5.2	1.38
	等方硬化則	478	5.2	1.38
f3.0-S	実験結果	727	13.8	2.10
	三曲面モデル	610	10.3	1.72
	移動硬化則	595	8.2	1.68
	等方硬化則	605	7.8	1.70

図一 6, 7 にそれぞれ試験体 f2.5-S, f3.0-S の鉛塊重心位置におけるヒステリシスループ、応答変位波形および応答加速度波形を実験結果とともに示す。ただし、試験体 f2.5-S に関しては、各材料構成則による解析結果はほぼ一致したため、ここでは紙面の都合上により三曲面モデルによる結果のみ示している。なお、実験では高周波成分を除去するため、全データに対してローパスフィルター処理を行い、加振周波数の 2.5 倍以上の周波数成分を取り除いていることより、解析結果に関しても同様な処理を施している。

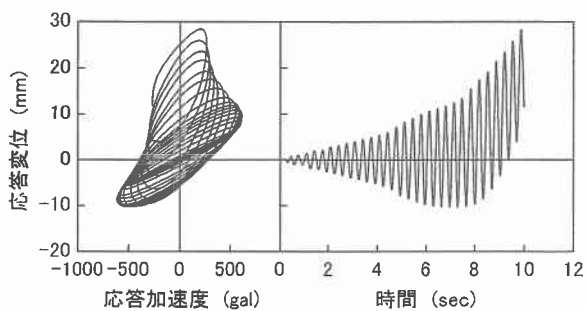
図一 6 (a), (b) より試験体 f2.5-S の場合に関して解析結果と実験結果を比較すると、ヒステリシスループおよび各波形は両者ともに弾性的な性状を呈しており比較的良く一致していることがわかる。図一 7 より試験体 f3.0-S の場合に関して比較すると、三曲面モデルを用いた場合には、実験結果と同様に応答変位の振幅の中心が一方向に移動しながら振動していることがわかる。また、実験結果における応答加速度波形に着目



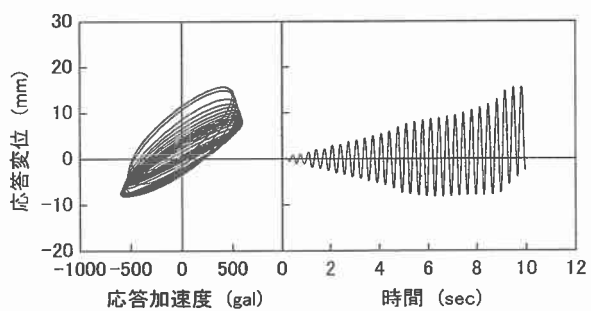
図一 6 解析結果と実験結果の比較 (f2.5-S)



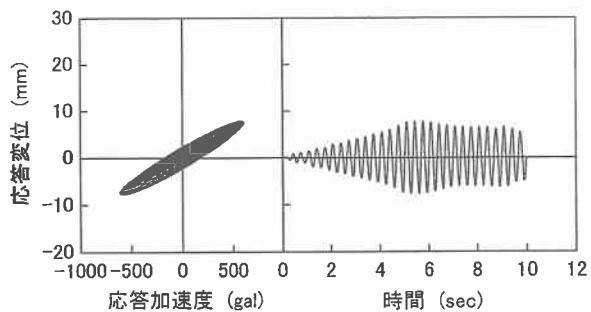
(a) 実験結果



(b) 三曲面モデル



(c) 移動硬化則



(d) 等方硬化則

図-7 解析結果と実験結果の比較 (I3.0-S)

すると、振幅が最大値に達した後、試験体の塑性化に伴う履歴減衰効果によって振幅が徐々に減少しているが、三曲面モデルによる解析結果はこれをほぼ再現できているものと判断される。なお、応答変位波形より倒壊に至る時間に着目すると、実験結果より三曲面モデルを用いた場合の方が若干遅れているが、これは前述のように両者の加速度応答倍率に差異が生じていることより、実験結果の方が三曲面モデルを用いた場合より塑性化が進行しているためと推察される。一方、他の材料構成則を用いた場合には応答加速度が最大値に達するまでは実験結果とほぼ一致している

が、その後は応答値が減少せず異なっていることがわかる。図-7(c)、(d)の応答加速度波形に着目すると、履歴減衰効果は実験結果と比較してかなり小さいことがわかる。また、移動硬化則を用いた場合の応答変位に関しては、振幅の中心が一方向に移動しているものの、その移動量および両振幅の減少傾向は小さい。一方、等方硬化則を用いた場合には振幅の中心が移動せず、正負対称な振幅となっている。これは降伏後に弾性域が拡大することや降伏曲面の中心が移動しないことによるものと考えられる。

4.2 履歴吸収エネルギー

図-8には、試験体 F3.0-S の各サイクル毎におけるヒステリシスループの面積に鉛塊質量を乗じて求めた履歴吸収エネルギーとサイクル数の関係を示している。図より、実験結果と各材料構成則による解析結果を比較すると、15 サイクル程度までは履歴吸収エネルギーがいずれの場合もほぼ同様な値を示していることがわかる。しかしながら、その後に関しては各解析結果における履歴吸収エネルギーが実験結果よりも小さくなっていることがわかる。これは前述のように実験では剛体変形が生じていることから実験による履歴吸収エネルギーは実際よりも大きく評価されているためと推察される。また、等方硬化則を用いた場合の履歴吸収エネルギーは他の材料構成則を用いた場合と比較してかなり小さいことがわかる。これは前述のように降伏後に弾性域が拡大することによるものと考えられる。

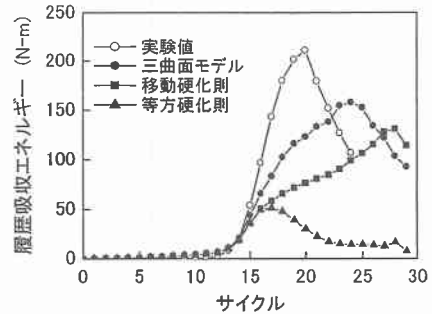


図-8 履歴吸収エネルギー (F3.0-S)

5. まとめ

本研究では、鋼製橋脚における非線形動的解析手法の確立を目的とし、基部に正弦波加振を受ける鋼管柱模型の弾塑性応答解析を行った。また、材料構成則には三曲面モデルの他に一般的な材料構成則である移動硬化則および等方硬化則を用いており、実験結果との比較によりこれらの適用性に関して比較検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると、

- 1) 各材料構成則による最大応答加速度時までの応答加速度-応答変位関係は比較的良く一致するが、その後の挙動に関しては材料構成則によって異なる結果となる。
- 2) 三曲面モデルを用いることにより、実験結果における応答加速度-応答変位関係を大略再現することが可能である。

今後は、解析精度を向上させるため、実験における剛体変形を考慮した解析手法の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 後藤芳顕, 王 慶雲, 高橋宜男, 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
- 2) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver.5.7, Hibbitt Kalsson & Sorensen Inc., 1999.
- 3) 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