

基部加振を受ける鋼管柱模型の弾塑性応答解析

横河工事 正員 市ノ渡 誉 将 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

1. はじめに

本研究では鋼管橋脚の非線形地震応答解析手法の確立を目的として、基部に正弦波加振を受ける鋼管柱模型を対象に有限要素法による弾塑性応答解析を行った。材料構成則に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を採用し、実験結果との比較により各材料構成則の適用性に関する検討を行った。なお、本数値解析には、汎用構造解析プログラムである ABAQUS を使用している。

2. 実験概要

図 - 1 には本実験に用いた試験体の形状寸法を示している。鋼管の基部は剛体変形を極力防ぐために板厚 9mm の鋼管を用いて試験体基礎定着部を補強し、上端部には鉛塊を固定するための鋼板を周溶接により取付けている。使用鋼管の機械的性質は引張試験により、降伏応力 $s_y = 336\text{MPa}$ 、引張強度 $s_u = 550\text{MPa}$ 、弾性係数 $E = 206\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ を得ている。実験装置はアクチュエータに接続された振動台上に試験体を設置し、試験体の上部に橋梁上部工の質量を模擬した鉛塊 (1.2ton) を設置している。実験は、試験体の最低次固有振動数を測定した後、所定の加振周波数および入力加速度を振動台に与えて実施している。表 - 1 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、f2.5 試験体はほぼ弾性挙動を示し、f3.0 試験体は塑性化し倒壊に至った実験ケースである。

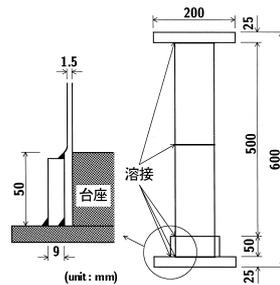


図 - 1 試験体の形状寸法

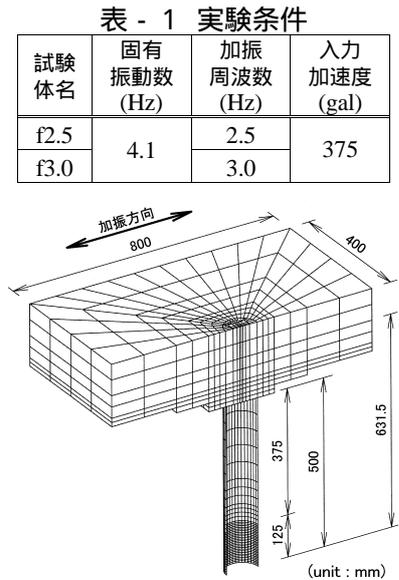


図 - 2 要素分割図

図 - 3 には入力加速度波形の一例 (f2.5 試験体) を示す。

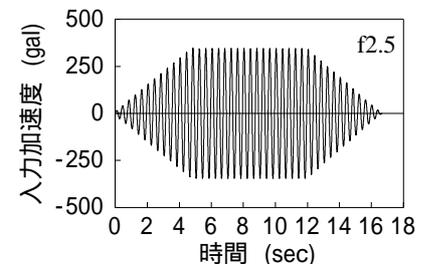


図 - 3 入力加速度波形の一例

3. 数値解析仮定

3.1. 試験体のモデル化

本研究では、基部台座を除いた橋脚模型を解析対象とし、対称性を考慮してその 1/2 断面をモデル化した。図 - 2 に要素分割図を示す。使用した要素タイプは、鋼管部が 4 節点厚肉シェル要素であり、その他は全て 8 節点三次元固体要素である。境界条件は、鋼管基部において加振方向変位成分以外の全自由度を拘束し、対称切断面は連続性を考慮した条件を設定している。粘性減衰には質量比例型減衰を採用し、減衰定数 h を解析モデルの最低次固有振動数 ($f_a = 4.4\text{Hz}$) に対して 2% と設定した。解析方法は、自重解析を行った後に、鋼管基部に実験より得られた振動台の起振加速度を与えることとした。図 - 3 に入力加速度波形の一例 (f2.5 試験体) を示す。

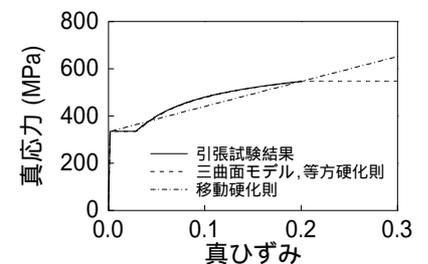


図 - 4 真応力 - 真ひずみ関係

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三曲面モデル、等方硬化則および移動硬化則を用いている。各材料構成則の材料パラメータは、引張試験で得られた機械的性質および真応力 - 真ひずみ関係により決定している。図 - 4 に各材料構成則の一軸状態における真応力 - 真ひずみ関係を引張試験結果とともに示す。なお、ABAQUS で提供されている移動硬化則は、降伏後の硬化係数 H が一定であるバ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 $\epsilon = 0.2$ 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

表 - 2 には各解析ケースの鉛塊重心位置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している。ただし、f3.0 試験体における最大応答変位は、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 f2.5 試験体では、最大応答加速度および最大応答変位とも全て類似な値を示し、材料構成則による差異はみられないことがわかる。一方、倒壊に至った f3.0 試験体における最大応答加速度は、材料構成則に関わらず類似しているものの、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、実験で得られた各最大応答値は、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 ($f_e = 4.1\text{Hz}$) と解析モデルによる最低次固有振動数 ($f_a = 4.4\text{Hz}$) 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

表 - 2 鉛塊重心位置の最大応答値一覧

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	実験結果	568	7.5	1.64
	等方硬化則	478	5.2	1.38
	移動硬化則	478	5.2	1.38
	三曲面モデル	478	5.3	1.38
f3.0	実験結果	727	13.8	2.10
	等方硬化則	605	7.8	1.70
	移動硬化則	595	8.2	1.68
	三曲面モデル	610	10.3	1.72

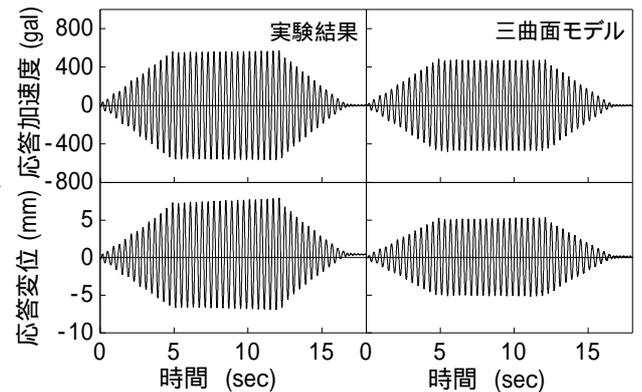


図 - 5 鉛塊重心位置の各応答波形の比較 (f2.5)

等によるものと推察される。以下では、これらの境界条件が若干異なることを前提として両者の比較検討を行う。

図 - 5, 6 には、それぞれ f2.5, f3.0 試験体の鉛塊重心位置における応答加速度波形および応答変位波形を実験結果とともに示している。ただし、f2.5 試験体に関しては、各解析結果がほぼ一致していることより、三曲面モデルによる結果のみを示している。

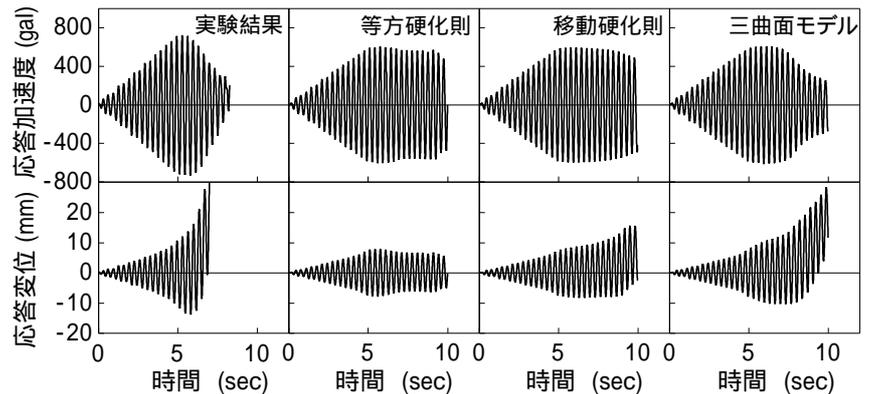


図 - 6 鉛塊重心位置の各応答波形の比較 (f3.0)

図 - 5 より、f2.5 試験体の場合における解析結果と実験結果を比較すると、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 - 6 より f3.0 試験体の場合には、各解析結果とも最大応答加速度値に到達するまでは、実験結果とほぼ一致していることがわかる。しかしながら、最大応答値以降の減少傾向に関しては三曲面モデルが最もその性状に近く、他の材料構成則の場合にはその減少割合が小さい。また、応答変位波形に着目すると、三曲面モデルを用いる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する性状を再現していることがわかる。一方、移動硬化則の場合には、振幅の中心が一方向に移動しているもののその移動量は小さい。また、等方硬化則の場合には、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。なお、応答変位波形より橋脚模型の倒壊は三曲面モデルを用いる場合が実験結果よりも遅れて発生していることがわかる。これは前述のように実験結果の加速度応答倍率が三曲面モデルを用いる場合より大きく、従って塑性化の進行度合いも早いことによるものと推察される。

5. まとめ

- 1) 各材料構成則による解析結果は、最大応答加速度付近まで比較的良く一致するが、その後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、実験結果の応答加速度 - 応答変位関係を大略再現することが可能である。