

I - B129

鋼製橋脚の弾塑性動的応答解析と材料構成則

地域振興整備公団 正会員 高橋 宣男 名古屋工業大学 正会員 後藤 芳顕
日本車輛 正会員 王 慶雲 名古屋工業大学 学生会員 斎賀 雄

1. はじめに

鋼製橋脚の地震終局挙動を解析的に予測することは極大地震に対する耐震設計では非常に重要である。このような挙動を予測する最も汎用的な手法は局部座屈挙動を考慮した複合非線形有限要素法解析といえよう。このような解析では、鋼製橋脚の静的繰返し実験との比較から、鋼材の繰返し塑性の扱いが重要であること判明している¹⁾。ただ、鋼脚の静的繰返し実験では、両振りの漸増繰返し载荷を行っているため、繰返し回数が多く相当塑性ひずみの累積も非常に大きいものとなり、材料の繰返し塑性の影響がより顕著になると言える。一方、鋼製橋脚の終局挙動を考慮して設計する必要のある内陸直下型地震の場合、鋼製橋脚が受ける繰返し塑性履歴は静的繰返し実験に比べかなり少ないものである。したがって、材料構成則が地震時終局挙動に与える影響が必ずしも大きくない可能性もある。そこで本研究では、兵庫県南部地震において損傷を受けた円形断面鋼製橋脚を対象に、実地震波を入力することにより弾塑性動的応答解析を行い、材料構成則が終局挙動に及ぼす影響を検討する。材料構成則としては、静的繰返し実験を精度良く解析しうる三曲面モデル¹⁾の他、通常の汎用コードで使用可能な単調载荷実験に基づくマルチリニア移動硬化則、マルチリニア等方硬化則及びバイリニア移動硬化則を比較対象とする。

2. 解析モデルの概要

解析の対象は阪神高速神戸3号線の円形断面鋼製橋脚の P-584 海側橋脚である。この鋼製橋脚の諸元は図1に示してある。鋼製橋脚は上ベースプレートから上部をモデル化をし、上ベースプレート部で固定と仮定する。コンクリート充填部については、曲げ剛性が等価となるようパイプ断面のヤング率を調整している。この橋脚の上端部には橋桁重量を想定した 482ton の集中質量を頂部中心に与えている。

材料構成則としては、ひずみの大きな領域から小さな領域まで鋼製橋脚の繰返し塑性を精度良く表現できるモデルとして開発した表1の三曲面モデル¹⁾のほか、単調载荷曲線に基づく通常のバイリニア移動硬化則、マルチリニア等方硬化則、マルチリニア移動硬化則を用いる。これらの構成則の基礎となる単調载荷条件下の鋼材の一軸応力-ひずみ関係としては、電力中央研究所において実施された被災後の P-584 橋脚の材料試験の結果²⁾をもとに、図2のように多直線近似したものである。ここで、塑性履歴のためか、いずれの鋼材も降伏棚の長さが短い。また SS400 の引張り強度は通常の場合に

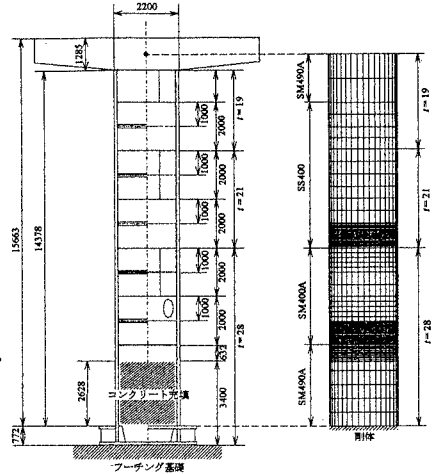


図1 P-584 海側橋脚の概寸

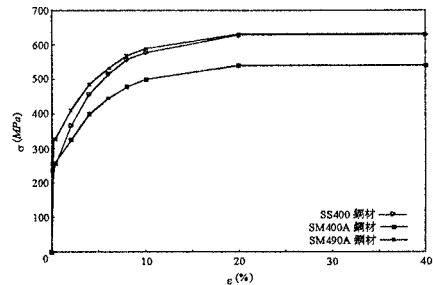


図2 真応力-対数ひずみ関係

表1 三曲面モデルのパラメータ値

	SS400	SM490A	SM490A
$E(\times 10^4 \text{ MPa})$	2.06	2.06	2.06
$\sigma_y \text{ (MPa)}$	235	257	327
$\sigma_u \text{ (MPa)}$	629	549	638
ν	0.3	0.3	0.3
ϵ_{yp}	-	0.00255	0.00221
f_b / σ_y	0.581	0.581	0.650
β	100		
H_{dcl}^p / E	0.05		
ξ	0.8		
H_{mon}^p	多直線近似(図2参照)		

比べ、非常に高く、降伏後の硬化係数も大きくなっている。バイリニア移動硬化則では降伏後の接線剛性は $E/100$ を設定する。地震波としては神戸海洋気象台で観測された加速度の N-S 成分と U-D 成分を用いる。計算時間を短縮するため、入力地震波は全地震波形の主要部分、すなわち地震波記録の開始 30 秒後の点から 10 秒間を入力している。弾塑性動的応答解析は汎用アプリケーションソフト(ABAQUS Ver5.5)によるが、三曲面モデル、マルチリニア移動硬化則はユーザーサブルーチンを作成してプログラムに組み込む。他の構成則は、組込のサブルーチンを用いる。

3. 解析結果

解析結果として、各構成則ごとの鋼脚頂部の水平成分に関する時刻歴応答を図3に、水平変位成分に関する最大応答値と残留値を表2にまとめている。また、解析開始 4 秒後の鋼製橋脚の変形モード(倍率 10 倍)を図4に示す。図3より、解析開始点から約 2.5 秒後までは材料構成則の差は応答変位に現れない。その後バイリニア移動硬化則を除き、他の構成則を用いた場合はいずれも約 3.0 秒で最大変位が発生するまで時刻歴応答変位はほぼ一致している。最大変位以降は、各構成則による応答変位曲線に差が生じている。その結果、表2に示すように残留変位には構成則による差が生じている。バイリニア移動硬化則を用いた場合の鋼製橋脚の応答挙動は、他の構成則とかなり異なっているが、これは他のケースに比べ降伏後の硬化係数を低めに評価することに起因している。とくに、SS400 の降伏後の硬化係数はかなり小さく評価されているため、図4に示すように板厚が $t=28$ (SM400A) から 21 (SS400) への変化点に塑性化による局所的な変形が集中しほぼ完全な提灯座屈が生ずる。その結果、変形もほぼ軸対称となっており、橋脚頂部の残留変位は最も小さくなっている。他の構成則を用いたときの変形モードとしては、三曲面モデル、マルチリニア移動硬化則では、板厚 $t=28$ 部分の SM490A から SM400A への材質変化点と、上述の板厚変化点に局所的な変形が生じている。一方、マルチリニア等方硬化則では $t=28$ の材質変化点に主として局所変形が生じている。

4. まとめ

内陸直下型地震の場合、最大応答変位が生ずるまでの鋼製橋脚が受ける繰り返し塑性履歴は静的繰り返し実験に比べかなり少なく、単調載荷実験に基づく構成則であれば移動硬化、等方硬化の差は少なく、また三曲面モデルともほとんど一致する。ただ、残留変位に関しては、構成則の差の影響は大きい。

4. まとめ

内陸直下型地震の場合、最大応答変位が生ずるまでの鋼製橋脚が受ける繰り返し塑性履歴は静的繰り返し実験に比べかなり少なく、単調載荷実験に基づく構成則であれば移動硬化、等方硬化の差は少なく、また三曲面モデルともほとんど一致する。ただ、残留変位に関しては、構成則の差の影響は大きい。

P-584 橋脚のデータを御提供いただいた阪神高速道路公団に謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 王、後藤、高橋、小畑：繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素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.
- 2) 中村秀治：阪神高速神戸線 P-584, P-585 鋼製橋脚の材料試験結果, WG2-38 資料, 平成8年8月3日

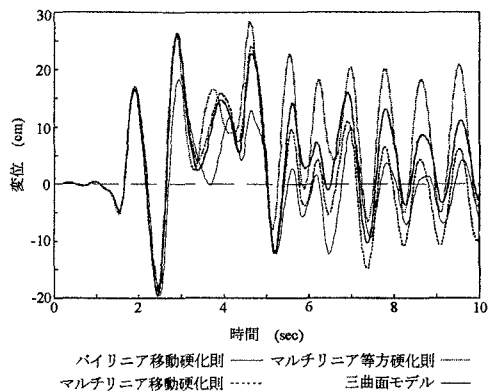


図3 時刻歴応答変位

表2 最大変位と残留変位

変位	材料構成則			
	バイリニア移動硬化則	マルチリニア等方硬化則	マルチリニア移動硬化則	三曲面モデル
最大変位 (cm)	-19.53	28.41	26.17	26.42
残留変位 (cm)	-1.39	8.39	-1.96	3.94

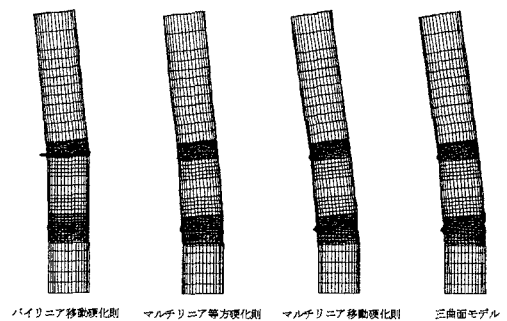


図4 変形モード