

# D

## 鋼製橋脚の耐震解析技術

1995年1月の兵庫県南部地震では、多くの鉄道や高速道路の高架橋で甚大な被害が発生した<sup>1)</sup>。これらの被害に対する精力的な調査・分析の結果を踏まえて、1996年12月に道路橋示方書の耐震設計編が大幅に改訂された<sup>2)</sup>。

本改訂の主な変更点としては、兵庫県南部地震のような内陸直下型地震動に対する照査が新たに追加され、またそれらの大規模地震に対しては、いく分かの損傷被害を認める損傷許容設計法が取り入れられたことである。

これにより、耐震解析法としては、従来の弾性解析ではなく、材料の塑性後の挙動をシミュレートできる弾塑性時刻歴応答解析のニーズが高まってきている。しかしながら、現状ではこのような弾塑性時刻歴解析手法が確立されてなく、道路橋示方書においても本解析に対する詳細な記述がなされていない。

ここでは、鋼製橋脚の耐震設計法および耐震解析について紹介するとともに、当社が行った解析事例について述べる。

### D-1

## 鋼製橋脚の耐震設計法

1) 土木学会鋼構造委員会：阪神・淡路大震災における鋼構造物の震災の実態と分析、1999年5月

2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、1996年12月

新たに改訂された道路橋示方書では、橋脚の耐震設計にもちいる地震動と耐震設計法を第1表のように規定している。同表から分かるように一般の橋においては、震度法と保有水平耐力法の2種の照査を簡易な静的解析で検討できるように規定している。

いっぽう、地震時の挙動が複雑な橋については、動的解析を義務付けている。

コンクリート橋脚や免震支承を有する橋脚については、近年の成果をいち早く適用し、改訂した道路橋示方書の中では簡単な静的解析で設計が可能な形式になっている。鋼製橋脚は、外観の単純さに反して、内側に垂直補剛材や水平ダイヤフラムを多数配しており、大規模地震時の座屈挙動は複雑なものとなっている。

このため道路橋示方書の中では、いまだ研究段階にあるとのことで、“動的解析を行うか、動的な挙動を再現できる実験による確認を行う”との記述に留まっている。

すなわち、鋼製橋脚は、複雑な挙動を呈する橋と見なされ、動的な耐震設計解析を余儀なくされている。

同表に示すように、設計応答加速度が設置地盤や橋梁構造によっては、最大2000galという従来の1.6倍にもなる大きな応答加速度に対して、損傷許容設計を行うためには、正確に損傷形態を求めることのできる精度の良い解析法が必要となる。

このため、橋梁の設計技術者からは動的解析手法の早急な確立を要請されている。

第1表 橋梁の耐震設計に用いる地震動と耐震設計法

耐震設計で考慮する地震動	目標とする橋の耐震性能		耐震計算法		最大応答加速度 (gal)
	重要度が標準的な橋	特に重要度が高い橋	静的解析法	動的解析法 (地震時の挙動が複雑な橋)	
橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動	健全性を損なわない		震度法		300
橋の供用期間中に発生する確率は低いが、大きな強度をもつ地震動	タイプIの地震動 (プレート境界型の大規模な地震)	致命的な被害を防止する	限定された損傷にとどめる	時刻歴応答解析法	1000
	タイプIIの地震動 (兵庫県南部地震のような内陸直下型地震)			応答スペクトル法	2000

### D-2

## 鋼製橋脚の動的解析

日本土木学会および日本鋼構造協会では、上記の要請に応えるため鋼橋の耐震設計検討委員会を1997年4月に発足し、各種耐震解析法の検討および確立に向けて精力的に活動を進めてきた。

その活動結果は、2000年5月に成果報告書とし

て監修されている<sup>3)</sup>。

これらの成果を含め、動的解析として非線形時刻歴解析を用いる場合は、橋梁形式や解析目的に応じて第2表に示す各種のモデルが提案されている。

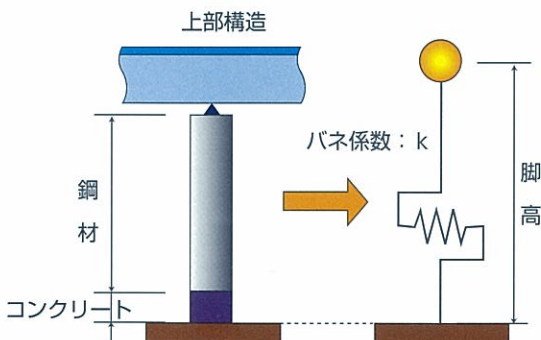
3) 日本鋼構造協会・次世代鋼構造研究委員会：鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと耐震設計法の高度化、2000年5月

第2表 動的解析のモデル一覧

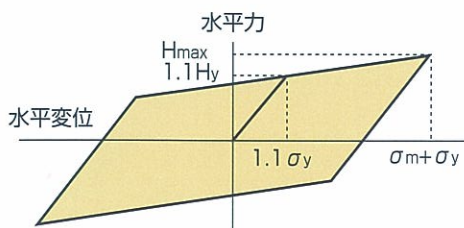
略称	骨格曲線	履歴法則	特長	解析の特長				
	( $\sigma-\epsilon$ 関係)	(硬化則)		簡便さ	難易度	汎用性	時間	精度
1自由度系 バネ・マスモデル	・バイリニア ・劣化型トリリニア	・移動硬化則 ・2パラメータモデル ・Damageindexモデル	モデル化が簡単で計算時間も少ないが、1次の固有モードで評価可能な単純橋脚に限られる	易 ↑	易	小	短	低
梁要素モデル (ファイバーモデル)	・ひずみ硬化型 ・バイリニア ・トリリニア	・等方硬化則 ・移動硬化則 ・修正2曲面 ・3曲面	計算時間は長くなるが、構造形式や変断面形式にかかわらず汎用性大。断面保持の仮定が入るため、局部座屈を正確には反映しがたい					
板・シェル要素モデル	・ひずみ硬化型 ・バイリニア ・トリリニア	・等方硬化則 ・移動硬化則 ・修正2曲面 ・3曲面	実体を忠実にモデル化しているため、精度の高い解がえられる。ただし、解析のモデル化などには、高度な知識と経験が必要	難 ↓	難	大	長	高

本表に示したのは一例であり、構成則との組み合わせを含め、多くの解析モデルが報告されている。そのため、設計技術者にとっては、どの解析モデルを選択するかの判断が難しい。それらの解析内容の詳細は各種の文献に譲ることとし、ここでは簡単に1自由度系バネ・マスモデルと板・シェル要素モデルの概要を説明する。

最も簡便なモデルである1自由度系バネ・マスモデルを単柱橋脚に応用すると第1図のようになる。図からわかるように、このモデルが最も簡便かつ実務向きであることから多用されている。



第1図 1自由度系のバネ・マスモデル



第2図 バネ・マス系の復元力モデル

その際の復元力モデルとしては、第2図に示す移動硬化則バイリニアモデルが一般的である。

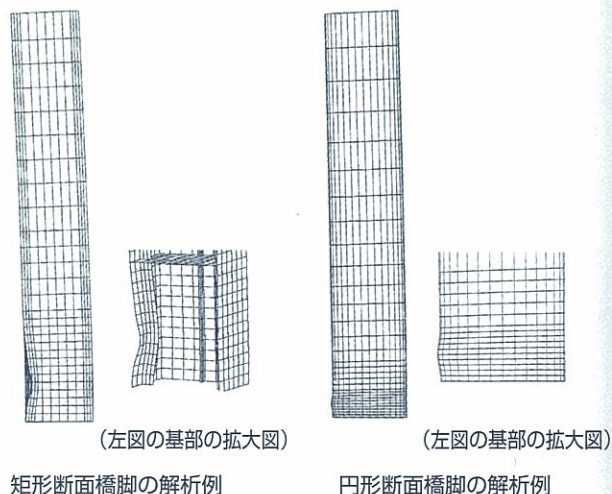
矩形断面の鋼製橋脚に対し、本解析モデルに必要な降伏荷重や2次勾配の決定については、宇佐美等の提案式<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>があり、当社の経験から実用的には次式で十分と考えられる。ただし、適用限界の注意が必要である。

$$\frac{H_{max}}{H_y} = \frac{0.10}{(Rr \sqrt{\lambda \lambda^1_s})^{0.5}} + 1.06$$

$$\frac{\delta_m}{\delta_y} = \frac{0.22}{Rr \sqrt{\lambda \lambda^1_s}} + 1.20$$

ここでは、各記号の説明は紙面の都合上、参考文献<sup>5)</sup>を参照していただくこととするが、式中の幅厚比パラメータRrが座屈に及ぼす大きな支配因子となっている。

いっぽう、複雑な局部座屈挙動を求める手法として、板・シェル要素モデルがある(第3図参照)。



矩形断面橋脚の解析例

円形断面橋脚の解析例

第3図 板・シェル要素モデルの解析結果例

4) 土木学会鋼構造新技術小委員会・耐震設計WG：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術，1996年7月  
5) 葛漢彬ほか2名：鋼製補剛箱形断面橋脚の繰返し弾塑性挙動に関する解析的研究，構造工学論文集，Vol.46，(2000)，P.109～118

兵庫県南部地震における橋脚の座屈モードを詳細にトレースできることから、近年多くの研究がなされてきた。

この解析モデルでは、材料の応力-ひずみ曲線を忠実に与えるマルチリニア型（第2表の中のひずみ硬化型と同じ）と弾性域と塑性域を2本の線で近似したバイリニア型、さらにそれに加え

て、材料降伏後の除荷・載荷の履歴法則が各種提案されており、それらの優位差についてはまだ結論が出ていない。

当社では汎用解析ソフトABAQUSに、これらの構成則をユーザーサブルーチンで与えて各種の解析ができるようにしている。

## D-3

### 単柱橋脚の解析事例

板・シェル要素モデルの解析事例として、矩形および円形橋脚の解析結果を第3図に示している。入力地震波は、兵庫県南部地震で得られたJR鷹取駅周辺で計測されたN-S波であり、図は最大変位が生じた7秒経過後の変形図を示している。

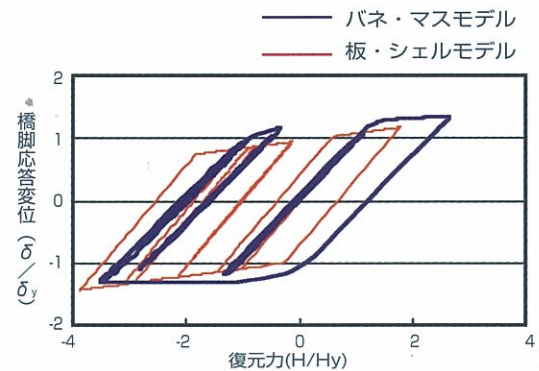
両橋脚とも橋脚基部では材料塑性域に入っており、その際の局部座屈の状況が忠実にトレースできている。

第4図にはバネ・マスモデルと板・シェルモデルの変位応答波形の比較を示している。

第5図は復元力と橋脚頂部の変位の関係を降伏荷重と降伏変位で除した倍率で示している。

1自由度系バネ・マスモデルでは、前述の式の復元力モデルを用いており、板・シェル要素モデルではマルチリニア移動硬化則を用いている。図より明らかなように、両者の差異がかなり現れている。当社で各種の解析法を検討してきた結果では、変形が降伏変位の4倍以上となるような大変形挙動を呈する場合は、この両者の差異は大きくなる。また、板・シェル要素モデルでも材料構成則として、バイリニア型とマルチリニア型とでは大きな差異を生じることもわかってきている。

国土交通省土木研究所などが行ったスモールサイズの橋脚の疑似地震応答試験<sup>6)</sup>と、当社が行った地震応答解析結果の比較検討の経験から、できるだけ精度の良い解析結果をえるためには、マルチリニア移動硬化型を用いた板・シェル要素モデルのほうが良いと考えられる。



第5図 変位-復元力履歴曲線の比較

当社では、兵庫県南部地震を契機として、鋼製橋脚の耐震解析に関して多くの研究開発を行ってきており、お客様のニーズに適した各種解析法を提案できる技術的な蓄積を行ってきた。

また、数値解析だけでなく実験的にも検討ができるように、多軸加振が可能となるハイブリッド実験の開発にも取り組んできている。

近年では、省力化橋梁、合理化橋梁など、建設コストを大幅に低減する橋梁の開発が進められており、これらの橋梁では、上述した道路橋示方書の規定にない、構造・部材の採用や一部で基準を逸脱した構造が取られている。

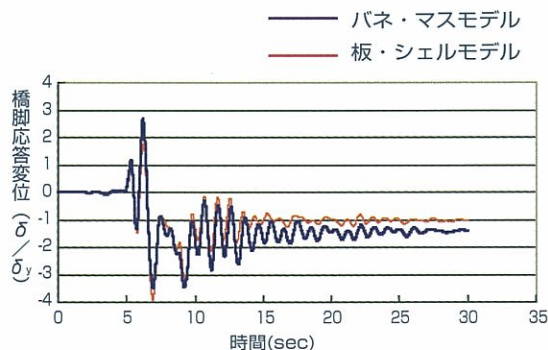
このような新形式の合理的な橋梁の開発を促進するために、現行の設計体系を見直す動きがある。

すなわち、示方書などの基準に沿った仕様設計から、性能照査型設計への移行が検討されている。これらの性能照査型設計では、自由な構造形式を提案できるが、設計者側でその安全性/妥当性を立証するための各種実験や詳細な数値解析などが必要となる。

当社はそれらの技術動向およびお客様のニーズに常に対応できるよう、今後とも技術の向上を図っていく予定である。

[エンジニアリングメカニクス事業部 CAE技術部 大谷 修]

6) 建設省土木研究所ほか5団体：道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同報告書(I)，(VII)，1997年



第4図 時刻歴応答変位の比較