

鋼構造物の耐震照査法

宇佐美勉¹・織田博孝²

¹フェロー会員 工学博, D.Sc 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8063 名古屋市千種区不老町)

²正会員 博(工) 瀧上工業株式会社 技術部 (〒454-8517 名古屋市中川区清川町 2-1)

1. はじめに

本論文の目的は、鋼構造物の耐震設計に関する最近の研究成果を解説し、実務で使用可能なレベル2地震動に対する照査法を体系的に述べることである。

鋼構造物の耐震設計法に関してまとまった参考文献としては、土木学会鋼構造新技術小委員会による報告書¹⁾がある。この報告書では、コンクリートを部分充填した鋼製橋脚に適用できる地震時保有水平耐力法とそこで必要なPushover解析法が示された。その後、道路橋示方書V・耐震設計編²⁾が改訂され、鋼製橋脚の耐震設計に関する規定が設けられた。しかし、モデル化の考え方および耐震解析法の詳細な記述がないため適用が限定され、記述がないものは設計者の裁量に任された、いわば性能照査型設計法のスタイルである。しかし耐震解析ツールが十分整備されていない状況のため十分機能しているとは言いがたい。そこで、日本鋼構造協会「次世代土木鋼構造研究特別委員会・鋼橋の耐震設計小委員会」と土木学会鋼構造委員会「鋼構造物の耐震検討小委員会」では、性能照査型耐震設計法の開発、耐震解析ツールを整備する際に必要な精度検証用ベンチマークの作成などを目的として研究した³⁾。

本論文は上記の文献3)の成果をもとに、まず実務と研究で用いられる耐震解析法を分類して示す。次に、これらの解析法のうち現在実務レベルで適用可能な方法を用いた耐震照査法を解説する。そして、応用として鋼製ラーメン橋脚の耐震照査の考え方について述べる。

2. 耐震解析法の分類

耐震設計では地震動による構造物の応答値 S (Demand) が構造物の対応する限界値 R (Capacity) を越えないかどうかを照査する。すなわち、

$$S \leq R \quad \text{あるいは} \quad f(S, R) \leq 1.0 \quad (1)$$

である。S と R はこれまでに無い特殊な構造でない限り数値解析だけで評価されるが、S と R それぞれに対してどのような解析法が利用可能であるのか、分類して整理しておくことは重要であろう。

表-1は耐震解析手法の分類とその主たる解析目的(S,Rの算出)を示したものである。解析手法は大きく4つに分類できる。すなわち、静的解析<Static>, 静的繰返し解析<Q.Static>, モーダルアナリシスに基づく応答スペクトル解析<Spectrum>, および時刻歴応答解析<Dynamic>である。解析タイプは取り扱い材料の性質により線形弾性材料<L>, 非線形(非弾性)材料<N>で分類し、幾何学的非線形性だけでなく局部座屈の考慮の有無も含めてL,Nの後の数字1~3で分類している。1,2はいずれも局部座屈を考慮しない棒(はり)要素を用いた解析で、1:1次解析は微小変位理論による解析、2:2次解析はいわゆる、はり一柱理論でP-Δ効果を考慮した線形化有限変位理論(幾何学的非線形性の2次理論)による解析である。3:3次解析は、局部座屈を考慮した棒(ひずみ軟化型の材料構成則を用いる方法⁴⁾)あるいはシェル要素を用いた幾何学的非線形性の2次あるいは3次理論による解析を表している。また、時刻歴応答解析の内、線形解析<L1>は多くの場合、応答スペクトル解析で代用されているので表には載せていない。

設計段階で使用される解析は、ほとんどが局部座屈を考慮しない骨組構造物の2次解析の範囲で、高次の非線形性を考慮した弾塑性有限変位(変形)解析<N3>が用いられる場合はほとんどない。しかし、<Static><N3>および<Q.Static><N3>は例外で、将来、性能照査型設計が本格的に導入された場合には、設計段階あるいは性能検証段階で使用されるかもしれない。現時点ではこのような解析は研究として行われており、例えばシェル要素を用いた局部座屈を考慮した鋼製橋脚の静的解析あるいは静的繰返し解析により保有耐力、変形性能、復元力モデルなどが導かれ、設計ではその結果のみが用いられている。

表-1 耐震解析法の分類

解析の種類	解析タイプ	主たる解析目的		適 要
		応答値 S	限界値 R	
静的解析 <Static>	<L1>	S_0	—	弾性 1 次解析：震度法
	<L2>	S_0	—	弾性 2 次解析：スレンダーな構造物に対する震度法
	<N1>	—	R_1, R_2	弾塑性 1 次解析（弾塑性微小変位解析） 保有耐力，変形能の計算のための Pushover 解析
	<N2>	—	R_1, R_2	弾塑性 2 次解析（複合非線形解析） スレンダーな構造物の保有耐力，変形能の計算のための Pushover 解析
	<N3>	—	R_1, R_2, R_3	弾塑性 3 次解析： 局部座屈を考えた Pushover 解析
静的繰返し解析 <Q.Static>	<N2>	—	R_1, R_2	繰返し弾塑性 2 次解析 局部座屈を考えない繰返し解析。 復元力特性，保有耐力，変形能の計算。
	<N3>	—	R_1, R_2, R_3	繰返し弾塑性 3 次解析 局部座屈を考えた繰返し解析。 復元力特性，保有耐力，変形能の計算。
応答スペクトル 解析 <Spectrum>	<L1>	S_0, S_1, S_2	—	モーダル解析による加速度応答スペクトル解析。エネルギー一定則，非弾性応答スペクトルあるいは等価線形法により非弾性応答の近似値が求まる。
時刻歴応答解析 <Dynamic>	<N1>	S_2, S_3, S_4	—	動的弾塑性 1 次解析（動的弾塑性微小変位解析）
	<N2>	S_2, S_3, S_4	—	動的弾塑性 2 次解析（動的複合非線形解析） スレンダーな構造物に適用。
	<N3>	S_2, S_3, S_4, S_5	—	動的弾塑性 3 次解析 局部座屈を考えた動的解析。

注 1) S, R の内容の例

S_0	応力，変形（震度法）	R_0	許容応力，許容変形（震度法）
S_1	$k_h W / Z$ （等価水平力）	R_1	H_u （保有水平耐力；終局水平耐力）
S_2	δ_{max}, ϕ_{max} （最大応答変位，曲率）	R_2	δ_u, ϕ_u （終局変位，曲率）
S_3	ϵ_{max} （最大応答ひずみ）	R_3	ϵ_u （終局ひずみ）
S_4	δ_R （残留変位）	R_4	$\delta_{R,lim}$ （残留変位の制限値）
S_5	応答局部ひずみ	R_5	低サイクル疲労強度（ひずみ）

注 2) L, N の後の数字は幾何学的非線形性の程度および局部座屈考慮の有無を示す。

注 3) <Dynamic><L1>, <Dynamic><L2>は多くの場合<Spectrum>で代用できるので省略してある。

注 4) Z = 塑性率によって定まる荷重低減係数

表中の<Static><N1>（弾塑性 1 次解析），<Static><N2>（弾塑性 2 次解析）は Pushover 解析と呼ばれ，慣性力に相当する水平力を一方向に単調に増大させ構造物の崩壊に至るまでの解析を行うことにより限界値 R を求める手法で，耐震設計上有用な情報が得られる重要な解析法である。これは道路橋示方書²⁾あるいは新技術報告書¹⁾に採用されている手法と基本的には同じである。

以上をまとめると，通常的设计段階で推奨される耐震解析法は，レベル 1 地震動に対しては<Static><L1><L2>, <Dynamic><L1>であり，レベル 2 地震動に対しては，静的解析では棒（梁）要素による Pushover 解析<Static><N2>, 動的解析では棒要素を用いた弾塑性時刻歴応答解析<Dynamic><N2>が基本である。したがって，いずれの解析においても鋼構造の終局限界に影響が大きい局部座屈は解析時に考慮されない

が，限界状態の照査に用いる破壊基準の中で考慮することになる。これらの解析より高度な解析法<N3>は研究用であるが，将来的には性能検証用の解析として使用されよう。

耐荷力解析では初期不整（初期たわみ，残留応力）を考慮するが，設計レベルの耐震解析では無視しても良い。これは，慣性力による横荷重が卓越するため初期たわみの影響は大きくなく，また残留応力は繰返し荷重において，その影響は消滅するためである⁵⁾。

鋼構造はコンクリート構造に比べスレンダーであるので，変位が大きくなるレベル 2 地震動に対する解析では幾何学的非線形を考慮した解析<N2>が望ましい。しかし，簡単のため文献 3) では ECCS の基準に基づいて<N1>解析で可能な範囲を示してある。

3. 耐震照査法の分類

(1) 要求耐震性能

レベル1地震動に対して、構造物はほぼ無損傷に収まるように設計される。わが国ではこの設計を震度法と呼ぶ許容応力度設計（無損傷限界）によって行っている。

レベル2地震動に対しては、種々な限界状態に対して耐震性照査が行われる。第1に、構造安全性に対する照査であり、限界状態は構造物の終局限界に対して定められる。第2に、最近の規準では無損傷限界と終局限界の中間に損傷限界を設定し地震後の使用性に対する照査が設けている。これは地震後の機能保持および復旧期間などを照査するものである。

構造物の重要度に応じて要求耐震性能を区分したものが「要求耐震性能マトリックス」であり、その一例を図-1に示す³⁾。

耐震性能 レベル	構造安全性				
	安全			破壊	
	地震後の使用性				
地震動	無損傷	小損傷	中損傷	大損傷	崩壊
レベル1	□	△	○		
レベル2	タイプⅠ	○	△	□	
	タイプⅡ	○	△	□	

○—○ 最重要構造物 △—△ 重要構造物 □—□ 普通構造物
図-1 要求耐震性能マトリックス

(2) 照査指標

式(1)に示した応答値 S は設計地震動によって構造物に生ずる応答で、慣性力、断面力、変位、曲率、ひずみなどで、選択した照査指標（照査に用いる量）に基づきこの内の1つが選択される。限界値 R は S に対応する照査指標となる。耐震照査で用いられる S と R の照査指標の例は表-1の注1)に示した。

耐震性能照査は、動的挙動に対する照査であるから、死・活荷重に対する安全性照査と異なり、“力”で考えるより、“変形”で考えるほうが分かりやすい。また、最近の耐震規準・指針では最大強度点（図-2の H_{max} ）を必ずしも構造安全性に対する限界状態ではなく、 H_{max} より低減した $\alpha \cdot H_{max}$ を終局点としているものが多い³⁾。したがって、地震による応答変形が終局点に対応する変形 δ_u より小さければ安全と考える変形照査法の方が合理的かつ明解である。

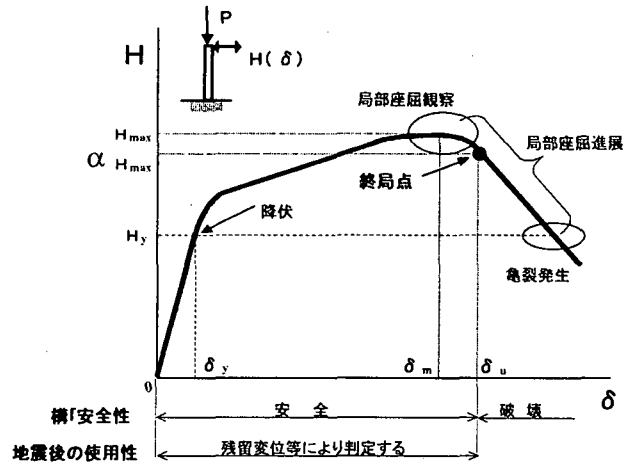


図-2 繰り返し荷重を受ける単柱式鋼製橋脚の水平荷重—水平変位履歴曲線の包絡線と損傷度関係のイメージ図

鋼構造物の場合、変位あるいは有効破壊長領域における平均ひずみで照査する方法が推奨される。変位による照査は、照査すべき変位の位置が明らかな単柱式橋脚、長方形ラーメン橋脚などに用いられるが、アーチ橋などでどの点の変位を照査すべきか分からない場合がある。そのときは、ひずみあるいは曲率による照査が考えられ、鋼構造物の終局点は構成要素の局部座屈によって決まる場合が多いため、曲率よりも板要素の平均ひずみで行うほうが精度は良くなる。地震後の使用性照査は残留変位で行われているが、後述のように最大応答変位、曲率、ひずみによって代用することもできる。そのうち、推奨される照査指標は安全性に対する照査と同じ理由で変位あるいはひずみである。

(3) 構造安全性に対する照査法

式(1)の S, R は表-1に示した耐震解析法、経験則、経験式によって求められる。 S, R の求め方の組み合わせによって耐震照査法は表-2のように4種類に分類されよう。以下にそれぞれの耐震照査法を説明する。実際の照査は安全係数を考慮して設計値（それぞれ、 S_d, R_d ）を決めるが、以下の議論では安全係数は対象にしないものとする。

a) 経験式に基づく方法

この方法は、実験あるいは高度な解析（<Static> <N3>, <Q.Static> <N3>）によって求められた $H-\delta$ 関係の経験式を基に、動的解析あるいは経験則によって応答値 S を求め、先の $H-\delta$ 関係の経験式で定められている限界値 R により耐震照査を行う方法である。現在のところ $H-\delta$ 関係の経験式が定められているのは、単柱式で上部構造重量が橋脚の中心軸に作用するコンクリート無充填の鋼製橋脚に限られている。この $H-\delta$ 関係の経験式では図-2に示す

表-2 解析方法に基づく耐震照査法の分類

略称	求める量	性能照査 応答値(S) ≤ 限界値(R)						適用限界	
		構造安全性			地震後の使用性				
		保有耐力法 $\frac{k_b W}{7} \leq H_y$	変形照査法			変形照査法			
			変位 $\delta_{max} \leq \delta_u$	曲率 $\phi_{max} \leq \phi_u$	ひずみ $\epsilon_{max} \leq \epsilon_u$	残留変位	変位 δ_{max}		ひずみ
① 経験式に基づく方法	S	・動的解析 ・経験則	—	—	—	δ_{max} より推定	δ_{max}	—	中心軸圧縮単柱式鋼製橋脚（1自由度系）のみ適用可能
	R	経験式	—	—	規定値				
② 静的解析に基づく方法	S	・経験則 ・所要降伏震度スペクトル	—	—	—	δ_{max} より推定	δ_{max}	—	1自由度系構造物のみ適用可能
	R	Pushover 解析+破壊基準	—	—	規定値				
③ 静的/動的解析の併用法	S	—	動的解析			動的解析 δ_{max} より推定	δ_{max}	動的解析	多自由度系構造物にも適用可能だが、基本モード卓越が前提
	R	—	Pushover 解析+破壊基準			規定値			
④ 動的解析に基づく方法	S	—	—	動的解析		動的解析 δ_{max} より推定	δ_{max}	動的解析	任意の構造物に適用可能
	R	—	—	破壊基準		規定値			

(注) 1. 経験則：エネルギー一定則，変位一定則など，弾性応答値から非弾性応答値を予測する方法
 2. 経験式：実験あるいは解析結果の統計的処理により得られた予測式

ような最大荷重 H_{max} ，最大荷重変位 δ_m ，95%強度点の変位 δ_{95} の推定式を，無補剛箱形断面，補剛箱形断面，パイプ断面鋼製橋脚に対して種々のパラメータの関数として求められている^{1) 3) 6) 7)}。

応答値 S の計算

動的解析：図-3 を H- δ モデルの骨格曲線として，移動硬化則を仮定して復元力モデルを作成し，1自由度系の地震応答解析を実施して最大応答変位 δ_{max} を求める。

局部座屈による劣化を考慮した2パラメータモデル¹⁾や Damage index モデル¹⁾による1自由度系応答解析モデルもここに分類される。

経験則：図-3 の骨格曲線を用い，各種の経験則（エネルギー一定則，変位一定則など）を仮定して最大応答変位を求めることができる。しかし，一般には動的解析の方が精度がよいので，動的解析を実施するのがよい。

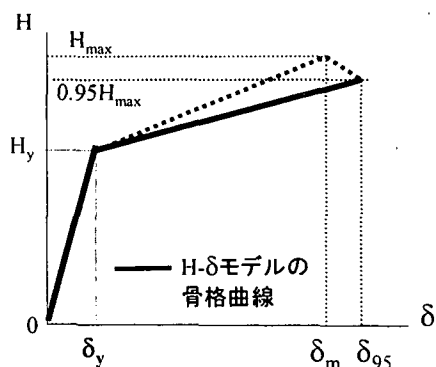


図-3 H- δ モデルの骨格曲線

限界値 R の計算

終局点として 95%強度点を採用すると， δ_{95} の推定式から限界値 R を求めることができる。

適用範囲

- ① 単柱式橋脚
 - ② 上部構造重量が橋脚の中心軸に作用する場合。
 - ③ コンクリート無充填橋脚
 - ④ 補剛箱形，無補剛箱形およびパイプ断面橋脚
- b) 静的解析に基づく方法

この方法は，Pushover 解析を基本にした方法で，現行の道路橋示方書²⁾および新技術報告書¹⁾で用いられている手法である。この方法は，1自由度系にモデル化できる構造を対象としたもので，コンクリート部分充填橋脚にも適用可能である。

応答値 S の計算

応答値は，Pushover 解析結果を基にエネルギー一定則などの経験則，あるいは所要降伏震度スペクトル⁷⁾によって算定する。

限界値 R の計算

表-1 の<Static><N2>解析に基づく Pushover 解析と破壊規準を導入して，構造物の H- δ 関係を求め，終局変位 δ_u ，保有耐力 H_u を求める。破壊規準公式，つまり終局限界ひずみの算定式は実験や部材セグメントに対する解析<Static><N3>あるいは<Q.Static><N3>から定められたものを使う。

適用範囲

- ① 単柱式およびラーメン橋脚（1自由度系構造物）
- ② 上部構造重量は橋脚に対して偏心も可。

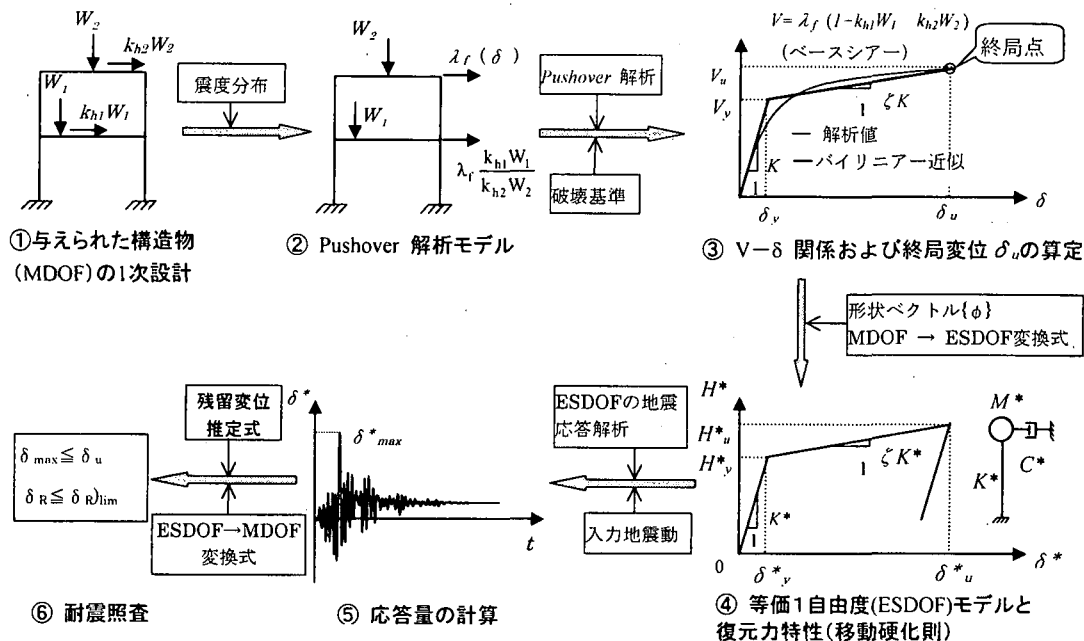


図-4 等価1自由度モデルによる耐震照査の流れ

- ③コンクリート無充填および部分充填橋脚.
- ④補剛箱形, 無補剛箱形およびパイプ断面橋脚. 他の断面形では,破壊基準の整備が必要.

c) 静的/動的解析併用方法

この方法は,「静的解析法に基づく方法」と同じく限界値 R を算定するため Pushover 解析を行うが, 応答値 S を動的解析から求めるところに相違がある. また, 基本モード卓越の多自由度構造物にも適用可能である. したがって, エネルギー一定則などの経験則の精度が悪くなる場合を避けることができる.

応答値 S の計算方法

多自由度系構造物(MDOF)を, モード解析と同じような手法により等価な1自由度系構造物(ESDOF)に置き換え, ESDOF の弾塑性地震応答解析から応答変位を求め,それを MDOF の応答値に変換して算定する. この手法は基本モード卓越が前提であり, 照査の流れを図-4 に示す. 詳細については文献 3),8)を参照されたい. 1~3層のラーメン橋脚の面内挙動および4径間連続橋の面内および面外挙動に対して検討した結果によれば, 式(2)の条件を概略満足すればESDOFによりMDOFの応答を精度よく推定できるようである⁹⁾.

限界値Rの計算方法

Pushover 解析により, 全水平力(ベースシア)と代表点の水平変位関係を求め, 破壊基準を導入して限界値(終局変位, 保有耐力)を求める. この際, 多自由度系構造物では慣性力が2つ以上あり, それをどのような比率で(すなわち, 震度をどのような比率で)増加させていくかが問題となってくる. 文献 3),8)では橋梁構造物に対して簡単な震度一様分布で問題が

ないことが示されている.

適用範囲

- ①多層ラーメン橋脚まで適用可能. ただし, 基本モード卓越が前提. 基本モード卓越の条件は,

$$\frac{M_{\text{eff},1}}{M_{\text{Total}}} > 0.75 \quad (2)$$

としてよい. ここで, $M_{\text{eff},1}$ は1次モードの有効質量, M_{Total} は上部構造の全質量である.

- ②コンクリート無充填および部分充填橋脚.
- ③補剛箱形, 無補剛箱形およびパイプ断面橋脚. 他の断面形状では, 破壊基準の整備が必要.

d) 動的解析に基づく方法

この方法は計算時間がかかるが, 汎用性がありどのような構造物にも適用可能である. この方法による耐震照査のイメージ図は図-5 に示すとおりである.

応答値 S の計算方法

はり要素を用いて多自由度系の弾塑性地震応答解析を実施して, 最も危険な(応答ひずみが最大の)部材セグメントの有効破壊長領域³⁾における平均ひずみの時刻歴 $\epsilon_{a,max}(t)$ を求めると, それが応答値 S となる.

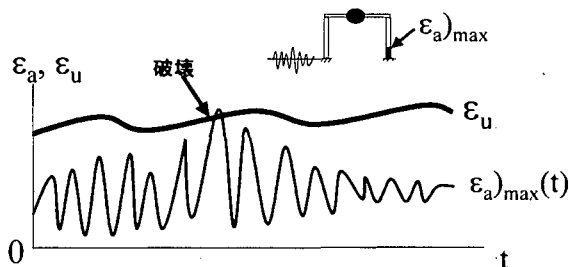


図-5 動的解析に基づく照査法のイメージ図

限界値Rの計算方法

この場合の限界値 R は破壊ひずみ ε_u そのものであり、応答値としての $\varepsilon_a)_{\max}(t)$ がこれを上回らなければ安全ということになる。なお、破壊ひずみは一般に軸力の関数であるため、時刻 t と共に変動することとなる。

(4) 地震後の使用性に対する照査法

新技術報告書¹⁾、道路橋示方書等²⁾では、地震後の使用性は残留変位を用いて照査される。ここでは、まず残留変位の算定手法について述べ、その後に残留変位を用いない照査方法について試案を示す。

a) 残留変位によって照査する方法

残留変位は動的解析を実行すれば直接算定できるが、構成則の影響を強く受けるため精確な構成則を用いなければならない。最も簡単なバイリニア/移動硬化則を用いた場合でも最大応答変位はかなりの精度で予測できることが多いが、残留変位の予測精度は一般に落ちる。従って、修正2曲面⁵⁾や3曲面¹⁰⁾等の繰り返し解析用の高度な構成則を使わないときには、残留変位は最大応答変位の値から推定式によって求めるのがよい。文献3)はコンクリート充填・無充填鋼製橋脚に対して、高度な構成則を用いた動的解析およびハイブリッド地震応答実験の結果から定めた残留変位の予測式をまとめている。

b) 最大応答塑性率(変位)によって照査する方法

上で述べた残留変位の予測式で与えられるように残留変位と最大応答変位には相関関係があるので、残留変位に代えて最大応答変位によって使用性の照査をすることも可能である。これは、鉄道構造物等設計標準¹¹⁾の考え方でもある。

残留変位の予測式から、残留変位を制限値以内に収めるための最大応答塑性率(変位)を計算した結果は表-3に示すようになる。道路橋示方書の残留変位制限値 $h/100$ に収めるためには、応答塑性率は、コンクリート無充填の場合には5.31以内、コンクリート充填の場合には9.41以内に収める必要があることを示している。

c) 応答ひずみによって照査する方法

この方法は実用化されていないが Caltrans¹²⁾で検討されている方法である。この方法は弾塑性地震応答解析により、もっとも危険な断面のひずみ(または曲率)の時刻歴をモニターし、それをある制限以内に収めることにより地震後の使用性の照査を行う。この方法は基本的に応答塑性率で照査するのと同じであるが、より汎用性のある方法である。ただし、残留変位による照査は上部構造の地震後の機能保持を照査する意味も含むと思われるが、応答ひずみによる照査は部材の補修性に着目した照査と言えよう。

表-3 残留変位制限値以内に収めるための応答塑性率の値

h/δ_R	100	150	200	300
コンクリート無充填	5.31	4.01	3.39	2.80
コンクリート部分充填	9.41	5.91	4.35	2.95

(注) 表中の値は応答塑性率 δ_{\max}/δ_y

4. 鋼製ラーメン橋脚の耐震設計法

ラーメン橋脚を設計するためには前章に述べた、静的解析に基づく方法、静的/動的解析の併用法、動的解析に基づく方法が適用可能である。ここでは不静定構造物であるために考えなくてはならない設計コンセプトについて論じる。

(1) 柱と梁の損傷順序

建築物では Strong Column / Weak Beam といわれ、建物を自立させるために重要な柱は損傷させず、それぞれの床のみを支えている梁を損傷させてエネルギー吸収するという考え方がある。

橋脚も倒壊してはならないが、建築物とは置かれている状況が相違している。まず①梁の下には道路などの施設が存在することが多い、②梁に積載する荷重は上部構造からの大きな集中荷重であって、移動したり取り除くことは困難である、③層の高さは建物と比べると高い、などである。これらの相違点から図-6に示すように地震後の点検・補修のためには、梁よりも柱を損傷させた方が良さそうである。しかしながら、橋脚が倒壊するほどの大きな損傷は許されるものではなく、補修可能な損傷レベルにおいては柱の方を損傷させた方がよいことである。ただし異なる状況の場合、例えば荷重が載荷されない中間梁は損傷させた方がよいこともあり得るので、条件に応じて考えることが肝要である。

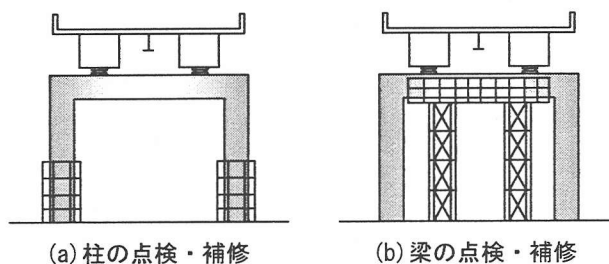


図-6 橋脚の点検・補修

(2) 終局限界の設定

部材セグメントの破壊基準(限界ひずみ算定式)は、図-7中に示す M- θ 曲線にあるようにセグメントの断面力が最高荷重点から95%点まで下った所を終局と定義したものである。このように定義した理由は、最高荷重から95%程度の点では繰り返し劣化の影響を無視し得ることと、この5%の間で変形が大

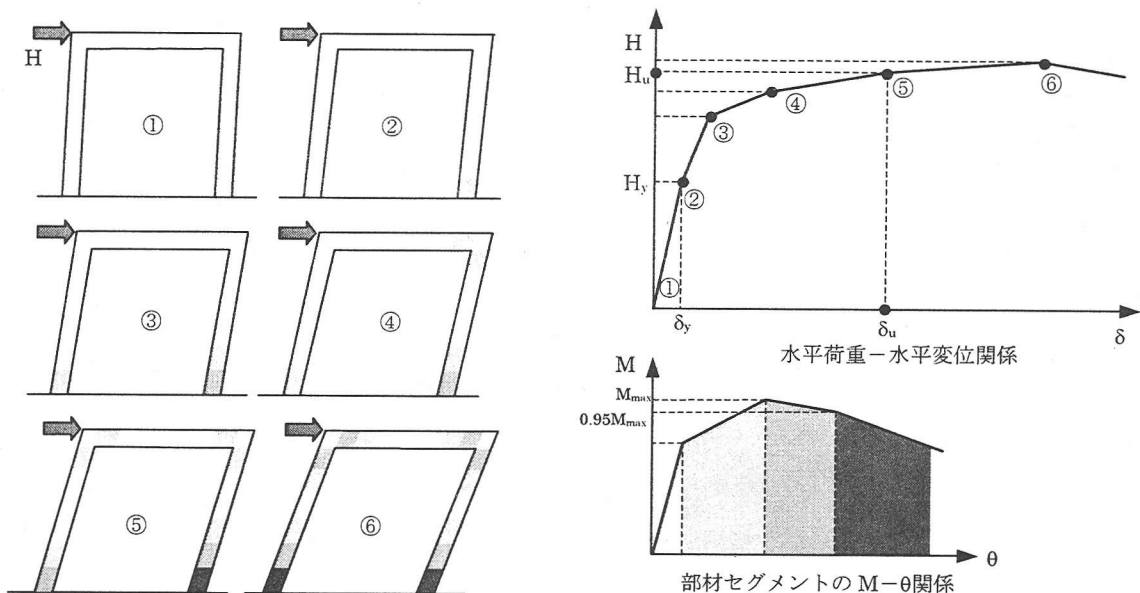


図-7 ラーメン橋脚の損傷イベントとH- δ 曲線 (イメージ)

大きく伸びる場合があるためである¹⁾。

静定構造である単柱橋脚は、基部または断面変換部の部材セグメントが破壊規準に達した時に全体が終局限界になる。不静定構造であるラーメン橋脚も同様に、すべての部材セグメントの中であるセグメントが最初に破壊基準に達した時を全体の終局状態と見なすのが最も簡単な定義と考えられる。そこでラーメン橋脚の荷重-変位曲線と各部の損傷状況の推移を考えてみる。図-7は門形ラーメンの損傷イベントとH- δ 曲線のイメージを表したものである。一般にラーメン構造は、あるセグメントが初降伏(②この場合は右柱基部)しても不静定構造であるため力が再配分され(③~④)、単柱構造に比べ荷重はかなり増大していく。荷重が増大していくと1つのセグメントが終局限界の定義点に達するが(⑤この場合は右柱基部)、このときをラーメン橋脚全体の終局と見なす。しかし、ラーメンは崩壊メカニズムを形成しておらず、まだ荷重を増加することができる。最終的に不静定次数が零になる(⑥この場合は4つのセグメントでM- θ 関係の劣化域に入る)と、ラーメンは不安定になり荷重が低下していく。

図-7でラーメンの終局定義点⑤は⑥に比べ安全側であり、⑥を期待しないのは不経済と思われるかもしれない。しかし現在⑥を期待しない理由は、まず局部座屈による強度劣化を考慮する解析<N3>は、まだ高度であり実用の設計には適さないからである。また、⑥を期待すると最初に終局定義点(95%)に達したセグメントはさらに変形が進んでいき、鋼部材では95%点を過ぎると局部座屈変形が目に見えて大きくなっていくことが分かっている。したがって、95%点を超える場合はどの程度の局部座屈なら

許容できるかを補修性など観点から検討する必要があるが、まだ検討されていないからである。

(3) アンカー部あるいは基礎に作用する反力

道示²⁾ではアンカー部を橋脚の終局耐力以上の降伏耐力を持つように設計することになっている。また、基礎も橋脚の終局耐力に対して1.1倍以上の降伏耐力を持つように設計することになっている。1.1倍という耐力差はキャパシティデザインの考え方を取り入れたものであろう。

しかし、ラーメン橋脚においては橋脚の終局耐力とアンカー部あるいは基礎に作用させる設計反力の取り方に疑問を感じることもある。例えば、上層が単柱形式の2層ラーメン橋脚や梁スパンが極端に大きなラーメン橋脚である。このような場合に合理的な考え方は、地震時の最大応答反力とすることだと思われる。ただし、様々な不確定性を考え、キャパシティデザインの重み係数のように1.1~1.2倍しておくのが良いと思われる。

(4) 柱の軸力変動

軸力変動を考慮するためには軸力変化を考慮できる解析法を使用しなければならない。M- Φ 構成則でも軸力変化を考慮できるものがあるが、数値解析上、特別な仮定を設けているようである。一方、ファイバーモデルでは断面内の応力分布に基づいて軸力と曲げモーメントが算定されるので、軸力変化が自然に取り入れられる。したがって、ファイバーモデルの方が望ましく、鋼構造の非線形解析では従来からファイバーモデルの使用が多い。

次に軸力変化によって生じる設計上の問題点を圧縮と引張の変化に分けて述べる。

圧縮側:破壊基準には適用範囲に軸力比 P/P_y の制

限があるものと無いものがある。軸力変動の大きさを考慮して適切な破壊基準算定式を用いなければならない。また、軸力比が大きくなると柱全体の座屈を照査しなければならないが、これは有限変位解析<N2>を取り入れることで考慮できる。

引張側：鋼製橋脚は自重が比較的小さく、断面全体が純引張になる可能性がある。柱断面は引張に対して十分な抵抗を持つが、レベル2の地震動ではアンカー部の設計が困難になる可能性もある。

6. まとめ

まず、鋼構造物の耐震解析法について、解析の種類(静的、静的繰返し、動的)、幾何学的非線形性、および材料的非線形性に応じて11種類に分類した(表-1)。そして設計レベルでは棒要素によるPushover解析<Static><N2>、弾塑性時刻歴応答解析<Dynamic><N2>が基本であり、局部座屈は解析で考慮せずに終局状態の判定で考慮する立場を明確にした。

耐震性能の照査は、構造安全性と地震後の使用性について行うことを示した。構造安全性照査は“力”を用いる保有耐力法と“変形量”を用いる変形照査法があるが、変位あるいはひずみを指標とする変形照査法の考え方が明解である。地震後の使用性照査は残留変位によって行われているが、残留変位を正確に求めることが困難な現状から、構造安全性照査と同じように、最大変位および最大ひずみに基づく変形照査法も検討されている。

耐震照査法は使用する解析方法に基づいて4種類に分類し、それぞれの方法および特徴を概説した(表-2)。1次モードが卓越する構造物に対しては、限界値RをPushover解析、応答値Sを等価1自由度系の動的解析で求める静的/動的解析併用法が優れていると思われる。これは静的解析法におけるエネルギー一定則の精度が悪い場合を避けることができ、簡単な1自由度系動的解析で多くの多自由度系構造物に適用可能だからである。高次モードの影響が大きい多自由度構造物の場合は、<Dynamic><N2>解析による地震応答解析を実施し、その終局判定に破壊基準(破壊ひずみ)を導入する動的解析法が有望である。

最後に、ラーメン橋脚の耐震設計の考え方の一例を示した。①地震後の点検補修を考慮して柱の損傷を優先する。②ラーメンの終局限界は、第1セグメントが終局限界に達したときとする。③アンカー部の設計荷重は橋脚の終局耐力が基本だが、最大応答反力の1.1~1.2倍にする考え方も検討する必要がある。④柱の軸力変動を考慮するためにファイバー

モデルを使うのが望ましい。⑤軸力変動の影響に関して、圧縮に対して破壊基準の適用範囲に注意し、全体座屈を考慮するために有限変位解析とする。引張に対してはアンカー部の反力に注意する。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究WG: 鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術, 1996.7.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・V耐震設計編, 1996.12.
- 3) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造物の耐震検討小委員会、日本鋼構造協会・次世代土木鋼構造研究特別委員会・鋼橋の耐震設計小委員会: 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, 2000.4.
- 4) 渡辺浩, 崎本達郎: 繰返し荷重下におけるコンクリート充填鋼管柱の終局挙動の簡易解析法とその適用性に関する検討, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1461-1468, 1999.3.
- 5) 坂野茂・宇佐美勉・水野英二: 修正2曲面モデルによる板要素の繰返し圧縮・引張弾塑性有限変位解析, 土木学会論文集, No.525/I-33, p.1-15, 1995.1.
- 6) Gao, S., Usami, T. and Ge, H.: Numerical study on seismic performance evaluation of steel structures, NUCE Research Report, No. 9801, Dept. of Civil Engineering, Nagoya University, 1998.
- 7) 鄭沂, 葛漢彬, 宇佐美勉: 鋼構造物の強度と変形能の統一的評価法, 第3回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, 土木学会鋼構造委員会, pp.25-32, 2000.
- 8) 宇佐美勉, 鄭沂, 葛漢彬: Pushover解析と等価1自由度モデルによる鋼製ラーメン橋脚の耐震照査法, 土木学会論文集, No.626/I-48, pp.231-240, 1999.7.
- 9) Usami, T., Zheng, Y. and Ge, H.: A seismic design method for thin-walled steel frame structures, submitted to J. of Struct. Eng., ASCE.
- 10) 後藤芳顯, 王慶雲, 高橋宣男, 小畑誠: 繰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.
- 11) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計標準), 1999.
- 12) Duan, L. and Li, F.: Seismic Design Philosophies and Performance-Based Design Criteria, in Bridge Engineering Handbook, edited by Chen, W.F. and Duan, L., CRC Press.