

## 6.1 概説

土木学会の耐震設計に関する第1次および第2次提言を受けて検討が進められてきている鋼構造物の耐震設計の現状を概観すると共に、その高度化に必要な研究開発の課題について述べる。土木鋼構造物として、橋梁、タンク、ゲート、クレーン、パイプライン、送電鉄塔などがあるが、ここでは対象構造物を主として橋梁とする。しかし、その主な考え方は、他の土木鋼構造物に対しても有効である。

土木学会の提言の内、鋼構造物の耐震設計に関連する主要な内容は以下のようである。

- ・地震動のレベル（レベル1，2）と重要度に応じて構造物に要求される耐震性能を定めること。
- ・重要な構造物および早期復旧が必要な構造物は地震後、比較的早期に修復可能であること。
- ・上記以外の構造物に対しては構造物全体系が崩壊しないこと。
- ・鋼構造物に対しても保有耐力や変形性能の照査を行うこと。
- ・不静定次数が低い構造物は保有耐力の確認を厳格に実施すること。
- ・不静定次数が高い構造物は損傷過程を考慮した変形性能解析が望ましいこと。
- ・変形性能を高めるための断面構成あるいは断面内応力の制限についての研究開発を行うこと。
- ・免震・制震技術等の新技術の積極的導入を図ること。

## 6.2 設計の考え方

- (1) 鋼構造物の耐震設計においては損傷程度を考慮して耐震性能を照査する設計法とするのがよい。
- (2) 鋼構造物の基本要求性能としての構造安全性と復旧性を考慮して、限界状態は終局限界と損傷限界となる。
- (3) 終局限界には変形限界と低サイクル疲労損傷を考慮するのがよい。
- (4) 損傷限界は地震後構造物に残留する変位（変形）で照査するのがよい。

性能（照査型）設計では構造物の要求性能に対応する限界状態が明確にされなければならない。橋梁構造物の限界状態は基礎、アンカー部、橋脚、支承、落橋防止システム、上部構造それぞれに対し種々考えられる。その内、橋脚および支承の一部（免震支承）などについては終局状態に至るまでの弾塑性挙動はかなり明らかにされているが、その他は研究途上のものが圧倒的に多い。従って、現行の道路橋示方書<sup>5), 2)</sup>では、

塑性変形によるエネルギー吸収・消散を期待する部材は橋脚および免震支承に限定し、他の部材は基本的には弾性限内に収める設計法を採用している。すなわち、“損傷過程に立ち入って耐震性能を照査する（第二次提言）”際に、Keyとなる部材は現段階では橋脚と免震支承であり、構造システムとしての弾塑性域での耐震性能照査を比較的信頼性を持って行える最小の構造単位は、橋脚と免震支承よりなる部分構造のみである。

実験から得られた土木鋼構造物（鋼製橋脚）の限界状態については5.4.1に詳述されているが、比較的薄肉な板を溶接集成して製作される土木鋼構造物の場合には、その耐震性能に深く関わる特性は弾塑性域での連成座屈現象（構成板要素の局部座屈と構造全体座屈）および材料の低サイクル疲労及び脆性破壊現象であり、後者には溶接部の施工の良否も関わってくることになる。

鋼構造物の基本性能として表-6.1に示すように構造安全性と復旧性を考えると、限界状態はそれぞれ終局限界と損傷限界となろう。この表には終局限界として変形限界と低サイクル疲労限界（ここでは塑性ひずみの繰返しによるき裂の発生・進捗とその後に生じる脆性的な不安全破壊を含む）の2つが挙げられている。変形限界は、経済性、設計の簡便性等を考慮して、繰返し水平力を受ける構造物の実験あるいは解析で得られる水平荷重—水平変位履歴曲線の包絡線において、水平荷重がピークを過ぎて少し低下した点（例えば、後述の図-6.1の破壊点すなわち95%強度点）の変位などを採用するのがよいであろう。鋼製橋脚モデルの実験によれば、95%強度破壊点では、局部座屈変形により橋脚壁面に板厚程度の面外たわみが生じることになる。変形性能の照査は、地震応答解析による最大応答水平変位（または変形） $\delta_{max}$ と破壊点に対応する終局変位（または変形） $\delta_u$ の間で行うことになる。低サイクル疲労照査は疲労き裂発生位置での最大局部ひずみと低サイクル疲労強度（ひずみ）及び破壊じん性値との間で行う。ただし、設計の段階で局部ひずみを算定することは難しいので、局部座屈を考えない nominal なひずみと局部ひずみの対応をあらかじめ求めておき、前者を用いて照査するのが実用的であろう。

表-6.1 鋼構造物の要求性能

基本性能	限界状態	評価性能	照 査	
			応答値 S	限界値 R
(1) 構造安全性	終 局	変形性能 (保有耐力)	最大応答変位 $\delta_{max}$ (等価水平力 $k_{he}W$ )	終局変位 $\delta_u$ (保有水平耐力 $H_u$ )

		低サイクル疲労	応答局部ひずみ	低サイクル疲労強度
(2) 復旧性	損傷	補修性	残留変位 $\delta_R$	残留変位制限値

(注1) 照査は  $S \leq R$  で行う。安全係数は別途考慮する。

(注2) 残留変位制限値の例は表-6.3 参照。

もう一つの基本性能としての復旧性は、地震後の構造物の補修に要する期間すなわち構造物の損傷度に関係するものである。この照査は地震後に構造物に残留する変位（変形）と構造物の重要度ならびに想定地震動によって決められる残留変位（変形）制限値によって行うのが分かりやすいであろう<sup>5),1)</sup>。なお、構造物の最大応答変位（変形）と残留変位の関係が実験などであらかじめ分かっているならば、復旧性の照査も最大応答変位（変形）によって行うことも可能である。鉄道構造物等設計標準<sup>5),3)</sup>では、この照査法を採用している。

以上のことを踏まえ、ここで提案する鋼構造物の耐震設計の考え方を要求耐震性能マトリックスの形に表すと表-6.2 のようになる<sup>5),1)</sup>。想定地震動は現行の道路橋示方書にならい3タイプとする。耐震性能レベルは、構造安全性として2段階、復旧性として5段階に分類される。構造物は、最重要、重要、普通の3段階に分けられ、それぞれの構造物に付与すべき耐震性能レベルが想定地震動に対応してマトリックスの形で与えられている。

例えば、大地震（レベル2，タイプII）時には、

- ・ **最重要構造物**：たとえ損傷が生じても、ごく短期間で修復可能な損傷（小損傷）のみが許容される。主要幹線道路に建設される高架橋などがその例である。
- ・ **重要構造物**：最低限の機能は維持されるが修復に相当な期間（2週間から2ヶ月程度）を要する（中損傷）。たとえば、橋梁の場合には、災害復旧用の緊急車両は地震後直ちに通行させることができるが、普通車両の通行には相当な補修期間を要する。
- ・ **普通構造物**：大地震によって崩壊はしないが構造物の機能は失われ、再使用のためには補強が必要とされる（大損傷）。

表-6.2 要求耐震性能マトリックス

耐震性能 レベル		構造安全性				
		安全				破壊
地震動		復旧性				
		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

容  
認  
不  
可

表-6.2 中の耐震性能レベルの構造安全性，復旧性は前述の方法で照査されるが，復旧性のレベル（無損傷～崩壊）は，対象とする構造物に対して個別に決められるべきものである．鋼製橋脚の場合には例えば新技術報告書<sup>5).1)</sup>で提案されている表-6.3 がある．同案によれば，補修可能な損傷は中損傷までで，大損傷となると補強が必要となり，復旧までに長期間を要することになる．表中にはそれぞれの損傷度に対応する残留変位の制限値の暫定案も記載されている．例として，非常に重要な路線に建設され，復旧に要する期間が短期間であることを要求される橋梁（最重要構造物）の場合，レベル2地震動に対しては小損傷（2週間以内で復旧可能）まで許容され，残留変位制限値は  $h/300$  ( $h$ =橋脚高さ)となる．

表-6.2 は要求耐震性能マトリックスと呼ばれる．構造物の重要度（グレード）に応じて耐震性能レベルを変える設計法は，性能設計での中核をなす考えである．今後，種々の構造物およびその構成部材・部品の要求性能を早急に調査研究する必要がある．その際，構造物を一つのシステムとして捉えて要求性能，限界状態を定めることが肝要である．

以下の節では，表-6.1 の限界値  $R$  の算定式あるいは計算方法（6.3），応答値  $S$  の計算方法（6.4），照査方法（6.5）の現状を順次述べる．

表-6.3 鋼製橋脚に対する損傷度の定義と残留変位制限値案<sup>5),1)</sup>

損傷度	損傷内容および復旧期間	残留変位(制限値)
無損傷	①損傷がほとんどない。 ②目視点検後、すぐに普通の交通が可能な状態。	$h/1000$ ( $h$ = 橋脚高さ)
小損傷	①2週間以内の補修で復旧可能な程度の損傷で、例えば伸縮継手の損傷。 ②または、補修をしながら普通車両を通せる程度の損傷	$h/300$
中損傷	①最低限の機能を維持している程度の損傷 ②災害復旧用、人命救助用の緊急車両のみ通せる程度の損傷で、例えば、支承などの損傷により路面に段差が生じた場合や、路面に隙間が生じた場合など ③復旧に2週間～2ヶ月を要する。	$h/150$
大損傷	①崩壊はしないが、橋としての機能を失っている状態。 ②補強をすれば再使用可能だが、長期間(2ヶ月以上)を要する	$h/100$
崩壊	①崩壊と見なされる程度の損傷 ②骨組線の変化が極端に大きく、車両通行が不可能な程度の損傷 ③撤去・建て替えが必要	$h/100$ を越える

### 6.3 保有すべき耐震性能

- 1) 鋼構造の変形性能の算定は弾塑性有限変位解析により行うが、その精度の向上および適用構造物の範囲拡大が必要である。
- 2) 鋼構造の変形性能向上のための鋼材の開発が必要である。また、コンクリートを充填したり、低サイクル疲労破壊を防止するための、構造ディテールなども検討する必要がある。

#### 6.3.1 部材と構造物

ここでは、鋼製橋脚の保有する性能  $R$  (表-6.1の限界値)の内、塑性化、座屈、 $P-\Delta$ 効果などに起因する構造不安定によって生ずる安全性限界の算定方法、耐震性能向上策、実橋脚の耐震性能レベルなどについて概観する。具体的には、後述の図-6.1の変形性能 $\delta_u$ 、 $\delta_m$ 、強度 $H_{max}$ などの量が関与する。なお、限界値 $R$ は本来ばらつきを持った量であるが、ここでは確定量と考える。

##### (1) 変形性能の算定方法および向上策

鋼製橋脚は大きく分けて、(a)コンクリート部分充填橋脚と(b)コンクリート無充填橋

脚に分けられる。道路橋示方書・V耐震設計編<sup>5),2)</sup>では前者に対しては保有耐力法、後者に対しては動的解析法による照査が義務付けられている。ここでは、安全性限界の内、変形性能を取り上げ、それらの算定方法および向上策について述べる。

コンクリート充填鋼製橋脚：上部構造重量を一定に保ち、慣性力に相当する水平荷重を単調に増大させた骨組構造物に対する弾塑性有限変位解析（Pushover 解析）により強度と変形能が算定されている。解析方法の詳細は新技術報告書<sup>5),1)</sup>に記述されている。橋脚の破壊は、クリティカルな部分に設定した構造物内の部材セグメントの内、一部材セグメントが局部座屈によって変形能を失った状態と考えている。単柱式橋脚の場合には、コンクリート充填部と無充填部それぞれのクリティカルな部材セグメントが同時に破壊条件を満たすときが最適なコンクリート充填高さとなり、変形能はほぼ最大となる。コンクリートを最適な高さだけ充填することにより、鋼製橋脚の変形性能は格段に上昇し、7.0以上の塑性率は容易に達成できる。ただし、強度も上昇するため、補強を対象とする場合は低強度のコンクリートを充填することによって極端な強度上昇を避けることが必要である。コンクリート充填鋼製橋脚のPushover解析ソフトは市販されており、単柱式橋脚（上部構造重量が橋脚の中心あるいは偏心して作用する場合）および1層ラーメン橋脚に適用可能である。2層以上の橋脚に対してもPushover解析は可能であるが、その結果をどのような形で耐震照査に利用するかについてはまだ研究途上である。

コンクリート無充填鋼製橋脚：コンクリート無充填鋼製橋脚の強度と変形能はもっぱら繰り返し載荷実験によって求められてきた。しかし、最近では、精度の良い鋼材の繰り返し弾塑性構成則が開発されたことと、強力な汎用構造解析用ソフトが安価に利用できるようになったため、薄肉から厚肉に至るまでの橋脚の強度と変形能が繰り返し荷重下でも解析可能な状態になってきている。現在では、実験および解析結果を基に箱形断面およびパイプ断面の単柱式橋脚の変形能と強度を求めるための経験式が既に提案されている<sup>5),1),5),4),5),5)</sup>。それらは、フランジの幅厚比パラメータ $R_f$ （パイプ断面の場合は径厚比パラメータ $R_t$ ）、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ および軸力比 $P/P_y$ の関数として表されている。ただし、補剛箱形断面の場合には、変形能を増すため縦補剛材剛度 $\gamma$ は最適剛比 $\gamma^*$ の3倍以上としている。橋脚の変形能はパラメータ $R_f$ （または $R_t$ ）、 $\bar{\lambda}$ 、 $P/P_y$ の大きさに反比例するため、それらの値を適度に小さくとることにより、変形能が大きな橋脚（ハイダクティリティー橋脚<sup>5),4)</sup>の設計も可能である。例えば、 $R_f=0.35$ 、 $\bar{\lambda}=0.3$ 、 $P/P_y=0.2$ 程度の橋脚であれば、塑性率6.0程度は確保できる。

上述のように、コンクリート充填の有無に関わらず変形性能の大きな鋼製橋脚は設計可能な状態になっている。どちらが有利な構造であるかの判断は、もう一つの要求性能である復旧性を考えなければならない。そのために応答値が必要であるが、それについては次に述べる。

## (2) 実橋脚の耐震性能レベル

道路橋示方書の震度法によって一次設計された鋼製橋脚が保有している耐震性能はどの程度のレベルにあるかを動的解析によって調べた結果の一部について述べる<sup>5), 5)</sup>.

- ・対象橋脚：補剛箱形断面単柱式橋脚（基部固定）で、①コンクリート無充填橋脚、②コンクリート部分充填橋脚、③免震支承を持つコンクリート無充填橋脚、④免震支承を持つコンクリート部分充填橋脚。コンクリートは最適高さ<sup>5), 1)</sup>だけ部分充填されている。
- ・地震動：道路橋示方書に規定されているレベル2・タイプII地震動の加速度応答スペクトルに適合する地震波（各地盤種について3波で、応答の平均値で評価）
- ・橋脚復元力特性：2パラメータモデル（コンクリート無充填橋脚<sup>5), 1)</sup>およびコンクリート部分充填橋脚<sup>5), 5)</sup>）
- ・免震支承：鉛プラグ入り積層ゴム支承（降伏強度は橋脚のエネルギー吸収量をもっとも小さくなるように定める）

表-6.4は解析結果を示したものである。照査は表-6.1の構造安全性（変形性能）照査と復旧性（残留変位）照査の両方に対して行っている。この表より、コンクリート（強度：200 kgf/cm<sup>2</sup>）を最適高さだけ部分充填すれば、免震支承を用いなくても安全性は満足され、かつ損傷度もほぼ小損傷程度（一部中損傷）に収まり、最重要構造物に対しても適用可能であることが分かる。コンクリート無充填の場合には、前述のようにダクティリティーの大きい鋼製橋脚の設計も可能であるが、残留変位が大きくなる傾向があり、復旧性（機能保持性）の点からは多少不利である。

表-6.4 動的解析から得られた実橋脚の耐震性能レベルの例<sup>5), 5)</sup>

地盤種	橋脚の種類（○：該当）		構造安全性	復旧性
	部分充填 コンクリート	免震 支承		
I			$T \leq 0.6$ 秒で破壊	中損傷以下
		○	安全	小損傷以下
	○		安全	中損傷以下
	○	○	安全	小損傷以下
II			$T = 0.7 \sim 1.1$ 秒で破壊	大損傷以下 ただし $T = 0.9 \sim 1.7$ 秒で崩壊
		○	安全	小損傷以下

	○		安全	小損傷以下
	○	○	安全	小損傷
II I			安全	T $\geq$ 0.7 秒で大損傷, その他は中損傷以下
		○	安全	小損傷以下
	○		安全	小損傷以下 ただし, T=0.6~0.9 秒で中損傷
	○	○	安全	小損傷

注)

1. 橋脚：補剛正方形箱形断面単柱式，幅厚比パラメータ  $R_f=0.35$ ，固有周期  $T=0.3\sim 2.0$  秒
2. 地震動：レベル 2・タイプ 2・I～III種地盤用地震波（応答は 3 波の平均値）
3. 充填コンクリート強度=200 kgf/cm<sup>2</sup>
4. 免震橋脚の固有周期は 2 秒とする。
5. 損傷度は表-6.2，表-6.3 参照

### 6.3.2 鋼材

鋼材や溶接材料は，構造体が耐震上必要な最大限の変形性能を発揮する前に脆性き裂発生などの不安定な破壊を生じることのない性能を有するものとする。地震に対して構造体に塑性変形性能を期待することは，構造体中の各部にかなりのレベルの塑性ひずみが生じることになる<sup>5), 7), 5), 8)</sup>。鋼材の破壊靱性の低下は，生じる塑性ひずみの大きさ，その繰り返し履歴，ひずみ時効，ひずみ速度に依存する。したがって，脆性破壊のような不安定破壊が生じないような破壊靱性を有する材料を選定する必要がある。

従来より，金属材料の破壊靱性はシャルピー衝撃試験で得られる吸収エネルギー値を用いて規定されており，構造用鋼材では 27 ジュール（0℃あるいは-5℃）あるいは 47 ジュールを限界値として材料の選定を行っている。したがって，構造体の塑性変形性能上クリティカルになる部材・部位に用いる材料については，ひずみ履歴による破壊靱性の劣化分を考慮して，その材料に必要な吸収エネルギー値を定めることになる。そのためには地震により生じるであろうひずみ履歴を設定する必要がある。これについてはこれからの研究課題と考えているが，考え方は以下の通りである。

次の 2 つのケースのひずみ履歴条件下で吸収エネルギー値が 27 ジュール（B 種鋼材）あるいは 47 ジュール（C 種鋼材）を満たすような鋼材を選定する。

(1) レベル 1 地震に対して

供用期間中に想定する地震の数：3，



繰り返されるひずみ：1%，

1地震での繰り返し数：10回，

従ってひずみ範囲1%で30回のひずみ履歴とひずみ時効を考慮する。

(2) レベル2地震に対して

供用期間中に想定する地震の数：1，

繰り返されるひずみ：10%，

1地震での繰り返し数：5回，

ひずみ時効は考慮せず。

これらの繰り返されるひずみの大きさと繰り返し数は、さまざまな地震波に対する動的応答解析から求められる破壊が問題となる部位における局部ひずみ履歴に対して線形被害則を適用して、計算した結果である。ただし、限られた構造形式についての試算であり、このような条件を満たす鋼材についても今後の課題であるが、100～200ジュールの吸収エネルギーを有しておれば上記の例の要求は満たせると考えられる。このような鋼材を耐震性能鋼材として規格化する。

今後の研究課題ではあるが、現行のB種鋼材の27ジュール、C種鋼材の47ジュールに加えて、100ジュール、150ジュールおよび200ジュールとした鋼材の規格をつくり、想定されるひずみ履歴の程度によって鋼材を選定することも考えられる。なお、冷間加工に耐えられる鋼材として、150ジュールおよび200ジュールの鋼材規格の規定が既に道路橋示方書にある。

### 6.3.3 構造詳細

ラーメン橋脚の隅角部、橋脚の基部、橋脚柱の板厚変化部などではその形状変化に伴うひずみ集中が生じ、塑性ひずみの繰り返しによる安定き裂進展（いわゆる低サイクル疲労）が生じる可能性がある。低サイクル疲労き裂は脆性破壊などの不安定破壊の起点となる可能性があり、その発生を防止する必要がある。そのためにはひずみ集中の面から構造ディテールを照査する必要がある。低サイクル疲労の防止の照査は6.2.2で設定した2ケースのひずみ履歴に対して、設計ひずみ範囲—寿命線図を用いて行う。設計ひずみ範囲—寿命線については、ここで必要となるひずみの繰り返し数が100回以下で精度が高い必要があり、今後の検討が必要である。

## 6.4 耐震解析法

(1)耐震性能の照査を行うための地震時挙動の推定には、非線形解析法が不可欠

であるが、その精度向上を図る必要がある。

(2)複雑な鋼構造物に対しては、システムとしての耐震性能の把握が必要であるが、その算定の精度向上のためには、大型ないしは実物大実験を行うのがよい。

前述の通り、耐震解析により、(1) 保有耐力の確認、(2) 損傷過程を考慮した変形性能の確認、(3) 塑性域での座屈と低サイクル疲労などによる構造物全体系の崩壊の推定などを適切に行う必要がある。設計段階における従来の耐震解析は、多質点はりモデル（タンク、容器類についてはシェルモデル）に基づいて導かれた運動方程式に対して、

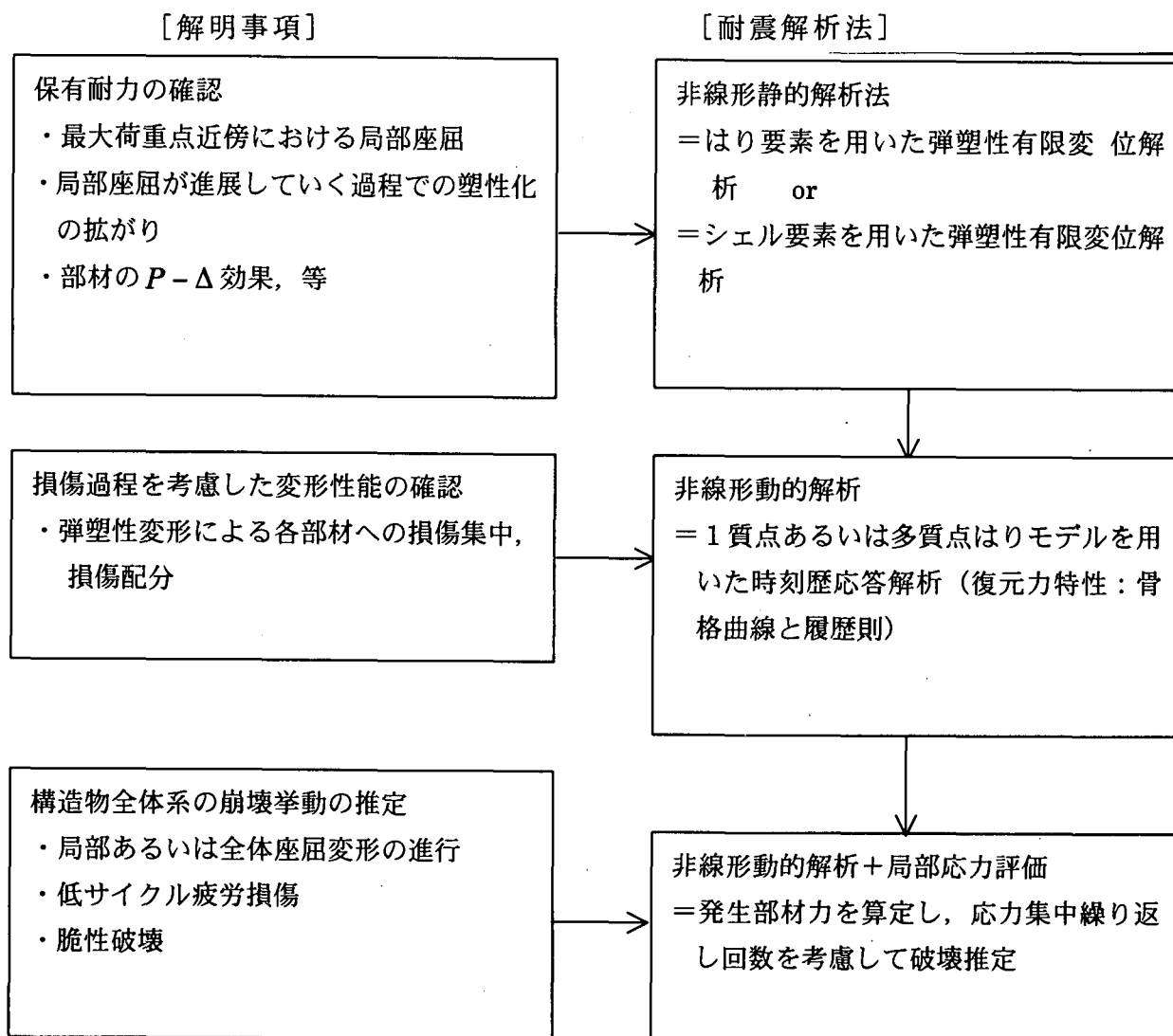
- ・直接積分による時刻歴応答解析
- ・周波数応答解析
- ・固有値解析の後、時刻歴解析またはスペクトルモーダル解析

が行われてきたが、これらは解析手法としての限界もあり、大部分が線形解析の範囲に限られていた。

今後、土木学会の耐震設計に関する提言に沿って、上記(1)～(3)のような検討を進めるにあたっては、非線形解析が不可欠であり、精度の高い解析結果を得るための技術的知見を共有できるように、非線形解析法のガイドラインを作成する必要がある。

### 6.4.1 耐震解析法の分類

表-6.5 耐震上の説明事項に対する解析法の分類



構造物への地震動の荷重効果は、一般にエネルギー入力としてとらえることができる。一方、これに対する構造物の抵抗力は、エネルギー吸収能力としてとらえられる。したがって、構造物の各構成要素はエネルギー入力に見合ったエネルギー吸収能力を備えたものでなければならない。地震力の場合には、座屈後の構造物への作用は地震動の特性と構造物の非線形な動的応答特性により定まるものであり、局部座屈の発生そのものを構造物の破壊あるいは終局状態と考える必要はない。地震動下の構造物の終局状態は、構造物が吸収し得る限界を超えてエネルギーが投入されることにより過大な変位やひずみが生じる状態である。このような考えに基づき、図-6.1 に示されたような荷重-変位関係を的確に把握した上で、保有耐力、損傷過程を考慮した変形性能、構造物全体系の崩壊、等の評価を的確に行うための耐震解析法は表-6.5 のようになると考えられる。

## 6.4.2 非線形静的解析

非線形静的解析は、はり要素を用いた骨組としての弾塑性有限変位解析とシェル要素を用いた弾塑性有限変位解析に分けられる。はり要素を用いた骨組としての解析は、5.2.1で述べたPushover解析のことである。シェル要素を用いた弾塑性有限変位解析は、まだ研究レベルの道具であるが、保有耐力の確認に留まらず、損傷過程を考慮した変形性能、構造物全体系の崩壊等の評価の基本になるものである。非線形静的解析は静的載荷実験に置き換えることも可能であるが、模型製作、載荷条件等に細心の注意を払った実験を数多く実施するのは負担が大きいため、主要なパラメータ以外はコンピュータシミュレーションを行うのが現実的である。

非線形静的解析による解明事項は、

- a) 座屈荷重値（最大荷重値）
- b) 座屈モード
- c) 座屈前の荷重－変位関係（特に、初期剛性）
- d) 塑性率
- e) 座屈後の荷重低下特性
- f) 座屈のしわを発生した部分での局所的応力分布
- g) 繰り返し荷重下での挙動

などであるが、

- i) 要素の選択と要素分割
- ii) 材料物性値
- iii) 降伏条件と流れ則：ミーゼスの条件、J2流れ則
- iv) 硬化則：等方硬化、移動硬化、修正2曲面モデル等
- v) 増分法：変位増分法、荷重増分法、弧長増分法
- vi) 載荷条件：一方向載荷、繰り返し載荷、2軸載荷（水平・上下地震動）
- vii) 初期不整の設定
- viii) 解の収束条件、精度

などに十分配慮する必要がある。まず、信頼できる実験結果、あるいは文献に示された解析結果などと詳細に比較検討した上で、解析結果を活用することが望まれる。

## 6.4.3 非線形動的解析

1次モードが卓越する曲げせん断系の弾塑性応答であれば、1自由度系に置換して骨格曲線・履歴則を適切に設定し解析することにより、非線形動的効果を比較的容易

に設計に反映させることができる。

一方、より複雑な振動特性を有する構造物に対しては、多自由度系としての弾塑性挙動を考慮した評価手法が必要となる。特に多自由度系では弾塑性変形の各部材への配分、即ち損傷集中、損傷分配を評価しつつ解析する必要があり、解析結果を設計に反映させることが重要である。これにより、損傷過程を考慮した変形性能の確認が可能となる。

解析法としては、

a) 直接積分による時刻歴応答解析

- ・ 1質点あるいは多質点はりモデルを用いた弾塑性有限変位解析
- ・ 1質点あるいは多質点はりモデルを用いた等価線形化解析

b) 骨組構造を対象とした設計用の簡易解析

- ・ インクリメンタル・ヒンジ (Incremental Hinge) 法 (構造物の弾塑性挙動を、応答スペクトルを用いて評価する簡易評価法。各部材の崩壊モーメントをあらかじめ求めておき、順次崩壊モーメントに達した部材をヒンジに置き換えていく方法)

などがある。損傷集中、損傷分配に対する影響因子としては、構造形態、節点質量比、要素剛性比・耐力比、復元力の履歴特性、入力地震動特性などがあげられる。

さらに、塑性域での座屈と低サイクル疲労などによる構造物全体系の崩壊を推定するためには、局所の応力 (ひずみ) 集中評価が必要になる。板・シェルの局部座屈については、既に多くの知見があり、各々の座屈モードに対して評価式が提案されている。疲労損傷については、非線形動的解析結果から振幅と繰返し回数をカウントし、マイナー則により評価するのが一般的である。脆性破壊については、6.2.2 に述べた通りである。

#### 6.4.4 構造システムとしての耐震性能

鋼構造は高い材料強度、高い加工性などの利点があり、コンクリート構造などでは対応できないところに用いられることが多い。そのため往々にして、形状として複雑でかつ薄肉の部材から構成される構造形態となる。このことは単体としての地震時挙動も鋼構造物は複雑になる面があり、設計を難しくしている状況がある。

激しい地震動に対しては損傷を許すという考え方を構造システムに適用するとき、当然考えられるのは、システム全体に地震時損傷を分散させ、システム全体で対応するという考え方である。どのように損傷を各要素に配分するかは各要素の損傷が全体機能に及ぼす影響の評価とも絡む問題であり、実際のシステムを対象とした時、その評価手法が確立しているとは言えない。また、仮にあるべき損傷の最適な分散が規定

できたとしても、複雑な非線形特性をもつ各要素を実際の地震時に所定の損傷レベルに分散させることは、入力地震動のレベルによるだけではなく、各要素の非線形特性の把握精度にも大きく左右することが分かっており、その実現は容易ではない。

逆に、ある特定の要素に損傷を意図的に集中させ、地震後それを交換もしくは修復するという考え方もある。このやり方は地震後一時的にシステムが機能しなくなることを容認することになるが、その復旧が迅速であれば、結果的には損失が少なくなる可能性も高い。また、この考え方は、損傷を受けるべき要素の耐力を他の要素に比して弱くすることで実現可能であり、難しさは相対的に少ないと言える。

しかし、高架橋を例にとれば、地盤・基礎・脚・支承などの一つ一つの構造要素の力学的特性が大きく異なっており、一つの要素のモデル化の誤差が全体の挙動を大きく変えてしまう可能性も高いことを理解すべきである。すなわち、一つ一つの要素のモデルの精度レベルを考えたとき、現在行われている全体系の非線形応答シミュレーションの精度については残念ながら自信を持って答えられないのが現状である。

このような状況の中では、実験的裏付けのある、力学特性の比較的分かっている要素に損傷を集中させる耐震設計が無難と言え、基本的には橋脚に損傷を集中させるキャパシティデザイン的な設計方針をとっている、新しい道路橋示方書耐震設計編の考え方は理解できることである。しかし、この設計手法は前述のように一つの考え方にすぎず、それが最適である保証はどこにもない。橋脚に損傷を集中させるとき、その残留変位が橋の機能の上からクリティカルになるが、それを抑えるために設計上の制約が強くなる。また、当然、基礎・支承の耐力も安全をみて大きくとることが要求され、経済性の面からみても課題は多い。

個々の要素の地震時極限挙動の理解を深めることが構造システム全体の予測に不可欠なことは言うまでもない。個々の要素の挙動については実験等によりモデルの検証を行い、その精度向上が可能である。しかし、それが出来たとしても、システム全体の挙動を検証をしたことにはならず、やはりシステム全体としての実験的検証があって初めて、全体モデルに対する信頼感が生まれると考えられる。

兵庫県南部地震後、実物大実験による検証の重要性が認識され、大型の3次元振動台がいくつか既に建設され、また超大型のものが現在建設中である。これらにより、橋梁などの構造システム全体の動的終局挙動を調べる事が可能な状況が生まれつつある。これは全体システムの予測モデルの開発・改良・キャリブレーションには欠かせないことであり、実構造物の地震観測の分析と並んで極めて重要かつ有力なアプローチと考えられる。

精緻な全体系予測モデルを持つことではじめて、橋梁で言えば意図的に支承を壊す耐震構造など、高度でかつ信頼性のある耐震構造のメニューを増やす道が開ける。しかし一方、動的非線形応答計算は、計算機が発達した現在においてさえ、設計という

膨大な繰り返し計算を伴う作業にはなじまないことも理解すべきである。本来は優れた構造系にもかかわらず、動的非線形特性が煩雑なために実際の設計現場では採用されなくなることもあると聞く。地震時保有水平耐力法は静的に置換した便宜的な手法であり、本来は動的な手法がとって代わるべきである。鋼構造の地震時挙動には先に述べたように複雑なところがあり、非線形動的解析を行わざるを得ない状況である。計算精度とのバランスの中で全体系のモデルをいかに単純化するか、とくに等価線形手法による簡便な設計手法の確立も設計技術の立場からみて課題の一つである。

## 6.5 耐震照査法

耐震性能の照査は、鋼構造物の要求性能である終局限界と損傷限界について行う。その限界値の設定には、塑性域での座屈現象（局部座屈および全体座屈）、材料の低サイクル疲労および脆性破壊現象をよく把握して行う必要がある。

### 6.5.1 想定限界状態

6.1で述べたように、鋼構造物の要求性能に対応する限界状態として終局限界と損傷限界が考えられる（表-6.1）。このような限界状態は、これまで鋼柱を対象に行われた数多くの交番載荷実験の結果<sup>5),11)</sup>をもとに想定されたものである。

図-6.1は、一定鉛直荷重の下で繰り返し水平荷重を受ける単柱式鋼製橋脚のモデル実験から得られた水平荷重(H)－水平変位( $\delta$ )履歴曲線の包絡線の概念図である。土木鋼構造物の特徴である比較的薄肉な断面をもつ橋脚では、荷重とともに変位は直線的に増大していき、試験体の下端部付近で降伏に至る。その後、次第に勾配が緩くなり最大荷重に達するが、最大荷重点近傍で局部座屈が発生し、それが進展していく過程で、塑性化の広がりおよび部材のP- $\Delta$ 効果との相乗効果により次第に耐荷力を失っていく。このような挙動は、単柱式鋼製橋脚に限らずラーメン橋脚にも見られる現象である。母材あるいは溶接部の低サイクル疲労によるクラックは、通常水平荷重がかなり低下した時点（降伏荷重 $H_y$ まで除荷した近傍）で発生する。コンクリートを橋脚基部に適切な高さだけ部分的に充填すると、その部分の局部座屈の発生が遅らされるため最大荷重に至るまでの変形性能は格段に上昇する。しかし、柱基部での母材あるいは溶接部（角溶接あるいはベースプレートと脚の溶接部）でのクラックの発生はコンクリートを充填しない場合より早まり、場合によっては最大荷重付近で生ずる場合もある。しかし、その場合でも耐荷力の低下は、通常比較的穏やかである。結局、鋼構造物の耐震性能に深く関わる特性は、塑性域での座屈現象（局部座屈および全体座屈）と材料の低サイクル疲労および脆性破壊現象である。なお、後者には溶接部の施工の

良否も関わってくる。

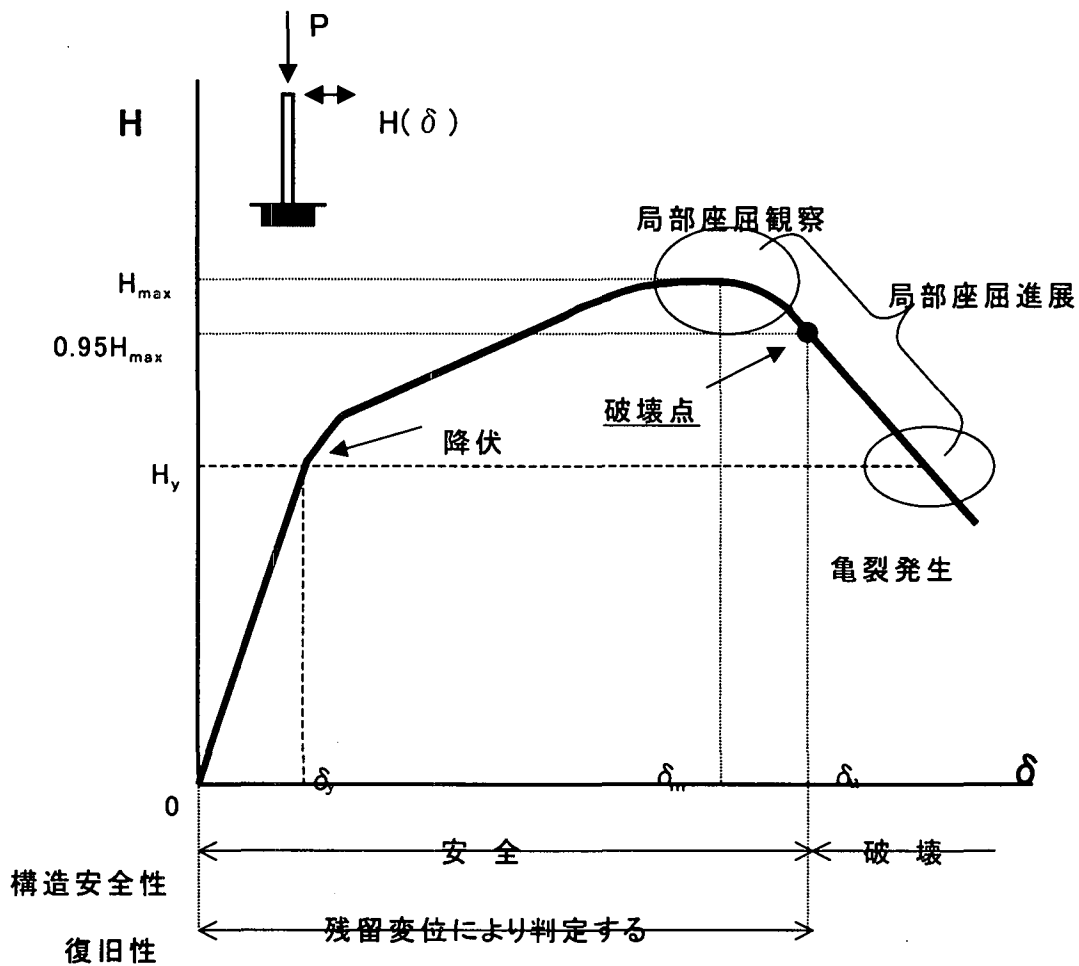


図 6.1 繰り返し荷重を受ける鋼製橋脚の水平荷重－水平変位履歴曲線の包括線と損傷度関係のイメージ図

このような現象を踏まえて限界状態およびその照査指標ごとに限界値を定めることになる。塑性域での座屈現象によって定まるレベル 2 地震の変形の限界値（破壊点）として、6.2 では、最大荷重が 95% に低下した点を破壊点としている（図-6.1）。これは、この点を過ぎると急激に耐力が減少することから、レベル 2 の大規模地震時にその点までを許容しようとするものである。復旧性の観点からもこの付近までは比較的復旧が容易であるが、それ以降になる可能性もでてくる。

なお、設計地震動と構造物の重要度に応じて構造物全体の耐震性能にランクを設けることが考えられるが、その場合には、用いる照査指標に対してそれぞれのランクに応じて限界値を設定することになる。



## 6.5.2 照査項目と照査方法

耐震性能の照査は、地震による応答値が耐震性能のレベルに応じて設定される限界値を満足するかどうかを確認することによって行うことになる。

終局限界状態に対しては、変形性能あるいは保有水平耐力をもとに照査することができる。変形性能を照査指標にする場合には、一般に動的解析を利用して変位、変形角あるいは曲率等の応答値を算出し、限界状態に対応して設定される許容値と比較することにより照査が行われる。この時、部材を有要素モデルとしてモデル化すると比較的精度よい解析が可能になり、部材の破壊形態が解析結果として直接得られる利点があるが、設計に用いるには煩雑であるため、線材のように単純化したモデル化を用いることも検討する必要がある。この時部材の復元力モデルが必要になるが、これまでの研究から繰り返しによる剛性低下や強度劣化等を考慮できる精度よく動的解析を行うことができるモデルも提案されており<sup>5),6)</sup>それらを用いることが考えられる。いずれにしてもその具体的な手法については、今後更に検討が必要である。

照査に保有水平耐力を用いる場合には、地震時保有水平耐力と、Newmarkのエネルギー一定則にしたがって塑性変形に応じて低減させた水平慣性力とを比較することによって照査を行う。この時、荷重-変位関係は、鋼材の応力-ひずみ関係にひずみ硬化の影響を考慮し、 $P-\Delta$ 効果の影響が大きくなることが予想されるため弾塑性有限変位解析により求める必要がある。なお、この時の終局ひずみをどの程度に設定するか等については今後更に検討が必要である。

終局限界状態のうち低サイクル疲労に対する照査は、6.2で述べたように、地震応答解析により算出した局部座屈発生位置での最大局部ひずみと、6.3.2で示したような低サイクル疲労に対する限界ひずみとを比較して行うことが基本になる。

また、損傷限界に対しては、動的解析によって得られる残留変位量と、表-6.3に示す損傷レベルに応じて設定される残留変位の限界値を比較することによって行う。

## 6.5 今後の課題

土木鋼構造物の耐震性能を明確にし、土木学会の第2次提言をより現実化する合理的設計法を確立するための課題は、既に各節において述べられているが、ここでは、それらの課題をまとめて列挙する。

- 1) 性能照査型耐震設計法の確立
- 2) 残留変位低減橋脚の開発
- 3) 損傷度限界（小，中，大損傷，崩壊）の判定基準の再検討

- 4) 逆L型橋脚の耐震照査法（橋軸方向，橋軸直角方向）
- 5) 多層（2層以上）ラーメンおよび異形ラーメン橋脚の耐震解析法・照査法
- 6) 橋脚に適した制震装置（含免震支承）の開発
- 7) 構造システム（含制震装置）の簡易耐震解析法
- 8) アーチ橋，斜張橋，吊橋等の土木鋼構造物の耐震解析法・照査法
- 9) 地盤，基礎の影響
- 10) 交番載荷実験における繰り返し回数のお考え方
- 11) 有限変位解析に用いる鋼材の応力—ひずみ関係における終局ひずみ
- 12) 繰り返し荷重を受ける耐震部材のための鋼材の高規格化
- 13) 大型または実物大の構造実験による耐震挙動の把握

## 参考文献

- 5), 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と耐震設計のための新技術，1996年7月.
- 5), 2) 日本道路協会：道路橋示方書・V耐震設計編，1996年12月.
- 5), 3) 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），1998年12月.
- 5), 4) 宇佐美勉：ハイダクティリティー鋼製橋脚，橋梁と基礎，Vol.31, No.6, pp.30-36, 1997年6月.
- 5), 5) 子林 稔，宇佐美勉，葛西 昭：動的解析による免震および非免震鋼製橋脚の耐震性能評価，土木学会論文集に登載予定.
- 5), 6) 金田一智章，宇佐美勉，Satish Kumar：Damage Indexに基づく鋼製橋脚の復元力特性，構造工学論文集，Vol.44A, pp.667-678, 1998.3.
- 5), 7) 岡下勝彦，大南亮一，道場康二，山本晃久，富松実，円治康行，三木千壽：兵庫県南部地震による神戸港湾幹線道路 P75 橋脚隅肉部におけるき裂損傷の原因調査・検討，土木学会論文集，No.591, I-43, pp.243-261, 1998-4.
- 5), 8) 三木千壽，休場裕子，沖中知雄：阪神大震災により円形断面鋼製橋脚に生じた脆性破壊の材料特性からの検討，土木学会論文集，No.612, I-45, pp.45-53, 1999-1.