

5. 機能を重視した耐震設計法

5.1 橋梁システムの機能損傷に対する考え方

5.1.1 橋梁システムの機能的構成

耐震設計においては所要の構造安全性を確保するのみにとどまらず、地震後の使用性についても十分配慮することが必要になってきている。しかし、発生頻度が低い巨大地震に対して、常時の使用性を保持する設計は必ずしも合理的ではない。地震後の緊急車両の通行、復旧過程における道路の役割を考え、必要な機能を経済性とのバランスに配慮して決定することが重要と考えられる。そのメニューとして、地震後の使用性を区分する損傷限界のグレードを表2.3.2および表4.3.1～4.3.2に示した。

一方、橋梁構造物は多種・多様な構造（部品）により構成されており、それぞれがその役割を果たすことによって、橋梁システムが要求される機能を満足することができる。したがって、地震後の使用性を満たすための条件は部材の役割と相互関係を明確にすることによって明らかになる。

図5.1.1は一般的な橋梁における主な構造（部品）とその役割（機能的要求性能）の相関関係を表したものである。橋梁は本来、交通を通すという目的を持っており、その役割を直接担う路面を構成するものは上部構造と伸縮装置である。路面の幾何学的な形状の良否が橋の機能に影響するので、限界状態は変位によって評価するのが最も直接的である。上部構造の支点部から基礎構造にわたる部材の役割は上部構造に載荷される交通荷重を支持し、その力を地盤に伝えることである。これらの機能は主に支持力（あるいは耐荷力）によって評価するのが妥当である

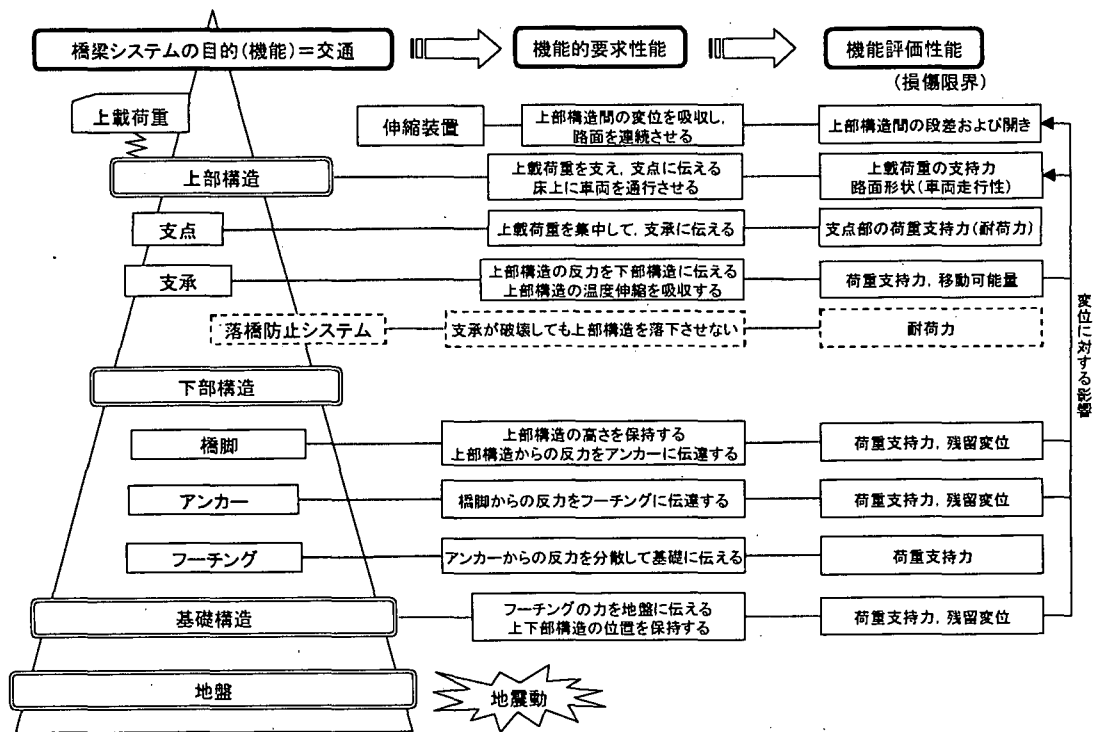


図5.1.1 橋梁システムの機能的構成

う。ここで注目すべきことは、このシステムが直列につながっており、1つの構造が機能を失うとシステム全体の機能が失われることである。もちろん、冗長性のある並列システムも考えられなくはないが、橋梁は一般的にそのようになっていないと思われる。

5.1.2 機能損傷に対する考え方

道路橋示方書・耐震設計編 [日本道路協会, 1996] では、「橋の耐震設計は、地震に対する道路交通の安全性の確保を目的とし、比較的生じる可能性の高い中規模程度の地震に対しては構造物としての橋の健全性が損なわれず、大正12年の関東地震のようなまれに起こる地震に対しても落橋などが生じないことを目標として行う」としていた。つまり、レベル1の地震動に対しては機能を保持し、レベル2の地震動に対しては崩壊しないことを目標としていた。しかし、阪神淡路大震災において高架橋の機能喪失が地震後の救援活動、復旧活動を妨げる要因になったと言われており、この反省から構造物を破壊させないという安全面だけでなく、重要路線の橋梁については救援・復旧用の交通を通すという「地震後の使用性」は保持させるべきという考え方が一般的になってきた。

表5.1.2は地震後の使用性という点に関して既存の文献における耐震性能を比較

表5.1.2 機能に関する耐震性能の比較

地震後の使用性 (書)	機能保持性	I	II	III	IV
		I	Ii	Iii	iv
新技術報告書 1996	復旧性	常時機能保持(目視点検後、通行可能)	一部機能限定(主要構造物材の機能保持、補修しながら通行可能)	大部分機能限定(主要構造物材にも損傷、荷重制限があり緊急車両のみ通行可能)	機能喪失(車両通行不可能)
		修復不要	復旧が短期間で可能(復旧が2週間以内で可能で、補修のみで復旧可能)	復旧が長期間が必要(復旧に2週間以上必要で、再使用のためには補強を必要とする)	復旧不可能(撤去・建替が必要。または、撤去・建替と同程度の復旧期間が必要)
道路橋示方書 耐震設計編 1996		D 目視点検後、すぐに通常の交通が可能	C 補修しながら普通車両が通せる	B 最低限の機能を維持している状態で、災害復旧用、人命救助用の緊急車両のみを通せる	A 崩壊はしていないが、橋としての機能を喪失 As 骨組線の変化が極端に大きく、車両通過が不可能
コンクリート標準 示方書 耐震設計編 1996		耐震性能1 地震後にも、機能は健全	耐震性能2 地震後に(機能が短時間で回復でき)補強を必要としない	耐震性能3 地震によって構造物全体系が崩壊しない	
鉄道構造物等 設計標準 耐震設計編 1999		耐震性能1 地震後にも、機能は健全	耐震性能2 地震後に(機能が短時間で回復でき)適度な補修を必要とする	耐震性能3 地震によって構造物全体系が崩壊しない	
建築学会 第3提言 耐震メニュー 199?		無被害 被害は発生しない。日常と同じ状態を維持できる	軽損 軽い被害が出るが、人身被害と建物の機能障害はない	中損 建物にかなりの損傷が出るが、人命損傷はほとんどない。建物の機能は停止することがある	大破・倒壊 復旧不可能なほど大きな被害が出る。人身被害が出る。人身被害がある。
Vision2000		Fully Operational	Operational	Life Safe	Near Collapses

したものである。地震後に無損傷で常時の使用性を保持する性能の他に、損傷を許す2～4のグレードが設定されている。これらのグレードの基本的な考え方は地震後に必要な使用性に着目して、経済性を考慮しながら終局限界の手前に中間的な耐震性能を設定するものである。道路橋示方書〔日本道路協会，1996〕は使用性というよりは復旧可能性の点から終局限界の手前に1つの耐震性能を設けている。コンクリート標準示方書〔土木学会，1996〕と鉄道構造物等設計標準〔鉄道総合技術研究所，1999〕では短時間に復旧するという点から耐震性能を設けている。建築学会第3次提言〔日本建築学会，1998〕とVision2000〔SEAOC，1995〕では機能と人命の点から2つの性能を設けている。本報告書では2.3.2および4.3.1で述べたように新技術報告書〔鋼構造新技術小委員会，1996〕を参考にして、地震後の使用性を機能保持性と復旧性に分けて考え、それぞれに2つの中間の耐震性能を設定している。このように中間の耐震性能の区分には多少差があるが、その数をどの位にするのかが適当であるかが問題になろう。区分数を細かくすれば要求に対してきめ細かい対応が可能になるが、実際の要求がどの様なものであるのか、要求性能が実際の設計で使われる工学的指標に置き換えられた場合に有意な差が現れるのかの両面から判断する必要がある。本報告で設定した全体で4段階の性能区分は建築学会第3次提言とVision2000でも採用されており、現在の技術レベルで対応可能と思われる。

5.1.3 機能重視の必要性和構造設計への適用

阪神淡路大震災以降、地震後の使用性に配慮した耐震設計が必要になってきたことはすでに述べた。従来の耐震設計法では橋梁各部の構造的な安全性は照査されていたが、破壊の手前にある構造損傷と橋としての機能の関連については不明確であった。機能は要求される性能の中では最も基本的なものであり、それを明確に考える設計法は性能照査型設計法に他ならない。したがって、性能照査型設計法が最初に耐震設計の中で注目されたのは当然のことであり、今後の耐震設計基準は性能照査型設計法として表されるべきである。

本報告で耐震設計上考慮している機能は地震後の使用性であり、地震中の使用性については言及しない。これは地震により激しく振動している構造物の上で、車両の安全な走行性を確保することは難しい問題と思われたからである。ただし、鉄道構造物等設計標準〔鉄道総合技術研究所，1999〕ではレベル1地震動に対して列車の走行性を照査することが述べられており、今後はレベル2地震動も含めて地震中の使用性について検討することが必要と思われる。

5.2 阪神淡路大地震における被害と機能損傷

5.2.1 阪神淡路大震災における被害と機能損傷

ここでは、1995年の阪神淡路大震災における上部構造、鋼製橋脚および付属物（支承・落橋防止構造・伸縮装置）の被害と損傷形態について述べ、損傷が機能に及ぼした影響について考察する。

文献〔土木学会関西支部，1999〕では，損傷形態を1次損傷と2次損傷に区分している．1次損傷とは直接地震作用力により発生した損傷であり，2次損傷とは1次損傷による部材の変形・変位により他部材が損傷することと称している．本報告の4.2では橋としての機能が失われるシナリオとして，橋脚や基礎の過度な変位が上部構造（すなわち路面）の過度な変形につながる，あるいは支承・変位制限装置の破壊が上部構造の移動，変形につながることを示したが，これも1次損傷が2次損傷につながることを示している．したがって，以下においては1次損傷および2次損傷という観点から損傷形態を論ずる．

（1）上部構造

上部構造の損傷形態は大別すると，①鋼桁の局部座屈・破断，②桁の移動・沈下，の2点に分類される．ただし，上部構造に関しては橋脚，支承の1次損傷によって引き起こされた桁移動や支点近傍の局部座屈，さらには落橋に至る2次損傷がほとんどであり，1次損傷の例は鈹桁橋の桁端部におけるニーブレイスの屈服座屈やニールセン橋の吊材の脱落，上横構の座屈等に限定される．よって上述の損傷形態①については1次損傷と2次損傷の両方があり，②は2次損傷である．

（2）鋼製橋脚

鋼製橋脚における損傷形態は文献〔土木学会関西支部，1999〕〔鋼構造震災調査特別委員，1999〕〔鋼構造新技術小委員会，1996〕などに詳しく述べられている．鋼製橋脚の損傷は主に1次損傷であり，その形態は局部座屈，隅角部の溶接割れ，柱基部のアンカーボルトの伸び・母材の割れ，柱全体の圧壊に区分される．被害の大半は局部座屈であり，その他の被害例は少数である．上部構造を落下させた圧壊は矩形断面で2基報告されており〔西川ら，1996〕，そのうち1例は柱部のフランジとウェブの角溶接が縦方向に裂け耐荷力を失ったのが原因であった．損傷形態を損傷の甚大さおよび2次損傷への影響などの観点からまとめると表5.2.1のように表せる．

表5.2.1 鋼製橋脚の1次損傷における損傷形態

損傷部位	柱断面形状	損傷形態		
		小	← →	大
柱部	矩形断面	補剛板局部座屈（パネル）	補剛板局部座屈（全体）	圧壊
	円形断面		局部座屈（提灯座屈）	脆性破断
梁部	矩形断面	せん断座屈		
隅角部	矩形断面		隅角部割れ	
柱基部			アンカーボルトの伸び，脆性割れ	

（3）付属物

1）支承

支承においては構造上1次損傷が主な損傷形態である．支承の損傷形態は支承部位により表5.2.2に示すように分類される〔土木学会，1999a〕．支承は単一の部材としては上部構造の支持，水平方向の移動吸収・制限等の多機能部材でありま

た、他の橋梁部材に比べ比較的多数の部品から構成されており損傷形態も多種に

表5.2.2 支承の1次損傷における損傷形態

損傷部位	損傷形態		備考
	小	大	
セットボルト	抜け	破断	
上沓・下沓	変形	脆性的な破壊	
ピン	抜け出し	破断	
ローラー		抜け出し	
サイドブロック	ボルトの破断（ボルトタイプ）	脆性的な破断（溶接タイプ）	
アンカーボルト	抜け、伸び	破断	沓高大→f-メント大
沓座モルタル	割れ	破壊	桁かかり長不足

わたっている。特徴的な事項としては、これら支承の1次損傷が他部位の2次損傷の原因となっている例も多かったことであり、早期復旧に困難を伴った。支承損傷による他部位への損傷としては、上部構造が破損した支承上や橋脚上に落下したことによる①上部構造桁端部の損傷、②鋼製橋脚梁の座屈がある。支承の損傷が他部材の損傷を防ぐヒューズとして機能するためには、2次損傷を引き起こさないようにする必要がある。

2) 落橋防止構造

隣接橋梁間においては橋軸方向の衝突または離れによる落橋防止構造を含めた桁端部損傷が多く見られた。落橋防止構造の損傷については形式別に以下のよう

- ・連結板方式は、①2ピンタイプ、②ピン+HTB固定タイプに区別できるが、HTBの破断、連結板取り付け部における主桁腹板破断、ピン破断、連結板の端抜け等が損傷形態としてあげられる。
- ・ケーブル方式においてはケーブル定着部の損傷事例が若干報告されているがケーブル本体の損傷については事例が見受けられなかった。

これらの損傷は1次損傷の場合もあり、移動制限装置あるいは支承の破壊による2次損傷もあると思われる。いずれにしても機能に及ぼす影響は比較的小さかったと考えられる。

3) 伸縮装置

以前の設計では移動可能量が支承の移動制限装置よりも小さい場合が多く、フィンガープレートの破損は1次損傷として生じたと思われる。一方、段差は支承の破壊、桁の逸脱による変位が原因であり2次損傷である。

(4) 損傷形態と機能損傷の関係

5.1.1で考察したように橋梁の機能は車両通行時における路面の平坦性、連続性およびの車両荷重の支持であるが、損傷が機能に及ぼす影響は損傷部位や損傷形態により異なる。

橋脚の損傷は1次損傷が主であるが、損傷が小さい補剛板パネルの局部座屈や

せん断座屈の範囲に収まっていれば機能への影響は小さいと思われる。ただし、損傷が小さくても全体の残留変形が大きい場合や補剛板全体の座屈など損傷が大きいと荷重支持の点で機能に及ぼす影響は大きくなる。

支承についても1次損傷が主であり、直接支承自身の機能が失われることで橋全体の機能に及ぼす影響は大きい。さらに支承の破壊によって生じる桁の2次損傷も機能に及ぼす影響が大きいと考えられる。

一方、上部構造において1次損傷は主として2次部材の損傷であり、機能に及ぼす影響は比較的小さい。しかし、支承の破壊によって生じる桁の移動、落下等の2次損傷は主要部材の損傷であり機能に対して大きな影響を及ぼす。

落橋防止システムは耐震が目的の装置であり、それ自体の損傷が橋の機能に及ぼす影響は小さい。落橋防止システムが取り付けられる桁の損傷も桁端の限定された範囲に収まっていれば影響は小さいが、桁端部以外に損傷が及ぶと影響が大きくなる。

一般論的にまとめると、当然のことと言えるが1次損傷は限定されていれば機能に及ぼす影響が小さく、損傷度が大きくなると影響が大きい。一方、2次損傷は機能に関係が深い上部構造の損傷が多く、機能に及ぼす影響が大きい。しかも2次損傷は設計上、制御しにくい損傷形態が多く、なるべくならば避けた方が望ましいと思われる。

5.2.2 機能からみた望ましい損傷

5.2.1の考察により機能保持・復旧から見た望ましい損傷箇所・順位を表5.2.3に示す。新技術報告書〔鋼構造新技術小委員会、1996〕でも望ましい損傷順序が示されていたが、本報告書では機能に及ぼす影響や補修の難易度に関する評価を加え多少の変更をしている。

まず、ジョイントプロテクターは地震時に最初に働く部材であり、部材が小さく補修も容易であるので最初に損傷する箇所とした。一般的には支承の1部品であることが多いが、損傷しても支承の機能に影響を及ぼさないようにすべきである。次に補修の点から伸縮装置としたが、機能に直結する部材であるから可能であれば変位制限装置やエネルギー吸収部材より後の順位とした方が望ましい。順位1、3～5は車両の荷重を直接支えないので機能に及ぼす影響は小さいが、順位6以降は荷重を支える主要部材であるため、できれば損傷しない方が望ましい。ただし、橋脚については一般的にエネルギー吸収量が大きいので、損傷をうまく制御できれば合理的な耐震設計が可能になると考えられる。

このような順位づけはキャパシティデザインの考え方につながるものであり、さらに検討していく必要があると考えられる。

表5.2.3 望ましい損傷箇所・順位

順位	箇所	損傷が機能に及ぼす影響	補修の場合の難易度	取替えの場合の難易度
1	ジョイントプロテクター	小	小	小～中
2	伸縮装置	中	小～中	小～中
3	変位制限装置	小	中	小～中
4	エネルギー吸収装置（支承と機能分離したもの）	小	小～中	小～中
5	上部構造2次部材（対傾構，横構など）	小	小～中	小～中
6	橋脚	中～大	中～大	中～大
7	支承	大	小～中	小～中
8	上部構造1次部材（支点部など）	大	中～大	中～大
9	橋脚定着部	大	大	不可能
10	基礎	大	大	不可能
11	落橋防止装置	大	小	小～中

5.3 機能保持性に関する設計クライテリア

地震後の使用性に関する要求性能の内、機能保持性に関する基本性能は表2.3.2および表4.3.1に示した。ここでは、設計のために数値化されたクライテリアの案を示す。

まず、具体的に設計クライテリアについて論じる前にクライテリアの表現方法について述べる。

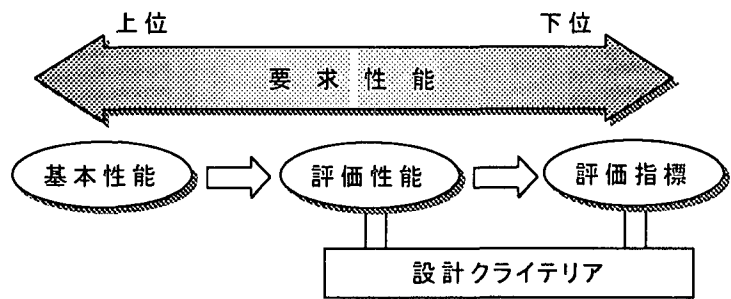


図5.3.1 設計クライテリアの表現

2.3.3では耐震性能照査体系について述べ、図2.3.3には要求性能の構成を示した。地震後の使用性は要求耐震性能を満足するために考慮しなければならない基本性能であるが、設計に適用するためには具体的な量で表されなければならない。地震後の使用性の内、機能保持性に対して評価すべき性能は路面の「走行性」と上載荷重（死活荷重）の「支持力（あるいは耐荷力）」である。そして評価性能は使用する設計手法から求められる定量的な「評価指標」に置き換えられて照査される。例えば走行性に対しては変位、支持力に対しては力となる。したがって、以下の設計クライテリア案では評価性能と評価指標の組合せによって示すことにする。以上のことを概念的で表せば図5.3.1のようになる。

表5.3.2は機能保持のための設計クライテリアの試案を示している。表の左列は要求性能レベルである。それに対して走行性、上載荷重の支持力で表される評価性能の例を示している。評価指標をもう少し具体的にすれば、走行性に対して路面（伸縮継手部）の段差、路面（伸縮継手部）の遊間、および路面の傾きの量で表されるものとし、上載荷重の支持力に対しては地震直後における主要部材の残存強度そのものとした。ここで、対象となる部材に作用する力と変位の記号については図5.3.2に表される意味で用いている。力が照査指標として有効なのは最大荷重 P_m までで、それ以降については変位を指標とすべきである。非線形性を考慮する耐震設計においては、すべて変位を指標とした方が明確かもしれない。

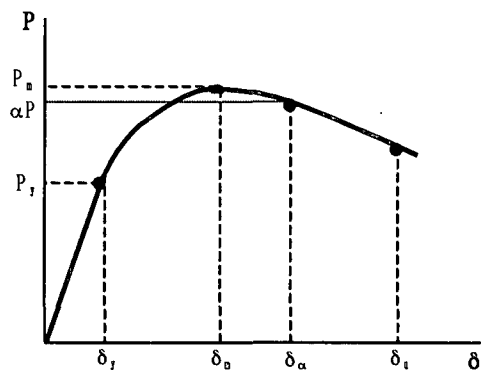


図5.3.2 構造部材の荷重－変位関係の記号

2.3.3で示したように現在の耐震設計で塑性化を認めているのは橋脚と免震支承のみであるが、表5.3.2では伸縮装置、変位制限装置、上部構造の2次部材に対しても最大荷重までの塑性化を考えている。この理由は前節において述べたように機能に及ぼす影響が比較的小さいと考えられるからであるが、地震時挙動の評価法が確立していないので実際の適用は今後の課題である。橋脚と免震支承以外についても地震時挙動が明確になれば、より合理的な耐震設計が可能になる。

表5.3.2 機能保持設計クライテリア(試案)

機能損傷レベル例 (機能保持要求性能)		設計クライテリア例		
機能保持レベル	定義	評価性能	評価指標	
レベルI	常時機能を維持	【走行性】 路面の段差：なし 路面の遊間：なし 路面の傾き：なし 【上載荷重支持力】 主要部材の 残存強度：100%	全部材に対して $P < P_d$	
レベルII	一部分機能限定	【走行性】 路面の段差：5cm以下 路面の遊間：10cm以下 路面の傾き：0.5%以下 【上載荷重支持力】 主要部材の 残存強度：100%	ジョイントプロテクター	$P > P_d$
			伸縮装置	圧縮： $P < P_d$ 引張： $\delta < 1.5\delta_d$
			変位制限	$P < P_d$
			免震装置	$\delta < \delta_d$
			上部構造2次部材	$P < P_d$
			橋脚	$\delta_f < h / 300$ and $10cm$ $\delta < S_f / 4$ and δ_d
			支承	$P < P_d$, $\delta < \delta_d$
			上部構造1次部材	$P < P_d$
			橋脚定着部	$P < P_d$
			基礎	$P < P_d$
落橋防止装置	$P < P_d$			
レベルIII	大部分機能限定	【走行性】 路面の段差：10cm以下 路面の遊間：20cm以下 路面の傾き：1%以下 【上載荷重支持力】 主要部材の 残存強度：95%	ジョイントプロテクター	$P > P_d$
			伸縮装置	圧縮： $P < P_d$ 引張： $\delta < 2.0\delta_d$
			変位制限	$P < P_d$
			免震装置	$\delta < \delta_d$
			上部構造2次部材	$P < P_d$
			橋脚	$\delta_f < h / 150$ and $20cm$ $\delta < S_f / 2$ and δ_{fs}
			支承	$P < P_d$, $\delta < \delta_d$
			上部構造1次部材	$P < P_d$
			橋脚定着部	$P < P_d$
			基礎	$P < P_d$
落橋防止装置	$P < P_d$			
レベルIV	機能喪失	【走行性】 路面の段差：10cm以上 路面の遊間：20cm以上 路面の傾き：2%以上 【上載荷重支持力】 主要部材の 残存強度：機能保持の 点から要求なし	ジョイントプロテクター	—
			伸縮装置	—
			変位制限	—
			免震装置	—
			上部構造2次部材	—
			橋脚	$\delta_f > h / 150$ and $20cm$ $\delta > S_f / 2$ and δ_{fs}
			支承	—
			上部構造1次部材	—
			橋脚定着部	—
			基礎	—
落橋防止装置	—			

5.4 復旧性に関する設計クライテリア

前項の機能保持性と同様に地震後の使用性に関する要求性能の内，復旧性に関する基本性能は表2.3.2および表4.3.2に示してある．ここでは，復旧性に関するクライテリアの案を示す．

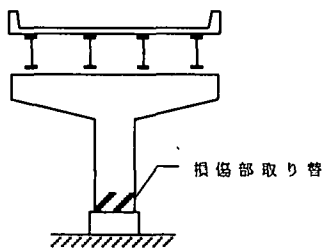
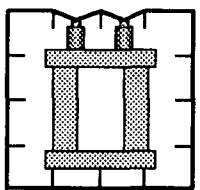
復旧性の要求性能は復旧期間に対応して設定された．そこで，設計クライテリアを復旧期間に結びつけるためには予め補修工法を想定しておく必要がある．鉄道構造物等設計標準 [鉄道総合技術研究所，1999]

では，耐震性能に対応する部材の損傷度は補修の難易度や残留変位に与える影響から定めるべきであるとして，損傷度レベルと補修工法のイメージを対応させている．表5.4.2は鉄道構造物等設計標準を参考にして補修工法のイメージを分類し，復旧が短期間から長期間になる順にレベル1からレベル5となるように補修難易度を区分したものである．補修レベル1は全く補修が必要ない状態である．レベル2は比較的軽微な局部座屈や塑性変形，およびそれらに伴う塗装のはがれがある状態で，形状の修復のみでよい状態である．レベル3はレベル2より変形が大きく，形状の修復とともに強度回復のためにリブなどの補強材を取り付ける場合である．レベル4は，さらに変形が著しく部材を撤去し取り替える場合である．レベル5は，もはや補修不可能で構造物全体を再構築する場合である．

表5.4.2 補修レベル

補修レベル	補修工法のイメージ
レベル1	補修不要
レベル2	形状の修復
レベル3	形状の修復および補強材の取付
レベル4	部材の取り替え
レベル5	全体の再構築

表5.4.3 鋼製橋脚の補修工法

補修区分	損傷状況・補修方法	要領図	補修レベル	復旧期間
TYPE I	<ul style="list-style-type: none"> 縦リブの塑性変形をとまなう損傷 損傷部を輪切り状に切断・撤去を行い，新しい部材を高力ボルトあるいは現場溶接で接合する． 		レベル4	4～8週間
TYPE II	<ul style="list-style-type: none"> 板パネルの座屈などの部分損傷 損傷部を部分的に除去し，新しい部材を現場溶接で取り付ける．あるいは加熱・プレスなどにより矯正を行う． 	<p>ジャッキにより局部的なひずみを取る．</p> 	レベル2 または レベル3	1～3週間
TYPE III	<ul style="list-style-type: none"> 許容値以下の軽微な座屈および局所的な溶接割れ，塗装はく離の損傷 再溶接，再塗装によって補修する． 		レベル2	～2週間

実際に要する復旧期間は部材の補修レベルだけでなく、補修しなければならない部材数と投入可能な人的・物的資源の量に関係する。このことについては5.5で考察することにし、ここでは単一の構造物の損傷レベルに応じて設計クライテリアを考えるものとする。

次に補修レベルと復旧期間について考える。表5.4.3と表5.4.4は阪神高速道路の震災復旧工事誌〔阪神高速道路技術センター，1997〕から引用したもので、阪神

表5.4.4 鋼桁の補修方法

補修区分	損傷の度合	補修方法	補修レベル	復旧期間
TYPE I	損傷が広範囲にわたり、損傷度合の大きいもの	1) 損傷部位を含む鋼桁（床版含む）を切断・撤去して、新規部材と取り替える（部分的な再構築）。 2) 新旧部材の接合は高力ボルト継手または溶接継手による。	レベル4	4～8週間
TYPE II	桁端の座屈・変形などで、損傷が大きいもの	1) 鋼桁の腹板または下フランジなどの損傷部位を部分的に撤去し、新規部材と取り替える。 2) 新旧部材の接合は高力ボルト継手または溶接継手による。	レベル4 または レベル3	1～3週間
TYPE III	溶接部などの割れ	溶接埋戻しにより補修する。	レベル2	～2週間

淡路大震災で被災した鋼構造物に対して実際に適用された補修工法の概要を分類してまとめている。ここでは補修工法の分類に対して、上に述べた補修レベルと概略の復旧期間を加えている。表5.4.3は鋼製橋脚の補修工法の分類である。補修工法はTYPE I～IIIに分類されており、これらは先に述べた補修レベル4～2に対応する。表5.4.4は鋼桁の補修工法の分類である。鋼桁についても補修工法はTYPE I～IIIに分類されており、補修レベル4～2に対応している。この他に伸縮装置、変位制限装置、支承などあらゆる部材に対しても、補修方法を想定しておく必要があるが、まだ整理ができていないので示すことはできない。

表5.4.5は復旧性に関する設計クライテリア例を示している。ここでは、各部材に対して要求される復旧期間を満たすような補修レベル（すなわち補修工法）の限界を示し、その補修レベル以下の損傷に止まるために必要と思われる評価指標の限界値例を示している。ただし、前節でも述べたように地震時挙動がまだ不明確な部材が多いので、実際に適用するためにはさらに検討する必要がある。

表5.4.5 機能修復設計クライテリア（試案）

機能損傷レベル例 (復旧性の要求性能)		設計クライテリア例		
復旧性 レベル	定義	損傷モードに対する要求 (評価性能)		評価指標
		部 材	補修レベル	
レベル I	補修不要	全部材	1	$P < P_f$
レベル II	復旧が短期間で 可能 (2週間以内)	ジョイントプロテクター	3	$P < P_n$
		伸縮装置	2	圧縮： $P < P_n$ 引張： $\delta < \delta_n$
		変位制限	2 ~ 3	$P < P_n$
		免震装置	2 ~ 3	$\delta < \delta_n$
		上部構造 2 次部材	2	$P < P_n$
		橋脚	2	$P < P_n$ または $\delta < \delta_n$
		支承	1 ~ 2	$P < P_f$, $\delta < \delta_f$
		上部構造 1 次部材	1	$P < P_f$
		橋脚定着部	1	$P < P_f$
		基礎	1	$P < P_f$
		落橋防止装置	1	$P < P_f$
レベル III	復旧に長期間必 要 (2週間以上)	ジョイントプロテクター	4	$\delta < \delta_n$
		伸縮装置	4	$\delta < \delta_n$
		変位制限	4	$\delta < \delta_n$
		免震装置	4	$\delta < \delta_n$
		上部構造 2 次部材	4	$\delta < \delta_n$
		橋脚	3 ~ 4	$\delta < \delta_n$
		支承	3 ~ 4	$\delta < \delta_n$
		上部構造 1 次部材	2 ~ 4	$P < P_n$
		橋脚定着部	1	$P < P_f$
		基礎	1	$P < P_f$
		落橋防止装置	1	$P < P_f$
レベル IV	復旧不可能 (撤去・建替が 必要。または撤 去・建替と同程 度の復旧期間が 必要)	ジョイントプロテクター	4	—
		伸縮装置	4	—
		変位制限	4	—
		免震装置	4	—
		上部構造 2 次部材	4	—
		橋脚	4 ~ 5	—
		支承	4	—
		上部構造 1 次部材	4 ~ 5	—
		橋脚定着部	2 ~ 3	$P < P_n$
		基礎	2 ~ 3	$P < P_n$
		落橋防止装置	4	$\delta < \delta_n$

5.5 機能の保持・復旧を考えた耐震設計

5.5.1 機能に基づく構造損傷度の定義

表2.3.2では地震後の使用性に関する要求耐震性能区分を機能保持性と復旧性に分けて示した。耐震性能は構造損傷度（ここでは，As：崩壊，A：大損傷，B：中損傷，C：小損傷，D：無損傷の5段階）と直接的な関連があり，単独の構造物では機能保持性および復旧性の性能を構造損傷度と1対1に対応するよう定義することは可能であった。しかし，複数の構造物から成る橋梁システムの耐震性能に対しては同じ定義を使えないこともあり得る。そこで橋梁システムに対する耐震性能の考え方を検討する。

ここでは単独の構造物に対して定義された地震後の使用性に関する耐震性能が，橋梁システムを構成したときにはどの耐震性能を満たすかを考える。いろいろな対応の可能性があるが，これは右の表5.5.1のようにマトリックスで表される。単独構造物の場合はマトリックスの対角線になるように損傷度が定義されているが，橋梁システムの場合は着色の部分になることがある。

例えば，表の中でより薄い灰色の部分には橋梁システムにおける被災シナリオによって機能修復レベルが低下することを表している。つまり，システムの中で複数の部品が損傷を受け，復旧期間が長くなると想定される場合であり，同じ構造損傷度で満たされる復旧性をランクダウンさせなければならない。

池田は被災範囲の違い（内陸直下型地震と海洋プレート境界型地震）によって被災数が異なることから，海洋プレート境界型地震に対しては許容損傷度をより厳しくする考え方を示している。これも上の橋梁システムと同様に被災範囲によって復旧性に差が生じることを考慮したものである。したがって，プレート境界型地震のように被害が広範囲に及ぶ場合や被災地域が都市の場合は損傷度の定義をランクダウンさせなければならない。

図5.5.1は被災範囲の総損傷量と復旧期間のイメージを表したものである。復旧期間は総損傷量に比例する関係があると思われる。その比例関係における傾きは

表 5.5.1 橋梁システムにおける機能保持・復旧レベルと構造損傷度の関係

		機能保持レベル			
		I	II	III	IV
機能復旧レベル	i	D			
	ii		C	B	A
	iii		C	B	A
	iv		C	B	A

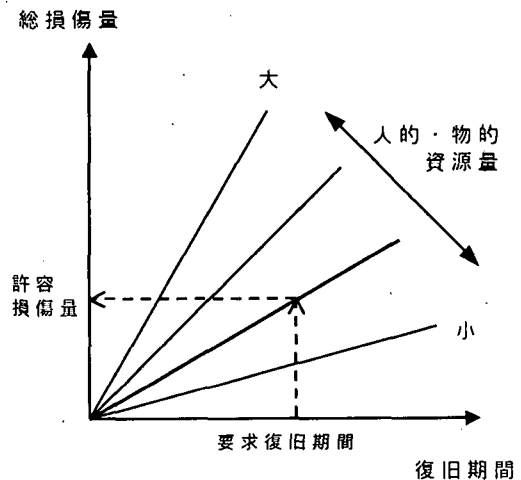


図5.5.1 損傷量と復旧期間の関係イメージ

人的・物的資源の投入可能量によって決まり、資源が多いほど傾きが大きく、短期間で復旧することが可能になる。資源量の算定は難しいことではあるが、見積もることができたならば、要求される復旧期間に対して許容総損傷量が算定される。

5.1で示したように橋梁システムは上部構造から基礎構造に至るまでほぼ直列のシステムから成っており、冗長性はそれほど多くないと思われる。このことから、例えば支承のように比較的小さな部品であっても、それが破壊してしまうとシステム全体の機能が失われてしまうことになる。したがって、橋梁システムにおいて機能保持のためにはシステムを構成する各部材の損傷は比較的小さいことが必要になり、地震に耐えるためには多くの部材に損傷を分散させることが望ましいかもしれない。一方、復旧性に関しては一カ所に損傷を集中させた方が補修、取り替えは容易と思われる。表5.5.1で濃い灰色を施してある領域は復旧性をより優先させた場合に相当する。このように機能保持・復旧に関しては、望まれる性能から構造損傷度との対応を適切に見直す必要がある。

いずれにしても耐震性能を考える場合には、被災シナリオをできる限り詳細に想定することが重要であると言える。

5.5.2 損傷制御設計フロー

本章の最後に機能を考えた性能照査型耐震設計法の流れについてまとめておく。性能照査型耐震設計法では使用限界と終局限界との間に幾つかの性能のグレードを設定し、要求に応じた性能を持つように設計することになる。これは終局限界の手前で構造物の損傷をコントロールすることであるから「損傷制御設計」[和田ら, 1998]とすることができる。

図5.5.2は損傷を制御する耐震設計のフローを示したものである。まず、要求から構造物の重要度と想定地震動の設定があり、重要度と想定地震動に対して構造物に要求される耐震性能が定められる。この耐震性能は許容される損傷度で表されるが、この損傷度は安全性、機能性、復旧性をまとめた概念である。そこで性能を明確にするため安全

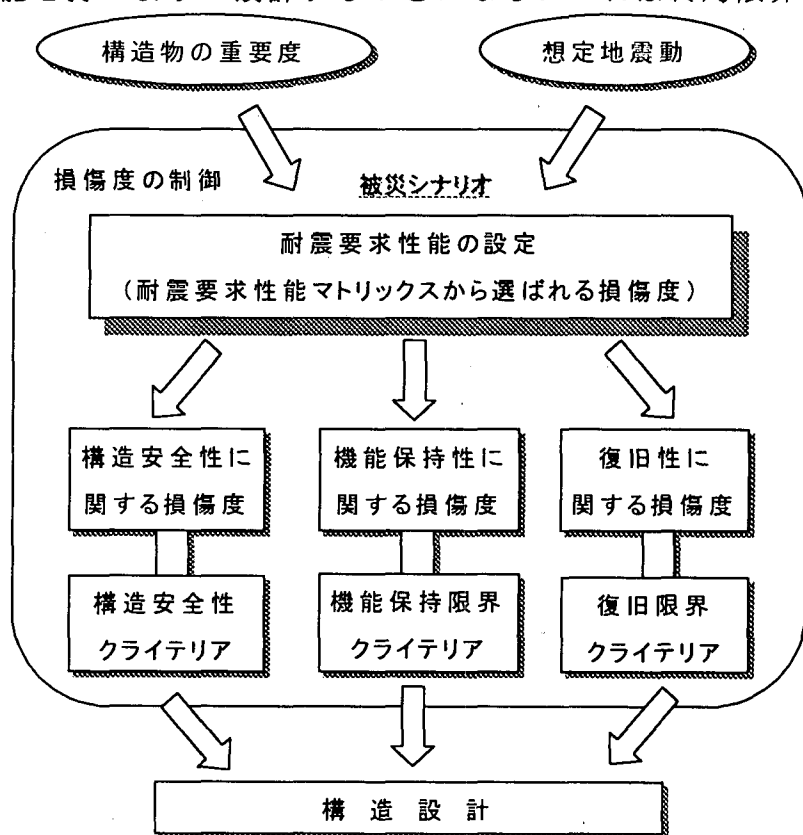


図5.5.2 損傷制御設計フロー

性，機能性，復旧性に関する損傷度を別々に設定する。機能性と復旧性については前節で述べたように被災シナリオを想定することが重要であり，シナリオから要求される損傷度が決められる。各性能に関する損傷度から設計クライテリアが決められるので，全てのクライテリアを満足するように構造設計がなされる。

参考文献

- [SEAOC, 1995] Structural Engineers Association of California (SEAOC) : VISION
2000 Performance Based Seismic Engineering of Buildings, 1995. 4.
- [鋼構造新技術委員会, 1996] 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.
- [土木学会, 1996] 土木学会: コンクリート標準示方書・耐震設計編.
- [日本道路協会, 1996] 日本道路協会: 道路橋示方書・V耐震設計編.
- [西川ら, 1996] 西川ら: 道路橋鋼製橋脚の被災と耐震設計に関する検討状況, 橋梁と基礎 96-8 西川他
- [Caltrans, 1997] San Francisco-Oakland Bay Bridge West Spans Seismic Retrofit Design Criteria, California Department of Transportation, Sacramento, CA.
- [宇佐美, 1997] 宇佐美勉: 鋼構造物の耐震設計の将来展望, “土木鋼構造物の耐震・免震技術の現状と将来の展望”, 平成9年度第3回技術講座, 土木学会中部支部, 1997.
- [阪神高速道路技術センター, 1997] (財) 阪神高速道路技術センター: 大震災を乗り越えて—震災復旧工事誌, 1997.
- [日本建築学会, 1998] 日本建築学会: 建築および都市の防災性向上に関する提言—阪神・淡路大震災に鑑みて—(第3次提言), 建築雑誌, Vol.113, No.1418, pp.009-015
- [和田ら, 1998] 和田章, 岩田衛, 清水敬三, 安部重孝, 川合廣樹: 建築物の損傷制御設計, 丸善, 1998. [日本建築学会, 1998] 日本建築学会: 建築および都市の防災性向上に関する提言—阪神・淡路大震災に鑑みて—(第3次提言), 建築雑誌, Vol.113, No.1418, pp.009-015.
- [Caltrans, 1999] Memo to Designers 20-1, Seismic Design Methodology, California Department of Transportation, Sacramento, CA.
- [大塚, 1999] 大塚久哲: 耐震基準の性能設計家の現状と今後の課題, 橋梁と基礎, 99-6. pp.39-43.
- [鉄道総合技術研究所, 1999] 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)
- [鋼構造震災調査特別委員会, 1999] 土木学会・鋼構造委員会・鋼構造震災調査特別委員会: 鋼構造シリーズ10—阪神・淡路大震災における鋼構造物の震災の実態と分析, 土木学会, 1999.3.
- [土木学会関西支部, 1999] 土木学会関西支部・阪神・淡路大震災調査研究委員会: 大震災に学ぶ—阪神・淡路大震災調査研究委員会報告書—, 1999.6.

[Duan et al., 2000] 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.

[土木学会・JSSC, 2000] 土木学会鋼構造委員会・日本鋼構造協会次世代土木鋼構造特別委員会：鋼構造物の耐震解析のベンチマークと耐震設計法の高度化