



# 社会基盤施設の地震災害軽減に資する耐震技術

運上茂樹

地震災害は、自然災害の中でも事前の予知が難しく、突発的に広域的、連鎖的な大災害を引起こす。1995年の兵庫県南部地震は、都市機能が高度に集積した大都市部を襲った初めての地震であり、多くの人命を奪うとともに、社会基盤施設も甚大な被害を受け、震後の避難や緊急物資の輸送などの救援活動に深刻な影響を及ぼした。本報文では、大規模地震に対して社会基盤施設の機能を確保するための主としてハード技術を対象として、その現状と今後確立が期待される地震災害軽減技術について整理を試みた。

キーワード：地震災害，耐震技術，社会基盤施設，災害予防対策技術，災害応急対応技術

## 1. はじめに

世界有数の地震国であるわが国では、これまで多くの地震被害を経験してきた。特に、1995年の兵庫県南部地震は、都市機能が高度に集積した大都市部を襲った初めての地震であり、6,400名を超える非常に多くの人命と生活基盤を奪うとともに、社会基盤施設も甚大な被害を受けた。

例えば、道路交通施設では高速道路の倒壊が複数箇所で見られるなど、従来にはなかった極めて甚大な被害が生じ、震後の避難や緊急物資の輸送などの救援活動に深刻な影響を及ぼした。

地震による影響を軽減するためには、

- ① 地震被害を発生させない、あるいは、発生しても都市機能に対して影響が軽微な程度/範囲に抑えられるように備えること、

が基本と考えられる。

ただし、地震動の大きさやこれによる地震災害の発生を事前に正確に予測すること、また、都市機能に影響のある被害を発生させないように全ての施設に対して事前の対応を施すことは経済的、時間的に現実には困難である。そこで、

- ② 地震被害が発生したとしても、これを早期に掌握し、かつ、早期の機能回復を図ることができるように備えること、

を組み合わせることが不可欠となる。

本報文では、このような地震災害に対して都市機能を支える社会基盤施設の機能を確保するための主とし

てハード技術を対象に、その現状と今後確立が期待される地震災害軽減技術について整理を試みた。

## 2. 地震対策技術の現状と今後

### (1) 防災基本計画

防災基本計画には、地震災害に対する基本的な考え方が示されている<sup>1)</sup>。

従来の災害対策では、想定される外力に対する災害予防に重点を置いて実施されてきたが、想定を超える外力が作用する可能性があること、また、想定を超える外力に対して災害を完全に予防することは財政的・技術的に限界があることから、災害応急対応や災害復旧・復興を通じて災害の影響を最小化する危機管理の概念が拡充されている。

防災基本計画では、災害の発生を未然に防止する災害予防対策、災害が発生した場合の災害の拡大や二次災害の発生を防止する災害応急対策、災害による社会・経済活動への影響を最小化する災害復旧・復興についての基本方針が示されている。現在の各種の地震対策については、これが最も基本的な考え方となっている。

また、地震に対する構造物・施設等の災害予防の基本的な考え方については、表1のように示されている。

構造物・施設等の耐震設計では、供用期間中に1~2度程度発生する確率を持つ一般的な地震動、及び発生確率は低いが直下型地震または海溝型巨大地震に起因するさらに高レベルの地震動を考慮すること、一般的な地震動に対しては重大な機能損失が生じず、

表一 防災基本計画における地震に対する構造物・施設等の災害予防の基本的考え方<sup>1)</sup>

		基本方針	
		供用期間中に1~2度程度発生する確率を持つ一般的な地震動(レベル1地震動)	発生確率は低いが高レベル地震動または海溝型巨大地震に起因するさらに高レベルの地震動(レベル2地震動)
構造物・施設等の重要度	通常の構造物・施設等	機能に重大な支障が生じない	人命に重大な影響を与えない
	重要度の高い構造物・施設等		人命に重大な影響を与えず、かつ、通常の構造物等に比べ耐震性能に余裕を持たせる

高レベルの地震動に対しても人命に重大な影響を与えないことを目標とすることとされている。

また、構造物、施設等の重要度に応じて高レベルの地震動に対しても耐震安全性に余裕を持たせることとされている。さらに、構造物、施設等の災害予防では、個々の施設の耐震設計による他に、代替性の確保や多重化等によってシステムとしての機能を総合的に確保

する対策も重要とされている。

(2) 地震対策技術

地震対策技術に関して、地震発生の時系列的(地震発生前、直前、地震発生直後の緊急対応、地震発生後の応急対策、地震発生後の復興期)に整理すると表一2のようになる。

施設そのものの耐震性を向上させたり、被害を早期に掌握しつつ応急対策や復興を行うためのハード技術と、それを都市のパフォーマンスの向上の観点から効果的、効率的に実施したり、また、災害時の各種の組織的な対応を行うといったソフト技術を効果的に組合せた対応が必要とされる。また、地震発生直後数十秒以内の時間を活用したリアルタイム地震対応も重要となっている。

(3) 地震対策に関するハード技術

表一2に示した地震対策技術のうち、災害自体の発

表一2 地震発生前後における時系列段階の対応事項と地震対策技術

震災発生前後の時系列		対応事項	地震対策技術
地震発生前	震災予防	<ul style="list-style-type: none"> <li>・災害に強い都市、地域整備、土地利用</li> <li>・都市システム機能・公共施設の機能の評価(被災時のインパクト評価、ネットワークシステムの耐震性の評価)</li> <li>・個別公共施設の耐震性の確保</li> <li>・施設機能の代替機能の確保、リダンダンシーの向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震動推定技術、地域別の地震危険度評価</li> <li>・被災予測技術、ハザードマップ(危険箇所の推定技術)</li> <li>・ライフライン施設(道路・上下水・電気・ガス・通信等)の耐震設計技術、既設施設の耐震補強技術</li> <li>・災害インパクト評価技術(都市システム全体のパフォーマンス評価)</li> </ul>
	危機管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・震災時の組織体制、関係機関との連絡協力体制の確立</li> <li>・震災情報システムの整備</li> <li>・復旧資機材の確保</li> <li>・防災知識の普及、訓練の実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・リスクマネジメント技術、災害マネジメント技術</li> <li>・災害シナリオの作成技術</li> <li>・災害過程・地震対応のシミュレーション技術(被災・避難・調査・復興・訓練シミュレーション技術)</li> </ul>
	観測・データベース化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震観測網の整備、強震観測データのデータベース</li> <li>・管理施設のデータベース</li> <li>・既往地震被害、復旧技術のデータベース</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・GISを用いた施設管理技術</li> <li>・災害情報システムとのリンク</li> </ul>
地震発生直前(緊急準備期)	地震発生の数ヵ月から数日前以内	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震予知</li> <li>・緊急準備(避難、災害・危険因子の停止・除去)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震予知技術</li> </ul>
地震発生直後(緊急対応期)	地震発生後数秒~数十秒以内(主要動の到達前)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・リアルタイム地震対応、緊急準備</li> <li>・災害・危険因子の停止、除去(システムの緊急停止等)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・リアルタイム地震対応技術(地震動の検知、影響推定、オートマチックな即時対応技術)</li> <li>・リアルタイム被害情報提供システム(緊急情報)</li> </ul>
	地震発生後~数時間以内	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震情報・観測データの収集</li> <li>・強震地域の特特定と被害予測</li> <li>・大被害の把握のための緊急調査と緊急調査に基づく緊急措置</li> <li>・余震対応</li> <li>・津波対応(数十秒~数分以内の情報)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・リアルタイム被害推定技術(地震情報、強震観測情報に基づく対象地域の被害予測)</li> <li>・地震被害検知技術(モニタリング技術、リモートセンシング技術、映像・画像、ITV、ヘリテレ、センサ)</li> <li>・地震被害調査技術(GPSを用いた調査手法)</li> <li>・リアルタイム被害情報提供システム(情報板、ラジオ、インターネット、情報ターミナル等マルチメディア、防災GISとのリンク)</li> <li>・津波対応技術(津波情報に基づく避難、即時対応技術)</li> </ul>
	地震発生後~1,2日程度以内	<ul style="list-style-type: none"> <li>・余震による2次災害の発生危険性の判定</li> <li>・2次災害の防止のための通行止め等の緊急措置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・施設の継続使用可能性の判定のための被災度の判定技術</li> <li>・機能停止技術(機能停止、代替システムへの転換)</li> <li>・被害情報提供システム(被害及び迂回路等の情報、防災GISとのリンク)</li> </ul>
地震発生後の機能回復(応急復旧期)	地震発生後数日から1週間程度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・施設の被災調査と被災度に応じた応急的な機能回復の方針の設定</li> <li>・施設の応急的な機能回復のための応急復旧(機能確保と余震に対する安全性を考慮)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・応急復旧に必要な被災度の判定技術</li> <li>・応急的な機能回復技術(機能、安全性能の確保)</li> <li>・リアルタイム被害情報提供システム(被害及び応急復旧情報、防災GIS)</li> </ul>
地震発生後の復興(本復旧・復興期)	地震発生後から数週間から長い場合で1年程度以内	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地中部等を含む詳細な被災調査と復旧方針の設定</li> <li>・施設の恒久的な性能回復のための本復旧(部材の撤去・再構築による復旧、被災部材の補強による復旧、長期耐久性確保のための復旧)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・損傷診断技術(非破壊、破壊)</li> <li>・早期復旧技術(撤去・再構築技術、復旧が容易な構造設計)(機能、安全性能、耐久性能の確保)</li> <li>・瓦礫処理技術</li> <li>・リアルタイム被害情報提供システム(被害及び復興情報、防災GISとのリンク)</li> </ul>

生をできるだけ軽減する「災害予防対策技術」と、災害発生時の早期の機能回復を実現する災害応急対応技術に関するハード技術で今後の確立が期待されると考えるものについて以下に示す。

地震災害予防対策技術としては、その損傷が都市機能に重大な影響を及ぼす施設を対象に、地域の地震条件や断層条件などから推定されるその地点で発生し得る地震動に対して、施設に所要の耐震性能を確保することが基本となる。このため、より確度の高い地震動の推定技術と、施設の耐震性を経済的に向上させる技術が必要とされる。

また、地震発生後には、施設の地震被害の発生の有無を早期に掌握し、これに対して効果的な対応を図ることが重要となるが、一般に明らかな大被害を除いて、被害がその機能に対して影響を及ぼす被害か否かの判定が困難となる場合が多い。このため、地震発生直後の混乱期において客観的に被害を掌握し、これを早期の応急復旧対応に結びつける技術が重要となる。

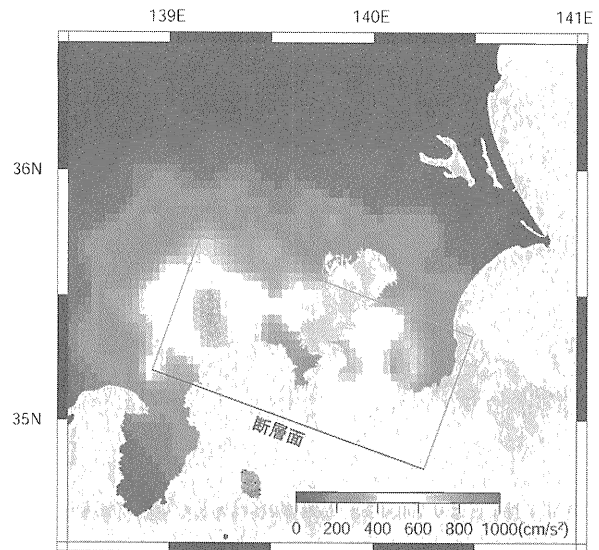
#### (a) 地域特性を考慮した地震動の推定技術

施設の耐震設計あるいは既設施設の耐震性能評価等の地震対策の基本的な方針を定めるうえで、地震がいつ、どこで、どの程度の規模で発生するかを事前に知ることができれば、効果的な対策が可能になるが、このようなことができるのは東海地域など非常に限られた地域に限定されるのが現状である。

また、地震がいつ起こるかが事前に正確にわからない場合でも、施設の地点周辺で発生し得る最大級の地震動レベルが推定できれば、相対的な地震危険度と確保すべき耐震性レベルの評価が可能になる。現在は、施設の存在する地点における過去の地震発生情報、活断層情報、地盤条件等を反映させて地震動を推定し、これを性能評価に用いることができるようになりつつある。

経験的グリーン関数法や統計的グリーン関数法といった断層を直接的に考慮した地震動の推定手法と断層モデルを用いた地震動の推定が実務設計においても用いられるようになってきている。

図-1は、統計的グリーン関数法により1923年関東地震の地震動強度分布を推定された事例を示したものである<sup>4),5)</sup>。地点によって地震動強度は変化し、断層の破壊過程を考慮したより精度の高い地震動の推定が可能となっている。このような地震動の推定は、地域の被害想定や構造物の耐震設計など各方面で活用されるようになってきているが、地震動の推定においては、断層パラメータが結果に大きな影響を及ぼし、その設定が非常に重要となることから、今後、実際の地



工学的基盤面における最大加速度

図-1 1923年関東地震の地震動強度分布の推定例<sup>4),5)</sup>  
(国土技術政策総合研究所による)

震記録との検証例を増やし、断層パラメータの設定法を確立していくことが必要と考えられる。

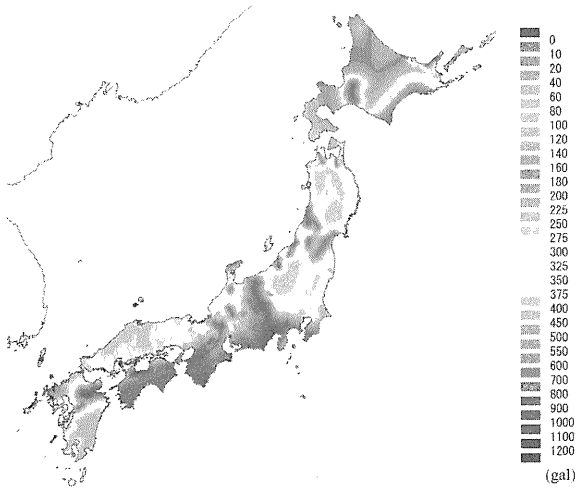
また、地域の地震危険度の評価を行う手法として地震ハザードマップがある。既往の地震ハザードマップは、一般に計器観測による過去百年程度の地震情報及び過去千数百年の歴史地震情報を用いて作成されているが、数千年以上とされる活断層の地震発生間隔を考慮すれば、十分な期間の情報が用いられているとは言い難く、また、活断層やプレート境界などで繰返し発生する大規模地震の発生位置が詳細には考慮されていない場合が多い。

このようなことから、既往地震の情報を考慮すると同時に、活断層及びプレート境界で繰返し発生する大規模地震に関して、近年蓄積されつつある情報も考慮できる地震ハザードマップ作成手法も開発されている<sup>4),6)</sup>。

図-2は、全国を対象にして作成されたモデルマップの事例を示したものである。危険断層のある地域における地震ハザードが大きく評価されていることがわかる。このようなハザードマップについては、断層情報等随時新たな知見を導入しながら高度化を図ることが重要と考えられる。

#### (b) 施設の耐震性能の向上のための高耐震構造・高機能構造技術

施設の耐震設計は、一般に、稀に起こるような大規模地震に対しては想定する部材に適切に損傷を誘導し、ここで確実に振動エネルギーを吸収することにより、大規模地震に対して構造全体としての所要の耐震性能を確保するように行われている。したがって、大規模



2001年1月1日より100年間の超過確率が5%となる最大加速度 (gal)

図-2 地震ハザードマップの試算例<sup>4),6)</sup>  
(国土技術政策総合研究所による)

地震時には何らかの損傷が構造物に生じ得ることを考慮することから、甚大な地震被害を受けにくく、あるいは、被害を受けたとしても地震後の診断、修復の容易な構造物が実現できれば地震後の早期の機能回復に有効となる。

地震に対する施設の高性能化、高機能化といってもいろいろな観点考えられるが、以下の3点が挙げられる。

- ① 地震被害を受けない、あるいは、受けにくい耐震構造 (弾性限界・終局限界の高性能化)
- ② 地震被害を自己検知する耐震構造 (自己診断機能)

③ 地震被害を受けても容易に復旧可能な耐震構造 (自己修復機能)

このような観点から従来にはない高性能、高機能耐震構造の可能性について例を挙げてみると、表-3のような構造が考えられる<sup>7)</sup>。

① 地震被害を受けにくい耐震構造

施設が地震被害を受けにくいように耐震性能の高性能化を図る方法としては、その力学的特性から、一般に、

- ・耐力・変形性能等の構造特性を向上させる、
- ・作用する慣性力を低減する、

方法が考えられる。

こうした高性能化を図るための方法の一つとしては、高強度材料や高弾性材料等の高性能材料の活用がある。ここで、どの耐震性能の向上にポイントを置くかによって高性能材料の選択方法、配置方法が異なってくることになり、例えば、表-3に示したように高耐力構造、高弾性構造、高剛性構造、超弾性構造、高じん性構造などが考えられる。

一方、地震の影響を低減する構造の代表例としては免震構造があり、現状の免震構造をさらに高性能化を図ることが考えられる。さらに、構造物位置において大規模な地盤変位が生じた場合でも致命的な被害を防止することを目的とする変位免震構造も考えられる。

地盤の変位は、断層条件によって上下、水平、様々な方向に生じ得るが、あるレベル以下の相対変位に対しては、変位に応じて桁が伸び縮みする伸縮桁や、桁が落下するのを防止できる高性能伸縮構造、支持機構

表-3 次世代高性能・高機能耐震構造の可能性<sup>7)</sup>

分類	特性・性能	高性能・高機能耐震構造の構造イメージ
① 地震被害を受けない、あるいは、受けにくい耐震構造	構造の高性能化	高耐力構造 ・高強度材料 (高強度鉄筋, PC鋼材, 高強度コンクリート等) を用いた高曲げ耐力構造, 高せん断耐力構造
		高弾性構造・高剛性構造 ・PC鋼材等弾性限の広い高強度材料を用いた弾性変形領域の広い構造 ・高弾性特性を有する高性能材料を用いた高剛性構造
		超弾性構造 (弾性変形吸収構造) ・地震時の変形を弾性変形吸収部材, 弾性変形吸収装置により吸収する超弾性構造
		高じん性構造 ・圧縮側材料 (コンクリート等) の高拘束と引張り側材料の伸び性能, 低サイクル疲労特性を高性能化した高じん性構造 ・損傷を分散させ, 特定の箇所に集中させない損傷分散制御構造
地震の影響の低減	地震時慣性力の影響の低減 (免震構造)	・高免震構造 (高性能すべりタイプ支承等を用いた高免震構造等) ・桁間あるいは桁と橋台間で緩衝構造を介して衝突を積極的に発生させることにより桁の振動エネルギーを吸収する衝突免震構造
	地震時地盤変位の影響の低減 (変位免震構造)	・連結桁の伸縮上部構造 (伸縮桁構造) ・高性能伸縮構造 ・大变位に対する支持機構を有する構造
② 地震被害を自己検知する耐震構造	自己診断構造	・センサネットワークを配置したモニタリング構造 ・センサ材料と構造材料の両特性を有するインテリジェント材料 (CFGFRP, TRIP鋼等) を活用した構造
③ 容易に復旧可能な耐震構造	高復元性構造	・残留変形を小さくすることが可能な高復元性構造 ・残留変形を小さくすることが可能な2次剛性の大きい非線形履歴特性を有する構造 ・損傷を分散させ, 特定の箇所に集中させない損傷分散制御構造 ・残留変形を自己復元可能なインテリジェント材料 (形状記憶合金等) を用いた構造

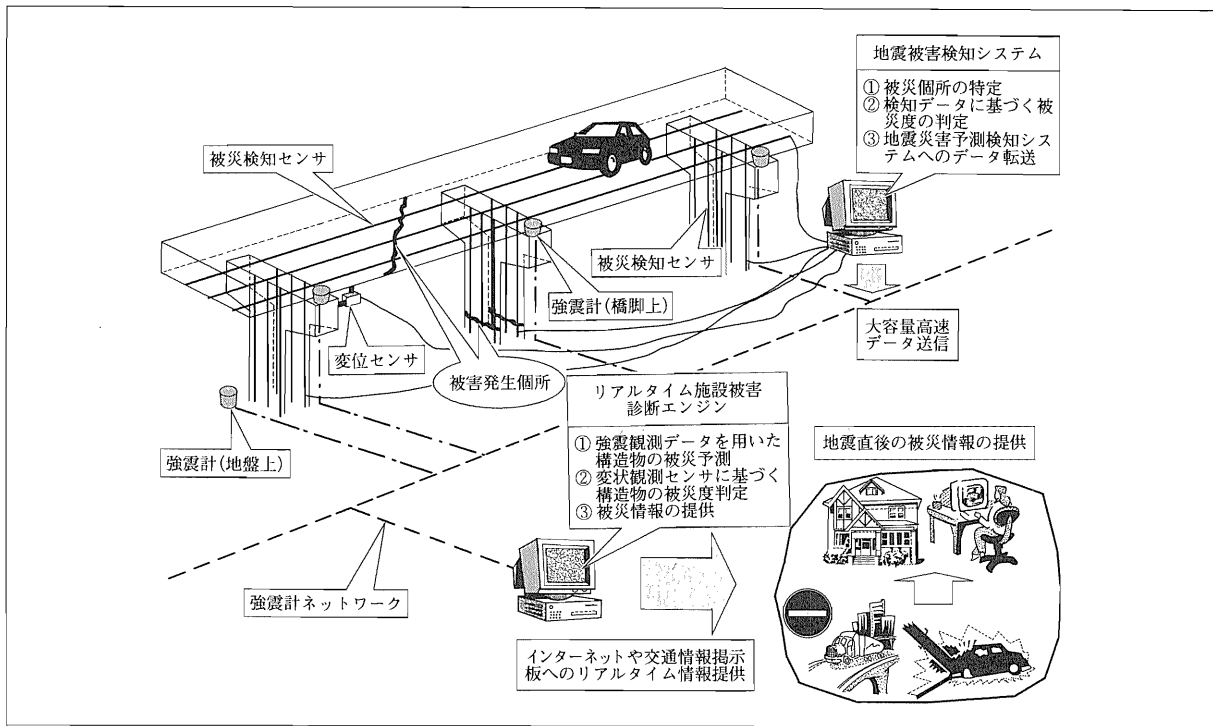


図-3 センサネットワークと被災診断

などが考えられる。

② 地震被害を自己検知する耐震構造

例えば、橋梁をはじめとする道路交通施設を考えると、地震発生直後の調査では、従来は、路面の大きな亀裂や欠壊、橋脚の大きな傾斜やひび割れなど目視で明らかに確認できる大きな損傷を中心に調査し、これをもとに被災度を把握し、必要に応じて通行止めなどの緊急措置を講じる方法が用いられてきている。

しかしながら、構造物が複雑化したり、また、夜間などで目視調査が困難な場合や地中部の構造部分などで地表面からの被災の把握が困難な場合がある。また、被害度の判定精度についても、あくまで外観からの判定が基本となるため、ある範囲での主観的な被災度の判定とならざるを得ない。

このような状況に対しては、図-3に示すように構造物にセンサを設置し、地震後の緊急調査において簡単なテストのようなものをもっていくだけで、誰でも被災度を確実に、かつ、精度よく判定できるようになれば地震被害調査に有効と考えられる。

もちろん常時モニタリングすればリアルタイムでの診断も可能となり、強震データと施設管理データベースをもとに、即時的に被害発生を推定する震害予測システム<sup>8)</sup>と連携することによりさらに精度の高い被害予測が可能となる。

③ 地震被害を受けても容易に復旧可能な耐震構造

早期に復旧が可能な耐震構造としては、いかに復旧しやすいように構造物に損傷を誘導するかといった損傷制御設計が重要となる。損傷制御設計とは、構造物が大規模地震時に対して、想定する損傷モードが生じるように、構造物内に耐力の階層化を図る設計方法である。

損傷を誘導する部材は、いわゆるヒューズのような役割として所定の外力以上が作用した場合に確実に損傷し、他の重要部材への損傷を防ぐとともに、その損傷が構造物の致命的な損傷に結びつかないことと、損傷制御部材の交換によって、簡単に元の状態に復旧可能となる構造イメージである。

現在の一般に用いられている構造物の設計方法も基本的には、こうした損傷制御設計の概念が取り入れられているが、まだ、確立されたものとはなっていない。

4. ま と め

本報文では、地震災害に対して都市機能を支える社会基盤施設の機能を確保するための主としてハード技術を対象に、その現状と今後確立が期待される地震災害軽減技術の一部について整理した。

今後、さらに、都市のパフォーマンスを効果的かつ飛躍的に向上させることが可能な技術開発が期待される場所である。

## 《参考文献》

- 1) 中央防災会議：防災基本計画，平成9年6月
- 2) 日本道路協会：道路震災対策便覧，震前対策編・震災復旧編，平成14年4月
- 3) 土木研究所，日本道路公団，首都高速道路公団，阪神高速道路公団，(財)土木研究センター：兵庫県南部地震の経験を踏まえた道路橋の震前対策及び震災復旧に関する事例集，共同研究報告書第272号，平成13年3月
- 4) 国土交通省ホームページ：新道路技術五箇年計画，地域性を考慮した地震動の評価及び次世代耐震設計技術，<http://www.mlit.go.jp/road/road/new5/04/04.html>
- 5) 片岡正次郎，日下部毅明，村越潤，田村敬一：想定地震に基づくレベル2地震動の誤定手法に関する研究，国土技術政策総合研究所報告，第15号，平成15年10月
- 6) 中尾吉宏，日下部毅明，村越潤，田村敬一：確率論的な地震ハザードマップの作成手法，国土技術政策総合研究所研究報告，第16号，平成15年10月
- 7) 運上茂樹，足立幸郎，星隈順一：次世代高性能・高機能耐震構造に関する実験研究，土木技術資料，Vol.42，No.9，pp.46-51，2000年9月
- 8) 日下部毅明，杉田秀樹，大谷康史，金子正洋，浜田 禎：即時震害予測システム（SATURN）の開発，国土技術政策総合研究所資料，第71号，2003年1月

## 【筆者紹介】

運上 茂樹（うんじょう しげき）  
 独立行政法人土木研究所  
 耐震研究グループ  
 耐震担当  
 上席研究員



## 建設工事に伴う 騒音振動対策ハンドブック

「特定建設作業に伴って発生する騒音の規制に関する基準」（環境庁告示）が平成8年度に改正され，平成11年6月からは環境影響評価法が施工されている。環境騒音については，その評価手法に等価騒音レベルが採用されることになった等，騒音振動に関する法制度・基準が大幅に変更されている。さらに，建設機械の低騒音化・低振動化技術の進展も著しく，建設工事に伴う騒音振動等に関する周辺環境が大きく変わってきている。建設工事における環境の保全と，円滑な工事の施工が図られることを念頭に各界の専門家委員の方々により編纂し出版した。本書は環境問題に携わる建設技術者にとっては必携の書です。

## ■掲載内容：

- 総論（建設工事と公害，現行法令，調査・予測と対策の基本，現地調査）
- 各論（土木，コンクリート工，シールド・推進工，運搬工，塗装工，地盤処理工，岩石掘削工，鋼構造物工，仮設工，基礎工，構造物とりこわし工，定置機械（空気圧縮機，動発電機），土留工，トンネル工）
- 付録 低騒音型・低振動型建設機械の指定に関する規程，建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法，建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法の解説，環境騒音の表示・測定方法（JIS Z 8731），振動レベル測定方法（JIS Z 8735）

■体 裁：B5判，340頁，表紙上製

■定 価：会 員 5,880円（本体5,600円） 送料 600円

非会員 6,300円（本体6,000円） 送料 600円

・「会員」 本協会の本部，支部全員及び官公庁，学校等公的機関

## 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館） Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289