

これからの耐震設計のあり方に関する一考

～ 地震レジリエンス強化サイクルの駆動継続 ～

運上 茂樹*1

本論は、東日本大震災から10年が経過し、改めて本大震災による激甚な被害経験から得られた教訓を振り返るとともに、南海トラフ巨大地震や首都直下地震などの大規模地震発生の切迫性が指摘される中で、社会インフラの1つを構成する橋梁構造分野に焦点を絞り今後の耐震設計のあり方に関する一私見をまとめたものである。シミュレーションを通じた経験知の蓄積と拡大を通じた地震レジリエンス強化サイクルの駆動継続と想定を超える外力にも対応可能な耐震構造コンセプトについて論ずる。

キーワード：耐震設計，地震レジリエンス，超過作用，シミュレーション能力

1. はじめに

マグニチュード9.0という巨大地震による東日本大震災では、従来の想定をはるかに超える巨大津波を発生させるとともに、東北地方から関東地方に至る広い地域で強い揺れを生じ、激甚かつ広域的な災害を引き起こした¹⁾。

改めて、東日本大震災によって明らかにされた重大な教訓は何だったのか？

- 1) 従来の経験や想定を大きく超える規模の自然災害に対する備え
- 2) 地震・津波・洪水・地すべりなどが同時・連続・複合的に発生するマルチ・ハザード災害に対する備えが不可欠であるということであったと考える。

東日本大震災から10年が経過する。こうした東日本大震災の教訓を踏まえ、それまで十分に対策の検討が行われてこなかった想定を超えるような災害リスクに対しても住民の生命を守ることを最優先とし、「減災」の考え方に基づくハード・ソフト施策の総動員、大規模災害への対応力を高めた国土基盤の構築、じん性の高い多重防御といった観点で、社会基盤の地震レジリエンスを高めるための様々な対策が進められてきた。

一方、我が国では、遠くない将来確実に発生するであろう南海トラフ巨大地震や首都直下地震等の大規模地震への備えが求められている。2013年12月「国土強靱化基本法²⁾」に示された3つの基本方針：「人命の最大限の保護」、「社会機能の維持、被害の最小化」、「迅速な復旧復興」に資す

る社会インフラ・システムの構築・転換整備が喫緊の課題となっている。

本論では、こうした大規模地震発生切迫性が指摘される中で、社会インフラの1つを構成する橋梁構造分野に焦点を絞り、今後の耐震設計のあり方について考えてみたい。

2. 先達が地震と戦い開発してきた耐震技術

橋梁構造分野の今後の耐震設計のあり方を論ずる上で、耐震技術は、これまでどのように発展し、そして、どこまで進んできたかを認識することが大前提と考える。この歴史は、先達技術者が、過去の数多くの地震被害に向き合い、それを乗り越えるべくどのように取り組まれたかを示すものである。

表-1は、筆者がよく用いている年表であるが、改めて本論でも示したい。1923年関東地震以降の被害地震の発生とその教訓をもとに開発、発展してきた橋梁構造の耐震技術の進化の歴史を一覧したものである^{3～9)}。

ここで、重要な技術開発の転換点やマイルストーンについて示す。橋梁の設計において、地震の影響を具体的に考慮するようになったのは、関東地震によって2000橋近い橋が被害を受けたことが契機となった。橋台・橋脚等の設計に、地震力に相当する静的な慣性力を作用させた弾性解析に基づく「震度法と許容応力度法」が初めて導入された。これによって、その後の被害橋数は劇的に減少するようになった。1964年新潟地震では、砂質地盤の液状化に伴う落橋被害により「液状化に対する設計法（液状化判定法と基礎の設計法）」が開発・導入された。1978年宮城県沖地震では、震度法や液状化設計法の導入によって基礎構造が強化された結果、次の弱点部となったねばりの少ない鉄筋コンクリート橋脚に損傷が発生するようになった。宮城県沖地震等による被害経験から、部材の破壊特性や変形性能の評価に関する一連の大型実験研究が大きく展開し、その成果は、大規模地震時の損傷を許容範囲内に収めるという耐震設計を実現可能な「地震時保有水平耐力法」^{6,7)}として結実した。この設計法は、1990年の道路橋示方書に規定され、L1地震、L2地震という2段階の設計地震動を考慮



*1 Shigeki UNJOH

東北大学大学院
工学研究科 教授

表 - 1 橋梁構造の地震被害と耐震技術開発の歴史⁹⁾

年代	主な被害地震	道路橋の耐震設計関連規定	耐震技術開発			
			耐震要求性能	外的作用（地震作用）	耐震設計法・性能照査法	耐震構造・構造設計コンセプト
1920(大正9)年	1923(大正12)年 関東地震(M7.9)	1926(大正15)年 道路橋造に関する細則案	大正12年関東地震による被害を踏まえた仕様設計	大正12年関東地震相当 (水平震度0.1~0.3程度)	震度法と許容応力度法 (弾性設計・静的設計)	
1930(昭和5)年		1939(昭和14)年 鋼道路橋設計示方書案				
1940(昭和15)年	1948(昭和23)年 福井地震(M7.1)	1956(昭和31)年 鋼道路橋設計示方書				
1950(昭和25)年	1952(昭和27)年 十勝沖地震(M8.2)	1964(昭和39)年 鋼道路橋設計示方書				
1960(昭和35)年	1964(昭和39)年 新潟地震(M7.5)	1971(昭和46)年 道路橋耐震設計指針				
1970(昭和45)年	1971(昭和46)年 米国サンフェルナンド地震(Mw6.6)					液状化設計法(判定・基礎の設計) フェイルセーフ設計法(落橋防止構造)
1980(昭和55)年	1978(昭和53)年 宮城県沖地震(M7.4) 1983(昭和58)年 日本海中部地震(M7.7) 1989(平成元年) 米国ロサンゼルス地震(M7.1)	1980(昭和55)年 道路橋示方書V耐震設計編			じん性設計法 (変形性能の照査)	鉄筋コンクリート部材の設計法・配筋細目(せん断・段落し等)
1990(平成2)年	1993(平成5)年 釧路沖地震(M7.8) 北海道南西沖地震(M7.8) 1994(平成6)年 米国ノースリッジ地震(Mw6.7)	1990(平成2)年 道路橋示方書V耐震設計編	①中規模地震に対する健全性の確保 ②大規模地震に対する致命的な被害の防止	2段階耐震設計法・2段階地震動 ①レベル1地震動(中規模地震)(震度0.1~0.3) ②レベル2地震動(関東地震相当の大規模地震)(震度0.7~1.0)	震度法(弾性設計) 地震時保有水平耐力法(静的設計・震度法・RC橋脚の塑性設計)	本格的なじん性設計法の導入 多径間連続構造・地震時水平力分散構造・免震設計法の適用
	1995(平成7)年 兵庫県南部地震(M7.3)	1995(平成7)年 兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様	耐震性能1~3 ①中規模地震に対する健全性の確保(耐震性能1) ②大規模地震に対する安全性・供用性・修復性の確保(重要度に応じて、耐震性能2,3)	②レベル2地震動(兵庫県南部地震のようなM7級内陸地震の追加)(震度1.5~2.0)	地震時保有水平耐力法(支承・橋脚・基礎等主要部材への適用) 動的解析による照査(非線形動的解析)キャパシテイ・デザイン 変位ベース設計法	免震設計法の本格導入 構造部材(RC・鋼・その他)のねばり強い構造(じん性確保)のための構造細目
	1999(平成11)年 トルコ・コジャエリ地震(M7.4) 台湾・集集地震(M7.3)	1996(平成8)年 道路橋示方書V耐震設計編	耐震性能に応じた限界状態	断層変位 断層近傍地震動(速度強度の大きいパルス的な地震動)	静的設計から動的設計へ	液状化に伴う流動化設計法 耐震性の低い既設建造物の耐震補強法(部材・全体系)
2000(平成12)年	2003(平成15)年 十勝沖地震(M8.0) 2004(平成16)年 新潟県中越地震(M6.8) スマトラ沖地震(Mw9.3) 福岡県西方地震(M7.0) 2007(平成19)年 能登半島地震(M6.9) 新潟県中越沖地震(M6.8) 2008(平成20)年 中国四川大地震(Mw7.9) 岩手・宮城内陸地震(M7.2)	2002(平成14)年 道路橋示方書V耐震設計編	仕様規定型基準から性能規定型基準へ(性能を満足する新材料、新構造の採用可能性の拡大)	個別断層・個別地震による地震動評価 長周期地震動の影響 津波の影響		高性能構造(高強度材料等の活用) 制震設計(ダンパー等の活用)
2010(平成22)年	2010(平成22)年 チリ地震(Mw8.8) 2011(平成23)年 東北地方太平洋沖地震(Mw9.0) 2016(平成28)年 熊本地震(M6.5,M7.3)	2012(平成24)年 道路橋示方書V耐震設計編 2017(平成29)年 道路橋示方書V耐震設計編	津波の影響を受ける橋の構造計画の考え方を規定 本格的な性能規定化 部分係数設計法・維持管理手法に関する規定の導入 斜面崩壊・断層変位・津波対策の考え方を規定	巨大地震・広域災害・巨大津波・長時間地震動・複合災害 ②レベル2地震動(プレート境界型大規模地震の地震動の再評価)(震度1.2~1.4) 2連続地震 断層変位 斜面崩壊	本格的な信頼性設計法の導入 限界状態設計法	津波の影響を受けにくい構造 地盤変位に対し適用性の高い構造(ラーメン構造等)
	将来の大規模地震の発生		レジリエンス性能(4Rコンセプト) (人命第一・被害最小化・早期復旧)	マルチ・ハザード(オール・ハザード)(地震動・津波・地盤変位(断層変位・斜面崩壊)・その他の外的作用のハザード評価)、超過外力・複合作用	マルチ・ハザード(オール・ハザード)設計法(津波・地盤変位対策) レジリエンス性能設計法 シミュレーション能力強化(社会システムを含む大規模モデリング) 重要建造物のリスクベース設計 劣化損傷を考慮した構造リスク評価	被害最小化構造(ダメージコントロール・ダメージフリー) 修復しやすい構造・迅速復旧構造 ABC(急速施工)構造 インテリジェント耐震構造(自己診断構造・自己修復構造) 状態把握(センサモニタリング) 高耐久性構造

する「2段階耐震設計法」とともに、それぞれの地震動に対して「健全性の確保」あるいは「崩壊防止」といった達成すべき目標を明示するという、現在ではあたり前となった「性能設計法」の考え方が導入された画期的な耐震設計コンセプトであった。

関東大震災以来最大の被害を引き起こしたのは、1995年兵庫県南部地震であった^{10,11)}。従来経験したことのないような強烈な地震動により、多くの構造物に激甚な被害を引き起こし、構造物の耐震設計法が抜本的に見直されることになった。兵庫県南部地震のような「内陸直下で起こるM7級の地震」による地震動が耐震設計において考慮すべき地震動として位置付けられるとともに、橋全体系としてねばり強く地震に耐える構造を目指し、橋脚、基礎、支承等の各構造部材に対して「地震時保有水平耐力法」が適用される本格的なじん性設計法の導入となった。構造物の損傷の進展を追跡するための「非線形域を考慮した動的解析法」、長周期化やエネルギー吸収性能の向上によって強震動の影響の低減を図るための「免震設計法」も、従来を大きく超える強震動に対する耐震構造を実現するために不可欠な設計ツールや構造法として広く普及、展開した。また、「地震時保有水平耐力法」の適用を確実にするために、地震による損傷を意図した構造部位に誘導し、そこでエネルギー吸収を確実に図ることにより橋全体としての安全性を確保するという「キャパシティ・デザイン（損傷制御設計法）」コンセプトも導入された。

兵庫県南部地震では、従来経験のない強烈な地震動を経験したが、その後、国内外で発生した巨大地震では、地震発生のたびに従来経験したことがなかった、あるいは、従来の経験を大きく超える、いわゆる想定外とも言われるような事象が次々と発生し、我が国の社会・経済に対し重大なインパクトを与えるとともに、構造物の耐震設計の考え方にも大きな影響を及ぼすこととなった。

1999年トルコ・コジャエリ地震や台湾集集地震：多くの落橋被害を生じさせた10m規模の極めて大きな「地表地震断層の出現」、2003年十勝沖地震：長大橋の耐震性に大きな影響を及ぼす「長周期地震動」、2004年スマトラ沖地震そして2011年東日本大震災：30m規模の「巨大津波」による多くの橋梁の流失被害、2008年岩手・宮城内陸地震、2016年熊本地震：大規模な「斜面崩壊等の地盤変状」による落橋被害、2008年中国四川地震、2010年チリ地震、2011年東日本大震災：M8直下～M9級の大規模地震により延長約500kmにも渡る「広域多発災害」、そして地震と津波あるいは原子力災害による「複合災害」、2016年熊本地震：「連続して発生した2つの地震」による同地域での強震動の連続¹²⁾、がまさに従来の経験を超越する事象となった。

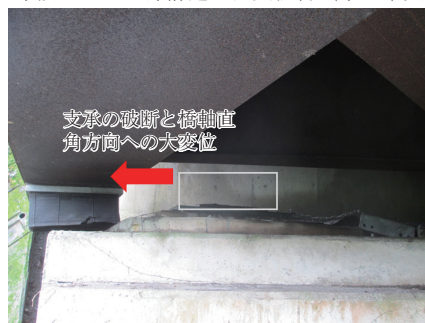
前述のように、兵庫県南部地震以降、例えば橋脚基部に損傷を誘導しエネルギー吸収を図るという損傷制御設計法が導入されたが、東日本大震災では、津波の主に浮力作用による上部構造の浮き上がりや支承部からの分離、そして流出・落下という破壊モード（写真-1(a)）が、熊本地震では、強震動とともに地盤変状に伴う基礎の水平あるいは

は上下方向の大変位によって、損傷や破壊が想定した橋脚基部ではなく支承接合部に生じ、上部構造が大きく変位するという破壊モード（写真-1(b)）が発生するなど外力作用の種類や方向、大きさが想定と異なることによって確実な損傷制御が実現できなかったという課題も明らかになった。

さらに、「津波、斜面崩壊および断層変位の影響」については、現時点ではこれらのハザードの推定精度に限界があるとともに、その規模によっては個々の構造物の設計においてこれらを直接的に取り込んで、崩壊などの重大被害を防ぐことにも限界がある。現状では、それらの影響を受けないように架橋位置または橋の形式の選定を行うこと、被災時の機能回復の方策とそれに必要な資機材の整備、道路網の多重化による被災時の補完性を確保できる路線計画を含め、地域の防災計画とも整合する対策を講じるなど、ハード・ソフトの両面からの対策が必要とされている³⁾。



(a) 津波による上部構造の流失被害（東日本大震災）



(b) ゴム支承の破断と上部構造の大変位（熊本地震）

写真-1 想定する損傷制御が実現できなかった被害例

3. 地震レジリエンス強化サイクルの駆動と課題

これまでの耐震技術開発の歴史を見ると、多くの地震被害の経験から得られた教訓を1つ1つ克服しながら、より耐震性に優れた橋梁構造やその設計法を開発し、技術基準等への反映を通じて社会実装することを繰り返し、それによって地震に対する社会の安全性を向上させてきたと考える。筆者は、図-1に示すこのサイクルを「地震レジリエンス強化サイクル」と呼んでいる。すなわち、地震によって被害が発生した場合には、なぜその被害が発生したのか、あるいは、なぜ被害が発生しなかったのかについて、強震観測データや構造特性面から分析し、その結果に基づ

き、これを解決するために必要な対策技術を研究・開発し、これを技術基準等への反映を通じて社会実装するというサイクルである。そして、新たに実装された耐震技術についても、次の地震を経験することによって、その効果を検証し、必要な技術の改良、あるいは、新たな技術を開発し、社会実装を繰り返すことによって、被害の最小化に結び付けていくというものである。得られた教訓に基づく対策技術の研究・開発においては、直接的な問題解決（ソリューション）とともに、構造物の価値を格段に高めることが可能な従来にはない画期的（イノベーション）な研究・開発も重要であり、「免震構造」などは後者の1つと言えよう。

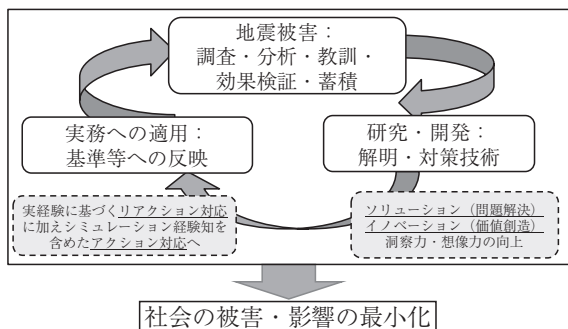


図 - 1 地震レジリエンス強化サイクルの駆動と課題

これまでの多くの地震被害に基づく本強化サイクルの継続的な駆動は、地震被害の絶対数を減少させることに大きく貢献してきたと言える。こうした蓄積の一例としては、例えば、東日本大震災において国土交通省東北地方整備局が太平洋岸の津波被災地への緊急支援のための道路網の啓開に際し、「くしの歯」作戦を展開し短時間での緊急輸送路の確保が実現されたが、兵庫県南部地震以降の耐震設計法の開発・整備、既設構造物に対する耐震補強事業の実施が有効に貢献したことも指摘されている。

このように、地震レジリエンスの強化サイクルを駆動することによって、被害と社会への影響は確実に軽減されてきたと考えるが、現状で欠けている視点はないだろうか？

これまで、激甚な被害を経験し、教訓を得て、課題を克服する技術開発を行うという、いわば「リアクション（受身）」的な研究・開発が中心であったとは言えないだろうか。教訓に基づく問題意識を明確にし、それを解決していくというのは研究開発の基本であることは言うまでもない。しかしながら、前述のとおり、兵庫県南部地震以降、近年の地震では、地震発生のたびに従来経験したことがなかった、あるいは、従来の経験を大きく超える外力作用、地震・津波・断層変位・斜面崩壊の同時・連続作用、さらには、原子力施設などの社会インフラの被害による新たな災害現象の誘発・複合化などが継続しており、実経験に基づく知識は非常に限られたものであることが改めて認識される。東京圏、名古屋圏、大阪圏といった高度に人口が集中し都市機能が集積した地域、情報化が発達し、交通・電力等ライフラインに極度に依存した都市構造、一方で高齢化・人口減少が進む地方が併存する現代社会の中で、新たな現象・被害が継続的に出現するであろうことは容易に推測され

る。こうした変化・進化しつつある災害の中で可能な限りの被害の最小化と災害発生時の迅速な事後対応への備えが求められている。これは、「経験知」の蓄積のための地震レジリエンス強化サイクルの駆動だけでは不十分ということであり、解決策を見出してもそこで思考停止に陥らず、今までは起きていないが将来起こるかもしれない事象を想像し、それを先取りして備えるという「アクション（能動）」的技術開発が従来にも増して重要になっていると考える。人間は、身近で実際に自分が経験しないと実際のものとして理解、認識できないということではあるが、少なくとも構造設計に携わる技術者は、過去の歴史や経験に学ぶとともに、新たな災害事象の出現に対する感度を高めて備えることが重要と考える。

このような「アクション」的技術開発を推進する上で必要となるのはフレキシブルな想像力と洞察力であり、このためには、そうした事象を再現、体験するための「シミュレーション能力」の強化が不可欠と考える。例えば、構造物単体を考えると、超過外力や地震と津波、地盤変状などの複合作用を受けた場合の挙動シミュレーションから、構造物内での損傷モードのトレードオフ問題を知ることによって、例えばねばり強さを高めるための構造計画や損傷制御の方法が見い出せると考える。さらには、都市や地域などより広範囲の現実社会をモデル化し、様々な地震作用の条件を仮定したシミュレーションを通じて、弱点部の抽出、対策案の可能性、対策後の費用対効果問題についての解を導出できる能力の強化である。

実際の経験知に加え、こうしたシミュレーション結果も経験知の1つとして有効に組み込み活用すべきと考える。シミュレーション能力を強化するためには、シミュレーションモデルの精度向上、簡易にあるいは自動的に高精度モデルの構築が可能なインターフェイスや情報活用方法、解析のための条件設定方法を含め、得られた結果を経験知として、想定を超える災害事象に対する我々の洞察力を効果的に高めるとともに、技術基準などへの反映、そして、実際の震災対策事業などに結び付けていけるようなレベルへの能力強化を目指すことが重要と考える。

4. 次世代の耐震構造コンセプト

筆者は、2006年の拙著¹³⁾において「10年後の耐震設計論とは？」と題して以下のような一私見を示した。

超過作用を含め不確実性が高い地震に対して、精度を高めるには限界があり、構造物をどこまでも「強くすること」は現実的ではないことから、技術的な観点から抜本的な改革ができないかと考えるところである。すなわち、
「地震力が大きくなっても心配不要。現状では、地震動の推測精度に限界があるため、そうしたことに影響しない耐震設計法を使っている」と言えないかということである。もちろん、安全率を十分に大きくとっているからという議論ではなく、である。

2006年から10年以上が経過したが、まだこのようなレベルに到達できている段階にはないと考える。ここでは、本耐震構造コンセプトの実現に向け、筆者の考える1視点

について紹介したい。

将来の技術コンセプトとして示した表 - 1 の下段の 1 つでもあるが、本コンセプトは、「想定を超えるような超過地震力に対してもねばり強く抵抗（コンセプト①）し、仮に被害が発生してもその状態を適格に検知、診断（コンセプト②）し、そして容易に修復可能な構造」を意図している。

コンセプト①は、地震被害を受けない・受けにくい構造であり、「ダメージフリー構造（地震の影響にセンシティブではない構造）」と呼ばれている。図 - 2 に示すように、地震作用（慣性力、波力、変位など）の強度に比例させて構造物の保有性能を高めるとするのが従来の構造設計における安全性確保の考え方であるが、新たな構造機構によって超過地震力をやりすごし被害を受けにくくするというものである。想定を超える超過地震力に対して従来構造よりも数倍以上ねばり強く抵抗し、所要の性能を發揮させるための構造機構をどのように具体的に実現できるかが課題である。

また、地震被害を受けた際に社会への影響を最小限にするためには、被災した構造物の機能を早期に復旧することが必須であり、そのためには、まずは迅速に構造物の損傷状況を正確に把握することが第一である。コンセプト②は、被害状況を自己検知・自己診断可能な構造機構である。従来から構造物モニタリング研究が活発に進められてきているが、完成した構造物に対して何をどう測定すればよいかという考え方ではなく、逆転の発想として重要損傷を確実に特定できるように構造機構自体をあらかじめ構成しておき、その変形量を測定、検知することによって確実に診断、継続使用の可能性を判断できるようにするというものである。

「ダメージフリー構造」のより具体的な例として、「マルチ・アブゾーバ／マルチ・ステップ変形吸収機構」コンセプトを紹介する。「マルチ・アブゾーバ変形吸収機構」とは、図 - 3 に示すように、損傷を 1 部材の 1 か所に確実に集中させるという従来の損傷制御コンセプトから、1 部材内の複数箇所あるいは複数部材において、損傷分散、変形吸収する機構にして、各損傷位置の損傷程度を低下させ、変形吸収性能を格段に高めるという構造コンセプトである。図 - 4 は、その実現性を示す一つの実験例を示したもの

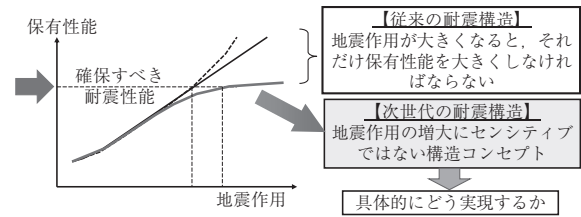


図 - 2 ダメージフリー構造のイメージ¹³⁾
(地震の影響にセンシティブではない構造)

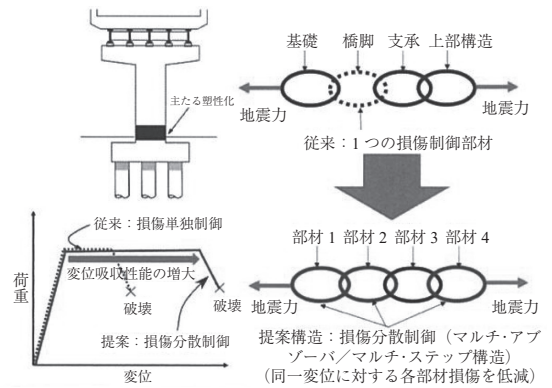


図 - 3 ダメージフリー構造コンセプトの例 1
(マルチ・アブゾーバ変形吸収機構)

である¹⁴⁾。同一寸法、同一鉄筋量を有する鉄筋コンクリート橋脚 2 体の模型荷重実験から得られた荷重 - 変位関係（部材の抵抗特性）を比較したものであるが、両者の変形吸収性能が約 2 倍相違していることが分かる。コンクリート構造に詳しい本誌読者各位にとっては容易に推定可能なメカニズムと考えるが、同一鉄筋量でも軸方向鉄筋の径を変化（この実験では D10 と D13 の例）させると変形吸収性能を大幅に増大させることができるというものである。これは、太径鉄筋にするほど損傷域（塑性ヒンジ領域）が拡大し¹⁵⁾、塑性変形を吸収する損傷域の損傷度が平均化されることによって、大きな変形まで耐荷力を維持できるというメカニズムである。すなわち、損傷を能動的に分散させることによって、耐荷力を維持したまま変形吸収性能を効果的に高め、ねばり強さを大幅に増大させることができるという一つの証左である。

もう一つの「マルチ・ステップ変形吸収機構」とは、異

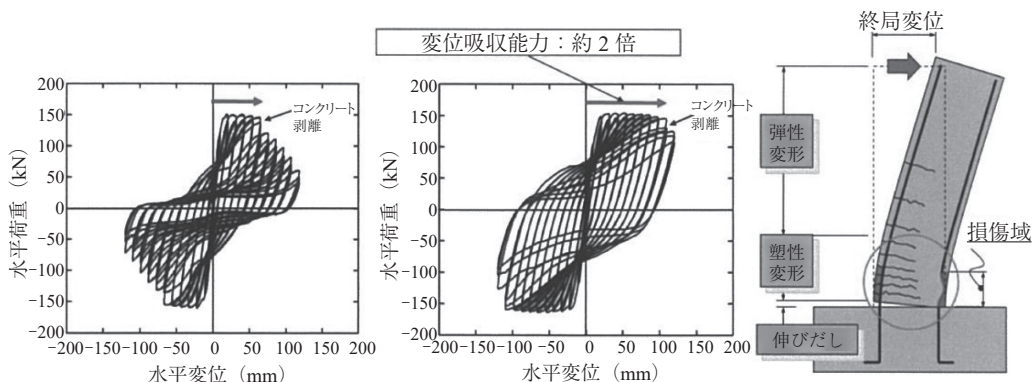


図 - 4 同一寸法、同一鉄筋量の鉄筋コンクリート部材の変形吸収性能に関する実験例¹⁴⁾

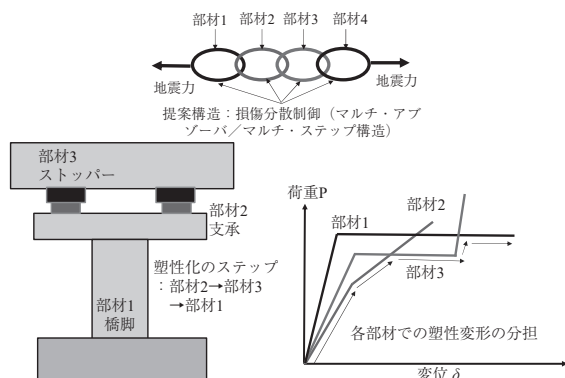


図 - 5 ダメージフリー構造コンセプトの例2
(マルチ・ステップ変形吸収機構)

なる複数の変形吸収機構を構造物にビルトインし、それぞれの機能を段階的に制御・機能させながら、構造全体としての変形吸収性能を高めるというコンセプトである。図 - 5 に示すように、各部材の性能を段階的に機能させる機構であり、強度が中程度のレベル1地震動に対しては部材1で、強度の高いレベル2地震動に対しては部材1と2によってなど、地震作用の強度レベルに応じて構造全体として分担しながら変形吸収性能を高めようというコンセプトである。

兵庫県南部地震以降、橋全体としてねばり強く地震に耐える構造を目指し、従来は、材料の強度特性の制約から信頼性の高い損傷制御を行うことが困難であることから1点集中の損傷制御に限定され、このため1箇所塑性変形に基づく変形吸収性能には限界があった。こうしたマルチ化を実現するためには、より信頼性の高い損傷制御を実現する必要があり、材料的・構造的条件に応じた変位吸収機構メカニズムを構築していくことが不可欠となる。

そして、コンセプト②「自己検知・自己診断構造」は、コンセプト①の「ダメージフリー構造」とセットになるもので、限定され確実に損傷が誘導される部材・部位に対し、最小限のセンサー・システムで損傷を検知し、その損傷度を適格に診断する見守り機構「状態把握オブザーバ」によって構造物の継続使用の可能性を確実に判断できるようにするというコンセプトである。

ここでは、これらのコンセプトを、上部構造、支承、橋脚、基礎といった橋梁部材を例に示したが、「損傷分散」、「段階対応」、そしてその適格な「状態把握」の考え方は、部材や橋全体に限定されず、道路ネットワークや地域全体の耐災害性を格段に向上させるために基本となるじん性の高い多重防御や大規模災害への対応力を高めるための方策の1つと共通するものとする。ここに示したコンセプトは、筆者の考える単なる1つのアイデアに過ぎないが、「人命の最大限の保護」、「社会機能の維持、被害の最小化」、「迅速な復旧復興」に資する社会インフラ・システムにおいて、従来構造をリデザインし得る構造コンセプトとして、その実現に努めたいと考える。

5. おわりに

改めて東日本大震災を振り返ると、国土交通省東北地方整備局が平成25年3月に発行された「東日本大震災の実体験に基づく『災害初動期指揮心得』」¹⁶⁾の中表紙に示された教訓が強く思い出される。

「備えていたことしか、役には立たなかった」

「備えていただけでは、十分ではなかった」

「したがって、過去の教訓に精通した上で、これを超越し、自由自在に応用できるようになること」

南海トラフ巨大地震、首都直下地震等の大規模地震への備えが求められている中、今後の耐震設計において、経験知に基づくリアクション対応とともに、シミュレーション経験知の拡大によるアクション対応によって、想像力と洞察力を高める視点からの地震レジリエンス強化サイクルの駆動継続と、想定を超える外力作用に対応可能な耐震構造コンセプトの継続的な開発と実現を願ってやまない。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所、(国研)土木研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報、国総研資料第646号、土研資料第4202号、2011.6
- 2) 強くしなやかな国民生活の実現を図るための防災・減災等に資する国土強靱化基本法(平成25年12月11日法律第95号)：https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoutjinka/hourei.html (閲覧日：2021.8.31)
- 3) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、1990.2、1996.12、2002.3、2012.3、2017.11
- 4) (公社)日本道路協会：道路震災対策便覧(震前対策編)、pp.96-109、2006.9
- 5) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編に関する参考資料、pp.1-15、2015.3
- 6) 川島一彦、長谷川金二、長島博之、小山達彦、吉田武史：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査法の開発に関する研究、土木研究所報告第190号、1993.9
- 7) 川島一彦：耐震工学、鹿島出版会、pp.195-210、2019.1
- 8) 運上茂樹：激甚化する地震災害と社会インフラの機能維持、第3回切迫する大規模地震と耐震技術開発、橋梁と基礎、Vol.52、No.11、pp.42-45、2018.11
- 9) 運上茂樹：耐震設計の基本、建設図書、pp.200-201、2020.8
- 10) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書、1996.12
- 11) (社)日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案)、1995.2
- 12) 国土交通省国土技術政策総合研究所、(国研)土木研究所：平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告、国総研資料第967号、土研資料第4359号、2017.3
- 13) 運上茂樹：次世代耐震設計論に関する一考、橋梁と基礎、Vol.40、No.8、pp.27-32、2006.8
- 14) 運上茂樹、星隈順一、西田秀明：橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン(案)、土木研究所資料第4023号、pp.7-11、2006.8
- 15) 浅津直樹、運上茂樹、星隈順一、近藤益央：軸方向鉄筋の座屈解析による鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長に関する研究、土木学会論文集、No.682/I-56、pp.177-194、2001.7
- 16) 国土交通省東北地方整備局：災害初動期指揮心得、2013.3

【2021年8月31日受付】