

鉄道橋における耐震設計

佐藤 勉*

1. はじめに

現在、鉄道橋の耐震設計および耐震補強等は、1995年に発生した兵庫県南部地震を契機に検討された技術基準や各種設計施工技術に基づいて行われているものが多い。

本稿では、兵庫県南部地震以降検討された鉄道コンクリート橋に関する耐震技術について、設計法を中心に述べるとともに、耐震補強技術および最近の鉄道橋に関する耐震技術についても簡単に紹介することとする。

2. 鉄道橋の耐震設計

2.1 適用設計基準

鉄道コンクリート橋の耐震設計は、兵庫県南部地震までは鉄道構造物等設計標準（コンクリート構造物）¹⁾（以下、コンクリート標準）により設計されていたが、地震直後は、新たな耐震基準が制定されるまでの暫定措置として、コンクリート標準による耐震設計のほかに、兵庫県南部地震規模の地震に対する検討を定めた「当面の耐震設計に関する参考資料」²⁾でも設計が行われた。その後、1999年に鉄道構造物等設計標準（耐震設計）³⁾（以下、耐震標準）が制定され、それ以降耐震標準に基づいて鉄道橋の設計が行われている。この耐震標準は、橋梁・高架橋のほか、基礎構造物、抗土圧構造物、開削トンネルおよび盛土に適用するが、盛土については、重要度が高くかつ地震の影響を受けやすい地形にあるか、復旧が困難な場合など耐震設計を行う必要のある場合に適用している。

2.2 耐震設計の考え方

現在の鉄道構造物の耐震設計は、損傷制御の観点から目標とする構造物の耐震性能を定め、基盤で設定した地震動を用いて表層地盤の応答計算を行い、その地震動を構造物に入力して応答を求め、それに基づいて耐震性能を照査する、いわゆる性能照査型設計を基本としている（図-1参照）。

設計上考慮する地震動は、構造物の設計耐用期間内に数

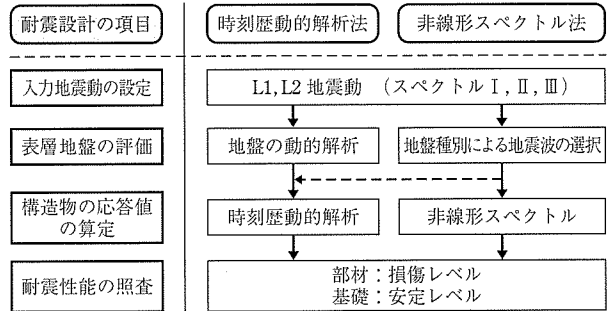


図-1 耐震設計の流れ

回程度発生する確率を有する地震動（L1地震動）と陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震や内陸型地震による地震動のように設計耐用期間内に発生する確率は低い非常に強い地震動（L2地震動）の2つのレベルの地震動としている。

構造物の耐震性能は、主に地震後の損傷に伴う機能回復の面からの性能に対して図-2に示す耐震性能Ⅰ、Ⅱ、Ⅲを設定している。構造物の耐震性能は、L1地震動に対して耐震性能Ⅰを、L2地震動に対して重要度の高い構造物は耐震性能Ⅱを、その他の構造物は耐震性能Ⅲを満足することとしている。

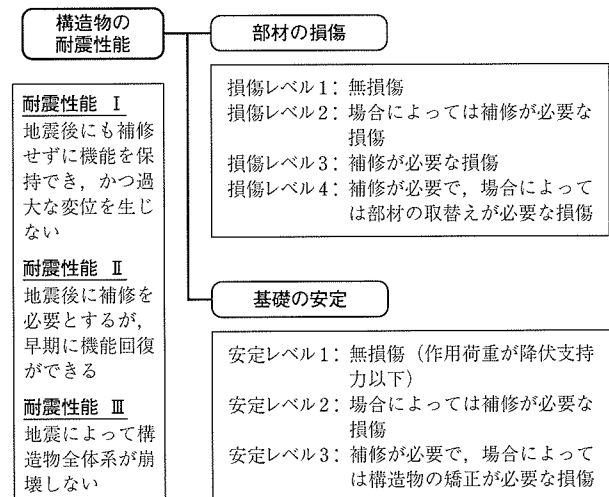
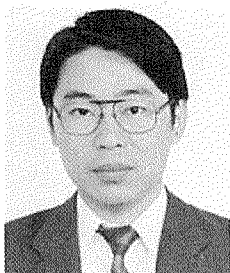


図-2 橋梁、高架橋の耐震性能

所要の耐震性能を得るためには、構造物を構成する部材の損傷レベルおよび基礎の安定レベルの関係を適切に設定する必要がある。部材の損傷レベルは、損傷に伴う補修および復旧の難易性等を考慮して設定している。部材の損傷レベルの区分と補修工法のイメージを表-1および図-3に



* Tsutomu SATO

(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造

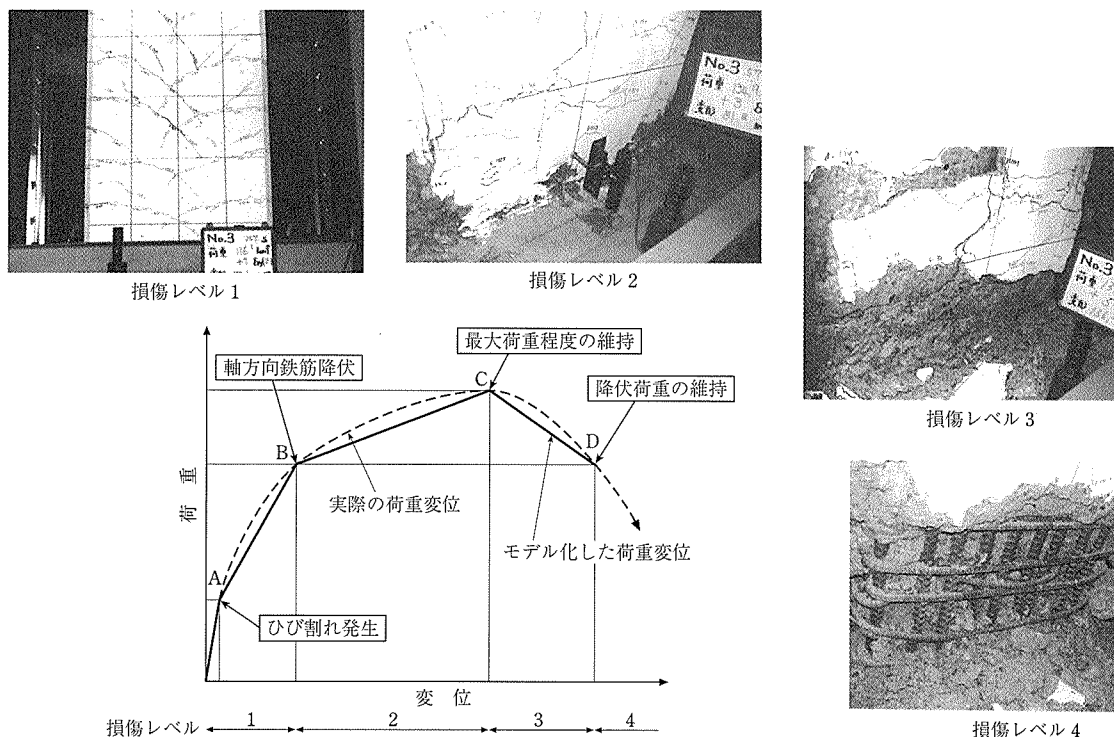


図-3 耐震設計標準で規定されている荷重変位と部材損傷レベルの関係

表-1 鉄筋コンクリート部材およびプレストレストコンクリート部材の損傷レベルに対する補修工法のイメージ

(a) 曲げ破壊

	損傷状態	補修工法のイメージ
損傷レベル1	無損傷	無補修（必要により耐久性上の配慮）
損傷レベル2	場合によっては補修が必要な損傷	必要によりひび割れ注入・断面修復
損傷レベル3	補修が必要な損傷	ひび割れ注入・断面修復 必要により帯鉄筋等の整正
損傷レベル4	補修が必要な損傷で、場合によっては部材の取替えが必要な損傷	・ひび割れ注入・断面修復・帯鉄筋等の整正 ・軸方向鉄筋、PC鋼材の変形が著しい場合は、部材の取替え

(b) せん断破壊

	損傷状態	補修工法のイメージ
損傷レベル1	無損傷	無補修（必要により耐久性上の配慮）
損傷レベル4	補修が必要な損傷で、場合によっては部材の取替えが必要な損傷	・ひび割れ注入・断面修復・帯鉄筋等の整正 ・軸方向鉄筋、PC鋼材の変形が著しい場合は、部材の取替え

示す。

部材の損傷レベルは、構造物の種類に応じて構造的特徴を考慮して定める必要があるため、耐震標準では、次に示す事項を共通の考え方として各構造物の耐震性能に応じた部材の損傷レベルを設定している。

- ① 耐震性能Ⅰは、構造物は無補修とするため、各部材とも損傷レベルⅠとする。
- ② 耐震性能Ⅱは、地震後に機能が短時間で回復できる場合と位置付け、補修の難易性を考慮し、損傷レベルを部材ごとに設定する。次に示す部材以外は、損傷レベルⅢまでを許容する。

基礎構造を構成する部材や開削トンネルの側壁等で

外周が土と接する部材は、現状では極めて補修が困難であると考え、損傷レベルⅡまでとする。

軌道構造を直接支持する部材は、地震後の列車走行に与える影響を考慮して損傷レベルⅡまでとする。

- ③ 耐震性能Ⅲは、地震によって構造物全体系が崩壊しないことを前提と位置付け、部材の損傷レベルは、補修が必要で場合によっては部材または構造物の取替えが必要な損傷レベルⅢまたはⅣまで許容する。

構造物ごとの耐震性能と部材の損傷レベルの関係として、ラーメン構造物の例を図-4および表-2に示す。

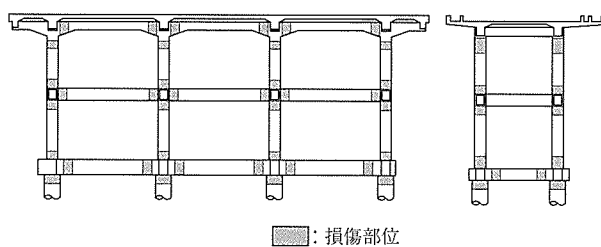


図-4 ラーメン構造物の損傷部位のイメージ

表-2 ラーメン構造物の耐震性能と部材の損傷および基礎の安定レベルの制限値

構造物		耐震性能Ⅰ	耐震性能Ⅱ	耐震性能Ⅲ
部材の損傷レベル	上層梁・地中梁	1	2	3
	その他の梁	1	3	4
	柱	1	3	3
基礎の安定レベル		1	2	3

2.3 構造物の応答値の算定

橋梁・高架橋の応答値の算定は、図-1に示したように動的解析法によることとし、動的解析法には非線形スペク

トル法と時刻歴動的解析法の2種類の方法が規定されている。非線形スペクトル法は、地盤種別ごとに設定された所要降伏震度スペクトルを用いて構造物の非線形動的応答値を予測する方法である。この方法は、構造系が比較的単純で1次の振動モードが卓越し、主たる塑性ヒンジの発生箇所が明確な場合に適用できるもので、比較的簡易に応答値が求められる。

時刻歴動的解析法については、構造物を振動単位に区分し、地盤-基礎-上部構造物一体モデル、基礎-上部構造物一体モデル（地盤分離）あるいは地盤-基礎一体モデル（上部構造物分離：基礎を支持バネに置換してモデル化）による方法^{4,5)}等が規定されている。構造物は、地震時に上部構造物、基礎構造物、地盤が一体として挙動することから、時刻歴動的解析法を用いる場合においても、全体系を一体としてモデル化するのが望ましいが、現時点では設計実務上煩雑であるとともに、地盤の影響のモデル化等について詳細な検討が必要な場合も多い。

部材のモデル化については、棒部材は線材にモデル化し、非線形性を考慮することを基本としている。L2地震動のように非常に強い地震動を考慮するため、部材の損傷を許容する設計が基本となる。このため、部材の非線形性を適切に評価する必要がある。最近では、部材のモデル化も、線材モデルから有限要素モデルの適用へと変化しつつあり、設計実務への適用も可能なレベルに近づきつつあると考えられる。

現在、耐震標準で示されている線材モデルにおける鉄筋コンクリート部材の非線形性は、部材のひび割れ、軸方向鋼材の降伏、かぶりコンクリートの剥離および軸方向鋼材の座屈等による部材の塑性化の影響を評価するモデルを用いている。一般には、図-5に示すような最大曲げモーメント以降の曲げモーメントの低下を考慮したテトラリニア型モデル等が用いられている。テトラリニア型モデルを用いれば、一部の部材が耐力の下降域に入った場合の構造物の挙動を追跡することができ、より精度の良い解析が可能となる。図-5に示す各部材のモデルの折れ点および履歴

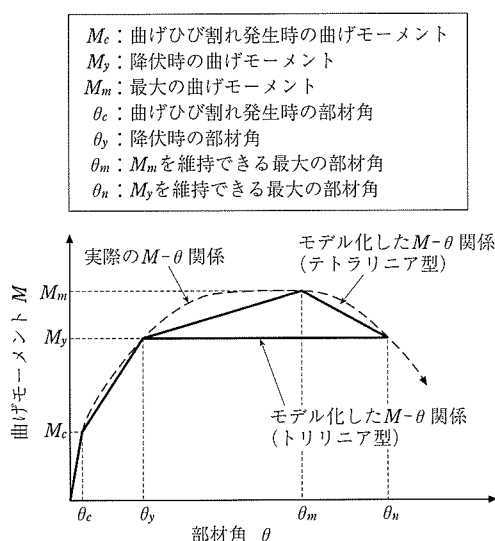


図-5 部材の非線形性のモデル化

法則に関しては、部材実験結果をもとにその算定法^{3),6)}が規定されている。

また、支承部に非線形性を考慮して解析を行う場合には、図-6に示すような支承部の特性を適切に表現できるようなモデルを設定することになっている。この場合、移動制限装置や落橋防止装置の特性を適切に考慮する必要がある。鉛プラグ入り積層ゴム支承や高減衰積層ゴム支承を使用する場合には、後述するように支承の減衰効果を設計の余裕代として扱い、水平力分散設計とするのを耐震標準では基本としている。

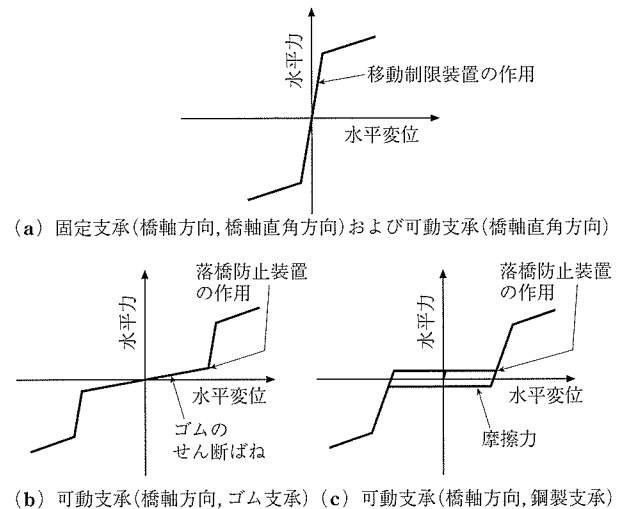


図-6 支承部のモデル化の例

2.4 耐震性能の照査

構造物の損傷に対する耐震性能の照査は、部材ごとに損傷レベルに応じた適切な指標を用いて行う。部材の損傷レベルの照査は、各種の安全係数を用いて次式により行うことを基本としている。

$$\gamma_i \cdot S_d / R_d \leq 1.0$$

$$S_d = \gamma_a \cdot S(F_d)$$

$$R_d = R(f_d) / \gamma_b$$

ここに、 S_d : 設計応答値

R_d : 部材の損傷レベルに応じた設計部材性能

$S(F_d)$: 設計荷重 F_d に対する応答値

$R(f_d)$: 設計材料強度 f_d に対する部材性能

γ_i : 構造物係数, γ_a : 構造解析係数, γ_b : 部材係数

部材の損傷レベルの制限値は、地震後の構造物の復旧性の観点から表-1に示した補修工法のイメージに対応するように部材特性や荷重状態等を考慮して設定している。照査においては、図-5に示した非線形モデルに対応する照査指標を用いて、各損傷レベルに対する制限値を部材係数 γ_b で考慮して評価することになっている。

支承部の損傷レベルは、基本的には部材と同様に、復旧性の観点から損傷レベルを3段階に区分し、設定した損傷レベルが満足することを照査している。なお、支承部は、支承本体、移動制限装置、落橋防止装置、桁端および桁座に区分し、それぞれについて損傷レベルを照査している。

3. 耐震補強に関する技術

鉄道構造物の耐震補強工法として多く採用されている鋼板巻立て補強の多くは、RC ラーメン高架橋柱（1 m 程度の矩形断面）のせん断耐力の向上および変形性能の向上を目的としたものである。なお、曲げ耐力の向上も期待する場合には、部材接合部や基礎に鋼板を定着することにより可能であるが、基礎への影響を考慮して、ほとんど採用されていない。壁式橋脚の変形性能の向上を目的として鋼板を巻き立てる場合には、大きな地震力を受けた場合に橋脚基部に塑性ヒンジが形成され、所要の変形性能が確保されるように断面の形状・寸法に応じて鋼板を拘束する。これは、橋脚基部に塑性ヒンジが生じると鋼板下端部がはらみ出すように変形し、鋼板によるコンクリートの拘束効果が低下することから、鋼板下端を型鋼などで拘束することにより大変形時にも塑性ヒンジ部の拘束効果を発揮できるようにするためである。とくに、壁式橋脚などのように断面の長辺と短辺の長さの比が大きい場合には、橋脚下端に型鋼などを設置したり、鋼棒等で鋼板と橋脚く体とを連結するなどして、鋼板を拘束しておく必要がある⁷⁾。鋼板巻立て補強についての設計の詳細は、文献⁸⁾による。

FRP シート巻立て補強やその他の耐震補強の設計の詳細に関しては、文献^{9～14)}を参考にされたい。

このほか、高架下を利用している箇所、壁などの支障物がある箇所、施工性を発揮する耐震補強工法がいくつか開発されている。たとえば、鋼材を柱の周囲を取り囲む

ように配置し、その端部を柱の隅角部で定着することにより、部材の変形性能を向上させる耐震補強工法^{15,16)}や高架橋等の柱の露出している一面から、鋼板とコアポーリングによる削孔後に補強鉄筋を後挿入することで、一面からのみで耐震補強を可能とする工法^{17,18)}等が開発されている。

4. 最近の耐震技術

4.1 高強度材料の適用技術

現在、コンクリートおよび鋼材に関して各種の高性能材料が開発実用化され、土木学会から指針¹⁹⁾も示されている。たとえば、700～1200 N/mm²程度の降伏強度をもつ高強度鉄筋、および自己充填・高強度コンクリート等の高性能材料を鉄道橋梁に採用することにより、耐震性の向上や地震時の損傷程度を軽微なレベルに止めた設計が期待できることから、これらの材料を使用した部材の性能評価の研究が行われている。

その一例として、軸方向鉄筋、せん断補強鉄筋に高強度鉄筋（SD685，SD785 相当）および自己充填・高強度コンクリート（圧縮強度 60 N/mm²程度）を用いた高架橋柱をモデルとした部材の変形性能についての研究例を以下に示す^{20～22)}。

文献²⁰⁾において、上記の材料を用いた柱部材の荷重－変位関係は、ある適用条件の範囲において耐震設計標準に示される算定式を用いて一部修正を加えることでおおむね実験結果を評価できる（図 - 7(a)）。また、断面寸法および曲げ降伏耐力が同じ試験体において、エネルギー吸収能力

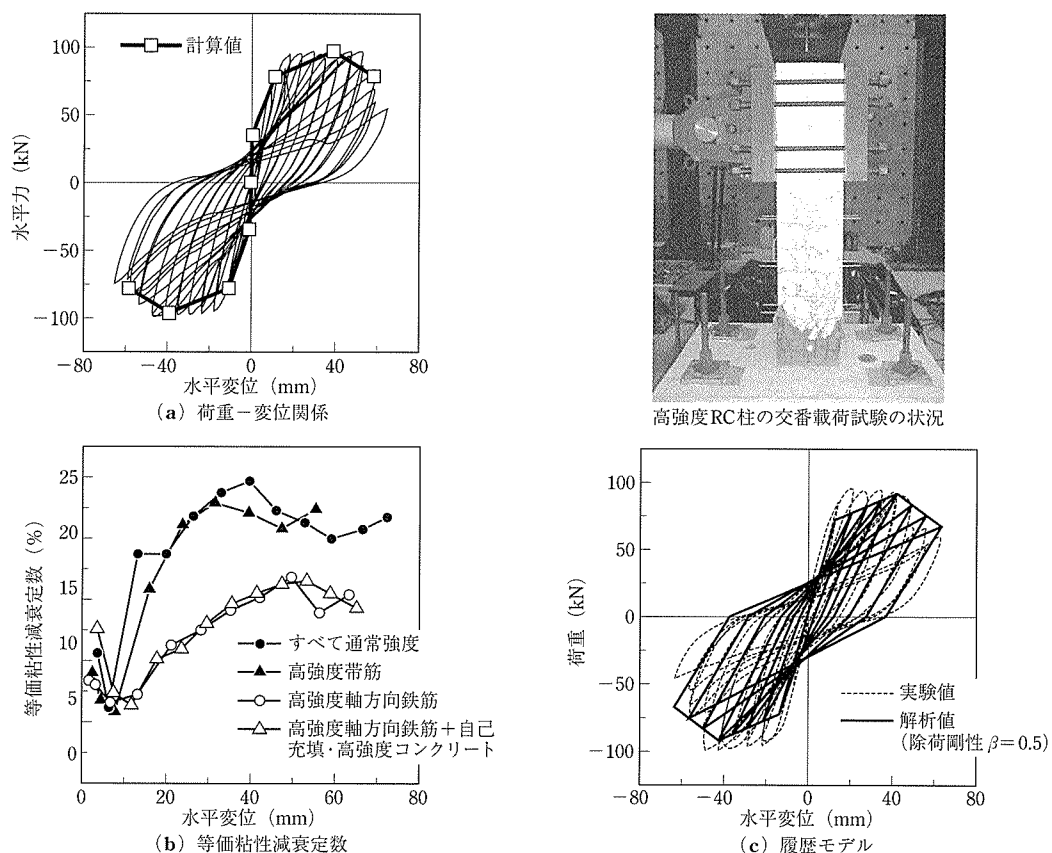


図 - 7 高強度材料を使用した柱部材の特性

を表す指標である等価粘性減衰定数は、普通強度の鉄筋を用いたものに比べて、軸方向鉄筋に高強度鉄筋を用いた場合のエネルギー吸収能力が小さくなること（図-7(b)）、このため履歴モデルとしては、適切な除荷剛性を設定した剛性低下型のモデルが提案されている（図-7(c)）。

4.2 その他の耐震技術

わが国における鉄道橋では、免震橋として設計を行い施工された実績はほとんどないが、これまでに免震支承を適用した事例はいくつかある。この場合、設計は水平力分散支承として検討し、長周期化と減衰特性による地震時の水平力の低減効果は設計上の余裕代として取り扱われている。鉄道橋の設計では、列車走行性を確保するため、線路（橋軸）直角方向は鋼角ストッパー等の移動制限装置により拘束する必要がある。このため免震支承の機能を発揮するのは、線路（橋軸）方向に限定されるが、線路方向に対しても軌道部材への影響を評価した上で適用することが重要となる。鉄道橋における適用事例等は、文献 23～27）に示されているので参照されたい。

また、建築分野等で利用されているダンパー・ブレースを鉄道高架橋に適用する研究も進められている^{28),29)}。耐震性向上のための高減衰化、地震時列車走行性向上のための高剛性化を実現するもので、鉄道高架橋の新設や既設構造物の耐震補強を含めて適用が検討されつつある。文献 28),29) では、低降伏点鋼の塑性せん断変形を利用してエネルギー吸収を期待するダンパーと H 形鋼によるブレースを組み合わせた鋼製ダンパー・ブレースについて、鉄道高架橋への適用を検討している。

このほか、柱部材等の新しい配筋方法として、軸方向鉄筋の外側に配置される帯鉄筋の一部を軸方向鉄筋の内側に配置した内巻き帯鉄筋を用いる配筋法が提案されている³⁰⁾。この配筋方法は、内巻き帯鉄筋が、大変形時に内巻き帯鉄筋の内側にあるコンクリートの損傷や軸方向鉄筋の座屈による横補強鉄筋としての機能低下を防ぐことにより、変形性能をより向上させるための研究である。

また、耐震標準による性能照査にあたって、最適な断面諸元を仮定し非線形解析による照査を実施するまでのトライアル計算を効率的に行うことや、設計者の相違による部材断面寸法に大きな差異を生じないようにするための簡易な耐震検討法の提案が行われている³¹⁾。これは、鉄道 RC ラーメン高架橋（1 層地中梁有り）および RC 橋脚（線路方向のみ）について、標準的なプロポーシオンを仮定して種々の非線形解析を実施し、耐震標準の照査をパスするための簡易な検討法を提案したものである。

4.3 コンクリート標準の改訂の動向

現在のコンクリート標準が 1992 年に制定されてから、既に 10 年が経過しており、この間、国の鉄道技術基準を定める省令³²⁾ は、仕様規定型から性能規定型への移行がなされている。土木学会コンクリート標準示方書や耐震標準がこの間改訂されており、これらの基準類との整合をとるためにも、コンクリート標準の改訂作業が進められている。コンクリート標準は、2003 年度中の改訂を予定している。

現在検討作業中のコンクリート標準では、次の 4 項目に

ついて重点的に調査検討されている。

- (1) 性能照査型設計体系への移行
- (2) 耐久性向上に関する検討
- (3) 高強度材料・高機能材料に関する検討
- (4) その他最新技術に関する検討

改訂案では、性能照査型設計において、鉄道構造物に対して一般に、安全性、使用性および復旧性に対する要求性能を設定する予定である。

安全性は、想定されるすべての作用のもとで、構造物の利用者や周辺の人々の生命を脅かさないために保有すべき性能で、構造物の構造体としての安全性と機能上の安全性を考えている。

使用性は、想定される作用のもとで、構造物の利用者や周辺の人が快適に構造物を使用するための性能、および構造物に要求される諸機能に対する性能である。

復旧性は、想定される作用のもとで、構造物が損傷を受けた場合に性能回復が容易に行えるための性能である。

とくに、復旧性については、耐震標準と深く関わる性能であり、耐震性能と関連付けての検討が進められている。

5. おわりに

鉄道橋における耐震技術について、紙面の都合上、耐震設計技術を中心に現状を紹介した。橋梁・高架橋における地震時の応答値の算定は動的解析を用い、部材のモデル化において非線形性を考慮することを基本としているため、設計の実務に役立つように設計計算例、手引き類および照査プログラム等も整備されている。今後とも、新しい材料開発や解析技術の向上が期待されるものと思われることから、新しい技術の適用を阻害しないように基準類の整備をしていくことも必要と思われる。

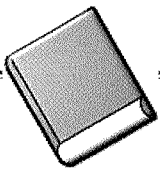
最後に、本文はごく限定された範囲について述べさせて頂いたことをご容赦願います。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），1992.10
- 2) 鉄道総合技術研究所：新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料，1996.3
- 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），1999.10
- 4) 鉄道総合技術研究所：橋梁および高架橋耐震照査の手引き，2001.2
- 5) 渡辺忠朋：耐震解析技術—耐震性能照査と動的解析技術—，プレストレストコンクリート，Vol.43，No.2，Mar. 2001
- 6) 渡辺忠朋，谷村幸裕，瀧口将志，佐藤勉：鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法，土木学会論文集，No.683/V-52，pp.31-45，2001.8
- 7) 岡本大，佐藤勉：壁式橋脚の鋼板巻立てによる耐震補強効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.3，pp.1615-1620，2000
- 8) 鉄道総合技術研究所：既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針—鋼板巻立て補強編—，1999.7
- 9) 松本信之，佐藤勉：鉄道高架橋の新しい耐震補強法，コンクリート工学，pp.9-17，1999.4
- 10) 鉄道総合技術研究所：炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針，1996.7
- 11) 鉄道総合技術研究所：炭素繊維シートによる地下鉄 RC 柱構造物

- の耐震補強工法設計・施工指針, 1997.1
- 12) 鉄道総合技術研究所：アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針, 1996.11
 - 13) 鉄道総合技術研究所：既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針－FRP吹付け補強編－, 1996.7
 - 14) 鉄道総合技術研究所：支承部の耐震補強設計の手引き, 1996.8
 - 15) 津吉毅, 石橋忠良：鉄筋を柱外周に配置し柱の四隅で定着する既設 RC 柱の耐震補強方法に関する研究, 土木学会論文集, No.662 / V-49, pp.205-216, 2000.11
 - 16) 津吉毅, 石橋忠良：鉄筋を柱外周に配置する既設 RC 柱の耐震補強工法の断面外配置した鉄筋の効果に関する研究, 土木学会論文集, No.676 / V-51, pp.77-88, 2001.5
 - 17) 小林薫, 石橋忠良：RC の一面から施工する耐震補強工法の鋼板の補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.683 / V-52, pp.75-90, 2001.8
 - 18) 小林薫, 石橋忠良：RC の一面から施工する耐震補強工法の後挿入鉄筋の補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.683 / V-52, pp.91-102, 2001.8
 - 19) 土木学会：自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計施工指針 (案), コンクリートライブラリー 105, 2001.6
 - 20) 岡本大, 佐藤勉, 吉田幸司, 黒岩俊之：高強度材料を用いた RC 部材の変形性能について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.3, pp.781-786, 2001
 - 21) 黒岩俊之, 佐藤勉, 岡本大, 吉田幸司：高強度材料を用いた RC 梁のせん断耐力に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.733-738, 2002
 - 22) 岡本大, 佐藤勉, 早川健司, 黒岩俊之：鉄筋とコンクリートの付着特性が RC 部材のひび割れ性状に及ぼす影響について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.781-786, 2002
 - 23) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の応答制御技術研究委員会報告書・論文集, pp.III-20~27, 2002.6
 - 24) 岩田秀治, 市川篤司, 保坂鉄矢：鉄道橋の免震構造化の取り組みと課題, 橋梁と基礎, pp.181-190, 1999.5
 - 25) 吉野伸一, 小西康人, 岡川秀幸, 塚本敦之：ピロンを併用したエクストラードロード PC 鉄道橋の押出し架設, コンクリート工学, Vol.37, No.8, pp.45-52, 1999.8
 - 26) 光木香, 保坂鉄矢, 松浦章夫, 市川篤司, 松尾仁：ゴム支承を用いた連続合成桁の高速車両走行性に関する研究, 土木学会第 52 回年次学術講演会, 1997.9
 - 27) 永尾拓洋：鉛プラグ入り積層ゴム支承を採用した鉄道橋の設計, 日本鉄道施設協会誌, Vol.37, No.12, pp.877-879, 1999.12
 - 28) 松本信之, 岡野素之他：鋼製ダンパー・ブレースを有する RC 鉄道高架橋の耐震性能, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1411-1422, 1999.3
 - 29) 松本信之, 曾我部正道, 涌井一, 岡野素之：鋼製ダンパー・ブレースを用いた鉄道高架橋の横振動性状改善に関する研究, コンクリート構造物の応答制御技術研究委員会報告書・論文集, pp.47-54, 2002.6
 - 30) 小林薫, 菅野貴浩, 木野淳一：軸方向鉄筋の内側にせん断補強鉄筋を配置した RC 柱の交番載荷実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.1135-1140, 2002
 - 31) 吉田徹, 小林薫：鉄道用 RC ラーメン高架橋と RC 橋脚を対象とした簡易耐震設計法の提案, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.997-1002, 2002
 - 32) 鉄道に関する技術上の基準を定める省令：国土交通省令第 151 号, 平成 13 年 12 月 25 日

【2002 年 9 月 18 日受付】



●刊行物案内

- PC斜張橋・エクストラードロード橋設計施工規準(案)
- PC吊床版橋設計施工規準(案)
- PC橋の耐久性向上マニュアル

(平成12年11月)

頒布価格：3点セット 会員特価 6 000 円〈非会員価格 7 200 円〉(送料はいつでも 600 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会