

研究討論会・高架橋の耐震設計のゆくえ

藤野 陽三

Yozo FUJINO

1. はじめに

兵庫県南部地震が発生して、はや一年半が過ぎた。都市内高架橋にも甚大な被害が生じたことは周知のとおりである。当時の耐震設計レベルからすれば壊れるべくして壊れたということもできるが、個々の橋、個々の部位を見ていくと意外と強かったということもできる。いずれにせよ、正しくあの歴史的な地震から我々が何を学びとるのがこれからの耐震研究・開発そして耐震設計の方向を大きく左右するものと思われる。

建設省は復旧耐震設計指針を発表し、新耐震設計基準の策定に向けて精力的に検討してきた。それがほぼ固まりつつある。細部はともかく、強震時の非弾性挙動を積極的に取り入れた姿になることは間違いない。

公共施設の中でもっとも復旧が遅れた阪神高速・神戸線も9月末には全面開通し、新耐震設計基準が施行されれば、当面の課題が片付くという意味で一段落することにはなる。しかし、設計基準について言えば、厳しい時間的制約の中でとりあえずまとめた側面もあり、今後の研究成果によるところも多い。また、目を外に転じれば性能照査設計など、新しい設計体系構築の動きが活発である。

構造工学委員会（渡邊英一委員長）では、耐震、コンクリート構造、鋼構造、基礎などの立場から、そして基準策定、研究開発の立場から被害をいま一度振り返りながら高架橋の耐震設計のあるべき姿について議論するのは会員にとって有用かつ関心が高いと考え、討論会を企画することとした。パネラーとして当日参加いただいたのは

川島 一彦 東京工業大学 工学部教授

新耐震設計の理念と実際

前川 宏一 東京大学 工学系研究科教授

コンクリート工学の立場から

西川 和廣 建設省 土木研究所室長

鋼構造、橋梁システムの立場から

後藤 洋三 大林組 技術研究所室長

基礎と実務の立場から

家村 浩和 京都大学 工学研究科教授

免震、制震技術の応用

であり、進行役（座長）は藤野 陽三（東京大学 工学系研究科）が務めた。

2. パネラーによる話題提供

まず、土木研究所において道路橋耐震設計の基準策定に長く関わってきた川島一彦会員に、基準策定の立場から話題提供をいただいた。新しい耐震設計基準で要求する耐震性能（図-1）を示した上で、基準の構成（表-1）と個々の項目について説明があった。大きな変更点は、兵庫県南部地震の教訓を踏まえ、①直下地震による、継続時間は短いが入力エネルギーレベルの高い地震動に対する照査、②じん性変形の照査、③地盤の流動化に対する対応、④免震設計の積極的活用、⑤非線形動的解析の照査手段としての認知、であるとのことであった。

次に、コンクリート工学の立場から前川宏一会員は、コンクリート構造における、耐震設計を含む設計基準の将来像とそれに向けての技術開発課題について発表があった。具体的には、その内容は性能照査設計（図-2）の志向であり、それをまとめると以下ようになる。

「設計にあたっては先ず耐震性能を明確に規定（宣言）すること、次に設計地震動のもとに諸元が仮定された構造物が「いかに振る舞うか」を技術を駆使して予測し、その振る舞いを基にして要求性能を判定することが、将来の橋梁の耐震設計の有り様ではないだろうか。コンクリート構造の観点から解明、開発すべきことは依然多いが（図-3）、10年を目処に性能照査設計を実のあるものにするには可能と思われる。現時点では、構造形式によっては破壊の進展や破壊後の挙動、変形性能などを動的応答解析の中に取り込むまでには至らず、そのギャップを埋めるためにせん断耐力式やじん性評価式が次善の策として用いられる。しかし、曲げ耐力算定式が示方書から消えたように、非線形解析の進歩によって、これら実験式を用いなくても、コンクリート構造の耐震性能を

* フェロー Ph. D 東京大学大学院教授 工学系研究科 社会基盤工学専攻/工学部土木工学科

表-1 道路橋示方書 耐震設計編の構成

現行示方書	改訂目次(案)
1章 総則	1章 総則
2章 耐震設計の基本方針	2章 耐震設計の基本方針
3章 耐震設計上考慮すべき荷重および設計条件	3章 耐震設計上考慮すべき荷重および設計条件
4章 設計震度	4章 震度法による耐震設計
5章 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査	5章 地震時保有水平耐力法による耐震設計
6章 動的解析による照査	6章 動的解析による耐震性の照査
7章 耐震設計における構造細目	7章 地震時に不安定となる地盤がある場合の耐震設計
8章 地震の影響の低減を期待する構造	8章 免震設計
	9章 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力と許容塑性率の算定
	10章 鋼製橋脚の地震時保有水平耐力と許容塑性率の算定
	11章 地震時保有水平耐力法による基礎の耐震設計
	12章 支承部構造
	13章 落橋防止システム
	14章 地震の影響の低減を期待する構造
	_____ : 新たに加わった項目や別途章立てした項目

耐震設計で考慮する地震動		目標とする橋の耐震性能		耐震計算法	
		重要度が標準的な橋 (A種の橋)	特に重要度が高い橋 (B種の橋)	静的解析法	動的解析法 (地震時の挙動が複雑な橋)
橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動		健全性を損なわない		震度法	
橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動	タイプⅠの地震動 (プレート境界型の大規模な地震)	致命的な被害を防止する	限定された損傷にとどめる	地震時保有水平耐力法	時刻歴応答解析法 応答スペクトル法
	タイプⅡの地震動 (兵庫県南部地震のような内陸直下型地震)				

図-1 耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能

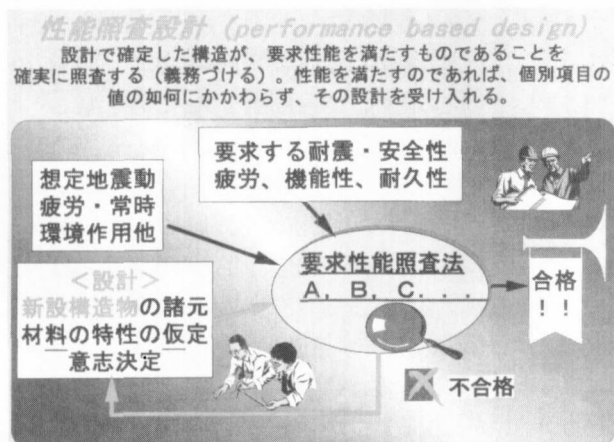


図-2 性能照査設計の概念図

合理的に照査できるシステム作りが可能であり、それを志向すべきである」。

3番目は、鋼構造・橋梁システム（具体的には落橋防止システム）の立場から、西川和廣会員による話題提供が行われた。鋼製橋脚については、(1) 兵庫県南部地震の被害として数は多くなかったが脆性的な破壊が見られたことが注目すべきことであり、地震後の実験を中心とした検討において、粘りのない破壊モードを防止する構造細目に力点をおいてきたこと、(2) 角柱においては角

性能照査技術の向上への努力=コンクリート工学の立場

(緊急) 研究開発事項

- ・低鉄筋比領域（要素）での鉄筋の平均挙動化
- ・ひび割れ面でのせん断軟化挙動
- ・3次元鉄筋コンクリート構成式の開発
- ・圧縮軟化挙動の解析法（構造挙動として）
- ・鉄筋座屈後の鉄筋モデルと被りコンクリート
- ・3, 4方向ひび割れを有する領域のモデル化
- ・その他

図-3 性能照査設計に向けてのコンクリート分野における研究開発課題

補強、R付きコーナー、円柱においては二重鋼管化など方法を開発しつつあること、(3) 動的解析のためのバイリニヤモデルの構築など(図-4)の説明があった。落橋防止システムについては、地震後桁が支承から落ちて路面に段差が出ることを防ぐことが橋としての機能から重要であるとの認識のもとに、検討を行ってきたことであった。具体的には支承そのものを激震時にも耐えさせる設計と落橋防止システムと補完しあって同等の耐

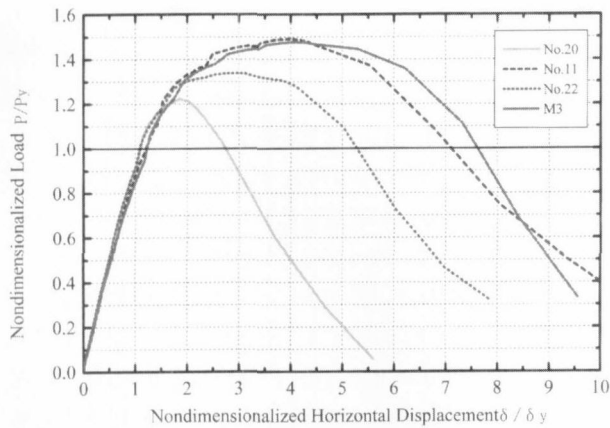


図-4 繰返し漸増荷重下での矩形鋼製橋脚の非弾性挙動(包絡線)における角補強の効果

No. 20: 既設 No. 11: ボルト角補強
No. 22: 溶接角補強 M3: 角R付+剛縦リブ

震性を確保する支承構造の2つが基準に採用されるとのことであった。落橋防止システムは桁かかり長の他に落橋防止構造、変位制限構造、ジョイントプロテクター、段差防止装置などから構成されるが、それらについての簡単な説明があった。なお、支承をヒューズとして機能させる設計は、魅力的ではあるが具体的には難しく、新耐震設計では採用しない方向とのコメントもあった。

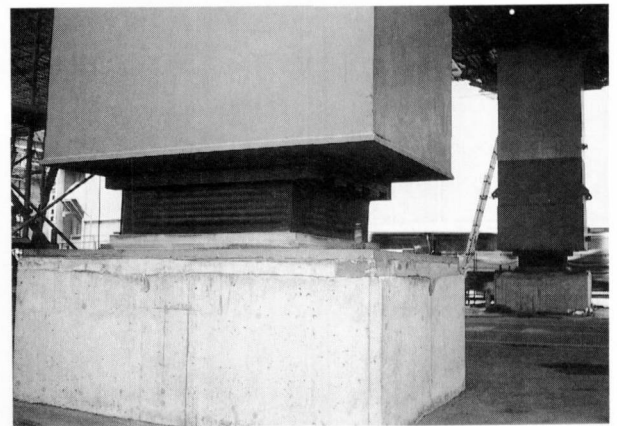
4番目の後藤洋三会員からは基礎を中心とした話題提供がなされた。まず、兵庫県南部地震において比較的フレキシブルな抗基礎上の建屋が大きな被害から免れたのに対し、剛な基礎上のものは甚大な被害が生じた実例を示し、基礎の剛性が上部工に与える影響の大きさを指摘した。また、今回の地震のような激震に対しては構造物にある程度損傷を配分することになるが、このとき基礎を含めた各部位にどのように損傷を配分すべきかを考えておく必要性の高いことを指摘した。このとき基礎自体の変形性能、耐震力、損傷を受けた後の残存耐荷力などの実験データや研究成果が非常に少なく、今後の重点課題であることを強調した。

最後に、免震・制震技術の展望ということで家村浩和会員から話題提供が行われた。従来、主部材の耐荷力、変形能で地震に抗する考え方が主流であったが、直下地震のように大きなエネルギーをもつ地震動に対しては免震ゴムなどのデバイスを用いて、そこにエネルギー集中・消費を担わせる設計の方が効率が高く、今後この分野の発展が大いに期待されることを実例(写真-1)、計算例を用いて説明された。

また、近年発達しつつあるアクティブ制震については、これまで風や中小地震を対象としたものであったが、大地震、直下地震に対応できるシステムの構築が課題との指摘があった。



a) 全体写真(弁天付近)



b) 脚つけ根近に配置された免震シュー

写真-1 阪神高速道路神戸線の復旧で使用された免震橋脚(阪神高速道路公団提供)

3. ディスカッション

各パネルーの話題提供のあと、1時間ほどフロアを交えてディスカッションをもった。まず、道路橋の復旧指針ならびに新耐震設計基準で採用される、弾性応答(Ⅰ種地盤)にして“2g”の入力地震動の妥当性についての質問が座長より出され、「道路橋の重要性、実測された地震動であるという事実としての重み、2gが上限ではないことなどを考えると妥当」(川島)という意見が出された。一方、「サイトが活断層のそばか否かによって起こりうる地震動は大きく変わる。一率2gというのは説明しにくいのでは? 原子力、建築分野との整合性もとれない」(家村)とのコメントがあった。これに対して、「建設地点を選べる原子力と橋では事情が異なる。活断層から20kmの範囲を色分けすれば日本のほとんどがこの地域に入る。したがって、今回の阪神地震クラスの地震動は我が国のどこにも起こると考えねばならない」(川島)との意見が出された。

次に、新耐震設計基準では、非線形動的解析を橋全体に適用して照査する方向にあるが、このことに関連して「橋システム全体を解析するとして、それをどのように

評価するかは難しい問題ではないか」(矢部会員(長大))との質問がフロアーからあった。これに対し「構造系全体の性能指標がないと確かに難しい。性能設計に向けての研究テーマである」(前川)、その他のコメントがパネラー側よりあった。また、設計の考え方に関するコメントとして「支承ヒューズ論というのがあるが実際には設計で見積もることには反対。支承部の破損まで忠実に解析に追うことは強い非線形性があり、不可能に近い。可能だとしても手間が大変」(依田会員(早大))。「じん性変形を主体とした耐震設計が唯一の方法ではない。構造物のもつ固有の吸収エネルギーと対比するだけですみ、簡便ではないか」(倉西会員(関東学院大))。これに対し、繰り返しによる強度劣化があり、構造物のもつ吸収エネルギーは入力の方方に依存し、固有のものではない」とのコメントがパネラー(川島)よりあった。

最後に、次世代の耐震設計基準について議論がなされた。「新耐震設計基準は旧版に比べ、ボリュームも増し、規定項目も増えている。一方、土木学会のコンクリート構造グループでは、性能指標を満たすか否かを問うシンプルな形の基準を目指している。方向性に大きな隔たり

があるように見える」(田中会員(大成建設))とのコメントがあった。これに対しては様々な意見がパネラーから出された。「性能設計のことは理解しているが、現実にはこと細かく規定してほしいという要求が設計技術者から出される。我が国の技術土壌の問題も多い」(川島、西川)。「いま、耐震設計において変位とエネルギーで規定するようにすればかなり性能設計的になるはず、新耐震設計もそれほど性能設計から離れているわけではない」(川島)。「性能照査は、土木学会の第2次提言を受けて、コンクリート委員会内で検討を開始した。現在のところは“絵に描いた餅”に近い。国際的にみても性能照査に移行するのは必然。しかし、研究すべき課題は多い」(前川)。「基準でがんじがらめにするより、原理原則の中で自由度を認める設計は民間技術者としては活力がわく」(後藤)。「現行の基準は確かに書きすぎのところがある。原理原則と参考資料とにわけるだけでもかなりすっきりする」(藤野)等の意見が出た。討論会は300名を優に越える参加者の中で盛会のうちに閉会した。

(1996年10月受付)