

地震時保有耐力法の開発経緯

川島一彦¹

¹正会員 工博 東京工業大学理工学研究科教授 土木工学専攻（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1）

1. はじめに

兵庫県南部地震から12年が経過した。土木学会地震工学委員会に地震時保有耐力法に基づく耐震設計法の開発に関する研究小委員会が設置されたのが平成9年8月であり、その後、平成13年3月まで筆者が初代の小委員長を務めた。

地震時保有耐力法が国レベルの土木構造物の技術基準に取り入れられたのは1990年道路橋示方書が最初であるが、その後、猛烈な勢いで地震時保有耐力法に基づく耐震設計法が普及してきた。また、これに伴い従来の震度法で何の問題も感じずに設計されてきた構造系が、地震時保有耐力法から見ると極めて問題がある場合があることも明らかになってきた。

ここでは、震度法の殻を破ることが如何に困難であったかを中心に、地震時保有耐力法の初期の開発経緯を示してみたい。以下の内容は筆者を中心とした記述となっているが、この点をご容赦願いたい。

2. 兵庫県南部地震以前の耐震設計観

（1）プレ・ルネッサンス時代の震度法

兵庫県南部地震がもたらした影響を考えるために、兵庫県南部地震以前にはどのような地震観が持たれていたかを振り返ってみたい。兵庫県南部地震がもたらした激変も、今となっては当然のこととなり、どういう経緯を経て現在に至ったかが忘れられつつあると考えるためである。

我が国では、1916年に佐野利器が家屋耐震構造論を著し、耐震設計するためには動的地震力を静的水平力に置き直せばよいという静的横力法を提案して以降、これが広く用いられてきた。当初、佐野は、現在でいうところの限界状態設計法を指向したが、部材耐力の知識や解析法が不十分であったことから、

許容応力度法と結びついた静的横力法が震度法として、その後の世界の耐震設計の潮流となった。

筆者は、地震時保有耐力法が土木の世界で認知されるまでの期間をプレ・ルネッサンス時代と呼んでいる。この時代には、震度法がすべてであり、耐震基準を策定する際には、常に、「設計震度は0.2とする」からスタートしたものである。この当時には、設計震度を上回る地震力が存在することを、国立研究機関の研究者が公言することは、多少の誇張を交えて言うとなればタブーですらあった。一例を挙げると、1978年伊豆大島近海地震の際に墓石の転倒率から震源域の地震動強度を0.4g以上と推定し、学会でこれを発表したとき、大御所の先生から、「建設省がそんな大きな地震力があったと公言していいのか？」と言われたものである。

これは、構造物に地震被害が生じていない以上、構造物に作用した地震力は耐震設計に用いられた設計震度以上であるわけがないという考えからきている。なぜ、設計地震力を上まわる地震力を受けても、構造物に被害が生じないかを説明することが、耐震工学の発展の歴史でもあった。

（2）重要であった強震記録の蓄積

プレ・ルネッサンスの伝統的な震度法から抜け出すために大きな力となったのは、強震記録の蓄積である。建設省や運輸省では、1964年新潟地震以降、本格的な強震観測に着手した。観測が主目的ではない事業官庁である建設省や運輸省では、強震観測は「学者の道楽」と見なされがちであり、強震計の設置と観測の継続は当時の建設省土木研究所の大久保忠良氏、栗林栄一氏、岩崎敏男氏等や運輸省港湾技術研究所の土田肇氏、野田節男氏等、担当者の並々ならぬ熱意によって実現された。

1970年代から集まりだした強震記録が統計解析に耐えるまで増加したのが1970年代後半である。

建設省総合技術開発プロジェクト「新耐震設計法の開発」の一環として、片山恒雄教授らによって加速度応答スペクトルの距離減衰式が開発された¹⁾が、これは大地震時に構造物に作用する地震力が1gに達するということを明らかにした点で、耐震設計のルネッサンスの幕開きであったといえることができる。筆者も強震計の短周期補正を施した距離減衰式を求めたことがある²⁾が、こうした研究から次第に地震時にどの程度の応答が構造物に生じるかが明らかになってきた。そして、ちょっとしたクラスの地震でも、これが震度法の震度を大きく上回ることも明らかになってきた。

(3) 地震動に対する技術指導の困難さ

ある時期、筆者は建設省土木研究所振動研究室で、地震動に関する研究に従事した。この際、建設省の事務所や地方省庁から動的解析したいので地震動波形を選んでほしいとの依頼が多数来た。多い時には、コンサルタントも含めて10名程度の人間がやってきて、耐震設計の状況を説明してくれる。分厚い説明資料の中の耐震設計のフローには「設計地震力設定」という項目があり、これを土木研究所の方で決めてほしいと言うのである。

この当時、筆者はこの設計地震力に関する技術指導にほとんど手を焼いていた。1つか2つの強震記録を選んで、これでどうでしょうと依頼者に渡すと、喜んで帰って行かれるが、いつも、1、2ヶ月すると結果を持って説明にやってきて、「動的解析結果は震度法と2、3倍も答えが違っている。どうしたらいいでしょう？」と聞かれるのである。震度法と動的解析結果が大きく異なる理由は、単純に構造物の固有周期領域における入力地震動の応答スペクトルが震度法と異なるだけであるが、「固有周期が・・・」とか「地震動の卓越周期が・・・」と説明するたびに、無力感にとらわれたものである。

もともと、震度法だけでは十分ではないだろうから、念のために動的解析によって耐震性を確認しておきたいという目的でわざわざ土木研究所までやってきた建設省や地方省庁の技術者に、震度法と動的解析の結果が異なる理由をいくら説明しても無意味である。要はどうすればいいかを技術指導しなければならないが、短周期で頭切りされている震度法（当時は、応答を考慮した修正震度法も含めて）と強震記録の応答スペクトルは形状だけでなく応答値も大きく異なっており、自分でもどうしたらよいかわからなかったのである。そうこうするうちに、「勘のよい」グループは土木研究所にやってこなくなるが、「勘の悪い」グループは何回も訪ねてくれ

て、そのたびに情けない思いをした。最後は、構造物の固有周期領域の加速度応答スペクトルが震度法の震度並の強震記録をお薦めし、「これで震度法の耐震設計が動的解析でも証明されたので、安心しました」と言われて、罪悪感を感じたものである。

ちょっとしたクラスの地震による記録でも簡単に応答スペクトルが震度法による震度を超えてしまうことをどのように耐震設計で考えればよいかが、地震時保有耐力法の重要性を考え始めたきっかけである。

また、強震記録のスペクトル特性が設計地震動にフィットするように、振動数領域で強震記録を振幅調整する手法を提案した³⁾。位相特性を変えると強震記録の見た目が大きく変化するため、位相特性はもとの値を保ったままで振幅特性だけを変化させ、目標応答スペクトルにフィットさせる方法である。この方法は予想以上の効果を持ち、技術指導でスペクトルフィッティングした波形を薦めることによって、上述した震度法との応答の乖離に関する苦情はぴたりと治まった。

しかし、スペクトル特性の問題は、こうしたテクニックで対応できても、ちょっとした地震による強震記録と震度法の震度のレベルの違いは埋まらなかった。ちょっとした地震でも構造物に生じる応答は設計震度を越すことは事実であるが、このようになって被害がさして生じない理由として、“瞬間的”に生じる動的地震力では構造物は壊れず、静的地震力はその数倍の強度の動的地震力に匹敵するのだという説明がこの当時には行われていた。

(4) 震度法への訣別

震度法で建設された構造物がなぜ震度法の震度を上回る地震力を受けても壊れないかに対する説明が可能となったのは、非線形域の構造部材、特にRC橋脚の履歴特性が繰返し載荷実験や振動台実験から実証的に明らかにされだした1980年代である。これには、つくば移転に際して導入された土木研究所の部材耐震実験施設や振動台の貢献が大きい。橋脚はその耐力を上回る弾性地震力を受けても、変形性能があればだちに破壊するのではなく、粘りを持った応答が可能であることが明らかにされ出し、大きな弾性地震力を受けても橋の被害が限定的であった理由を説明できるようになったのである⁴⁾。

筆者は土木研究所振動研究室で地震動の研究を担当していた頃に、地震動の性質の何が構造部材の破壊に寄与するのかに疑問を持っていた。最大加速度や最大速度、最大変位、継続時間（いろいろな定義があるが）、加速度応答スペクトル等、既存の指標

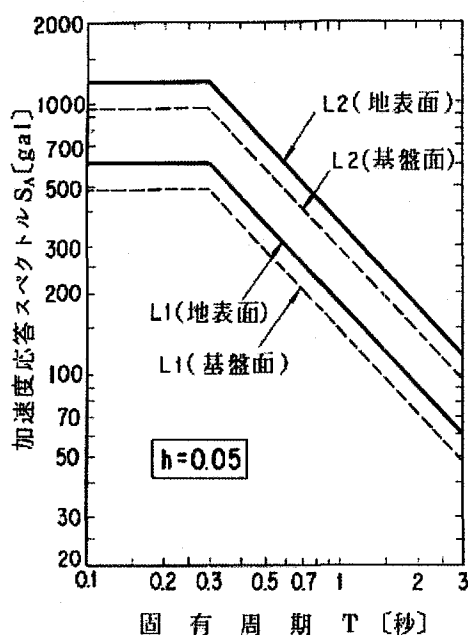


図-1 東京湾アクアラインの耐震設計に
用いられた L1, L2 地震動

に対する予測式は開発できても、こうした指標が構造部材の損傷を表現するために有効かどうかはわからなかったためである。構造部材が塑性変形すれば、損傷の進展には載荷繰返し回数が寄与するはずだと考えて、くりかえし回数を考慮した加速度応答スペクトルを提案したのもこの頃である⁵⁾。

やがて、耐震研究室に移動し、構造部材の耐力や変形性能に関する研究を担当するようになって、真っ先に手がけたのは、載荷履歴や載荷繰返し回数に対する検討である。繰返し載荷実験では、変位制御で載荷変位を順次大きくして載荷するのが一般的であるが、最初に、大きな変位で載荷し、順次変位を下げていくかどうかを試してみた⁶⁾。いわば、兵庫県南部地震のような直下型地震を受けた際の損傷や変形性能の検討に相当するものである。こういう検討から、載荷履歴や載荷繰返し回数が橋

脚の変形性能に大きな影響を与えることを知り、これがやがて、兵庫県南部地震以降のタイプⅠ地震動、タイプⅡ地震動に応じた橋脚の変形性能の評価へと受け継がれていった。

3. L2地震動に対する耐震設計

(1) 初めてL2地震動が採用されたアクアライン
L2地震動というと、兵庫県南部地震以降に土木学会によって提案されたものと誤解されている方がいるが、これは間違いである。L2地震動を我が国の土木構造物で最初に取り入れたのは、1982年の東京湾横断道路の耐震設計である。ここでは、東京湾周辺の地震危険度解析から求めた再現期間475年の加速度応答スペクトルに基づいてL2地震動が図-1のように定められた。東京湾アクアラインでは、部材の取り替えの難易と当該部材が損傷した場合の全体系に及ぼす影響に応じて表-1に示すように性能目標が与えられた。L1地震動に対しては、構造部材の最大応答が原則として弾性範囲にあるように、また、L2地震動に対しては、構造部材の非線形最大応答値および塑性率が原則としてそれぞれの終局強度および終局塑性率以下で、これにより全体系の崩壊が生じないように設計することが求められている。“L2”という名称は、当時、土木研究所振動研究室長であった荒川直士氏がつけられたものである⁷⁾。

L2地震動に関して荒川直士氏の指導の下で検討し始めたのは、東京湾横断道路ではどのような状態が耐震的に最悪シナリオだろうという議論が契機であった。当時は海中人工島・沈埋トンネル・橋梁案が主流であった。大地震時に、沈埋トンネルの可撓性継手から水が漏れてもいいだろうかというのが話の発端であった。底面では4気圧以上にもなる高水圧の水が可撓性継手から吹き込み出したら、手で押さえることなど当然不可能であるし、吹き込む水の

表-1 東京湾アクアラインの耐震設計に用いられたレベル1, 2地震動に対する耐震性能目標

地震動	補修、取り替えの難易	影響範囲が局所的であり、全体系の安定性に影響がない	影響が広範囲に及ぶか、もしくは全体系の安定性に影響がある
レベル1	比較的復旧が容易もしくは取替えが容易な構造となっている	損傷してはならない（ただし、過去の事例からみて損傷する場合もある）	損傷してはならない
	困難	損傷してはならない	損傷してはならない
レベル2	比較的復旧が容易もしくは取替えが容易な構造となっている	破壊してもよい	損傷は許すが、破壊は防止する
	困難	損傷は許すが、破壊は防止する	軽微な損傷に限る

(注) 単に技術的な難易のみでなく、経済的・期間的な面からの難易も含まれるものとする。

量は無限であるため、とうてい非常用ポンプでくみ上げることなどできない。そうすると、大地震時といえども可撓性継手から水が侵入する状態は許容できないという当然な結論に達した。

このようなたわいない議論からスタートしたが、震度法によって耐震設計すれば安全なのだという当時の思考停止状態から抜け出すためには、この議論は極めて重要であった。震度法の呪縛からようやく脱することができたという点で、L2地震動の持つ意義は我が国の土木構造物の耐震設計できわめて大きい。

しかし、この当時には、まだ、橋脚のじん性率の評価法も無く、シールドトンネルや人工島に至っては手探りの状態であった。構造部材の履歴特性を設計に取り入れるだけの技術力がなく、結果的には、震度法の地震力を少し割り増す程度の実効的意味しか持たなかった。

(2) L2の実用化に道を開いた免震設計

L2地震動が実質的に使用されたのは、橋梁の免震設計が最初である。免震設計では、震度法の地震力を上回る地震力に対する耐震性が要求される。震度法だけでは到達不能の世界であった。道路橋の免震設計法ガイドライン(案)⁸⁾、道路橋の免震設計法マニュアル(案)⁹⁾に現在のタイプI地震動(プレート境界型の大規模地震による地震動)が取り入れられた。これは我が国の地盤上で得られた394成分の強震記録の統計解析から求められた加速度応答スペクトルの距離減衰特性に基づいている²⁾。ここで初めてL2地震動が耐震設計に有効に生かされることになった。ようやく追いついてきたRC橋脚の動的耐力やじん性率に関する知識が、L2地震動に対する免震設計を可能とした。

(3) 1990年道路橋示方書に取り入れられたL2

このような経緯を経て、L2地震動は1990年道路橋示方書の「RC橋脚の地震時保有水平耐力の照査」に取り入れられた。これが国レベルの技術基準に初めて取り入れられた地震時保有耐力法の規程である。この当時、土木学会でも地震時保有耐力法に関係する研究は全くといってよいほど発表されておらず、地震時保有耐力法の意味を理解できる官庁や民間技術者はごく少数であった。

実は、道路橋示方書の原案を道路協会・橋梁委員会の審議に上げる際に、当時、建設省道路局企画課専門官であった宮田年耕氏(現在、国土交通省道路局長)から地震時保有耐力法に関する説明を求められたことがある。筆者は当時としてはあまりに斬新

すぎる原案にストップが掛けられるのではないかと危惧したが、本省に説明に行き、地震時保有耐力法とは「関東地震に持つ可否かをチェックする方法です」と説明すると、宮田年耕氏は即座に「わかりました」と了解してくれた。10分程度の打ち合わせであったと思う。筆者は省内に宮田年耕氏のように支持してくれる技術者が居ることを非常に心強く思った覚えがある。

道路協会・橋梁委員会では、地震時保有耐力法は「1980年道路橋示方書の参考資料に示された地震時変形性能の照査法と同じような結果を与える規程です」と説明した。ほとんどの委員は意味がわかっていなかったと思うが、地震時保有耐力法にはさしたる質問も出ず、承認された。ただし、後述するように、静的フレーム法の導入が問題になり、これ以外の原因もあったが、実質、耐震設計編の通達が約半年遅れることとなった。

地震時保有耐力に関する照査の規程は、兵庫県南部地震以降、復旧仕様に取り入れられ、さらに1996道路橋示方書では、地震の影響の大きいすべての構造部材に適用すべき耐震設計法として、震度法と並ぶ同格の耐震設計法として位置づけられることとなった。現在では、2段階設計法と呼ばれることもあるが、筆者は、震度法は初期断面決定の位置にフェードアウトし、地震時保有耐力法が実質的な耐震設計法になったと見ている。

1990年道路橋示方書は、筆者が日本道路協会橋梁委員会耐震設計分科会長として初めてとりまとめに当たった基準であるが、地震時保有耐力法と並んでもう一つ重要な点は静的フレーム法が導入されたことである。下部構造の設計に際しては、当該橋脚に作用する死荷重反力に設計震度を乗じて地震時水平力を求めるとされてきたが、動的解析すると、下部構造に配分される地震時水平力はこのようにならない。たとえば、3径間連続橋の橋軸直角方向の耐震計算を例に取ると、等径間長であれば、橋台に作用する死荷重反力を1.0とすれば、橋脚には1.7の死荷重反力が作用するはずであるが、実際には、剛性の高い橋台がもっと大きな水平力を分担し、橋脚の地震時水平力の分担は橋台以下になる。当然、橋脚が分担する地震時水平力は橋脚高さによって変わってくる。

このような点から、静的フレーム法¹⁰⁾を開発し、設計振動単位という概念も提案した。これを1990年道路橋示方書に盛り込むことを提案したが、従来の方法と抜本的な変更になるという理由で橋梁委員会で問題となり、道路橋示方書の通達が約半年遅れることとなった。新しい方法を開発した際に、理論

的にはこの方法でよいが、これが従来の慣例と大きく異なる場合が、原案作成者にとって最も悩ましい。筆者は何人かの当時のオーソリティーに相談したが、意見は完全に半々に分けてしまった。静的フレーム法で良しとする意見は、これが本当である以上、下部構造の設計もこの方法で求められる地震時水平力を用いるべきであるという意見である。静的フレーム法の導入などとてもないという意見は、従来の日本の橋梁は橋脚の地震時水平力の算出に余裕を持たせ、剛な橋脚を採用することによって橋脚の変形を抑え、結果として上部構造に変形が生じることを抑えてきた。このような方法を採用すると、橋脚断面が小さくなり、橋脚の変形が大きくなる結果、上部構造にも耐震設計が必要になるというものであった。

普通、困った場合には、何人かの専門家に聞けば、大勢はわかる場合が多いが、このように意見が分かると、最後は自分は何を信じるかによって意見をまとめなければならない。結局、筆者は、静的フレーム法を採用し、従来の方法との激変を緩和するため、最小値の規定を設けることによって決着を図った。メインストリームが何であるかははっきり示すべきと考えたためである。

4. 兵庫県南部地震のインパクト—事実に近い設計体型の重要性

図-2 は、1923 年関東地震以降の橋の耐震基準の変遷を、耐震設計に係わる規程が記述されているページ数（参考資料等は除く）で示した結果である。耐震規程に関する技術基準のページ数が増えれば耐震技術が向上したと言うつもりはないが、ページ数に比例しただけの知見が蓄積されたことは事実であろう。昔の基準では活字の大きさが異なっているので、現在の道路橋示方書の様式に従ったページ数に換算してある。

これによれば、兵庫県南部地震で倒壊した多くの橋が準拠した 1964 年鋼道路橋示方書を含めて、1971 年に道路橋耐震設計指針が耐震設計に特化した初めての基準として刊行されるまでは、耐震に関する記述はわずかに 2~3 ページでしかなかった。設計震度の数値と、単純橋を対象に慣性力と可動支承の摩擦力をどのように下部構造に作用させるか程度の規程だけで、連続橋としての慣性力の配分、じん性の重要性や確保の方策、落橋防止構造や液状化・流動化、動的解析等、近代的な耐震設計を構成する重要な項目は何一つ含まれていなかった。これが、1971 年以前の技術水準であったのである。

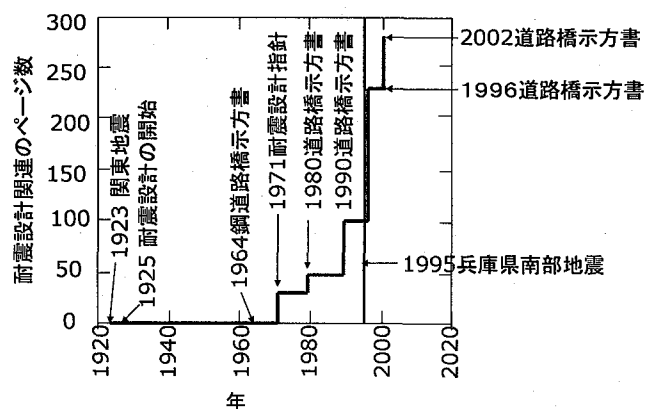


図-2 橋梁の技術基準のうち、耐震設計に関連したページ数の変遷

1971 年道路橋耐震設計指針は、1964 年新潟地震以降に研究が開始された液状化判定法や固有周期に基づいて設計震度を与える修正震度法、落橋防止構造の規程を取り込み、この当時としては間違いなく世界最先端の耐震基準であった。ページ数も 30 ページ程度と、いっきに従来の 10 倍に増えた。地震応答の低減を図る構造等、将来の免震設計につながる概念を本文規程に取り組んで、新規技術開発を鼓舞する等、新しい耐震技術の鼓動と息吹を感じさせる斬新な規程であった。文章も簡潔で、生き生きしている。

これに対して、1980 年道路橋示方書・V 耐震設計編は、液状化の FL 値に基づく判定法が取り入れられた以外は、ほとんどが 1971 年道路橋耐震設計指針を道路橋示方書の形式に書き改めただけの基準であった。耐震に関連する規程は 56 ページに増えたが、1971 年米国サンフェルナンド地震以降、海外ではすでに開発されつつあったキャパシティデザインの影響が反映されておらず、従来通りの震度法と応答を考慮した修正震度法しか記述されなかった。

唯一、1980 年道路橋示方書には地震時変形性能の照査の例が新しく参考資料として取り入れられた。これは、震度法による震度の 1.3 倍の地震力に対して変形性能を確認しようというもので、見方によっては、地震時保有耐力法の走りである。しかし、この方法の致命的欠陥は、震度法で考えている以上の地震動にどのように対処すべきかという基本方針が示されず、いわば震度法と迎合して、その範疇で構造部材の変形性能だけを照査して事足りていた点である。震度法の震度とは何かに答えを出し、これを解決するという設計思想の見える技術体系にはなっていなかった。

しかし、この当時は我が国の高度成長期にあたり、

多数の橋がこの基準に従って建設されたという点で、この基準は我が国の現存する橋梁の耐震性レベルに大きな影響を与えている。筆者は、1980 年道路橋示方書からこれが改定される 1990 年までの 10 年間に「耐震設計の失われた 10 年」と呼んでいる。

1990 年道路橋示方書・V耐震設計編では、震度法と修正震度法をひとまとめにして改めて震度法とする（全固有周期範囲で、設計震度を固有周期に基づいて定める）と同時に、RC 橋脚を対象に、地震時保有水平耐力の照査や関連する L2 地震動、じん性等の規程が初めて取り入れられたほか、上述した静的フレーム法による連続橋の慣性力の算定法、動的解析に用いる設計スペクトル、設計スペクトルに周期領域で応答スペクトルをフィッティングさせた標準加速度波形等、各種の規程が盛り込まれた。ページ数は 95 ページと 1980 年道路橋示方書のほぼ 2 倍に増加した。

1990 年道路橋示方書・V耐震設計編の考え方は、その後、兵庫県南部地震で被災した橋の復旧に使用された復旧仕様を経て、1996 道路橋示方書・V耐震設計編に受け継がれ、さらに拡充された結果、227 ページに達した。復旧仕様では、橋脚のじん性の確保の重要性から、星隈順一氏らによって新たに開発された横拘束されたコンクリートの構成則が導入された¹¹⁾。コンクリートの横拘束に対する研究としては国際的には John Mander らの研究が有名であるが、このモデルは鉄筋比が高く帯鉄筋がみっちり入った建築構造を対象としており、我が国の橋脚にはなじまないためである。

また、兵庫県南部地震の経験から、橋の残留変位に対する規程も新たに盛り込まれた。これは曲げ破壊し、倒壊は免れたが地震後に傾いたまま残った橋脚があったことから、残留変位応答スペクトルに基づいて設けられた世界最初の規定である¹²⁾。この規定は、じん性の向上を過度に期待して設計することに対する歯止めの役割を果たしている。

さらに、兵庫県南部地震による地震動がタイプ II 地震動として取り入れられた。兵庫県南部地震による地震動は激甚で、1990 年道路橋示方書に取り入れられた L2 地震動よりも周期 0.3~1.5 秒あたりではさらに大きいスペクトル特性を持っている。当初、L2 地震動よりもさらに大きな地震動を取り入れることにためらいもあったが、地震後の復旧には実際に生じた地震動を取り入れないわけにはいかないと建設省道路局長以下の鶴の一声で、兵庫県南部地震による地震動を設計に反映することとなった。観測された強震記録の加速度応答スペクトルを包絡する形で、設計スペクトルが定められ、これを

1990 年道路橋示方書の L2 地震動と区別するためにタイプ II 地震動、1990 年道路橋示方書の L2 地震動をタイプ I 地震動と呼ぶこととした。

筆者の原案では、当初、タイプ II 地震動は現在の規定よりも長周期領域をさらに大きく評価していたが、原子力発電所の設計地震力よりも大きいのはおかしいとのある大学教授からの意見を取り入れて、現状のレベルとなった。筆者は、原子力発電所の設計地震力よりも大きかろうと、兵庫県南部地震による地震動特性を設計に反映することの意義が大きいと考えたが、復旧仕様をとりまとめる時間との戦いの中では、Better than nothing と判断せざるを得なかった。

タイプ I 地震動に加えてタイプ II 地震動を設けることに対しては、設計の手間が増えるため、一つにまとめるべきだとの意見も出された。しかし、1923 年関東地震の際に東京で生じたであろう程度の地震動を表すタイプ I 地震動と、兵庫県南部地震のように M7 直下型地震による断層近傍地震動を表すタイプ II 地震動では、継続時間等、加速度応答スペクトルには現れてこないいろいろな特性の違いがある。したがって、タイプ I とタイプ II 地震動の加速度応答スペクトルを単純に包絡すると、その結果得られる地震動はどういう地震を反映したものかがわからなくなってしまう。耐震設計には、どこの馬の骨ともわからない地震動を使用する訳にはいかない。兵庫県南部地震の地震動を耐震設計に使用するということは、設計しようとしている構造物が、もし兵庫県南部地震に相当する地震を受ければ、どのような状態になるか、またこれが許容できるかを、兵庫県南部地震の際の他の構造物の損傷状況との比較において判断しようという行為である。

1923 年関東地震の際に東京で生じたであろう程度の地震動を表すタイプ I 地震動では、主要動部は 1 分にもなると考えられる。これに対して、M7 直下型地震による地震動を表すタイプ II 地震動では、主要動の継続時間は 10 秒程度に過ぎない。このような地震動の繰り返しを考慮して、タイプ I、タイプ II 地震動では、異なった橋脚の許容じん性率が定められた。星隈順一氏、運上茂樹氏、武村浩志氏らによって載荷履歴や載荷繰り返し回数に対する検討⁵⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾ がこうした規定の理論的背景になっている。さらに、液状化強度の評価にも載荷繰り返し回数の影響が取り入れられている¹⁶⁾。

また、1996 年道路橋示方書では、免震設計と動的解析に対する規定が大幅に拡充された。免震設計としては、従来、地震の影響の低減を期待する構造として、こうした構造を採ることが推奨されてはい

たが、具体的な規定が示されていなかった。兵庫県南部地震では、激甚な地震動に耐えるためには、橋梁系全体の変形性能の確保が重要であることが明らかとなり、その方策の一つとして免震設計が正式な規定として取り入れられることとなった。道路橋の免震設計法マニュアル（案）に基づいて、免震設計に関する規定が国レベルの技術基準として初めて取り入れられた。

また、塑性ヒンジを考慮した地震時保有耐力法に基づく耐震計算では、橋全体系の地震応答を適切に考慮することが重要であることから、動的解析に関する規定が大幅に強化された。

このような耐震設計法の強化によって、兵庫県南部地震で被災した多くの橋が準拠していた 1964 年鋼道路橋示方書に比較し、どの程度の耐震性の向上が図ることができるかが、堺順一氏によって RC 橋脚を対象に検討されている¹⁷⁾

兵庫県南部地震後の耐震設計法の大変革をスムーズに乗り切れたのは、地震時保有耐力法の意味を深く理解されていた矢部正明氏らの俊英なコンサルタンツ技術者の存在によるところが大きい。技術基準は、これを的確に運用できる技術者が居なければ単なる絵に描いた餅になる。矢部正明氏らコンサルタンツ技術者や免震橋に関する建設省土木研究所と民間 47 社との共同研究(1999~2001 年)に参加された多くの優れた技術者の牽引力がなければ、1995 年復旧仕様や 1996 年道路橋示方書の運用があのようにスムーズには行かなかったと考えられる。

以上のような経緯を経て、最新の 2002 年道路橋示方書が運上茂樹氏を中心としてとりまとめられた。性能規定型の技術基準を目指して、要求事項とそれを満足する従来からの規定を併記する書式が採用されるとともに、L2 地震動に対する主働土圧や液状化地盤上の橋台の耐震設計法等が新しく導入されている。この結果、本文・解説は 280 ページになり、これに参考資料を加えると、実に 405 ページにも記述が充実されている。

こうしてみると、耐震基準としては、1990 年道路橋示方書以降、設計思想、設計ツールともに、格段に強化されているのがわかる。1990 年道路橋示方書は、ようやく、近代的な耐震基準のレベルに達したと考えられる。兵庫県南部地震で被災した橋は、1964 年鋼道路橋設計示方書や 1971 年道路橋耐震設計指針（一部は、1980 年道路橋示方書）で設計されており、L2 地震動や橋脚の変形性能に対する配慮のなかった時代に設計されたものであった。

兵庫県南部地震の大きな教訓は、従来の震度法のように、過小な地震力を用いて、耐力は許容応力度

法で厳しく縛り、結果として両者がそこそこバランスするという体系ではだめだということを明らかにした点にある。こうした結果オーライの世界では、地震力や部材耐力・変形性能に関して新しい知見が出てきても設計には反映できない。なぜなら、外力、耐力、計算法のいずれもが歪んでいるため、どこか一つに事実に近い知見を入れようとすると、すべてを入れ替えるか、新しい知見を従来と同じように歪ませるかしなければ、新しい技術が基準に入らない。この結果、技術の進歩から遅れ、震災経験のある構造物に対してはそこそこの結果が出せても、震災経験のない構造物の耐震性を検討できないためである。

外力、耐震計算法、断面照査法をいずれもより事実に近い値や手法により求められるようにしておかないと、技術の進歩を基準に反映できない結果、基準が時代のニーズを取り込めないというのが、兵庫県南部地震の最大の教訓であった。

5. 今後の方向

(1) 性能規定型耐震設計

現在、耐震設計に限らず、技術基準は性能規定型の方向に向かっている。構造物の塑性域の応答を評価できるようになって、現実的かつ実用的な応答照査が可能となり、このことが、日常の耐震設計業務の中で、構造物の断面決定を如何に行うかというハウツーから技術者を解放し、はじめて、どのような構造物を設計したいかという耐震目標に思いをはせることを可能とした。

性能規定型耐震設計では、性能目標をどのように与えるかが重要である。しかし、現状の性能目標は、「できるだけ速やかに機能回復する」とか「限定された被害にとどめる」といったように曖昧である。性能目標を明らかにしていくことが重要であるが、その際の視点は、1) 個々の構造物ごとに性能目標を定めるのではなく、都市や地域の耐震性能を確保するために、都市や地域を構成するサブシステムとしての各種インフラ施設の性能目標はいかにあるべきかという視点から議論されることが重要であること、2) 国民が要求するニーズに見合った性能目標であること、3) 性能目標を表すための指標（たとえば、最大変位やじん性率、残留変位等）が不足しており、もっと持ち駒を増やさないと、国民に対する説明や、さらには技術者間でさえ、どういう性能を意図するかを表現できないこと、等である。

たとえば、静岡県地域防災計画では、地震発生後、1 週間程度は救急救助活動や重傷者の搬送、救助用資機材や人員の搬入を最優先で行うため、県民

には、7日程度の最低生活を確保できる緊急物資の備蓄や、3日分の非常持ち出し食料、飲料水の確保を求めている。このことは、地震後3日、遅れても7日程度で、道路が確保されることを前提としているが、兵庫県南部地震の経験から見て、同時多発的かつ広域に震災が生じた場合に、被災した橋梁を3日以内に復旧することは可能であろうか。

さらに、与えられた性能目標を達成するためには部材や構造系の照査法を現状よりもさらに大幅にグレードアップする必要がある。たとえば、ある大きさの設計地震に対して、3日以内に1車線だけでも復旧したいという要求と、1週間以内に全車線を復旧したいという要求をどのように設計で考慮できるであろうか。性能規定型耐震設計では、従来の耐震技術よりも格段に高いレベルの耐震性に関する包括的知識と構造全体系、部材系の両者に対して、外力、解析、断面決定、耐震性照査の技術が要求されている。

性能規定型耐震設計は従来の仕様規定型設計のように、ともすれば惰性で基準に従った計算をすれば耐震性が確保されると錯覚されがちな耐震設計に目標と確信を吹き込み、耐震目標にかなった構造計画の下に適正な耐震設計を行えるようになると同時に、細部にもいろいろな工夫を凝らすことができるようになることを期待したい。

(2) 国民のニーズに合った性能目標

構造設計の常識では、外力は十分な安全性を持って設定されるべきであるが、耐震設計では依然としてぎりぎりなレベルの地震力しか考慮されていない。これは地震の発生頻度が低く、構造物の耐震性を向上させるための投資が無駄になるかもしれないという理由から来ている。一方で、我々の地震経験は限られたものに過ぎず、兵庫県南部地震のようにそれまでの常識を覆す地震が起これば大被害が生じる。現在まで、被害を受けては耐震設計法を改良するという繰り返しを重ねてきたが、兵庫県南部地震以降の努力もこうした被害と改良の繰り返しの1ページに過ぎない可能性がないとは誰も否定できない。

こうした状況にありながら、一般に施設管理者や設計者は、自らが設計したり管理する構造物が耐震的であると国民に言われている傾向にあり、実際に被害が生じると国民から非難されるという、損な役回りを演じさせられている。

一般国民が、橋梁の耐震性に関してどのように考えているかは、我々が橋梁の耐震性に対してどのような説明責任を果たすべきかを考える上で多くの示唆を与える。これに関して宮路健太郎氏により興味

深いアンケート調査が実施されている。これについてはすでに報告されているので、さわりだけを以下に紹介する^{18) 19)}。

東京都内で行った街頭アンケートやアンケート調査によれば、都民は兵庫県南部地震と同程度の地震が東京で起これば、自分の周りや利用する橋梁は大被害を受けるに違いないと予想している者が多い。この理由として、兵庫県南部地震の影響が大きく、きっと東京でも同じ被害が生じるに違いないとか、手抜き工事があるに違いないと答えた都民が多い。

利用者として普段使用している道路や鉄道が橋の地震被害で利用不能となった場合に、どの程度の期間で応急的でもよいから復旧（仮復旧）してほしいと考えているかを聞くと、地震後3日以内という回答が30%で最も多く、地震後1週間以内と答えた国民が約90%を占める。街頭調査した都民の反応を見ると、適当に答えたのではなく、停電し冷蔵庫が使用不能となった状態で自宅の食料品の備蓄がほとんど無いことや仕事で休める日数等を考えながら回答している。一般国民から見れば、この程度で復旧してほしいと願うのは当然かもしれない。

しかし、兵庫県南部地震で被災した橋梁では、点検調査、復旧工法検討、桁仮受工だけで3ヶ月を要したり、杓座補修だけで、2.3ヶ月を要した橋がある。上下部構造を撤去新設するようになると、復旧までに半年～2年と長期間を要する。現状の復旧期間は明らかに国民が求めるレベルと乖離している。

現在の耐震設計では、中小地震に対しては機能保持、大地震に対しては崩壊防止となっていることとその背景を説明した後、耐震設計ではどのような状態にあるように橋を設計すべきかを質問すると、現在の耐震性能目標である「地震後使用できなくても人命が損なわなければよい」、「地震後なるべく早い時期に回復できる程度に被害をとどめるべきである」を支持する回答はそれぞれわずか4%、12.4%であるのに対して、「地震後直ちに回復できる程度の被害にとどめるべきである」、「コストをかけても被害を押さえるべきである」という回答はそれぞれ47.2%、34%に達しており、ほとんど被害が出ないように橋を建設すべきだと願う国民が多い。

地震被害を受けないことが耐震設計の究極の目標であるが、これを阻む要因として技術的困難性と建設費の制約が指摘される。しかし、現状の技術でも、特殊な橋や条件を除けば、建設費をかければ大地震時にも被害を受けないようにすることは可能である。それでは、大地震に対してほとんど被害を受けない橋を建設するためであれば、現状に比較してどの程度の建設費の増加であれば許されると国民は考えて

いるのだろうか。これを聞いて見ると、コストアップなどすべきでないという意見も 7.3%あるが、圧倒的多数は耐震性を向上させるためのコストアップは許されるとの意見で、大地震に対してほとんど被害を受けない橋を建設するためであれば、現状の 30%までならコストアップしてもよいと回答した国民の累計は 80.4%に達する。

設計震度を増加させるとコストが上がるというが、どの程度上がるかを具体的に検討した例は少ない。液状化は生じないという条件で、杭基礎で支持された橋脚高さ 10m の 5 径間連続版桁橋を対象に設計震度と建設費の関係を検討してみると、2004 年道路橋示方書に比較して、下部構造だけ（橋脚及び杭基礎）の建設費が何倍増加するかを求めると、Ⅲ種地盤の場合には、設計震度を 3.0 とすると 1.14 倍、設計震度を 5.0 とすると 2.3 倍となる。これに桁の建設費を加えると、橋の建設費の増加度は設計震度を 3.0 とすると 1.04 倍、設計震度を 5.0 とすると 1.35 となる。

以上に示したように、橋梁建設費は設計水平震度が基準値から少し増加すれば急速に増大するというわけではない。むしろ設計水平震度が 3 程度までであれば、設計水平震度の増加に伴う建設費の増加はわずかであるとさえ言える。

性能規定型耐震設計という土俵で、工学的に発生することが考えられる現実的なレベルの地震力を他の荷重作用と同等の安全性を見込んで評価し、これに対して、極力被害を受けない橋を設計するというプロセスに変えていくことが、今後の技術開発を活性化し、設計技術者の創意工夫を呼び込むために必要である。

（３）動的解析を使いこなすノウハウの蓄積

兵庫県南部地震以降、線形動的解析と同時に非線形動的解析も幅広く設計に使用されるようになっていく。兵庫県南部地震以前には、大学や研究所でさえあまり行われていなかった非線形動的解析が、日常ルーチンとして設計レベルで行われるようになったことは隔世の感がある。解析ツールに対する設計者の自由度は大きく広がったと言える。将来の動的設計に向けた非線形動的解析の一層の活用が期待される。

かつて、動的解析理論や解析ソフトの詳細を理解していない技術者が動的解析を行うのはとんでもないという風潮があった。理論もわからないくせに、果実だけを享受するのはとんでもないという考え方

である。確かに、理論を知らないととんでもない使い方をしがちであり、この点は十分注意しなければならないが、そろそろ一通り動的解析理論を知った後は、動的解析を使いこなす技術を蓄積し、習得する時代になっていると考えられる。テレビの理論と回路設計を理解していない者はテレビで伝えられる情報を享受すべきでないという意見はない。間違った使い方をしなければ、利用者として情報を享受すればいいのである。動的解析についても、理論及び解析ソフトの開発者とこれを使いこなす技術者は分業する時代になっている。

参考文献 20) はこのような意図で、動的解析をツールとして使いこなすためのノウハウの蓄積を目的としてまとめられたマニュアルである。動的解析について最低限知っているべき知識を入門編として示した後に、耐震設計例を具体的に計算してみる事例編、さらに深く動的解析を知りたい読者のための応用編から構成されている。

パソコンで計算可能な体験版フリーソフト DYMO が大変おもしろく役に立つ。道路橋示方書に基づき、橋脚の塑性変形や地盤ばねの計算等が自由にできるほか、ユーザーが任意の断面や入力地震動を与えて計算することも可能である。DYMO は土木研究センターのホームページ (<http://www.pwrc.or.jp/>) からダウンロード可能である。コンサルタント技術者だけでなく、施設管理者の技術者にも是非使ってもらい、断面や減衰定数を変えたり、入力地震動を変えたり、橋の振動がどのように変化し、被害のレベルがどのようになるかといった基本的なところから、“遊んで”みて頂きたい。普段、何となく難しそうだと思っていた動的解析が、「なーんだ、静的解析と同じじゃん！」とおわかりいただけると思う。百聞は一計算にしかずという点を体験頂ければと期待している。

（５）断層近傍地震動と断層変位

K-NET 等、地震観測網が充実してきたせいで、構造物にパンチのある断層近傍地震動が国際的にも次々に観測されるようになってきた。単に最大加速度や短周期領域の加速度応答スペクトルが大きい地震動は別として、2004 年新潟県中越地震でも、小千谷で観測された地震動のように、固有周期 1 秒付近では兵庫県南部地震で観測された地震動を上まわる記録もでてきている。米国では、断層から数 km の範囲では、特別に設計地震力の割り増しを行っている施設もある。断層近傍地震動の特性に注目していく必要がある。

さらに、断層変位そのものによる被害も要注意で

ある。たしかに、ある1カ所を取れば、そこに断層が出現する確率は数百年～数千年に1回かもしれないが、日本全体で見れば高い確率で断層が出現するということが重要である。ただし、断層変位に対して、耐震設計の範疇で対応できることは、現状ではわずかである。この方面の技術開発はこれからの段階である。

6. まとめ

兵庫県南部地震を契機として、耐震設計ツールが充実し、部材の変形性能や構造物の非線形応答に関する技術が飛躍的に進展したのは事実である。しかし、依然として、ルーチンとして耐震計算を行っているだけで、地震被害を軽減させるために何が有効か、何をなすべきかを考えるという方向に進んでいないのではないかと危惧される。動的解析は使いづらいという意見は、この事情を端的に示している。性能規定型設計が、一層、技術者参入型の耐震対策を可能とする方向に移行していくことを期待したい。

また、百聞は一見に如かずというが、反対に言えば、これは人間は自分の目で見た経験の中からしか将来を類推できないことを示している。新しい社会システムとこれを可能にする社会インフラの登場に従い、災害は進化する。発生頻度が数百年～数千年と長い地震災害では、科学技術に裏打ちされた耐震技術はまだごく限られたものでしかない。施設管理者や研究者、技術者は、耐震設計には未知の領域に属する多数の事象があることを念頭に置き、謙虚な姿勢で地震災害の軽減に向けた技術開発を行い、実施していくことが必要である。

参考文献

- 1) 片山恒雄, 岩崎敏男, 佐伯光昭: 地震加速度応答スペクトルの統計解析, 土木学会論文集, 275, 1978
- 2) 川島一彦, 相沢興: 強震記録の重回帰分析に基づく加速度応答スペクトルの距離減衰式, 土木学会論文集, 350/I1, pp. 181-186, 1984
- 3) 荒川直土, 川島一彦, 相沢興: 応答スペクトル特性を調整した時刻地震応答解析用入力地震動波形, 土木技術資料, 26-7, pp. 46-51, 1984
- 4) たとえば, 川島一彦, 長谷川金二: 鉄筋コンクリート橋脚の非線形地震応答及びエネルギー一定則の適用性に関する実験的研究, 土木学会論文集, 483/I-26, pp. 137-146, 1994
- 5) Kawashima, K. and Aizawa, K.: Earthquake response spectra taking account of number of response cycles, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 14, pp. 185-

197, 1986

- 6) Kawashima, K. and Koyama, T.: Effect of number of loading hysteresis on dynamic behavior of reinforced concrete bridge piers, Proc. JSCE, Structural Engineering and Earthquake Engineering, Vol. 5, No. 2, pp. 343-350, 1988
- 7) 荒川直土, 川島一彦: 動的解析における入力地震動の設定法, 土木技術資料, 26-3, pp. 126-131, 1984
- 8) (財) 国土開発技術研究センター: 道路橋の免震設計法ガイドライン (案), 1988
- 9) 建設省土木研究所・民間 47 社: 道路橋の免震設計法マニュアル (案), 1992
- 10) 川島一彦, 長谷川金二: 震度法による連続橋の耐震設計法, 橋梁と基礎, 90-10, pp. 37-45, 1990
- 11) 星隈順一, 川島一彦, 長屋和宏: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力法の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係, 土木学会論文集, No. 520/V-8, pp. 1-11, 1995
- 12) 川島一彦, Gregory A. MacRae, 星隈順一, 長屋和宏: 残留変位応答スペクトルの提案とその適用, 土木学会論文集, No. 501/I-29, pp. 183-192, 1994
- 13) 星隈順一, 運上茂樹, 川島一彦, 長屋和宏: 載荷繰返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法; 構造工学論文集, [44A], pp. 877-888, 1998
- 14) 武村浩志, 川島一彦: 載荷履歴特性が鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす影響; 構造工学論文集, 43A, pp. 849-850, 1997
- 15) 武村浩志, 川島一彦, 運上茂樹, 星隈順一: 繰返し載荷実験に基づく RC 橋脚の終局変位の評価; 構造工学論文集, 43A, pp. 869-880, 1997
- 16) 東拓生, 田村敬一, 二宮嘉朗: 地震動波形の繰返し特性を考慮した液状化判定法に関する研究, 土木学会第 51 回年次学術講演会, pp. 196-197, 1996
- 17) 堺淳一, 川島一彦, 武村浩志: 試設計に基づく耐震技術基準の変遷に伴う RC 橋脚の耐震性向上度の検討; 構造工学論文集, 43A, pp. 833-842, 土木学会, 1997
- 18) 宮路健太郎, 川島一彦: 市民から見た橋梁の耐震性能目標; 第 9 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 303-310, 2006
- 19) 日本地震工学会・性能規定型耐震設計法に関する研究委員会: 性能規定型耐震設計法—現状と課題—, 鹿島出版会, 2006
- 20) (財) 土木研究センター: 橋の動的耐震設計法マニュアル (案), 2006 (体験版動的解析フリーソフト DYMO は土木研究所のホームページ (<http://www.pwrc.or.jp/>) からダウンロード可能)