

土 木 研 究 所 資 料

道路橋の耐震設計に関する研究

—地震被害から学んだ教訓と
今後の技術開発—

平成6年7月

建設省土木研究所
地震防災部耐震研究室

Copyright ©1994 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

道路橋の耐震設計に関する研究

—地震被害から学んだ教訓と
今後の技術開発—

土木研究所地震防災部

耐震研究室	室	長	川	島	一	彦
		主任研究員	運	上	茂	樹
		研究員	杉	田	秀	樹
		研究員	中	島		燈

要 旨

本文は、さらなる道路橋の耐震設計法の向上を図るために、既往の道路橋の地震被害について再度振り返るとともに、これから学んだ教訓について調査し、今後、道路橋の耐震設計に関して技術開発が必要とされる課題について調査した結果をとりまとめたものである。

キーワード：道路橋，耐震設計，地震被害，教訓，技術開発

目 次

1. まえがき	1
2. 地震被害の教訓と今後の耐震技術開発に関する座談会議事録	2
2. 1 吉田 巖 氏	2
2. 2 多田 安夫氏	2 1
2. 3 大橋 昭光氏	3 7
2. 4 栗林 栄一氏	5 1
2. 5 岩崎 敏男氏	6 1
3. まとめ	7 4

1. ま え が き

我が国は、世界第1級の地震国であり、現在までに幾多の地震被害を経験してきている。大正12年の関東地震から最近の地震までに地震により被災した道路橋は約3,000橋に及び、このうち、24橋が落橋という事態に至っている。最近では、1993年1月には釧路沖地震が、7月には北海道南西沖地震が発生し、約70橋の道路橋が何らかの被害を受けている。道路橋の被害は、避難路、緊急物資の輸送道路としての機能を喪失させるとともに、復旧に多大な費用と日数を要し、地域社会、地域経済に与える影響が大きい。このため、道路橋に対しては適切な耐震性を確保しておくことが重要である。

我が国の道路橋の設計において地震の影響が考慮されるようになったのは、関東地震による大被害を契機として翌大正13年に地震力に相当する水平力が考慮されるようになった時に始まる。その後、道路橋に対する耐震設計法は、震災経験、耐震工学に関する技術の進展とともに、徐々に整備されて現在では、世界第1級の耐震技術を整備するに至っている。

しかしながら、地震による道路橋の被害はまだ十分解明されたわけではなく、どういう橋が地震被害を受けやすいかについてはほとんどわかっていないといっても過言ではない。また、1923年の関東地震以降、都市部がマグニチュード8クラスの地震を受けた例はなく、現在建設されている多くの橋梁は、大規模地震の洗礼を受けていないというのが実状であり、将来の地震の発生に向けて、さらなる耐震技術の開発が必要とされている。

本文は、道路橋の耐震設計法の向上を図るために、既往の道路橋の地震被害について再度振り返るとともに、これから学んだ教訓について調査し、今後、道路橋の耐震設計に関して技術開発が必要とされる課題について調査した結果をとりまとめたものである。

2. 地震被害の教訓と今後の耐震技術開発 に関する座談会議事録

2. 1 吉田 巖氏

(1) 日 時 平成4年4月15日 12:00~14:00

(2) 場 所 日本道路協会 特別会議室

(3) 出席者	吉田 巖	橋梁委員会委員長
	川島 一彦	耐震設計分科会長(土木研究所耐震研究室長)
	岡原美知夫	土木研究所基礎研究室長
	田村 敬一	土木研究所振動研究室主任研究員
	運上 茂樹	土木研究所耐震研究室研究員
	木暮 深	首都高速道路公団工務部設計技術課



写真-2.1.1 吉田 巖氏

川島：今日は、吉田委員長にはたいへんお忙しいところを、御時間とっていただき、大変ありがとうございます。私ども耐震設計分科会では、現在道路橋の耐震設計便覧を作ろうと鋭意努力しておりますが、この中で耐震設計の観点からどのような構造形式がよいのかという点について諸先輩の御意見を伺ってみようということが分科会の中で提案されまして、本日はその第一弾として吉田委員長にお願いしました次第であります。

今日は特別なストーリーも何も決めておりませんで、ざくばらんにご意見を伺わせていただいて、我々の方からいろいろ質問をさせていただきながら、2時頃を目途にお話を承りたいと考えておりますので、どうぞよろしくお願いします。

運上：それでは、まず出席者を簡単に紹介させていただきます。土木研究所から川島耐震研究室長、岡原基礎研究室長、私、耐震設計分科会の幹事をしております運上、振動研究室の田村主任研究員、それと首都高速道路公団工務部設計技術課の本暮さんです。

川島：本日は若手精鋭で参りました（笑）。

運上：それでは、本日は大きく3つくらいのテーマについて御意見をいただければと存じます。1つめは過去の地震被害の御経験からこのようにすればという留意点があればという点。2つめは、吉田委員長がこれまでにいろいろと設計、施工されてきた橋や御関係されてきた橋の中で、設計のモットーとして考えておられる点や、特に留意されている点についてお話を伺わせていただければと存じます。

最後に、現行の設計基準の中で、今後変えていく必要があるのではないかとお考えになっておられる点につきましてご意見をいただければと考えております。

それでは、まず最初に、過去に地震被害の調査を通して、どういう点に留意すべきかということからお伺いしたいと思います。特に、新潟地震の際にはいろいろと調査をされたと聞いております。新潟地震の際には液状化による昭和大橋の落橋があり、これが特にクローズアップされたと思います。そのような被害の中で特に衝撃を受けられた点や、地震被害を契機としてこのような点は変えていかなくてはと決断されたというような過去の御経験についてお聞かせいただければと存じます。



写真-2.1.2 座談会出席者

吉田：新潟地震については、いま、こんな感想をもっています。昭和大橋が落橋しましたが、昭和大橋は現在の耐震設計が進もうとしている長周期構造物ですね。単列のパイルベントで、剛性が低いから変位が大きく出ます。もちろんその当時も変位を制限するという規定があったのですが、昭和大橋では変位の計算にある間違いがあって、非常に長周期構造物になっていたのです。

長周期構造物で設計震度を落とすときに気をつけなくてはならないのは、変位の推定は普通の計算とは精度が一桁違うということ、すなわち、精度が悪いということです。ばねを仮定すれば計算上は答えが出てくるのですが、地盤の変形も含めて変位は精度が悪いから、そのことを十分知っておかないといけない。単純に落橋防止構造をつけたからとか、計算上の変位に余裕代を見込めばいいというだけではいけないのです。

それと同じようなことを本四で話を聞いたのですが、花崗岩の非常にフレッシュな所に基礎を置いたら、応答震度が上がって、大量に補強鉄筋を入れなくてはならないというようになった。ところが軟岩の上に基礎を置くと、とたんに寸法は小さくなってしまう。そういうのが本当に正しいのかどうかですね。基礎は硬い地盤には置かないで軟らかい地盤に置いた方が合理的ということになると、長年の我々の経験からずれてしまうと思います。

長周期構造物を設計する時には、変位応答の推定が問題になりますが、硬い構造物を花崗岩の上に置いたときの変位は小さく、その値が余り問題にならない。一方、柔らかいところに置いた時の変位は大きく、その推定は相当幅が出ます。だから、それを同じメジャーで考えて硬いところに置いたらこうで、軟らかくすれば安全だというのはおかしいと思うのです。決して間違いではないと思うのですが、変位の大きさが違う、したがって、柔らかいときは精度が問題になるということを考えて全体をまとめられたらいいと思いますね。

昭和大橋の隣に八千代橋がありました。昭和大橋よりも八千代橋の方が地盤が少し硬くて、さらに地盤が硬いのが万代橋だった。八千代橋は落橋しなかったのですが落橋寸前で、中央部の橋脚は確か25～30センチくらい完全にシフトしてますよ。非常に大きな地盤変動ですね。

そのようにアバットが滑り出して傾斜すると、地震に伴う地盤変状をどこまで設計に考慮するかということが非常に難しい。それを本当にやったらものすごく建設費がかかりますよ。どこまで建設費をかけることがフィージブルであるかという追求がちょっと遅れているという感じがします。

岡原：計画論の段階でそれを避けるということとか……。

吉田：もちろんそういう方法もありますが、避けられない場合もあるわけです。それに対して絶対安全な設計は出来ないわけですが、本当に交通を途絶してはいけない所では、建設費が2倍になろうが3倍になろうがきちんと設計しなくてははいけないと思います。経済性、耐震設計の投資額、橋の重要度の関係がまだ完全に整理されていない感じがしますね。

万代橋は、アーチ橋でいろいろ考えられて設計されていていい橋なのですが、復旧費についてはよく考える必要がある。昭和大橋は落橋した。八千代橋は相当痛んでアバットが動いてピアのところで桁が落下しそうになった。万代橋はまあまあ人間が通れるし、多少、手を入れたら車も走るという状態なわけですね。ところが、原型復旧費でみると万代橋が一番かかっているのです。

一同：なるほど。

吉田：一番復旧費が安くすんだのが昭和大橋なのです。そこが、本当に昭和大橋は悪かったのかという意見もある由縁なのです。場合によっては落橋してもいいということが考えられるわけですね。復旧費が一番安かったわけですから。

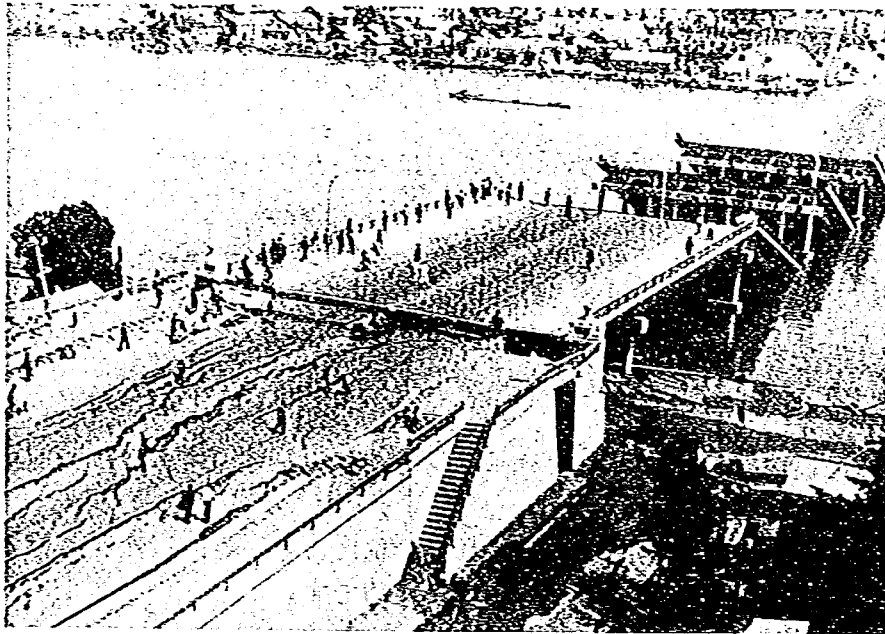


写真-2.1.3 昭和39年新潟地震による昭和大橋の落橋



写真-2.1.4 昭和大橋のパイルベント橋脚

川島：昭和大橋の落橋において変位の推定に問題があったとか、耐震設計の重要性の問題、さらに明石海峡大橋の応答震度等にいたるまでいろいろご意見を伺ってきたのですが、もし、現行の設計でやっていれば変位が大きくなって、杭の剛性が上がっていたのでしょうか。

吉田：いや、上がっていたかどうか、もし意識してそれだけの変形を許せば応答震度が減るから、杭の断面がもったかもしれない。そのかわりに相当揺れるからアバットのところでぶつかるかもしれない。例えば、仮に変位制限が無いとしたら、別の形がありそうな気がする。もちろん流動化の評価の問題は残る。

川島：パイルベントは昭和大橋以後、だめということで耐震点検の中で点検してきて補強してい

くようになっているのです。最近になってだんだん人手も無くなってきて、中小の橋や地方の橋ではいちいち河道を止めて掘削して、基礎を建設するというのは大変だということで、もう一度パイルベントを見直してもよいのではないかという考えが出されています。

吉田：私自身はパイルベントが全てだめということはないと思います。

川島：ちゃんと設計すればいいわけですね。

吉田：その通りですね。ただ、どこまで変形を許容するかということと、変形の計算には地盤に応じた精度を考えた上で設計していくことが重要ですね。

運上：現行の下部構造綱で変位を杭径の何パーセントと規定しているのは杭頭部においてですか？

岡原：杭頭部ではなくて、設計地盤面です。これは、杭にある一定の剛性を確保するためですね。今、委員長の言われたように変位の推定精度が悪いためです。

川島：今の変位制限と言うのは、最小剛性の確保ということですね。パイルベントの場合には、設計地盤面レベルで変位制限をするだけでなく、橋脚天端位置でも変位制限する必要がありますね。

吉田：パイルベントが非常に細かければ、地盤だけが揺れて橋桁は揺れないという極端な場合だってあるかもしれないね。

川島：免震設計になってしまいますね（一同笑）。

吉田：しかし、構造物としてはどこかでちゃんとした剛性をとっておかないといけない訳ですが。

川島：そうですね。パイルベントも普通の橋脚なみの剛性を持たせるように、橋脚天端で変位を制限すれば、最小剛性を確保できるということですね。そうすれば、パイルベント橋脚も有効に使えるのではないかという気がしているのですが。

吉田：レンジで制限するとか、山勘でやるのではなくて、しっかりした理屈がいるでしょうね。

川島：そうですね。それから2つ目の明石海峡大橋の例で、岩盤上でごつい構造物を造ると、今の解析では非常に震度が上がってしまっておかしいことになるという、直感に反する点ですね。これをどの様に考えていったらいいのかということですが、田村君少し言い分があるでしょう。

田村：岩盤もしくは普通の地盤でありましても、加速度応答スペクトルを求めると、短周期側で大きく、長周期側では小さくなります。これは実測の強震記録によっても、また解析でも同じ結果になると思います。現行の設計は、従来からの慣行もあり、設計震度は短周期の方で低く抑えられて、一方、長周期の方で高くなっています。私も地震動を扱っているものからすると、入力と計算方法は決してバランスがよくないと思うのですが、その辺に対するご意見などをいただければ大変参考になると思います。

川島：私はこう思っています。もともと耐震設計は計算法の研究からスタートしたんですね。構

造物の振動をきちんと計算できる方法の開発という点からスタートしたわけです。その次に入力に関する研究が進んできた。昭和39年の新潟地震以後、強震計をつけてきたせいで、いまそれなりに記録が集まってきて、その解析により、入力の方からの研究成果ができたわけです。その入力に関する研究成果を今の設計水平震度にいれ替えるとすると、従来の設計とは大きく変わってしまう場合がある。「外力」、「計算」、「照査」という3つのうち「照査」と「入力」をあわせて扱っていかないと、「入力」だけを新しい研究成果に入れ換えたのでは全然バランスが悪いわけです。

例えば、耐震研究室では明石海峡大橋以後、大型剛体基礎の転倒については検討してきました。この結果、剛床上の剛体と考えると、計算上はほんのわずかに浮き上がってくるかもしれないが、ひっくり返りはしないことが分かってきました。従来のように絶対浮き上がらないというのではなくて、巨大地震を受けた場合にはわずかなには浮き上がるかもしれないけど、転倒することはないということです。実際には、基礎は基岩に固定されますし、水の影響がありますから、浮き上がるということはないかもしれません。

従来は、巨大地震時にはもっと外力が大きいというところには目をつぶって、静的なつり合い条件だけで転倒を照査しているわけです。しかし、実際には、水平地震力と重力の合力が基礎底面の端を越えても大型剛体基礎では容易に転倒することはないのです。従来は、動的安定照査をせずに静的安定照査をしているから、外力が小さいものと見なして耐震計算法が組み立てられているのです。すなわち、地震外力の頭切りというのをやっているのです。したがって、照査を静的に行うという部分をそのままにして、入力に関する最近の研究に従って頭切りを行わないために、耐震設計としては、バランスを崩しているとみています。

剛体の転倒などは本四の明石や来島のような方法の先にバランスのとれた設計法があると思っています。転倒の他に滑動もそうです。このあたりの方向付けでいいサジェスションがありましたらお願いしたいのですが。

吉田：私の記憶では、昭和41～42年から45年に本四の耐震設計指針をまとめる時に似たような議論があったのです。それで結局、栗林教授（豊橋技科大）の論文にあると思いますが、短周期構造物に対しては、転倒エネルギーは頭を切っているわけです。

川島：それを、外力の方にもっていくということですね。

吉田：その方が合理的だということですね。外力を落したのですよ。そうした上で、ミドルサードに入れるという設計法があるでしょ。あれはひとつの経験でいっただけで、イメージ的には浮き上がってもいいということですよ。そうすれば振動エネルギーが減るという考え方が入っているわけです。栗林さんの20年前の論文をもう一度読んでいただいて、そのあたりを再整理するといいんじゃないでしょうか。

川島：耐震設計上の地盤面という考え方がありますね。あれも、もともと、もしその地盤面を設けずに、下部なんかもどこまでも深さ方向に地震力をかけたら、軟弱地盤の場合だと、下部の慣性力が増えますよね。そうすると抵抗力との関係で、むしろ下部をちょん切った方が楽になってくる。だからあるところから下は地震力をかけないというようにしたのだと伺ったことがあるのですが、それも同じ考えですね。

吉田：今でも地盤の応答計算をやるでしょう。ちょっと荷重がかかればすぐに地盤の方も非線形領域に入ってしまうのですよ。だから、思いのほか変形が増えて、そこで吸収エネルギーが増えてしまうのです。コンクリートと岩とを比べて、コンクリートの方が軟らかかったら、コンクリ

ートの方が先に破壊するでしょう。仮に大きな地震力が作用すれば、必ずローカルには破壊するのですよ。ローカルに破壊する領域が剛体のコーナーに起った時に、その部分でのエネルギーのやりとりや、全体のエネルギーのバランスが今の計算でどこまで追っかけられているのかが重要ですね。まだ、そこまでの計算はしないのではないかと思います。

川島：そこは、もっと検討がいりますね。岩盤上に大きなブロック状のコンクリートの構造物を造って、大きな地震を受けると、バシッと斜めせん断を受ける可能性があるのでしょうか？

吉田：常識的に言ってそれは無いでしょう。そんな大きなエネルギーは、入らないはずですよ。

川島：構造物の大きさ、寸法という概念が、意外と安定照査に入っていないような気がします。例えば、転倒で言えば、今の静的転倒照査は縦と幅の比が大事です。例えば、このノートと、形状は同じで寸法は100メートルある基礎も今の静的転倒照査では同じように転倒すると判断されるわけですね。縦横の比だけが重要ですから。しかし、実際には100メートルある基礎が50メートル持ち上がって転倒など絶対しないわけですね。形状だけではなくて、大きさとかマスとかそれを振動させるために必要なエネルギーとかが考慮されないといけない。

吉田：大きさが入らなかったらエネルギーの計算が出来ないのですからね。

川島：そうですね。その辺りは要検討ですね。

岡原：私も入力と照査の関係が重要だと思います。耐震設計では入力が行先しているが、照査の所は全然昔の方式を使っている。だからものすごくバランスが崩れていると思うんです。先ほどの委員長のお話でそこら辺を見直す必要があるのではないかと思います。

川島：照査というのは土も絡むし、なかなか進まない分野ですから、ここが重要ですね。現在は、新潟地震以後、開始された強震観測の記録が集まってきたので、ちょうどぐっとポテンシャルが上がった時期なんですね。そういうものを耐震設計に入れようという気持ちはわかるけど、今まであった、しわをどこにもっていくかが重要ですね。バランスの問題ですね。全体の設計としてのジャッジの問題ですね。例えば、バネなどもそうですね。バネを非常に硬くしていくと、特定の杭に非常に負担がかかってくる。バネを緩くするとまあまあ均等になってくる。設計からしますとあまり差がつくのはいやですよ。その辺の扱いも似たような話がありますね。

岡原：耐震設計綱のばねを使いますと、部材設計は非常にきびしくなってきますね。バランスが取れていないという感じがするんですよ。

川島：固有周期の計算でバネを軟らかくすると固有周期は延びる方にいきますね。実験によって得られた、固有周期と合うバネを選ぶと下部構造綱のバネより硬いのです。本来は、地盤に生じる歪等介して連続性のあるべきものなのでしょうね。現在は、耐震設計綱の方では硬いバネで固有周期を計算し、外力まで出して、今度は下部構造綱の方について下部構造綱のバネで全体の設計をするという二段構えになっています。面倒だけど今は考え方が違っている。これも地盤のひずみとか非線形域の破壊のような状態を念頭において設計には一連の設計体系として頭に入れておかないと・・・。

吉田：いずれにしても、力と変位の世界で議論している他に、トータルエネルギーの議論が同時

にないところかで計算がおかしくなってしまうのではないのでしょうか。どこかでトータルチェックする形にもっていかないといけないと思いますね。

運上：それでは、このあたりで、過去の被害から得られた教訓は何かと言うことで簡単にまとめてさせていただきますと、耐震設計の確保水準と、地盤の変状に対してどこまで対応するかということを中心に整理する必要があるということですね。

吉田：これはそう簡単な話しではないですね（一同笑）。今すぐにはできなくて、今後5年か10年はかかるでしょうね。

運上：それと、変形の推定に際してはその精度が非常に重要であるということで、そういうことを念頭においた設計をする必要があるということですね。

吉田：バネが硬くて変形が小さくでる場合と、バネが柔らかく変形が大きくなる場合とでは同じ精度にはないということですね。柔らかくなるほど同じ精度でも値が大きく変動して影響が大きくなるということですね。

運上：また、万代橋の話がありましたが、橋梁建設費と維持費、復旧費のトータルコストというものを考える必要があるということと、入力地震動の話では、地盤が柔らかい方が地震動が小さくなるため基礎が小さくなり反対に地盤が、硬い場合には経験からいいますとその方が安全にもかかわらず危ない状態となるという、地震動入力と計算法を含めた照査法のバランスが重要ということです。一番最後に入力と照査をトータルエネルギー的な考え方でトータルとしてチェックする必要があるということ、このようなご意見をいただきました。

川島：特に、先ほどの、直感にあっていないというのは最も土研としてはやらなくてははいけませんね。直感にあっていない設計というのは受け入れられませんから、それが一番大事ですね。それと、さきほどの御意見の中でもう少しお話しをいただければと思うのは、重要性についてですね。

吉田：昔から、重要度係数とか、1等橋、2等橋とかあるでしょう。現実にはそこに住んでいる人からすれば、なぜ自分の所だけ2等橋なのだとかいう意見が出るのです。だからこれは難しい問題ですね。

川島：委員長、どういう方向に何をすればいいのでしょうか。と申しますのは、重要度別補正係数がいま2割しか差がないわけですね。先ほど、4倍も5倍も変えてはどうかという御指摘があったのですが、ただ、現実にはそうは簡単にいかなくて、そんなに差があってもいいのかということになるんです。土研としてもいままで研究テーマとしては重要度別補正係数に関するものがあったのですが、なかなか答えがでてこないのですよ。

吉田：それは計算ではなくて、行政的な面が非常に強いから、計算だけでは答えはでてこないでしょうね。

川島：どっちかという、実務への適用という点では重要度別補正係数という概念を設計法に導入すること自体が、非常に難しいのですね。いい例がキャブという電線の地中化でした。あの時私たちの方で指針案をまとめて本省に持っていったら、本省では重要度別補正係数は駄目だということによってしまった。橋の耐震設計では従来から重要度別補正係数があるからいいのですが、

それ以外の施設基準では重要度というものはなかなか入れにくいのです。

いままでも、「重要な構造物」と「重要でない構造物」という区分の仕方がまずいということで、「重要なもの」と「特に重要なもの」という表現に変えてはどうかという議論もありました。あるいは、「重要なもの」が1.0で「重要でないもの」が0.8と下げるのはどうもまずいので、0.8を1.0にして、1.0を1.25にするのならまだいいのではないかという意見もあるのですが、どうもそれだけではかたがつきそうに無いのです。

このような点はどのように攻めていったらよいのかお伺いできたらと思っています。このようなことも考えているのです。例えば、いまの耐震設計でいけば、本当に大きな地震に対しては、橋が被害の無いようには出来ないのです。すなわち、現在造っている橋はこれから来世紀にむかって非常に大事な構造物になりますが、現状の耐震設計と言うのは大地震時には、被害がでるであろうという設計であって、被害なしとはいかない。しかし、思い切って現在の設計震度を1.5倍くらいにしてやれば相当のレベルをカバー出来るわけです。ほとんど、巨大地震に対しても損傷を受けないようになると思います。耐久性の向上というのはいま非常に大事になってきていますが、耐震性の向上を図るということは、耐久性の向上という観点からも好ましいわけです。橋全体としては耐久性や長期的な安定性の向上が重要になっていますが、耐震設計という面からは、地震に対して強くすることが他の面に悪影響を与えず、常時の使用性とか耐久性が向上するのであれば、重要な橋は、例えば都市部の重要な橋は、思い切ってもっと頑丈に造るという方向があるのではないかと思います。例えば、本州四国連絡橋でも瀬戸大橋や明石海峡大橋だって上部構造に関してはそのような設計になっている。100年、200年もつのだというようになっている。そういう方向に都市部の重要な幹線というものは向かって行くべきではないだろうかと思うのですが、そのあたりについてもご意見いただけますでしょうか。

吉田：特定路線のようにこれだけは絶対に大震災の時でも交通確保のためにいるのだという構造物があって、これに対してはこうしなさいという行政判断があるのでしょうか。特定路線というのは、1等橋とか2等橋とかいう多数ある橋ではなくて、非常に限られた橋ですね。数を限ればらばうに金のかかる話ではないから、そうすると割合納得されるのではないのでしょうか。これは特定で非常に大切だから鉄じゃなくて金で造れというくらいのことをいっても許されるわけです。そのようなことをやっていけば、重要度をつけるということが定着するのではないかと思いますよ。世の中を二種類に分けて1等と2等にするからいろいろ議論があるのであって、スーパーというものにすれば、みんな納得すると思います。

川島：首都高速道路なんかスーパーに相当するのではないのでしょうか。

吉田：そうともいいきれませんね。首都高速道路が止まったら交通が止まってしまうわけではないですからね。下の道路を走ればいいのですよ。

川島：いま、緊急避難路がありますよね。物資輸送用の1次、2次なんていう指定があるわけですから、あのような道路指定と絡めて、重要性を考えてっては…、

吉田：これだけは絶対だというものが必要でしょうしね。どういう形になるかですが…。

木暮：重要度というのは日本が貧しい時代には考えなくてはいけなかったのですが、いまみたいに豊かになってくると、わざわざつけなくていい、みんなが首都高速なみとはいいいませんが、重要度1.1位で設計してもそれほど問題無いのじゃないかと思うんですけど。

吉田：現実にはそうになっています。重要度を2級でつくる例はないのです。非常に特定なところだけは重要度を上げておくという考え方をいれた方がなじみやすいですからね。

川島：私、今のお話を伺っていて、日本の耐震設計というのはまだなんとなく貧乏人の発想という感じがぬけないと思うのです。物部先生が道路の改良とかという雑誌に書いておられましたが、耐震設計をはじめて取り入れた道路構造に関する細則案が大正13年に出されたのですが、その時に物部先生は、10橋の費用をもって11橋をつくり、もって富国強兵、国を富ましてというくだりがあるのです。このような話と今の状況で次の世代に向けて投資が可能になってきた段階で、いかにして良質な社会資本を残すかという判断と、大きく違うという気がするのです。

吉田：今の話に関連してこんな話があるのですよ。瀬戸大橋の番の州の埋立地の上に高架橋があります。上が道路で下が鉄道なのですが、それをやる時には鉄道のグループといろいろな議論をしたのです。鉄道のグループは将来新幹線が通るということで、非常に厳しい変位制限を考えているのです。これは、地震がきたときの列車の転覆や脱線防止のためなのです。私は、震度Ⅲくらいで地盤加速度で数十Gal程度という時に被害が出るというのは問題ですが、大地震がきて埋立地の工場群に被害が出て、ガソリントankから黒炎がもうもうと上がっている中で、本四備讃線だけが汽笛を鳴らして走っているという（一同笑）ことはバランスとしていいのかということをおっしゃるわけですね。重要度では、そここのところで議論が起きていると思うのだけですね。

川島：建築との比較では、私は、こう思うのです。平成元年10月に、サンフランシスコで地震がありまして、高架橋に大きな被害が出ました。政府調査団の一員として調査に行った時に気がついていたのですが、ビルなどはけっこう建て替えているのですね。ビルの総工費に占める構造部分の費用というのはインテリジェントビルだと3割くらいだそうで、あと7割は内装とか照明なんです。内装とか照明とかはだいたい20年位すると古びてくるので、ビルのオーナーからすると20～30年するとビルの建て替え時期に入るから、地震で壊れてもいいんです。事実、サンフランシスコでもどんどん古いビルが新しい高層ビルに建て変わっているのです。その真ん中をすすけた汚くて古く、また、耐震性が低い高速道路が、うねうねと走っているのです。これは非常に印象的でした。しかし、高速道路の方は取り替えたくても簡単には変わらないわけですね。首都高速にしてもあれを取り替えようとなると至難のわざですね。そう思うと、やはり橋は、特に重要な橋はビルと同じ耐震性であっていいのであろうか、というのが私の疑問でして、やはりビルと比べればより安全性を持たなくてはいけないと思うのです。大地震が起って人間が逃げるとか、物資の輸送をするとか、都市が壊滅したというときに道路も壊滅したというのでは、その後の市民生活にあまりにも大きな影響が出ます。しかし、それが委員長のおっしゃるように車がシャキシャキと走ることができるという所までは必要がないのかもしれないですね。その時は、多少止まってもいいのかも知れませんが、応急的にすこし直せば、都市生活を営めるくらいの物資の輸送に使えることが重要ではないかという感じがしているのですが、その辺どうでしょうか？

吉田：首都高速道路の話が出ましたが、首都高速道路の道路としての性格の議論が必要だと思います。首都高速道路が震災時の避難道路として絶対重要だという位置付けであれば、それだけのものにならないといけないわけです。しかし、便利とか、快適性とかが首都高速道路の役割であれば、地震時には下の道路を走ることでもできるわけだから、多摩川とか墨田川の橋が落橋する方がはるかに重大なわけです。

川島：それはもう、都内に入れられないわけですからね。

吉田：それは、まさにどういう位置付けかという議論で結論がでるのではないかと思います。

川島：橋の耐震性をあげるべきかどうかというときに、いつも議論となるのが、今の橋はどれほどの地震にもつのかという点です。そこそこもつのであればいいのではないか。現状のレベルではかなり落ちるのであれば、耐震性の向上もわかるがということになります。この辺はどうでしょうか？

吉田：それはさっきの話ですよ。大地震にもビクともしないというように設計しても、あまり建設費は変わらないというのであればいいのですけれど。確かに建設費をかければ耐震性は上がってくるでしょう。しかし、そのためには、建設費が2倍かかるというのでは、少しは壊れてもいいのではないかという設計思想の話になってきますね。

川島：そうですね

吉田：やってみたら、建設費は案外変わらないかもしれませんよ。

川島：私は、以前、設計水平震度をかえて建設費を検討してみたことがあるのですよ。上下部構造費全体で、設計水平震度を変えてやってみたらどうなるのかということで。そんなに変わらないのですね。それほど設計地震力の多少のアップに神経質になる必要はないのかなというのが個人的な意見なのですが。

吉田：海外では日干し煉瓦みたいな橋があるでしょう。日本と比較できるのはアメリカくらいのものではないのでしょうか。

川島：アメリカでも耐震性が必要なのは西の方だけですからね。

吉田：ニューヨークの構造物でもそれなりにじん性を持っているわけだから、日干し煉瓦とは違うわけですね。そこそこの地震がきたとしてもマンハッタンのビルが倒れてしまうかということそうはならないのではないのでしょうか。そこが日干し煉瓦とは一緒にならない点ですね。この前、モロッコに行ったのですが、モロッコではまったく無筋に近いですね。

川島：外見はきれいですけどね。

田村：今の示方書では全ての橋についてある一様のレベルの耐震性を持たせるのが根本思想だと思うのです。一方、原子炉では、特定の断層を仮定して特注の設計をするのですが、橋の設計についてもそのようなことを今後やっていくべきと考えられますか。

吉田：基本的には、そのようなことが起こるかもしれないし、起こらないかもしれませんが。そのような大きな地盤変動は、設計対象から外していいと思います。いかに日本でもそこまでの経済的な余裕がないと思います。先ほどの10橋の費用で11橋造れという話ではありませんが、これだけ建設事業が拡大するとなかなかそこまでカバーしきれないと思います。ただ、先に申し上げたようにスーパーとか特定のものについてはありとあらゆる点を調べた上で、これはもうまさに特定ですよと、千橋のうちの一橋はそうするのですよといえ、それをするともあると思うのです。

川島：やはり、バックグラウンドリスクがあるわけですから、絶対安全な構造物を造るということは技術論的におかしい話かも知れませんね。

吉田：盛土の耐震設計を考えると、耐震性はほとんど零に近いですよ。簡単に崩れてしまうわけなのですが、そのかわりすぐに直せるから、耐震性を議論していないわけですよ。盛土はそうになっているときに橋だけピンとしているというのもおかしい話ですから、多少の手直しで通ればいいという考えがあっておかしくないわけです。一番壊れるのは道路なのですから。舗装なんか簡単にバリバリになってしまいますよ。橋だけがピンとして何ともないという必要はないと思うのです。

運上：時間の関係もありますので、次の議題に進みたいと思います。ここは、委員長が、これまでに関係されてきた橋で、これは特に今後も参考にできるというのはありますでしょうか。

吉田：特に、そういうものはありませんね。先ほどの昭和大橋、八千代橋、万代橋の3橋に集約されているという感じがします。世間一般では、万代橋が一番よかったとっているのですが、そこにはもう1つの考え方があるわけですね。あれはよかったとみんな評価しているわけだから。確かに復旧費はべらぼうにかかったのですが、相当大きな地震がきてかなりの被害があっても、とにかく交通確保はしたのですから、最高のジャッジなのかもしれませんね。そういう時には、お金の話は飛んでいるわけですからね。

橋は、どこかで土と接触していなくてはいけないから、そのところの処理が重要ですね。橋の耐震性は高まっていますが、アバットがあってパラペットがあってというあのような構造は耐震的にはあまり好ましくないと思っています。アバットの所に非常に大きなフィンガージョイントを造れば話は別ですけれどね。

川島：橋台なんかを固定してしまうというのはどうでしょうか。カリフォルニア州などでは意外に桁と橋台のつながっている橋が多いですね。

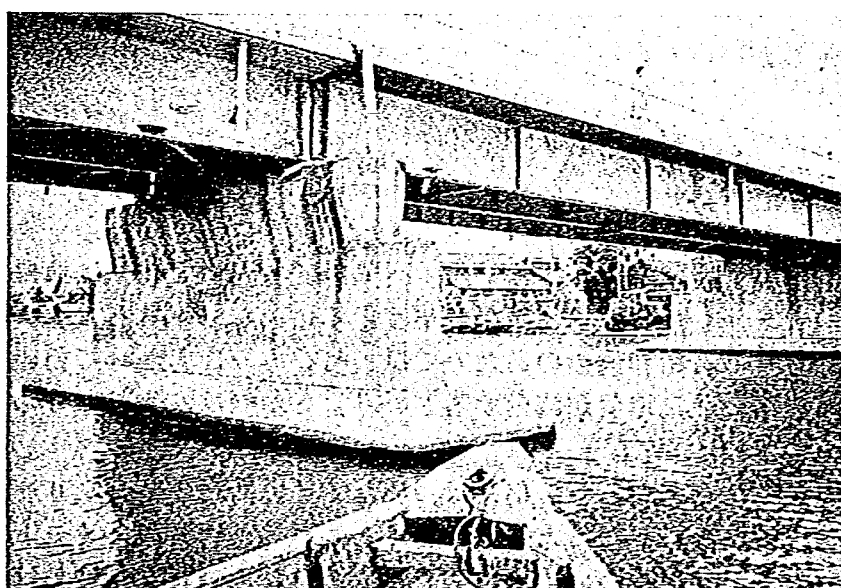


写真-2.1.5 八千代橋



写真-2.1.6 八千代橋の橋脚の傾斜

吉田：アバットをいくら良好に作っても、後ろの土はどうなるかですね。杭があれば杭の下の土を含めての話だから、非常に大きな偏載荷重がかっているわけです。だから、そう簡単には力で押さえつけるとか、変位制限するとかという話にはならないと思います。地球と喧嘩する話だから、大変な金がかかるでしょう。大きな変形を生じるという前提に立って議論しなくてはだめだと思いますね。

岡原：そうですね。盛土なんかね。

川島：アメリカは地盤がいいからね。

吉田：新潟地震の時には、アバットもメートルオーダーで動いていましたからね。メーターですよ。あれは止められませんよ。

川島：いま、東海大学の浜田先生達がいろいろ調べていて、大地震時には地盤が流動しているとこの4、5年言われてます。地震の前と後の航空写真で比較してみると大きな所で10メートルくらいずれているという。特に昭和大橋のあたりでは、河心方向に向かって動いているという。昭和大橋では新潟地震の当時既に地盤が流動するというような話はあったのでしょうか？

吉田：私は自分の目で見ましたからね。例えばついたて位の高さのコンクリートブロックの塀がつながっているのですが、それであるところにいくとスパッと切れて、メートルオーダーでずれているわけですよ。倒れてはいないのですよ。そこに大きな地割れがあるわけではないのですよ。おそらく流動化で地盤全体が大きく波打って動いた中で、最後にフリクションで止まったのではないのでしょうか。

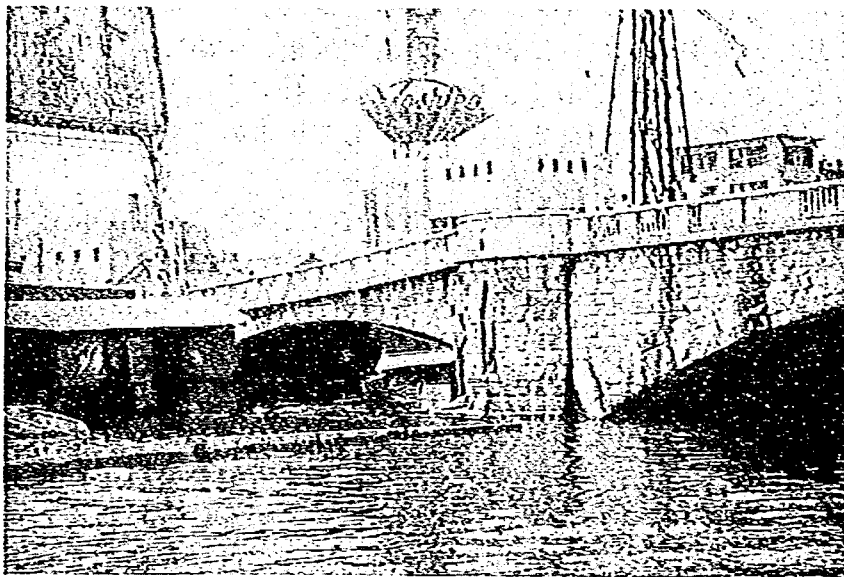


写真-2.1.7 万代橋の橋台部の沈下

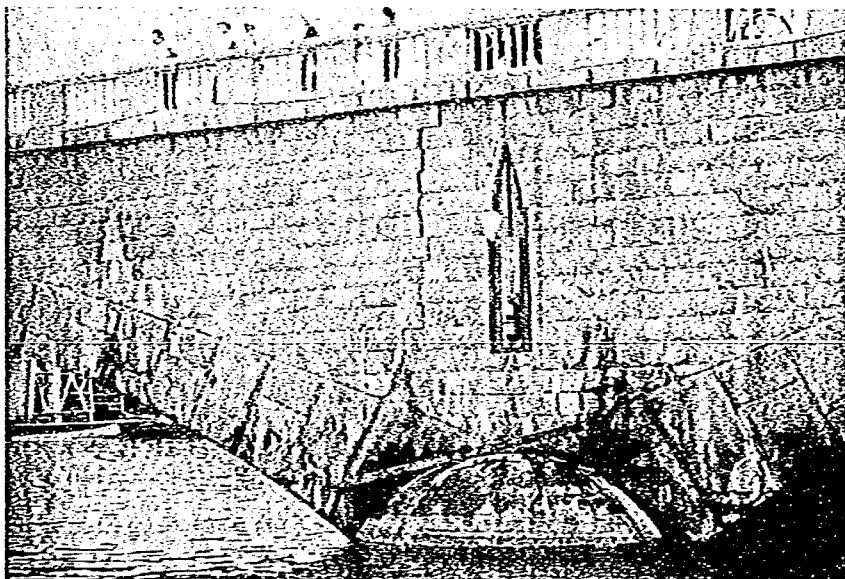


写真-2.1.8 万代橋アーチ部のひびわれ

川島：新潟地震による震災を示した土研所報を拝見していて、八千代橋の部分で地盤が杭の先端よりも深いところから全体が移動したとしか考えられないというような記述があったのを覚えています。

吉田：そうです。さっき申し上げたように真ん中の橋脚は大きく動いて、どんなに調べてもなんともなっていないのですよ。杭も一緒に地盤がそのまま動いたとしか考えられないようなところもあったのです。

川島：吉田委員長にしてみればなんでこんな質問をするかと思われると思うのですが、「流動化」については、新潟地震以後、矮小化されてきたと思うのです。地盤が動いて「流動化」と言う言

葉が使われてきたのが、そのうちに名称が「液状化」と変わってしまった。そのため、軽いものが浮いて、重いものが沈むというアルキメデスの原理を検証するみたいなことに液状化の研究がいつってしまった。そして、東海大学の浜田先生らの研究以後、改めて、実は液状化にともなって地盤の動きがあるのだということがこの4、5年再認識されてきたのです。それでやっと「液状化」の他に「流動化」という言葉も再度定義しようとしているのですね。

吉田：北陸地方建設局の前の道路なのですが、地震が終って本来まっすぐに通ってたはずの町並みが大きくうねっているのです。

川島：国道7号の海老ヶ瀬地区ですね。

吉田：家屋は何ともないのに、地震が終わったら大きく蛇行しているのですよ。それから、北陸地建でこういう話もあるのです。地震がきたとき、たまたま4階建ての屋上にいた人がいたのです。あそこ辺りの家は2階建てですからね。そしたら、吉田さんこういう経験をしましたよという話なのです。要するに海の上の波を見ているのと全く同じように地盤が振動したというのです。波が沖から寄せてくるときと同じだというのですね。そうやって揺れて止まったときに残留変形が残ったのですよ。だからなにも1回の振動で生じたわけではないのですよ。このような現象は設計対象にならなくてもしょうがないと思います。

運上：次に、道路橋示方書では、下部、上部、耐震と縦割り式になっていますが、構造物としては一つのものなので、全体として見ていくことが、重要だと思うのですが…。

吉田：その考え方は、非常に大切だと思います。上下部一体で、耐震性も加味した全体の計画論をきちんと位置付けた橋梁計画指針のようなものがあればいいのではないのでしょうか。そこでは必ず上下部一緒になって耐震性も議論し、計画することが重要ですね。今は、計画のところがほとんど飛んでしまっていますからね。ルート選定も含めて上下部一緒の景観設計（景観設計という言葉は嫌いで、私は橋梁美学と呼んでいます）を追求すれば、こういう考え方が必ず入ってくると思います。

川島：示方書の中ではこうしろとか、こうしてはいけないとかいうことの組合せがいっぱい書いてあって、では全体を通してこのような橋がいいんだよというのはないので、示方書を全部満足して造った橋がベストな橋になるかというところではないということがあると思うのですね。やはり、こういう橋がいいというものがあってもいいと思いますね。

運上：耐震とは直接関係ないと思うのですが、基準があるせいで、デザイナーの自由裁量範囲が非常にせまくなっています。基準の位置づけは、本来必要最小限を規定したということでしょうが、今はそれが全てとなってしまうという感覚を非常に受けるのです。

吉田：設計に関連して会計検査の話があります。組織で仕事をするとき、設計のレベルを合わせるため基準が作られています。基準がその通りに守られているかどうかについて、会計検査の中での議論を聞きます。実物は、千変万化ですからこれに対応するためには技術者の技術力を必要とします。基準は人の作ったもので、人によって運営されるものです。基準を守らなければならない、守ればよいということだけになっては、技術力は現在では生かされなくて、過去の経験だけが、基準の形で生かされることになります。

くいの世界を例にとれば、打ち込みぐいと場所打ちぐいの選択の話があります。どちらの工法

を採用しても一般にはそれ程、工費、工期に差はないものです。打ち込みぐいに信頼性を抱いている技術者は、公害問題を乗り越え、地域の関係者を説得しても、打ち込みぐいを施工することでしょう。

技術は個性のあるところに育ち、はぐくまれて行くもので、マニュアルエンジニアにだけはないものではないのです。

川島：指針作りの本質というか裏側を見た人でないとわからない点ですね。指針だけ見ている人はわかりませんから、吉田委員長に、もっとどんどん発言してもらわないと、いまのお話のようにはなってきませんね。

吉田：こっちの機関の主張と別の機関の主張が違っても、東北は東北流だと言い切るくらいの図々しさがあってもいいのですよ。それは技術的な信念に裏打ちされて議論しているわけですから。ある意味で好き嫌いの議論であっていいと思いますよ。ただし、鋼管杭を使ったら非常に不安定で場所打ちでいったら非常に安全だという場合に対しては今までの議論はありません。同じ安全性の上での技術的な議論ですよ。

川島：私また一つ違う話をお聞きしたいと思うのですが、支承の部分の設計で、最近多径間連続化したいということで、だんだんゴム支承の採用も増えてきて、その時よく話にでますが、支承部では、上方向にも死荷重反力の0.1倍相当の力で持つように設計しなさいというのがあるのです。これは、まだ、なかなかゴム支承では対応しづらいのですね。もう一つは移動制限装置でして、可動支承については移動制限装置を付けなさいというものがありまして、落橋防止装置の一つなのですね。移動制限装置を付けますと、橋軸直行方向にも変位を拘束するわけですね。ゴム支承を使うと、斜橋や曲線橋などでは、いろいろな方向に動けるわけです。それをわざわざ殺して橋軸方向だけの移動にしようというのは、ちょっともったいないし、むしろ被害もでるのではないかという気がしまして、移動制限装置と絡めてゴム支承を将来使っていくときに、可動支承では、移動制限を付けない、上方向の0.1の震度というのもなくしてはどうかという気がするのですが。

0.1の設計震度をかける理由は、従来の被害例を見ると桁が、上向きに飛んだとしか考えられないような被害があるからということであるのですが、現在の目でこの現象を解釈すると、それは液状化等の地盤の破壊に伴う下部の移動が原因でないのかなという気がします。現在では、液状化の判定はちゃんとし、対策するので、上向き0.1gをかけるということを見直していったらどうでしょうか。

吉田：現実の話としてゴム支承の上に桁を乗せて、それを鉛直方向にゆすったとして、本当に桁は飛び上がるのだろうか。桁には相当なマスがあって、そこで変形があってエネルギーを吸収するわけでしょう。揺すられているときに横ずれがあってはいけないから、横ずれ防止は必要としても、鉛直上方の力としてそれを持ち上げることがあるでしょうか。

川島：液状化を通して下部構造がひっくり返って、見かけ上桁が浮いたみたいにならない限りは、振動だけの現象としては無いと思うのですね。

吉田：そう思いますよ。仮に鉛直方向に下部構造が沈めば桁も一緒に沈下するわけですからね。鉛直方向に止めておかなければならないということはないと思いますけどね。それこそ、土研で実験していただければどうでしょうか。

川島：あのような規定は、むかしからの経験できていますから、意外とはっきりとこのような実験をしてこうなったというわけではないのです。そうでないだけになかなか変えるのも難しくて。

吉田：ゴム支承は水平方向の変形しか考えていなくて鉛直方向に変形するという経験はありません。それとメタル支承を一緒にしてはいけないと思います。

岡原：水平移動に対して、アンカーに引っ張り力が作用した経験があるから、おそらく鉛直方向の移動ではなくで水平方向の移動から来ているのではないですか。

川島：桁が持ち上がったとしか考えられない状況があるから、というのが規定に示されている理由ですね。私がいま思うのは、まさに八千代橋みたいに足元がすくわれて下部が移動したために桁がはずれたのではないかということです。液状化等に対する配慮は今はしていますから、支承部で上向きの力に抵抗しなくてもよくなっているのではないかと思うのです。いま、ゴム支承では、上向きに0.1gかけるのが、非常に難しいのです。耐震設計で足をひっぱっているのではないかという感じがしていて、気になっているのです。本来はノージョイント化したいし、分散固定など非常にいい方法かと思うのですが、示方書破りになっているのです。

吉田：私の考えではゴム支承というのは構造的にも特性が非常にはっきりしているわけです。実験すれば相当の特性がわかるわけですよ。だめならば取り替えも可能です。そういう物は計算に乗りやすいのです。先程の硬岩、軟岩とは違う世界ですから。材料の一つなのですから、どうして積極的に使うのを遠慮しているのかが私にはよくわかりません。変なところで遠慮していると思っていますよ。

木暮：委員長がさきほどいわれた長周期化したときの問題とか、免震支承とかの話もございすけど、それはやはり、動的解析というのが前提にあると思うのですが。

吉田：線形で計算できる範囲では問題無いのですよ。ただゴム支承でもまともに特性を考えたら、必ず非線形解析をしたくなると思うのです。そうしないと経済的にならないから。私はそこまで材料特性をしっかりとつかんで設計していいと思いますね。

木暮：私の知っている範囲だと、例えば日本だと震度法がもともとあって、徐々に動的解析に移っていった、それを震度法がカバーしている状況だと思いますが。

吉田：構造物の一部にゴム構造を入れて一種のエネルギー吸収機構を入れる時には、修正震度法の方がいいかもしれません。

川島：震度法と動的解析ではほとんど差がないわけですよ。おなじ外力を使っていて、あと違うのは2次とか3次とかの高いモードを条件しているかいなかでしょ。そんなものは一般にほとんど効かないよね。

木暮：基本震度として0.2とか0.3とかがあって、それが応答スペクトル曲線の中の300gal程度とかその辺りでしっぽを引きずっているのではないかなというイメージがあるのですが。日本では震度法に持ち込む際に応答スペクトルの頭を切っちゃいますが、アメリカの設計では応答スペクトル自体がもっと表面にでてきますよね。

川島：彼らは、耐震設計をする段階から応答スペクトルを考えていたわけですね。それをベースにして設計体系を組んでいたのですよ。日本ではそれ以前から震度法の設計があったわけですね。その後、応答スペクトルが日本に伝わった段階から、耐震設計の中に応答スペクトルを途中から取り込んだようになってきているのですよね。少し流れが違ってきているのですよね。震度法でも動的解析でも同じように外力を与えてあげれば、答えは同じになるのね。このため、私は最近では土研に相談があっても動的解析はやらなくていいと言っているのです。従来の動的解析では、震度法と外力が違うから、答えも大きく違うといったものがあって、動的解析に対する不信感ばかりでしょ。平成2年の示方書改訂では、動的解析の入力を規定して、これが震度法とほぼ同じになるようにした。だから、今は、動的解析をやっても震度法とほぼ同じ答えになるのですよ。だから、あまり動的解析はやらなくていいと。そのかわり震度法をちゃんとやって、その中から耐震設計でこういう点が大事だということをよく考えた方がいいと言っているのです。何でもかんでも動的解析やっても、入力が違ったり照査がいい加減では、意味が無いと思います。

木暮：震度法というのは、動的解析というのがあるとしてとらえるのか、また対立概念としてあるのか、私ちょっとよくわからないのだけど。シングルモードが卓越したものと考えて、震度法というのは動的解析の一部として位置付けられるのでしょうか？

川島：私は、両者は同じものだと思う。単純に動的解析の中で、一次モードだけを考えた応答スペクトル法というのが震度法と思っています。

吉田：事実そういう意味でしょう。そういう意味では非常に単純化したものを震度法と言っているのでしょうね。その中間にあるのが修正震度法ですからね。だから、ゴム支承というものは修正震度法で考えるには割合制御しやすい材料ではないのかな。

川島：免震に対して伺いたいのですが。免震設計を使いますと、同じ外力に対しては橋の振動は少し下げられるわけですね。それを耐震設計ではどう使っていくかという時に、その効果を橋の断面を少し絞る方向に使っていくのと、耐震設計では、同じ金を使うなら同じ断面にして耐震性のアップということに使っていく方向と、あるいはこれらの中間で、100パーセントの免震効用があればそのうちの30パーセントは耐震性の向上に使って、残りの70パーセントは断面を下げ、経済性を追求するというものと、いろいろな考えができるのですが、この辺りはいかがでしょうか。

吉田：私の持論としては、材料の一つなのだからまともに評価していいのではないかと思います。

川島：では、設計地震力を下げる方向ということですか。

吉田：そのために、下部構造の地震力を低減できるのであれば、低減させていいのではないのでしょうか。土とはちょっと違うわけですから、材料として使い込んでいいと思います。ただ問題は耐久性で、100年もちますよという人もいますが20年、30年したら老朽化してしまうのではないかと心配もあります。しかし、本当に老朽化したら取り替えられますよとしておけばいいのではないのでしょうか。P C鋼棒だって50年したら腐る場合もあるわけですからね。

川島：免震に関してはどうも2つの方向が出てきそうな感じがするのですが。普通の免震の他に、もう1つは、土研では「免震もどき」と呼んでいますけど、免震支承は使うが、しかし、地震力を下げる方はまだ歴史がないので、少しやらずにおこうという…。

吉田：その程度の時にはいわないでにおいて、5年間くらい我慢して、設計震度を落とすのだと言いつけるまで黙っておきなさい。自分自身の考えがまとまらないときに出したら世の中まどわされるよ。

川島：それはもうまとまっているのですけど。

吉田：だったらもっと自信をもって言いなさい。

川島：はい、わかりました。もう1つ非常におもしろいのは、超多径間連続に使えるそうですね。横方向の支承に剛性が低いですから。平成4年から免震支承を使って700メートル位、ノージョイントでいこうという話が動きつつあります。

吉田：明治から大正、昭和の始めまでは鉄道のレールは皆25メートルで、50メートルは使えなかったのです。いま、鉄道のレールは何キロあると思いますか。昔はロングレールにすると、伸びちゃって飴のように曲がっちゃうと言われていた。それが今は、ほとんどロングレールですよ。ある意味でみんなダンパーを使っているわけですね。地盤をバネとして使って、変形を吸収しているわけですよ。それとよく似ているのですよ。単純桁でエキスパンションを多数設けて、これはまさに25メートルレールの世界ですよ。

川島：私の究極の願いは、首都高速道路のような道路を全部つないでジョイントレスにならないかということなのですが…。

吉田：それはまさにロングレールの発想なんだよ。

川島：そろそろ予定の時間に近づいていますので、最後に耐震設計の面からご注文というか、こんな夢を描いたらどうかというそういう話はいかがでしょう。

吉田：もう、言いたいだけのことは、言ったから（一同笑）。ただ君達は卒業していると思うけど、構造物をやっている若い人達と議論していてぶつかるのは、たとえばマスコンクリートの設計するでしょう。梁の設計は許容応力度法で相変わらず引張領域ではコンクリートは効かないとして計算していますね。ところが、マスコンクリートになるとそれが出来ないわけですよ。そうするとFEMを使うのですよ。FEM解析して引張応力が出たら、それを全部鉄筋にとらせてるわけです。そうするとものすごい鉄筋量になるのですよ。本当はそんな鉄筋量はいらないし、FEM解析のような応力集中は現実の世界では起こらないのですよ。ちょっと応力集中すると、応力が逃げてしまうからです。それをまともに計算しようとするの大変だし難しい。今は、計算が面倒だから、ここを細かくやってないのです。ところが、FEM解析では数字として出るから、数字ばかりに目が行ってしまふ。私は、同じようなことが動的解析の世界でもあると思いますよ。いかに計算機能力が上がったといってもそう簡単に複雑な非線形域の現象を追いかけてられません。要素数を増やすとなんとなくと真値に近い感じがするのですがね。ここの所をよほど分かって動的解析を使わないと、ジャッジを間違ふのじゃないかと思います。

川島：それでは、本日は大変お忙しい中をご意見を賜り、大変有難うございました。いろいろな貴重なご意見をいただきましたので、また私たちの方でよく噛み砕きまして、耐震設計便覧に反映させていただきたいと存じます。

2. 2 多田安夫氏

(1) 日 時 平成4年7月1日 12:00～15:00

(2) 場 所 日本道路協会 C会議室

(3) 出席者	多田 安夫	初代耐震設計分科会長（現、橋梁コンサルタント取締役社長）
	川島 一彦	耐震設計分科会長（土木研究所耐震研究室長）
	常田 賢一	土木研究所振動研究室長
	運上 茂樹	土木研究所耐震研究室主任研究員
	松田 哲夫	日本道路公団試験研究所橋梁研究室長
	山岸 一彦	本州四国連絡橋公団設計部設計第三課課長代理



写真-2.2.1 多田 安夫氏

川島：本日は大変お忙しい中を御出席頂きまして有難うございます。現在、耐震設計分科会では、耐震設計便覧を作っておりますが、その中でどういう橋が耐震的に望ましいのか、これから耐震設計はどのような方向にいったらいいのかということについて議論しております。このため、諸先輩方のお話を伺う場を作り、少人数でざくばらんな話をお聞きする場を設けようということで本日の機会を持ちました。

第一回目としては、吉田橋梁委員会委員長をお招きしてお話を伺いましたので今日は第2回目でございます。初代の耐震設計分科会長という立場で、昭和46年の道路橋耐震設計指針の取りまとめを御担当された多田さんに今日お越しいたきまして、いろいろなお話を伺いたいと考えておりますので、是非忌憚ないご意見をお願いします。

運上：最初にまず耐震設計指針の作成時に御苦勞された点についてお話を伺いたいと思います。

多田：それでは、最初に耐震設計指針を作った際の技術史的な経緯を簡単に申し上げます。地震時の構造物の挙動は構造物の材料とか、構造形式と橋長、地盤、地質、震央との距離等によって複雑に変化するので、未知の分野が多い学術分野であるといえます。これは現在でも似たようなものだと思います。ところが、橋梁の建設はそれらの学術の進歩を待っておられませんので、結局震災事例の調査を綿密に行って、それを分析評価して耐震設計を行ってきたというのが耐震設計法の成立過程ですね。

この最初が、大正12年の関東地震のあとに発達した震度法ですね。今日、昭和14年のものを一部コピーして来ました。これは、動的な地震の影響を地震の加速度を利用して静的計算法で表わしたんですが、あくまでも震害調査の経験を踏まえているというのが我々の認識でございます。したがって、今申し上げた全ての要因を考慮できていないというのは当然ですね。ところが、一度基準となりますと、その注意書きを無視して計算のみが先行して設計するようになりました。特に、昭和30年代に入って、コンサルタントに設計委託をすることが始まってからこれが著しくなってきました。そこで、いろんな心配がでてきたのです。これに憂慮した技術者や機関が、落橋防止対策や設計震度を上げて頑丈な構造物を作ることで耐震性向上を考えた訳ですね。首都高速道路は絶対落してはいけないということで落橋防止をやったり、震度を上げたりしたんですね。



写真-2.2.2 座談会出席者

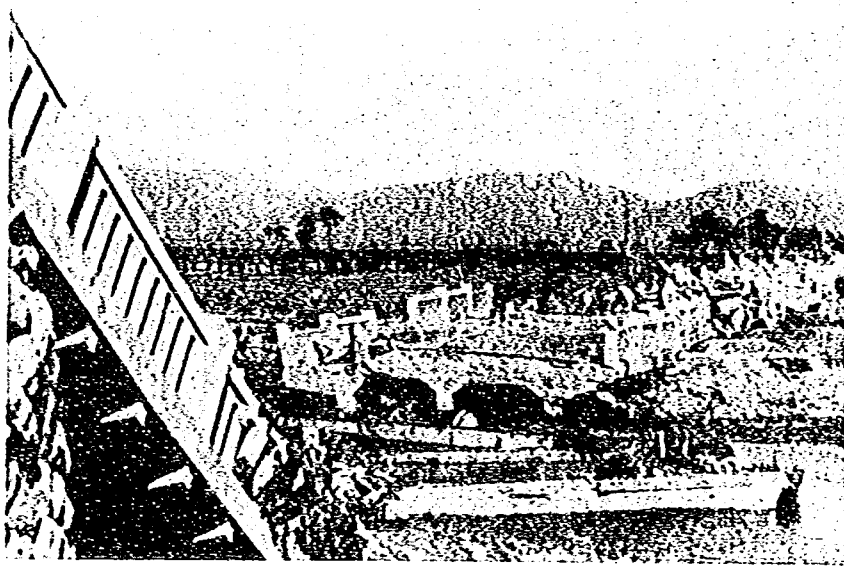


写真-2.2.3 大正12年関東地震による酒匂橋の落橋

そこへ、新潟地震が発生した。地震の影響を受けた地域の橋の全数調査を行った訳です。それでこれらの要因分析を行いました。これは土木研究所報告を読んでいただければ分かりますが、先ほど申し上げたいろいろな要因が絡んでいるんです。震央に近いところがやられていなくて、距離のあるところがやられているものがある。だから、地盤の特性によって一律には考えられないということですね。それから、沖積層における地震の影響が一番顕著に現われたわけです。そこで、一橋梁内で地震の影響が異なる場合、また、橋長が長い場合に隣接区間の根入れ長や支間が異なる場合には、従来の静的計算法では問題が多いことが明らかになりました。というのは従来の震度法では着目スパンだけで個々にやっていたから、その部分だけは、静的にはもっていても先ほどの要因を入れますと位相差が出たりするということですね。

この時に社会的にも耐震性が高い橋梁というのはどういうものかという一つのコンセンサスができたと思います。それは落橋せず、地震後の混乱した民生安定や救援のための交通に使用できる橋梁であるということです。これは災害復旧費の工費のみではないということですね。これをもう少し申し上げますと、八千代橋と昭和大橋が対照的です。昭和大橋は落ちた訳です。これは、一方は古い河川敷で固かったけれども、反対側は新しい河川敷で流動化したためです。しかし、当時の計算では地域ごとに設計震度を変えただけですから、この影響は入っていません。スパンごとに設計をした訳です。それから、変位制限に対してはある程度は考えていましたが、現在のようなしぼりはありませんでした。非常に安く出来上がった橋なんですけど、地震により落橋して通れませんでした。一方、八千代橋は落橋しませんでしたけど、相当変状していました。ところが、交通手段がこれしかなかったわけです。

私は当時ちょうど北海道に村上所長と出張中だったんですけれども、電話がかかってきまして、至急戻って現地へ行けということだったんです。千歳まで自動車を飛ばして、千葉に帰り、その日のうちに皆ジープで新潟に入ったんですよ。

地建の対策本部に入ったら1時間でも早く八千代橋を通せということだったんです。どういう耐荷力調査法がいいかと考えましてね。そこですぐトラックを入れて綿密に調査しました。やっとトラックを通して、OKと出したんです。それでまず、兩岸の交通が出来るようになって、そのうちに救援物資が届いて、だいぶん落ち着きました。

万代橋は不静定のアーチですから、通していいかどうかの判断が難しかったですね。不静定構

造だから一挙に崩壊する可能性があったんですよ。その辺から、耐震性の高い橋梁というのを実例をもって感じましたね。

災害復旧費が一番高かったのが万代橋だったんです。その次が八千代橋で昭和大橋が一番安かった。昭和大橋はそういう点では、非常に経済性の高い橋だったんですが、落橋したのがね…。

ただ、実際は当時の耐震設計がきちんとして、パイルベントの径がもう少し大きければ落橋したかどうか疑問なんですよ。設計に問題があったようなんです。もう亡くなられた細川さんと計算書を見たんだけどありゃーってことになったわけですよ。

耐震性の高い橋梁、落橋しない橋梁というのは、設計で想定した地震力よりも強い場合でもだいじょうぶでなければならないのです。強い地震は来るかもしれないけれど、それは確率的には殆どないという前提で我々の耐震設計は成り立っています。地震学的には、今の設計震度は最大の地震を考慮しているということになるのです。したがって、それ以上になるというのは、地殻変動とか突然変異が起こった時でしょう。でも、そこまで考えると、耐震設計は成り立たない。膨大な費用がかかる訳です。それでも重要度を考えて首都高速道路は特に設計震度を上げています。

日米耐風・耐震専門合同部会（UJNR）にNBSの部長が来られて、新しい指針を英文で説明したら、「やあ、日本は金持ちだ」といったのを今でも覚えています。アメリカと日本の社会的風土が違うのですね。アメリカでは、地震被害が生じて、設計者の責任を追求するのではなくて、じゃ、次にはどうしたらいいかというプログレッシブな見方をします。新潟地震のときには、港湾施設も大きく被害を受けたのですが、新聞記者は、あれは壊れても仕方がない経済的な施設だというんですよ。でも、橋は落ちてはいけないというんです。これは日本人のメンタリティーですよ。

当時、本四連絡橋の調査と建設省が東京湾岸、伊勢湾岸、大阪湾岸で大規模特殊事業を大がかりに調査を始めましてね。道路公団も今度は横断道に入ることになり、府県や地建でも山岳道路の高橋脚が出来てきました。いろいろな動的解析も始まっていました。そうして、各地建や公団もコンセンサスをとらなければならないという機運が出てきたんですよ。それで、昭和41年に小委員会ができて、昭和46年に道路橋耐震設計指針を出したということなんです。したがって、このバックグラウンドは、動的解析までも含めた土研における本四の検討と震害調査結果、SMAC強震記録といったもののなのです。

道路橋耐震設計指針の前書きにまとめて書いたつもりですが、「従来の慣行と違う点は次の通りである」ということで、設計震度を架橋地点の国内における地域、地盤状況と橋の重要度に応じて、統一的に決めなくてはならない。鉛直震度を一般に考慮しなくてよい。それから、地中部分については設計震度を考慮しなくてもよい。それからごく軟弱な土質、地震時に流動化する地盤では計算上は支持力を無視するという規定を設けました。それから、高い橋脚をもつ橋の設計震度の問題。そして震害経験をもとに、設計細目に落橋防止対策を加えた。この辺を一つに体系付けてまとめたということで、その後のいろんな考え方の基本になっていると思います。この時もまず用語の定義をやったわけですね。みんな、頭を同一にしないといけないということでした。

加速度と震度とは混乱するんですよ。特に問題になったのは、我々は強震記録とか加速度の記録を持っていて、これによれば1000galとか500galとかでる訳ですよ。でも、橋は何ともないんですよ。一部ひびが入ったということはありません。だから、そういう意味で加速度と耐震設計上の設計震度とは直接には結びつかないんだという考え方なんですよ。それはあくまでも便法であるということです。一つのファクターとして設計震度を決めるけれども、ここにはいろんな要素があるから、これを全て設計で考慮していたらたまらない。したがって、一番影響が大きいと思われる補正係数を決めて、あとは設計者がバックにある考え方を頭において、橋梁を計画してくださいよ、ということで耐震設計の基本方針を決めたわけです。

我々が示方書を考える時は、必ず市町村の土木係の方でもある程度分かること、そしてコンサ

ルタントの設計者がだいたい分かるというように、少なくとも講演会でバックグラウンドを言えば理解できる程度の条文とか、決め方をしませんが間違いが多くなります。

しかし、免震とか、新しい技術はどんどん進んでいます。しかし、設計指針とか示方書というのはどうしてもそれまでの実績のある設計法、構造形式を前提にしておりますので、新しい技術は潰さないような条文にしていこうということで雑則を設けました。勉強して新しいことをやっていただくなら、それはその機関でやられたらどうですかとしました。免震設計とかいろいろ新しい方法というのは大いに結構だということです。こういうことで技術開発の方向、進歩に対してはちゃんと対応できるようになりました。

先ほど耐震設計指針をまとめる際にどこで一番苦心したのかというのがありましたね。一つは、やっぱり耐震設計上支持力を無視する土層です。これは解説にもありますように、まだまだ、議論があったのです。しかし、議論していても仕方がないので、地建や道路公団、首都公団にお願いして、どういった影響があるかと試設計したんです。それをやったら、構造が大きく変わってきたんです。お金もそうです。しかし、理屈は確かにそのようだったので、やろうじゃないかということになったわけです。

それから、流動化については、この位ならそう無茶苦茶な事業費の増大は起きないというところにしたんです。事業費への影響分析を必ずやっておかないと、実施不可能になってしまうからです。試算、試設計とここに簡単に書いてありますけれど、幹事さんが大変な努力をしました。そうしますと次の段階で条文ではこういう紛らわしい点があって、もっと明快にすべきだという問題がでてきますね。コンサルタンツが全然意図しない使い方、読み方をすることがあります。そういう影響分析をやりながら、まとめていったわけです。

次に大論争になったのは、京葉道路と首都高速道路の境界線で重要度別補正係数が違うので、杭本数に違いが出てくるのです。道路公団の方は「首都公団は重要度別補正係数を直すべきだ」というのですが、首都公団は社会的に見たら、関東地震よりも大きい地震でも落ちては困るんだ、通れなくてはいけないということだったんです。ところがよく分析しますと、一見、設計震度は上がっているようではありますけれども、上部構造については首都高速は許容応力度を増して、塑性まで認めているんです。したがって、上部については道路公団も首都公団もそんなに変わらないんです。ただ、下部の杭本数にはどうしても影響してきますね。これはもう結局、首都高速道路という特殊性を考慮しようということで、決着をつけました。この辺の調整が一番大変でした。これは後に三郷で、建設省、道路公団、首都公団が全部出会うところでも同じようなことがありました。あそこでは三者協議で耐震設計の基準を調整されたようですね。どういうふうに調整されたか、数字的には良く知りませんが、連続性があるようにうまく調整されたというように伺っています。

それから、地盤別補正係数も議論されたんですけれども、これはある程度慣行がありましたから、問題は少なかったです。地域別補正係数もそうですね。河角先生にお越しいただいて地震学的な点から見たご意見も伺いました。

それから当時の耐震工学ではまだまだ分からなかった各種の原因、例えば、位相差ですね。新潟地震で跨線橋が落強したのですよ。それに対しては橋座を広くしておこう、それから、落橋防止対策をやろうということになりました。それから、鉛直震度を設計に考慮しないのは影響度を試算してみまして、強震計の記録では鉛直震度はあるのは確かだけれど設計上は支配的ではないのです。ただ、そういう現象があることは確かで、上下部の連結点に影響が出てくるから、そこは鉛直震度に耐えられるようにしておけばいいのではないかとということで、「5章 耐震設計上の構造細目」を入れてそれを補ったんです。思想は、耐震設計ではないのです。橋梁の設計というのは、設計法、計算法でありまして、それには必ず、仮定条件、計算条件がありますね。例えば、ピン固定にするとかね。計算条件を補足するために、設計細目、構造細目がありそれらを合わせて配慮することによって設計は成り立っているのです。ですから、耐震設計も、耐震計算だ

けではだめで、設計細目も合わせて、初めて、一つの耐震設計として成り立つんです。

次には、いろいろ議論されているけれども、事業は進んでいるから値を決めなければならない。しかし、バックグラウンドをはっきりしておかなくてはいけないということで、設計指針の解説のあとにそういう指針の根拠とした資料をつけた訳です。それを見て、まだ、いろいろと足りないところもありますから、ケースに応じて判断してくださいという3段階でしたね。

修正震度法の補正係数が少し問題になったんです。実は、これは当時土研の構造橋梁部に主として本四を担当する耐震調査室があり、栗林さん、岩崎さんがおられました。基礎研究室長は吉田さんだったんです。我々には固有周期が0.2~0.5までというのは、あんまり資料がなかった。だいたい1秒くらいで応答が下がることはわかる。0.1秒くらいではまっすぐなのがありました。ここは、切っていいかどうか分らなかったんです。本四の昭和41年の指針では切らずにやりました。それは、どちらかといえば安全側なんです。国鉄の方は、大地さんが担当で、経済性を問題にして切っておりました。そこで本四の海峡部の下部構造の構造寸法をつきあわせたんです。建設省案は小さい橋の設計方法から言うとなんらおかしくはないんですが、これを1000m、1500mの橋に適用したのだから、大きな寸法になってしまいました。ところが、国鉄の方は上を切っておりましたので小さかったのです。それでこれが出来たら、今度はスパン20m位の橋だったら理論的には実設計のものよりはるかに小さいものになるんです。それで、デッドロックに上りまして、岡本先生にお願いして、また、いろいろな要素を考えて、やはり切っていいんじゃないかというような裁定ができて、本四の耐震指針はそれを使うことになったんです。ところが、震害調査をやったらわかりますが岩盤の上の減衰の小さいコンクリートのマスなんかは被害を受けているんですよ。やはり地震時にはこのあたりの周期の係数は大きいような気がするんですね。

川島：それは橋でしょうか？

多田：橋ですよ。だから、いろんな組合わせになるんですね。沖積層の上の剛体だったらよかった。それは、地震時でもそうなんです。関東大震災の時、山の手では、土蔵がやられたのです。素直に補正係数を出した頃はどうもあっているみたいなので、少し山型に切ったんですよ。しかし、今後フォローしましょうということでした。昭和41年には強震計の設置を全国的にやろうということになりました。当時道路局道路経済調査室の担当は山根さんで、特別会計で増やして全国で新しい橋につけることを義務付けたりしたんです。地建とか公団にお願いしてそれを調べようということでした。そういうバックグラウンドがあったんです。この間、岩崎さんにお聞きしたんですけど、「うーん、強震計の通りにやると設計できませんよ」とおっしゃっていました。そういう問題が残っています。だから、そういうことを担当委員が頭において耐震設計を書いて欲しいとお願いしたいんです。加速度が少し大きいと、支承なんかはふっとんちゃってね。岩盤の上で雁字搦めにする橋梁がいいかということ、僕は非常に疑問に思っているんです。これは次の議題ですね。

これは、皆の頭がしっかりしているうちに書かないといけないといっていたんですけど、大久保さんが亡くなられて、岩崎さんとか栗林さんとか山根さんとかね。岡本先生がお元気な間に当時の大地先生とかね。当時の本州四国連絡橋技術調査報告書が土木学会からでておりまして、あれの今後の検討事項というところをよく読んでいただきたいのです。そういう前提で事業が成り立つような構造寸法を基本にして設計指針にしたということです。小さい橋は別としてね。ですから、昭和46年の道路橋耐震設計指針が昭和55年に改訂されてますね。それで、当時は重要度別補正係数は次回に統一しようとしたんですよ。

川島：1.25という特別枠が1.1に下がったんです。

多田：そのフォローができていないと変えられないですね。昭和55年だったらまだ46年のバックグラウンドをよく御存知ですし、大地震を経験していませんから下げられませんよね。

道路公団の高速道路も重要だけどこれはなんと言っても迂回路はある程度あるし、首都高速は首都にあるから首都が混雑したら治安上問題だという政府の考え方もあるわけです。

お江戸からの距離に反比例して問題にならなくなるということです。首都高速の床版に穴があると大臣が見に行くと大騒ぎになるけれど、近畿地建の滋賀国道に同じことがあってもそれ程問題にならないのですね。そういう社会的な影響を考えなければならないんですよ。特に地震というのはアブノーマル・ローディングで影響が非常に大きいからです。ノーマル・ローディングの時は落ちてまわりは平然と動いているから大事故があったですむ。アブノーマル・ローディングの時は皆非常に不安だし、これが一番設計者の配慮すべきことでしょうね。だいたい昭和46年の時はこういう考えでまとめました。

川島：昭和46年の道路橋耐震設計指針をまとめられた時に御苦労された点がよくわかりました。何点かこれについてお伺いしたいんです。まず、耐震設計上の地盤面というのがありまして、そこから下は地震力をかけないというのがあります。これは、下部構造は根入れのある方が耐震的には安定しているけれども、下のほうに地震力をかけるとそうならない場合があるということです。こういうものが設計において非常に重要な規定だと思うんです。恐らくこのような考え方は建築のほうでも無かったんじゃないかと思いますが、これを決める時にはどういうディスカッションがあったかお話しただけませんか。

多田：1つは、さっき指針の背景を申し上げた時に東京湾横断道路とか、沈埋トンネルとか話しましたね。トンネルは当時伊吹山さんが御担当で、私は橋梁担当でした。東海道、中央道それから関門の重要なところは、そういう学際とまではいいませんが、そういう分野際の議論が出来たんです。トンネルについては、伊吹山さんは地盤の中に入っちゃえば特に問題無いというわけですよ。で、何でケーソンが地中にはいったら地震力をかけて自分の力でまたやらなきゃいけないのという議論だったのです。

学際的な議論というのは必要ですよ。建築も確か地下は地震力はみないという議論でした。これも震害調査からの経験的な、よくいえば、エンジニアリング・ジャッジメントで、悪く言えば、コンピューターということですよ。結局はトンネルとの整合性を考えたんですよ。

川島：なるほど。

多田：関門の時は、トンネルと橋梁を検討しました。交通量の増大からトンネルは最初は一本でもいいけれど、何年か後には二本いります。何年か後の投資を考えるとどちらが安いかということで、結局橋梁になったんですよ。お互いに設計規準にケチをつけるのではなくて整合性をつけるということでした。それは、本四もやっていたわけですよ。どんな質問がくるかもしれないから、大規模事業調査の成果でそういう点がございました。ですから、必ず鉄道や建築の分野からのご意見も聞くし、いろんな自分達の考え方に狭いところがないかどうか熟知しておかないといけない。トンネルは地中の地震力をみないので地下鉄はOKなんです。地下鉄がOKならケーソンもOKだろうということですね。

川島：分かりました。もう一つ、今のお話のなかで、是非お聞きしたいのが、重要度別補正係数です。これも非常に大切な規定で橋の耐震設計の一つの特徴になっています。ただ、新しい基準を作る場合には重要度によって差をつけるというのは行政的にはなかなか難しいのです。要するに、差をつけるという発想が日本の土壌ではなじまないところがあります。当時は、重要度によ

って設計地震力に差をつけるというのは非常に新しい考え方だったと思うのですが、これについては当時どういう議論があったのでしょうか。それから最近、よく冗談で出るんですが、重要度別補正係数では重要な橋とそれ以外の橋に分けられており、それ以外の橋では補正係数が1よりも小さいんです。普通の橋が1.0で、特に重要な橋が1.25という形だと外部にもわかりやすいのですが。

多田：一つはやっぱり公共事業費の額が今とは違って小さかったんですよ。できるだけ多く橋をかけたい。20年前ですから、これはもう現在とは大変な違いです。ですから、一等橋、二等橋で分けたのです。もっと分けてはどうかという意見もあったんです。道路構造令ではいくつかに分かれていますよね。交通量で分けるかという議論もあったんですが、試算してみると意味が無いということになったんです。それはかえって紛らわしいと。それよりは耐震性を向上させることにもっと頭を向けてもらおうということですね。いろいろなファクターを入れると、トータルでは同じになってしまうんです。1と0.8は、一等橋のT20に対して二等橋のT14は0.7倍です。同じ理論です。なにも迷うことはありませんでした。確かに川島さんのような意見もありましたけど、一等橋、二等橋の区分は行政とか社会的に十分受け入れられる議論であるということであるようにした訳です。橋は架かっていればよい、国道の橋は早く多く作ってくれということでした。その方が理解しやすいだろうということでした。

川島：なるほど、二級の係数を一級の係数の80%としたのは、一等橋のTL20と二等橋のTL14との比を考えて技術的に判断したということなのですね。

松田：昭和46年位からかなり計算機が発達してきて、かなり動的解析が使用されてたように思いますが、動的解析をもっと耐震設計に使うということは道路橋耐震設計指針を作られるときには議論にはならなかったんでしょうか。それとも、計算に走りすぎるよりも、実際の震害例とかそういうもので統一していこうという考えがあったんですか。

多田：それは、一つは先ほど申し上げたように、震害調査はあくまでもそれ以前の構造形式に対する経験であり、設計方法なのです。そういう認識は十分もっていたので、新形式の橋にはそのまま適用しては危ないということはあるんです。だから本四のように未経験の構造物にはその時点で考えられるいろいろな手法をやってみようということになったんです。平均応答スペクトルや強震記録を用いたシミュレーションもやってみようと。だけど、栗林さんが「これは日本の記録ではなく、あくまでもカリフォルニアの地震記録だ」と言われた。じゃ、本当に瀬戸内海でそうなるかどうかかわからないからちょっと安全側で考えましょうということになりました。しかし、計算ではこうなるけど、設計してみるとこうなる。それをみんなで見て、ここはどういうふうな破壊するかとか、いろいろ検討をしてみたんですよ。

川島：地震力と割増しを考慮した許容応力度を組み合わせ、全体として、こういう耐震設計をすれば関東地震級のもう少し大きい地震に対してももつと多田さんが御判断された材料は何だったのでしょうか。

多田：やはり震害調査の結果ですね。それとこれはあくまでも机上ですが、動的解析です。それと強震記録ですよ。それから復旧工費ですね。復旧工費の他にも復旧工期もありますね。この辺を総合的に議論してやったということです。したがって、上部構造のスチールはイールドまではOKということで、イールドしても、橋は落ちないし使える。しかし、下部でイールドを越えてしまうと問題ですから、下部では50%までの割増しとしました。震害調査の結果から、例えば福井

地震の中角橋とか昭和大桥だって下部があんなにならなければ落ちないわけです。上部はなんともないですよ。そういうことで、新しい規定にしたのです。橋梁委員会でも通りました。橋梁委員会の当時の大先生方も、確かにそうだとおっしゃられてましたよ。

川島：新潟地震では流動化で被害がでてますね。現在は流動化とは言わずに液状化と呼んでいるんですが、流動というのはいかにも地盤が動いたという状況を表わしている訳です。東海大学の浜田先生達が、地震前後の航空写真を比較して地盤面が非常に大きく水平方向に残留変位していると発表されています。だいたい河心方向に、大きい箇所では10m位横方向に移動しているのです。これは液状化する層の上のいわゆる表土層が横方向に移動していて、したがって、家屋も庭も電柱も根入れの浅い構造物を引きつってみんな動いているのです。これは地表から見ているとなかなかわかりづらいんですが、これは確からしいです。それで、土木研究所報告を拝見しますと、八千代橋では周辺地盤が流動したのではないかと記述されています。私どもは、多田さん達が調査されたときに地盤面が横方向に大きく移動するということをお考えになって、流動化という表現をされていたのかどうかに興味があるのですが、どうでしょうか。流動化の研究はだんだん進んできました。過剰間隙水圧が上がってくると土の強度が下がって、重いものが沈下して、軽いものは浮き上がるということです。しかし、いつの間にかアルキメデスの原理を検証するみたいな話に矮小化してしまって、液状化という現象が狭くとらえられるようになってきたのではないかという気がするんです。

当時は、液状化とか流動化に関してどういう議論があったのでしょうか。

多田：流動化といっても別段不思議に思わなかったのは、地震の時に流れて動いていたからですよ。液状化して流れ動いていたんだから、流動化というのは別段不思議に思いませんでした。

川島：最近の研究では支持地盤が抵抗力をなくすと同時に、その地盤が移動しますから地盤が構造物を引っ張るということがわかりつつあります。当時は支持力が無くなるというところに議論の中心があったと理解していいのでしょうか。

多田：いや、それはありました。土が動水圧的、あるいは、動土圧的な作用をするんじゃないかという考えがありました。しかし、これを考えたら、もう、設計がどうなるかわからないのです。試算してみたら、事業費に大きく影響するので、今回はこのへんでいいんじゃないですかということでそうしました。次に送りましょうということでした。

常田：そうしたら、そういうことは一応考えられたということですね。

多田：そりゃもう当然、動土圧とか動水圧という規定があるし、液状化して水になるんだからということですね。

川島：道路橋耐震設計指針によれば、表面部土層を無視した場合には、それによって生じる動土圧は考えなくてもよいとなっていますね。

多田：わざわざ書いたというのは、そういう議論があったということです。固定点を下へ下げただけで、首都高の7号線の下部構造の断面は大幅に大きくなりました。それに、さらに動土圧までを考えることはないだろうということだったのです。ただし、影響が少ないような構造を選択した方がいいんじゃないかという議論がありましたね。というのは、耐震設計指針を早く出さなければいけないということでした。逆算してだいたいこのくらいでおさめようということでした。

全体の条文のなかでこれだけは絶対に書くと。マイルストーンでジャッジしないとだめなんですよ。

常田：液状化した場合に横方向の支持力を減少させるというのは、昭和55年の示方書の中に取込まれているんですが、最近、振動研究室では取り込むとすればどういう形で取り込んだらいいかというあたりをテーマにして実験を続けてきています。

今までに分かっているのは、現在の示方書の設計法では完全液状化状態になると、横方向の抵抗という観点からみると設計上は厳しくなるんです。ただ、模型実験では完全液状化した状態だとかえって杭に力がかからない。ですから、横方向の抵抗と杭に作用する流動圧みたいなものは現象が違うんじゃないかと考えています。ある程度抵抗がある状態で流動した場合の方が力が加わるんじゃないかと思われますので、流動の影響はないのではないかと考えています。設計法にどう結びつけていくかについてははっきりと整理されていないんですが、今、そのような着想でやろうとしているんです。先ほど言われたように力がかかるということでそんな杭の設計は難しいと言われましたので、その辺の見通しで、何かアドバイスがあれば伺いたいと思うんですが。

多田：そういう場合、我々は必ず試算、試設計をやったわけですよ。そんな影響のあまりないものは止めておこうということです。鉛直震度は、実際にはあるけれども、設計で見込むのは止めておこうということと同じことです。だから、今のお話を伺っているとますます46年の時のジャジメメントはいい線をいっているということですね。そんなに金をかける必要があるかということですね。それよりは力に対して力じゃなくて、もっと知恵を出そうじゃないかということですね。さっき申し上げたように他の方法で逃げようということです。それで本四で一番問題になったのが岩黒とか榎石のダンパーですね。ちょうど私が常任参与のときで、田島さんが設計部長をやっておられて、現場からダンパーを使う案が出てきました。それで、仮にそれが駄目だったら、どうなるかという議論をした訳です。やっぱりそういう極限状態を考えて、その間にタイムディレイがあるから大丈夫じゃないかということになり、いささかコンピューターですけれど、採用することにしたのです。コンピューターでも玄人ものだから、いい線いっていますよ。

川島：支承部の鉛直方向の地震力についてですが、これを考慮する理由は震度法の計算では説明しきれないような現象が観察されている、すなわち、上部構造と下部構造が離れたとしか考えられないような状態が過去に生じていると解説に記述されています。これは液状化に起因して下部構造に移動、傾斜を伴うような非常に大きな被害を受けた状態と考えてはいけなんでしょうか。橋の上下部構造が振動だけで離れるというのは、一般的には考えにくくて、下部構造が液状化を受けて大きく倒壊するような状態になるからこそ、上下部構造が離れたとしか考えられない状態になったのではないのでしょうか。

その背景をちょっと御紹介しますと、最近ゴム支承を使っていこうという気運がございます。ゴム支承は橋軸方向にも橋軸直角方向にも動けて、なかなかよさそうに思えるわけです。ただ、ゴム支承の場合には上下方向に0.1の震度をかけることは大変なのです。そのために、規定の背景をよく考えていこうということが議論されています。この規定が最初に設けられた頃の議論を御紹介いただけないでしょうか。

多田：まず、これは本当かどうか分からないけれども、上下動で上部と下部との慣性力の差があって、下部が離れたとしか考えられないような壊れかたがあるんですよ。例えば、アンカーボルトですね。また、さっき言った強震計から見て垂直の振動があるんですよ。そうするとその垂直力というのは、結局は連結点における隣接間のタイムラグなんじゃないかという考えなんですよ。ですから、従来は例えば橋台橋脚ともに水平、垂直に設計震度をかけて設計していましたが、橋

脚のように地盤と一体に振動するものには鉛直地震力は考えなくてもいいんじゃないかということです。震害調査からみると結局支承のところが問題なのです。強震記録で見ると鉛直方向の加速度があることはもう明らかなんです。したがって、どういう支承で上下部構造が離れるかというと、どうも位相差、タイムラグじゃないかと思うんです。桁が上がって、その後下部が先に下がり、その時に瞬間的に凄い力がかかってということです。だけど、0.1くらいをみておけば、上部をちゃんと引っ張って下に下がるんじゃないかということです。液状化は関係無いですね。

2番目のゴム支承の議論はありました。ありましたが、それはやっぱり必要だと考えました。明らかにそういう現象はあるという認識です。

川島：そうすると、それは単純桁よりもむしろ連続桁で、例えば π 型ラーメンみたいな橋で、端っこの方で桁そのものの振動が出そうな構造ということでしょうか。

多田： π 型ラーメンの場合には下部が地球と一体ですから、一緒に降りるわけです。

川島：連続桁のようなものでしょうか。単純桁でもそうでしょうか。

多田：そう、単純桁とかね。それはそれだけのことをやっておかなくてはいけない。しかし、やるといっても力を与えないと設計はできないでしょう。鉛直地震力の根拠はみんな強震記録ですよ。鉛直加速度がどのくらいかかったかということです。

運上：耐震設計指針作成時に際してご苦労点された点をいろいろ伺ってきました。今からは今後の耐震設計の方向ということで、進めさせていただきたいと思います。山岸さん、いかがでしょうか。

山岸：先ほど、震度の話がございましたけれども、本四のほうでも一応周りとの横並びということで昭和52年の基準の時は修正震度法で、0.2が基準になっていました。動的解析する場合でも0.2に合わせたスペクトルに合わせた波を使うということが基本になっています。

我々のように後に入った者には、そこに書かれてある限りのものしか理解できなくて、結局はその条件の中で設計していくことになるわけです。Dルートと兎島坂出の工事が終わって、時間的な余裕もあったということでその辺の見直しが行われました。基本的には基準とする地盤に地震入力をそのまま入れましょうということです。ですから、最大で800gal、1000galに近いような波を入れまして、それに対して、根入れだとか周りの地盤の状態を考慮して有効地震動を計算してそれに基づいて躯体なり上部工なりを設計してみようということになった訳です。ある意味でそれは大きな進歩だと思うんですが、いろんな弊害といいますか、結果として今までの基礎の設計との整合性がとれないということになっています。地盤によっても例えば明石みたいな比較的柔らかい神戸層だとか明石層で根入れが十分ある場合は一応設計でも従来の震度に比べてもそう大きな問題はないんですが、硬い風化花崗岩の上で根入れがない場合には、特に問題が顕著に出てきます。明石では4Aとかですね。

来島もほとんどが地盤は非常に良い所なんですね。良好な風化花崗岩の支持地盤の上に直接基礎でそのままのっています。根入れも基本的にはないということで、ほとんど800galくらいの入力地震動で直接設計するようになるんです。そうしますと従来の設計では成り立たないんです。特に、来島では、静的な釣合でいきますと浮きあがってしまい、転倒してしまうんです。動的な転倒照査につきましては、川島室長のところで実験等をやられて、大きな剛体基礎が転倒することはないということになっています。地盤さえしっかりしていれば、転倒が起こる程大きなエネルギーを地震波は持っていないからです。結局、浮上がりが生じるような非線形応答解析

をしないとイケないのです。浮上がりはすべて幾何学的な非線形ですからね。底面地盤をバネに置き換えて引張りがでてくる所を無視するのです。そういう非線形解析を行っています。非線形解析をするとそれなりに応答が落ちてきて、その落ちた応答に対して地盤の支持を照査して、なんとか安全率以内におさめているというのが現状です。従来の地震時の安全率ですとDルートでは、20とか30とかいうオーダーがあったわけです。ああいう大きなマスのおまけに比較的支持力が十分在るような基礎に対して、今は安全率ぎりぎりのような状態です。

Dルートでやられた一連の耐震設計と明石以後の耐震設計とで、がらりと考え方が変わってきて、いままでは安全率が十分であったものがぎりぎりいっぱい決まるようになったことで、整合性の面ではちょっと問題があるんじゃないかと思っております。

それから、もう一つ、配筋の問題もあります。基本的には本四は鉄筋コンクリートではなくマスコンクリートということで弾性設計するようになっており、引張に対して鉄筋を入れて補強するという考えに基づいているんです。その辺は従来と変わっていないものですから、応答が増える分だけ鉄筋が増えるということになっているんです。それもやはりいろんな認識のされかたがありますけれども、Dルート等を経験のされてきた人達にとっては、なんで同じ様な場所でこれだけ違うんだということになるんです。

施工上は鉄筋が多くなると大変になってくるわけで、なるべく不必要な所はなくしたいと思うのです。ある意味で設計自体は変わっていますけれども、そういったところの問題整理がされていないという段階なんです。

多田：さっき、耐震設計指針で本四のスペクトルの話をしました。その時に、その通りのことをやっているのですよ。まず、本四の基準の0.2ですが、本四は0.2というけれども道路橋耐震設計指針の設計震度0.2と違うんです。本四では基礎は深い本当の岩盤に設置しているのですが、普通の橋だったらもっと上の地盤におくでしょう。ですから、本四の0.2というのは増幅を考えると設計震度にして0.3とか0.4を使った形になっていて、一般の橋と比べるとはるかに高いんです。これでいいんだという考えです。

川島：基盤で0.2で、構造物では0.3くらいですか。

多田：同じ基盤でも一般の橋だったらもっと上の地盤で止めますね。これは後で耐震設計の高い橋梁ということで紹介しようと思いましたが、私が高知県から依頼されて、実際に橋梁計画をして設計したものなんです。基礎をしっかりとしたところに止めるということになると40mにもなるんですよ。ところがもっと浅い所に硬い層があって、ここで止めたんですよ。5径間連続にして、不等沈下を考えて計算して断面も決めて、それから、沈下した時にはジャッキアップできるように全てディテイルを考えました。そういうやり方だったんです。

ところが、本四だったら必ず下の硬い層まで入れているということです。そこに0.2をいれているんです。

それから、2番目の地震入力ですが、強震記録を見ると1000gal出るというのは46年でも分かっていたんですね。記録が出てきて、確かに沓が壊れていますからね。沓がやられているので、岩盤があったんでしょうとかね。だけど、金をかける必要があるのかどうかという議論がありました。金をかけると何倍にもなりまして、小さい橋なら設計できるんですが、明石では現実的でなくなってしまうんです。

根入れがある場合にはなんとかいけるんです。直接基礎ですとそういう問題がでてくる。それから、Dルートでは小さくて今度のは大きいということですね。本四の実際の設計をするときは、実はあなたの方がやったことと同じことをやったんです。それで耐震設計指針を作りました。まあ、経済的にまあまあの規模で収まるような指針にしてあったという逆の発想なんですよ。

だけど、明石なんかは影響が大きいですよ。これは技術調査報告書をみれば分かるけれど、当初は橋長5kmで、アンカレイジは海中だったんです。それで、私は経験から、当時の企画部長の松崎さん、それから亡くなられた工務部長の相良さん、設計二部長の浅間さんに話をして、上部にリスクを持ってくるようにしたんです。日本の場合は耐風耐震で決まるから、アンカレイジを軸に持つてこようということにしました。こうしたら安心なんじゃないかと思った訳です。施工もその方がしやすくなりますね。半年で耐風耐震の検討をやりました。総裁が富樫さん、理事が村上さん、田中さんでよく御存知の方々でしたからね。

アンカレイジが陸上になりまして、それなら、なんとか設計できるということで、昭和46年の時に福岡さんが1000galをやったらどうなるというので、もう何度も話し合ったのですよ。非線形効果も考えてね。岡本先生がスペクトルの頭を切ったらどうかということで、納まった経緯なんです。

川島：地震入力に関しては、観測記録が集まってきているわけです。それで、地震力の大きさがマグニチュードと距離によってどのように変わるかということも大筋でわかってきました。今までは頭を切るにより外力に責めをもっていったものを、現在はあるがままの外力を用いて設計体系を組む方向に動いているのです。構造物の動的な振動をベースに照査する体系を作っていく方向に向かっているのです。例えば、剛体基礎の転倒では、現在の方法では縦、横の比が同じであれば同じように転倒すると判定されます。しかし、小さなサイコロはひっくり返っても100mのものが大型基礎50mも持ち上がってひっくり返るということは有り得ない、ということが、現在の転倒照査法には入っていないのです。

これは、ごく簡単な振動実験をしても一目瞭然で、同じ形状をしていても寸法が違えば大きなものは転倒しにくいのです。そここのところを設計に組み込んでいこうとしているわけです。これは実は物部先生の論文にも載っているのです。ただ、物部先生の時代には電子計算機がなかったので、縦、横の比から合力を求めて合力が底辺を横切ったらひっくり返るという転倒照査法を提案されたんですね。それが長く静的な転倒照査法として、現在も使われているわけです。

現在の方向は、スペクトルの頭を切ったり外力の方をいじるのではなくて外力はありのままにしておき、それに対して構造物が実際にどう動くか動かないかを計算して、動かないからいいんじゃないかという方法でいこうとしているんです。そういう動的な照査法がまだ開発されていないものがあるのです。一番いい例は滑動ですね。支持力に対しても開発されていません。構造部材でいきますとRC橋脚に対する照査は平成2年の段階で示方書に入ってきましたが、まだ、鋼製ピアとか杭とかに対してはまだ照査法が開発されていないわけです。

多田：川島さんと山岸さんのお話に対して答えると、外力は切ったつもりはないんです。外力を切ったら問題ですよ。加速度、即、地震力ではないんだということですね。総合的な形でそういう設計をとっているということです。基礎が地盤に対して振動すれば、そこで摩擦や減衰が生じるでしょう。だから、地震力は結果的に応答スペクトルの頭を切った形になるだろうというのは、エンジニアリング・ジャッジメントですね。これが今の改正の点で一番気になっているんですよ。加速度即耐震設計の地震力と結びつけてものを考えさせないようにすべきではないかということで、46年の道路橋耐震設計指針はそうしてあるんです。用語の定義と両方ですね。1000galをとるときは、減衰効果とかすべて計算法に含めて、そういうことが進歩してからじゃないかというのが私の改正に対する意見です。転倒に対する結果、転倒しないはずだということで、計算法がおかしくないかという議論をしていただけないかとそうしたわけです。それじゃ、基礎はどう動くんだろうかと考えると、岩盤は摩擦でやられて粉々になってしまうのですかということですね。私が本四の尾道の局長のときは締め切りにしてダムと同じようにきれいにして、コンクリートを打ち、岩盤とコンクリート間を計算通りの状態にしました。そこで、真ん中のルートは海中施工の

設置ケーソン工法だったので、「吉田さん、あんた安全率が同じじゃおかしいんじゃないの」といいました。それで安全率を変えたんです。大きなエンジニアリング・ジャッジメントですね。コンピューターですよ。その分だけ基礎が広くなりましたね。だから、外力を切らないのはいいんだけど、こっちの中の計算もしっかり入れないとだめですね。これは、小さいものに対しては適用可能であっても、大きくなった場合には設計できないですよ。ということは矛盾があるということですね。

川島：今のことに関係して、地震力のレベルについてお話を伺いたいのですが、昭和46年の道路橋耐震設計指針では設計震度としては地震学的には最大の地震力を考えているのでしょうか。

多田：最初に申し上げたように、昭和46年の道路橋耐震設計指針では地震学的にその地点で考えられる最大の地震を考えています。一等橋に対してですけれどもね。二等橋に対しては確率的にもっと頻度の高いものであってもいいだろうということで0.8かけしている。それ以上の地震がきたらという議論はちょっと視点が違うということで、地震学的にはそれは来ないというのが前提ですね。

設計耐用年数は50年くらいという考え方です。本四では、耐用年数として100年くらい考えていますよね。地震は、設計耐用年数内には来ないかも知れないわけです。それにべらぼうの金をかけるのはつまらない。ノーマル・ローディングで決まった寸法が基本で、その強度でできるだけ収まるような設計をするのが経済的だということです。その中で耐震性の高い橋梁を考えるのが良い橋梁計画ではないかという考え方です。だから、1000galとか実際にあったけど、しかし、それはその時はまだ本当に確かめられていなかった。しかし、岩盤の上に剛なアバットがあって、その上にRCの橋桁がある場合はどうもそういうことがあるらしいということで、その時は沓が切れていいんじゃないかと考えました。そのかわり落ちないようにしなくてはいけない。そうやって金がかからないんじゃないかと。だから、設計震度すなわち考えている地震動は一等橋の橋にとっては考えられる最大で関東地震よりも大きいということです。強震計の加速度とは直接結びつかない。結びつくかもしれないけれど、結びつくんだったら、もっと壊れてもよかったはずですよ。強震計もおかしかったのかなあ。

そういう時代だったんですね。だから、示方書改訂の時に川島さんにたびたび申し上げたのは、その辺のバックグラウンドをしっかりとってもらわないと、強震計の加速度即地震動だと考える可能性があるということです。それが一番のお願いしたい点で、耐震設計はまだまだ、経験的な設計手法であるということですね。

川島：わかりました。それでは、一番かんじんの耐震的にはどういう構造系がいいかということについてお話をいただこうと思うんですが。

多田：橋梁計画における耐震設計への配慮ということですね。最初に申し上げましたように、結局、地震時の構造物の挙動は構造物の材料によるし、構造形式、橋長、地盤、地質、震央との距離とか、その間にある地盤、地質等によって複雑に挙動するから、その橋、その橋によってそういうことを考慮して計画しないとイケないということをやまずお願いしなくてはいけないということです。

それで、条件を整理してみるとこんなことになるのではないかと思います。地形条件があるでしょう。それから構造形式がありますね。それから地質、地盤や支持地盤、表層地盤の増幅特性があります。地形だったら山岳地帯と丘陵、平野、デルタ、埋立、海中くらいに分かれるのではないかと思います。構造形式は山岳地帯だったら栈道とか跨谷、谷を渡る橋ですね。谷を渡る橋はなんていいましたっけ？ 架谷橋でいいでしょうか？

川島：あまり跨谷橋というのは耳なれないですね。跨道橋とか跨線橋というのはよく使いますが。

多田：山岳地帯では栈道。まともにだったら、普通道路かトンネルでしょう。それか、谷を渡るか。山岳地帯というのは、だいたいそうでしょう。

松田：そうですね。栈道形式の場合、山腹ををぬっていく橋ですね。

多田：それか谷を渡るかですね。それに対して丘陵地帯だったらもちろん、栈道もあるし、谷を渡る橋もあるし、川がでてきますよね。それから高架橋もでてきますね。それから、いわゆる鉄道の跨線とか跨道橋ですね。高速道路の跨道橋とかね。平地地帯だと、だいたい跨線、高架、歩道橋まででしょう。デルタ地帯も埋立地帯も似たようなものです。それから海中とか海峡になるとまた違いますね。埋立地だと埋立地の連絡橋みたいなものになりますからね。

そうすると、この支持地盤からみると、橋梁区間の地質地盤が同型で地質構造的に連続している場合は割と考えやすいですよ。固定点がここだから一緒に動くだろうとね。連続性がない場合が問題なんですね。だから、一律に連続桁がいいとは必ずしも言えないですね。やっぱりそれぞれの場所に応じるでしょう。地盤でもその表層とか中間層とか、それぞれ連続性のある時と連続性のないときと、それから崩落地帯とかで違いますね。

1つの橋でいろいろな形式を比較した例を御紹介しますと、先程も申し上げた高知県のデルタ地帯の跨川橋です。この地帯では橋梁区間の地盤には連続性がないから、10径間連続にしたかったのですが、これはちょっとどうかなということになりました。これは昭和39年で、新潟地震の前だったような記憶があるんです。それで、中央部に固定橋脚を設け、5径間連続とし、橋台との間には6mのスラブ橋を入れました。位相差があっても落ちてこの位なら簡単に復旧して通れるという私の考え方によるものです。新潟地震の震害調査では、ケーソンは案外沈下したり傾いたりしていたんです。ケーソンを降ろすときは周辺の地盤を壊すでしょう。トンネルと一緒にしっかり裏込めしなくてはいけない。杭は叩き込んでいるから地盤と一体になって大丈夫なんですよ。その後、高知では地震が無くて、30年は何ともない。床版がやられて直したというけれど、それでも当時は5径間連続は珍しいほうでした。架け違い長には余裕をとっています。このディテイルは昭和46年の指針に入れてるわけですよ。私はこういうところでは極力連続桁にしてバランスよく設計してほしいと思います。

川島：こちらもアバットでございますか。

多田：こっちはアバット。こっちはアバットはボックスラーメンのアバットにしたんですよ。鋼杭とフーチングとの連結は全部鋼杭スリットで曲げたのですが、これが一番確実で安くできたのです。これはデルタ地帯の例ですから、不静定構造のラーメンがいいと判断したのです。さっき申し上げた橋梁区間も同じで、こうじゃないと成り立たない。位相差が出たら壊れちゃうと私は思うんです。それが当時の耐震設計では入っていないので、結局その橋脚の幅とか経験的なものにしたのですよ。

川島：そうですね。がんじがらめにするにはよくないかもしれませんね。

多田：シンプルだと常時の交通にエクspansionが多すぎてね。そうすると連続桁が良い。地震に対しても連続桁は有利ですからね。ただ1つ連続化することによってどういうところに力が集中するかを考えた計画をすべきじゃないかと思います。それが耐震設計上良い設計じゃないか、

耐震性の高い橋梁と言えるのではないかと思いますね。

運上：それでは、昭和46年の道路橋耐震設計指針作成時の過程から、耐震設計の思想や耐震上優れた構造まで非常に貴重なご意見をいただきましてどうもありがとうございました。

川島：今日は予定を2時間もオーバーしまして本当にありがとうございました。

多田：いえいえ、とんでもございません。わたしも勉強させていただきました。

一同：どうもありがとうございました。

2. 3 大橋昭光氏

(1) 日 時 平成4年9月3日 12:00~14:00

(2) 場 所 日本道路協会 特別会議室

(3) 出席者	大橋 昭光	トピー工業株式会社副社長
	川島 一彦	耐震設計分科会長(土木研究所耐震研究室長)
	西川 和廣	土木研究所橋梁研究室長
	松田 哲夫	日本道路公団試験研究所橋梁研究室長
	山岸 一彦	本州四国連絡橋公団設計部設計第三課長代理
	運上 茂樹	土木研究所耐震研究室主任研究員



写真-2.3.1 大橋 昭光氏

川島：今日は、大変お忙しい中をご足労いただきましてありがとうございました。最初に、少しこの座談会の主旨を申し上げますと、現在、耐震設計分科会では道路橋耐震設計便覧というものを作っており、その中で耐震設計ではどういう橋が最も良いのだろうかということを検討しています。いろいろな意見は出るんですが、なかなか形が見えて参りません。そこで、方向付けをするために諸先輩方のご意見を伺ってはどうかということで、耐震設計に御経験の深い諸先輩方をお招きしてお話を伺うということをしております。本日は少人数で、ざっくばらんなお話を伺って参りたいと存じますのでどうぞ宜しくお願い致します。

大橋：先日、川島さんからこの会のことを聞きまして、耐震的に優れている橋ということについて何でもいから話してくださいということでした。これはたいへん難しいことですね。耐震的に優れているという橋は、設計の時点で耐震上付与すべきアイデアが設計に反映されていて、その考え方が製作なり架設を通してちゃんと現場に備わっていることが第一ですね。設計はしたけれども現場はそうならないというのはとんでもない話ですから、まずこれが必要条件です。

示方書の改訂やさらに耐震設計の便覧だとかいろいろなことをやっていますけれども、今の我々が持っている道路橋示方書耐震設計編の成果に至るまでには、いくつかの地震がありました。地震による被害がその次の耐震設計の考え方や手法のレベルアップに役立っているわけです。今日の皆さんは、福井地震当時にはまだ耐震という仕事とは関係が無かったと思いますが、非常に大きな影響を与えた地震です。次に、昭和39年の新潟地震、そして、皆さんが経験された昭和53年の宮城県沖地震と続いています。最近では外国ではいろいろ地震がありましたけれども、幸い日本には大きな地震は起きずに経過してきています。そういう点では福井地震、新潟地震、宮城県沖地震の後に、いろいろな国内外の知見を集めた研究成果が実際の地震によりチェックできないといってもよいでしょう。耐震工学を一つの工学とするならば、絶えず、実験や解析、シミュレーション手法を通してチェックしていくことによって進歩があるわけですね。それが幸いなるかな、近年は地震がないために、ある意味では先が十分に見通せないという状況にあるというのが実状ではないかと思えますね。



写真-2.3.2 座談会出席者

福井地震は、昭和23年6月28日の夕方5時頃に起こった直下型の地震でしたね。九頭流川の道路橋、鉄道橋は全て単純形式で上部はトラス橋がほとんどでした。橋脚は皆ある方向に倒れ、それに伴って橋桁の片一方は橋脚の上に載っているけれども、もう片一方が全部下へ落下して、パタパタと下へ落ちてしまった。震害のパターンとしては、非常にシンプルでかつ象徴的でした。これが契機となって、落橋防止構造をつけようということになったわけですね。

それから、連続構造というのは、当時は地盤の不等沈下の問題がありましたので、地盤の悪いところはむしろ避けた方がよい構造形式でした。そういうところは、できるだけ、シンプルかゲルバー方式のようなもので逃げる形式をとるのが通常の橋梁の設計のアプローチでありました。

福井地震というのは局地的には被害が非常に大きかったんですけども、震害域が非常に狭かったんですね。震害域が狭ければ、明日にでもよそから救援が入るということですね。福井市から西の方に武生という町があるんですが、そこでは民家の倒壊などの被害はほとんどなかった。福井市では夕方5時に地震がありまして、夜の10時には私の家は延焼で焼けちゃったんですね。それを見て武生の方達は炊出しに入ったんです。東の方の九頭龍川を渡った春江のあたりは、それほど被害はひどくはなかったんですね。



写真-2.3.3 昭和23年福井地震による中角橋の落橋

川島：どれくらいの範囲だったのでしょうか？

大橋：範囲は福井を中心に北陸線の駅でいいますと、せいぜい東西南北で1駅ないしは2駅くらいの範囲でした。九頭龍川の河口にある三国町では、基礎のしっかりした岩盤の上でしたので、海岸一体はほとんど被害がありませんでした。本当に福井市の周辺だけでしたね。

私の場合には家から荷物を持ち込んで御城の御堀の近くで一晩過ごしましたが、次の朝には竹の皮にくるまれた握り飯が配られました。自分で米を用意してといった被災者意識は食料に関しては全くなかったですね。

川島：戦争直後だったんでそのような訓練があったのでしょうか。

大橋：それと、アメリカ陸軍が駐留していて、野戦の浄水機をつけてくれまして、足羽川からすぐ浄水して、それをジープで配ったんです。ですから水も次の日から飲めましたね。震害域が小さいということは救援という面ではたいへん心強いものでした。

川島：福井地震は気象庁で震度Ⅶというのが新しく出来たくらい強い振動だったそうですけれども、私が以前、大橋さんに伺った時は、建物の柱がめきめきに折れたという話を伺った記憶があるのですが。

大橋：当時、私は京都の高等学校におりまして、都会ではろくなものを食べられないので、1学期の試験を繰り下げて皆で帰省したんです。地震が起きたのは帰省してから3日目くらいでした。私は、たまたま、空き地で木材を焼いていたんです。そうしたら、ドドドときましてね。そして、いつのまにか地面に腰を落としてへたばっていましたね。回り一面は、家屋の壁土がジャッと落ちて、もうもうとかすんで向こうが見えないくらい赤土の煙が立ち上がっていました。私の隣の家は平屋の上に2階を継ぎ足したものですから、あっという間に壁から赤土が落ちたかと思うと、2階が崩れ落ちてしまいました。

今の建築ですとボルトを締めて、蝶番でとめたりしてしっかりしていますが、昔は、ねたがあってほぞ穴があって、柱をはめ込んで五寸釘を打っておしまいです。ですから、地震がきて縦揺れがきてそこがはずれたら、タコの脚みたいになって、上がおちてしまいましたね。

それから、火災が出てきれいに焼けました。ペチャンコになった家の後を見ますと、たいてい亀裂が入っていましたね。軽い木造の家だとしても、すじかいでしっかり固めていないと、ばらばらに動いて簡単にくずれてしまいましたね。まことに関東大震災の時の言伝え通り、2階にかけあがれ、1階は危ない、というのはその通りでしたね。最近はどうじゃないと思いますが。

福井地震のついでにいいますと、昭和39年の新潟地震ですね。これは液状化の問題がクローズアップされて、都市とか工業地帯における地震に対する警笛を鳴らしたということですね。宮城県沖地震の時は、コンクリート柱の耐震性ということですね。建築物がずいぶん倒れましたね。それからライフラインの問題ですね。

川島：非常に大きな地震を経験した人というのは非常に少ないですね。昭和53年伊豆大島近海地震や同年の宮城県沖地震の振動を福井地震の場合と比べるとやはり福井地震の方が大きかったのでしょうか。震度Ⅶという福井地震が起きたら、今の耐震設計による橋にも被害が出てくるのでしょうか。

大橋：昭和53年の宮城と伊豆の時も、私は東京におりました。ですから、それだけ遠隔の地で感じた地震動というのは、現地にいたわけではないのでなんともいえません。福井地震の時はその場にいまして、何のワーニングもなく、いきなりドスンときまして、とにかく立っておれませんで地面に尻餅をつくくらいでしたね。ですから、確かに上下動が主で水平というのは全く感じられませんでした。

川島：最近は大い地震が起きていませので、現在の耐震技術が実際の地震によりチェックを受けていないんですね。研究的には振動台などもできまして実験もされていますが、過去の震害の延長線上で研究的に追証されてきているとってよいと思うのです。しかし、大地震を経験しない間に橋も変わってきました。特に、都市内高速というのは新しいタイプの橋ですし、主塔の耐震性が全体系を支える斜張橋、多径間連続化、下の道路の制約によって橋脚の断面をしばりそ

のかわり鉄筋量を増やして対応した橋脚とか、新しいタイプの橋が作られています。構造設計の面から強い橋を作るのではなく、社会的ニーズに答えるために技術開発が進められてきています。

そういう面から、これからの技術開発で耐震設計法の不十分さのためにこういう橋ができないとか、耐震設計でこんなことをやっていかないと橋梁の技術開発という視点から不十分であるとか、この辺についてのご意見はいかがでしょうか。

大橋：そうですね、日本は地震国である。したがって、なんらかの投資が必要であり、その手法としては耐震設計であるということですね。それをやらなくてはならないがために橋梁のデザインとかで、全く耐震設計をしなくてもいい橋と比べて、著しい遜色とかデメリットがあるというようなことにはならないと思いますね。

確かに耐震設計が必要でないものに比べて、耐震性を付与しなくてはいけない場合には、橋脚の直径が太くならざるを得ないし、鉄筋も増やさなくてはいけない。鉄筋を増やすよりも、ある程度径を大きくして、鉄筋、配筋その他コンクリートに余裕をもたせる方が鉄筋コンクリート構造物としてはよりいいものができるわけです。そういう意味では、耐震設計をするということは、期せずして、丈夫な橋を作るということに寄与していると思いますね。

だから、耐震設計をやらなくてはいけないが故に、どこかの国みたいなスレンダーなものは出来ないということで嘆くことはないでしょう。皆さんが御自分で家をお造りになる時には、建築基準法がありますので、ある程度の金を追加投資しなくては耐震設計ゼロの家になります。不必要な物に対してプラスアルファを付けないと今は家が建てられません。それが故に、震度Ⅴ位の地震でも平気で寝ていられるわけですね。それをやらなかったら、震度Ⅴでもおかしくなるわけですね。それと同じことで、期せずして丈夫なものを作るという方向に自然に針は向いているのでないでしょうか。それを逆にうまく利用して、耐震設計と長寿命化というのをうまく結びつけていくことが一つのコンセプトとしてありえるのではないのでしょうか。

話はとびますが、新潟地震の時に、村上さんが土研の所長をつとめておられました。多田安夫さんが構造橋梁部長、吉田さんと私が本四の担当で、橋梁設計室、基礎調査室を作っていました。本州四国連絡橋調査事務所に、亡くなられた相良昌幸さん、村上さんと多田さんと相良さんと私と4人で、室蘭に出張に行ったんです。日本製鋼所という所がありましてね、そこを下調べに行ったんです。村上さんと多田さんは、飛行機で行かれまして、相良さんと私は車でいきました。室蘭でおちあうべく我々は後からいったんです。ちょうど、村上さんと多田さんが、着いた日に新潟地震が起きまして、すぐに帰って調査するということで即帰られてしまったんです。で、私と相良さんは朝室蘭に着いたら二人は帰られたということでした。折角出張に来たんだから、目的は果たして帰りましょうということで、日本製鋼所を拝見してから千葉へ帰ったんです。今は皆さん運転ができますけれど、昔は年寄りしか運転できませんので、ライトバンを引張出して、自分で乗っていったんです。新潟で釘を踏むに違いないと、スペアタイヤを2、3本とガソリン補助タンクを入れて13時間かかって新潟まで行きましたね。その頃は、三国峠までは舗装してありましたが、三国峠のトンネルを抜けましたら雪国どころか、もうもうたる砂塵でして、無舗装なんです。救援のトラックがどんどん通るんですが、昼間からライトをつけて走らないと危なくて通れないくらいひどい状態でした。クーラーなんかついていない車ですから、それは死ぬような思いでした。

新潟に入って、地建などからデータをもらったりして、その後、土研からも何回かいろいろな調査で新潟入りしましたが、なんといっても一番ショックだったのは流動化でしたね。昭和大橋も八千代橋も流動化が原因だったということですね。万代橋は若干のひびわれがありましたがもってくれたので、震災復興や東西の交通に大変役立ちましたね。

宮城県沖地震の時は、数日して現地へ赴き、第一陣の調べた多くの被害を見て回ったんです。私が個人的に教訓として持ち帰ったのはこうです。その頃はすき焼きを家でやることがありまし

て、ガスをゴムホースでもってきて卓上コンロに火をつけていましたが、あれ以来カートリッジ式に換えました。今でも押し入れの中には、5、6本のカートリッジが入っています。これは、お酒の席とか、いろいろなところで皆さんに必ずそうしなさいと申し上げたんです。当時は、東北ガスがすべてガスを止めてしまって、ガスタンクには被害はなかったんですが、末端のガス管はやられているのでガスを供給するわけにはいかなかったんですね。そこで皆が泣きを入れて、結局配られたものは卓上コンロとガスボンベだったんです。それで皆は飯を炊き、湯を沸かすことができたんです。

それからもう一つは、お風呂ですが、それぞれの御家族により様々ですけれども、最後はきれいに洗って栓を抜いて風呂桶を乾かしてしまいますよね。でも、汚くてもかまわないから、次の日新しい水に取り替えるまでその水とおきなさいと話しておりました。わかれば飲めるんですから、多少汚くても命にはかえられませんからね。

その後、昭和46年～50年頃に、新耐震設計法という総プロがありましてね。あれは随分苦勞をしました。あそこで少なくとも耐震設計の目的をどこにおくかについての、建築と土木構造物で考え方のすりあわせができたと思います。関東大震災のような超大型の地震に対して被害ゼロなんていうのは無意味な話で、一瞬にして建物が崩壊するとか二つに折れるというカタストロフィックなダメージだけは避けると、橋でいえば落橋はしないということです。ただし、マイナーなダメージは止むをえないということでした。ただし、それ以下の地震に対しては十分もってもらわないといけないということです。

これがベースになって耐震設計の1つの大きなコンセプトになりました。それで、建築と土木がそれぞれ分かれて、一つは建築規準法、一つは道路橋示方書の中に盛り込まれたのですね。

川島：示方書の中に地震時変形性能照査が昭和55年に入りまして、あれが新耐震設計法の成果の1つの現れですね。地震時変形性能照査が、平成2年の道路示方書では地震時保有水平耐力の照査として取り入れられています。

大橋：新潟地震の後は、流動化が問題になりました。調査して見ると、関東地震の時にも東京都内や神奈川県相模原周辺でも相当おきていたんですね。伊豆でも流動化が結構ありましたね。持越ダムがいい例で、液状化して決壊したんですよ。

その後土研の振動研究室の龍岡さんあたりが一所懸命になっていろいろなことを考えられて、今は流動化判定法は実用的に評価されるようになりました。土木手法的には何が効率的で経済的かということが検討され、扇島あたりの地盤改良として大々的に取り上げられたりしましたね。あれは、土木学会の技術開発賞をもらっていますよ。

川島：確かに従来の被害を見てみますと、一つの対策をして、次の地震が起きた時にはまた違ったタイプの被害がおきるということがありますね。最近ですと、橋脚とか支承回りの被害が多いのですが、これはある意味では落橋防止構造の効果があったからだと思います。しかし、今でも構造部分の中では支承部が弱いでしょう。ですから、一つの検証を受けて次の方向を打ち出すということは大事なことです。

大橋：是非、そういうステップが必要だと思います。しかし、これはなかなか、得ようと思ってもそうはいきません。しかし、それができないから一歩も先にすすみませんというわけにもいかない点が重要です。

西川：宮城県沖地震の時は、まだ土木研究所に入ったばかりで被災地に行ってついてまわったんです。連続桁の場合には、まさに地震力が集中するところがやられていました。今考えると日本

の示方書というのは、そもそも単純げたを念頭においた設計体系になっていますね。この間の改訂で連続桁を念頭においた耐震設計法が導入されて、これは新しいと感じたんです。太い橋脚の方に力がより集中するということは理論的にはわかっていながら、それにすっと移行するにはまだ一つ不安を感じているのです。その辺がまさに経験がないところだと思いますね。それがあまりにもネックとなってしまうと、折角の免震設計という考え方ができなくなったのではないかと考えています。免震というのは柱を細くしていくやり方とは全然違って、ゴム支承の挙動を考慮しようということですね。

大橋：免震、免震というとな、橋脚がだんだん細くなるよね。でも金があるんだから、そんなにケチって細くする事はないよとおっしゃるかもしれない。それはそれで行政のポリシーとしてあるから、別に安物を作っている訳ではなくて、前と同じ耐荷力で、同じ耐震性能を持ちながら、安いものができます、あるいは、よりよい物ができますという説明が必要でしょうし、そういう説明が名実ともにできるようになっていくといいですね。

川島：最初の話で連続橋のことなんですが、これは浦河沖地震で静内橋が被害を受けたのが契機となっています。当時基礎研究室の浅沼さんとコンクリート研究室長だった小林さんが、橋脚の分担が単純桁の場合とは違うことが被害原因の一つではないかということを実証されました。それで、こういう研究が必要になって耐震研究室でやったんですね。これは研究というよりはもっと単純な話でして、橋脚の剛性によって下部構造に伝わってくる地震力は非常に違うのです。橋台は非常に剛性が大きいから、橋台の方が慣性力をもってしまふのです。そうすると橋脚の方にはあまり慣性力が加わってこないということになります。こういうことが示方書改訂の土壇場になってでてきたんです。試設計すると、静的フレーム法を用いた新しい方法によりますと、橋台の方は慣性力が今までの2倍になり、橋脚の方は、場合によっては、慣性力が今までの半分になってしまうのです。私は何人かに相談したのですが、意見が2つに分かれたのです。そのようになるのは正しいのだから、それで設計すればいいじゃないかという意見が1つです。もう1つは、橋脚の断面を小さくすれば橋脚が変形しやすくなります。日本では伝統的に橋脚を太くしているので変形しにくい。このため上部構造は耐震設計では決ってこない。したがって、橋脚をどんどんしぼっていきまると、橋脚が分担する慣性力は減って、橋台の方へ慣性力がいってしまいます。最後は、橋脚というのは上下方向の荷重さえ支えられればよいということになりかねません。そうすると橋脚は非常に大きく変形するようになります。上部構造も変形するでしょう。すると上部構造も耐震設計で決まるものがでてくるかもしれない。これは従来被害を受けたことのないタイプの損傷の形態で、この方に一気に進むのはよくないのではないかというのが2つめの意見でした。

大橋：簡単なプレートガーダーでいえば、座屈という形で表れるということですね。

川島：そうです。あの時は、上部構造と下部構造をつなげて耐震設計を考えることが非常に大事だなという印象でした。これまで耐震設計では上部と下部を切り離して、下部だけ考えるということであったのですが、そうではなくてやはり上部と下部を取り入れた橋全体系で考えていかなければならないと思いましたね。

西川：これからは景観面で橋脚の太さをそろえようというものがでてくるでしょうね。なかなか、ハードな計算で断面が全て決められないケースも多々でてくるんじゃないかと思いますね。そういう時に、私が免震設計に期待するのはそういうことで両立できるのではないかという気がするからです。

大橋：支承あたりはどうなんですか。ゴム支承もあるし、従来型のスティーラのすべり支承なりローラー支承もありますけれども。

川島：宮城県沖地震の後には、大橋さんが分科会長を務められて、宮城県沖地震の震害と支承に関する分科会で3年くらい検討されました。当時、西川室長と私の方で支承の被害を仕分けしたのです。あの時に分かったことは鋳鉄製の支承は被害が多いとか、一本アンカー形式に被害が多いとか、移動制限装置の突起部分に断面変化のあるものに被害が出やすいからアールを付けた方がいいとか、そういう結果だったですね。

西川：背の高い支承とか、鉛直荷重に対して水平力の比が大きい支承、橋台に固定をとっている支承はちょっと苦しいということでしたね。

川島：背の高い、例えばピン支承とかが取り付けているフランジ部分が被害を受けやすいのです。宮城県沖地震の場合では柳津大橋ですね。桁が水平力を受けて水平変位するとピンが回転するのですが、これによってフランジやウェブが被害を受けたのです。平成2年の耐震設計編では、ウェブにスティッフナーを入れるように絵を入れたのです。

大橋：あれは、スティッフナーというか支承周りの主桁の方で丁寧を受けてあげれば問題は無かったんです。脊の方にしわ寄せをするのは脊がかわいそうな気がします。

川島：昭和58年くらいだと思いますが、神奈川県と山梨県の県境で地震が起きたのです。東名の酒匂川のあたりの橋で、いずれも橋台に固定支承をとっているピン支承を使った背の高い鋼鉄桁で、ピン支承の回転に伴ってウェブが面外方向に座屈したのです。フランジまでは座屈はしませんでした。これは一見小さい被害に見えますが、地震の規模は小さかったのです。マグニチュード6くらいのものなのです。強震計の記録を見てみますと、地盤面で100galちょっとくらいの振動でした。これが橋脚になりますと300galくらいになるのです。2倍から3倍に増幅しているんです。このクラスの地震でもうすでに損傷を生じているのです。これではいけないと思いましたね。

西川：思わぬ副産物ですが、この部分をコンクリートで巻いて補修したら騒音が減ったということもありましたね。

川島：宮城県沖地震の調査でおもしろかったのはゴム支承ですね。ゴムといっても当時は大部分ゴムパットですが、ゴムパットには被害がなかったのです。あれは多少ずれたとしても被害にはカウントされませんから。他のタイプの支承には被害があったのですが、ゴムパットには被害がなかったのです。

西川：そういうことがあったので、あの時には部品が飛んだものも被害にカウントするのはおかしいんじゃないかという話もあったのです。どこかでヒューズみたいに飛ばした方がいいのではないかいうところまでいったのですが、それを主張するところまではいかなかったのですね。

川島：そうですね。ゴム支承はかなり無理がききますよね。下部構造なり支承まわりの上部なりに被害を出さなくてもすむのです。

西川：最近、ゴム支承をまた別の意味で使いたいという話がでてきました。疲労損傷がいくつかでてきています。スチールの支承とか支承板支承が擦り切れるとか、スチール支承が錆びて動きが鈍くなるとか、支承の上で車が通るたびに桁がたわむんですがここで固定されますから、ソールプレートをつけたところから、疲労クラックが発生するんです。あやうく落橋寸前というものもいくつかありました。やっぱり自由にスムーズに動く、しかも必ずしもピンを中心に桁端が活荷重によって回転したがついていないとは限りませんので、中立軸とピンの中心が違いますから、そこで必ず無理がでます。その点、ゴムならば動きたい方向に動いてくれるだろうということですね。今年か来年は調べてみようとしています、まだ実験には至っていません。これは地震とは直接関係ないですが。

大橋：ゴムについては、最近、大きなものが使われ始めたでしょう。あのようなものは、大きな地震の履歴はまだ受けていないということですね。スチール支承、ローラー支承などは、それぞれ、一長一短はありますが、少なくとも地震の履歴は受けてきて資料として残っていますね。

川島：宮城県沖地震の時に大橋分科会長にお伺いした所、支承というのはやはり1つのヒューズではないかと言われていたのを記憶しています。ある程度以上の力が来たら壊れてもいいのじゃないかという訳です。それによって下部構造に過大な慣性力が作用するのを防げるのです。であれば、最初からそのように設計するかという意見もあったのです。しかし、そこまでいうのはまだ十分ではありませんでしたので、基本的には支承は強くする方向にすると同時に、大きな断面変化は避けてアールをつけようというのが分科会の最終的な結論になったのです。

ですから、背の高いゴム支承を使って免震化するというのは、こういう考えとも一脈通じる点があると思います。支承はヒューズのように切れませんが、そこが大きく変形して、相対変位を吸収して下部構造に過大な力が働くのを防ぐということですね。免震設計については最近いろいろと検討しているんですが、有望な方法だと思いました。免震設計では背の高いゴム支承を使いますから、横方向の剛性が低いのです。そうしますと、多径間連続する場合に温度変化による桁の伸縮に伴って橋脚に作用する水平力が小さくて済むのです。そうすると結構多径間を連続化して長く出来そうなのです。

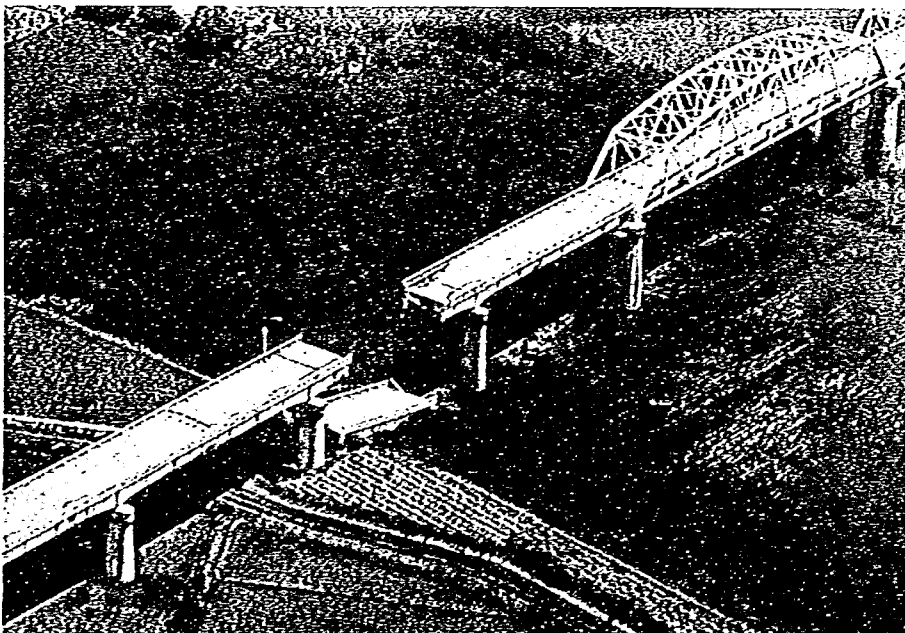


写真-2.3.4 昭和53年宮城県沖地震による錦桜橋のゲルバー部の落橋



写真-2.3.5 昭和53年宮城県沖地震による天王橋の支承部の損傷

大橋：長くというのはスパンですか？

川島：径間も長さもですね。仮に30mスパンで30径間とか35径間を連続しても橋は設計できるのです。もちろん、両端ではそれなりの伸縮長を持った大きなジョイントが必要ですが、途中はノージョイント化が図れるのですね。耐震面から見ても、支承が上部構造と下部構造の接点として多少の無理をきいてくれるというメリットがあって、同時にノージョイント化も図れるという点が免震設計の使い勝手の良いところではないかということが分かってきたんです。

大橋：建設省で、実験橋とかを提供してもらえとか、あるいは将来やるべく関東地建あたりとおやりになるとか、そんな動きはあるんですか。

西川：もう県では出来ていますし、直轄でも何箇所か建設中です。

川島：免震橋に関しましては、最近では珍しいと思うのですが、建設省が主導したのですね。東北地建の能代工事事務所が設計として免震設計が終わったのが一番最初の橋だったのです。ところが事業の進捗が遅くて、静岡県の方が先に完成したのです。これらは本省が橋梁台帳をめぐって選んでいただいたものなのです。

大橋：何径間ですか？

川島：静岡県の宮川橋は3径間です。今、栃木県で作っている橋がPCなんですけど、6径間連続で250～60m、これが一番長いものです。今、委員会の中で検討されているもので免震を使って750～60mくらいでいこうじゃないかというものがあります。早ければ、平成4年度には詳細設計を終わりたいということで今動いています。あと1kmくらいを多径間でいきたいという橋が出て来ました。今までは最大が500mくらいなんですよ。

大橋：それで何スパンですか。

川島：支間長で30mで15スパンとかそれくらいですね。この中には、上前さんのSUダンパーを使った橋が首都高速道路にございます。今までは500mちょっと位ですから、これを免震設計を使って1.5倍から2倍にチャレンジしつつあるという状況ですね。

大橋：最近は強震計の設置は順調に延びていますか。

川島：強震計の方はまあまあ順調です。台数の伸びはそれほどではございませんが、振動研究室が非常に努力してちゃんとメンテナンスをやっています。建設省管理の強震計は、地震がきたらちゃんと記録がとれるのですね。台数ははっきり覚えていませんが、300台くらいは土木研究所の方に記録が集まるような体制になっています。まだまだ不十分ではありますが、着実に集まってくるという状況だと思います。

ただ、現在までに土研で集めた強震記録は、全部で1000波形くらいですね。そのうち実際に使える記録、すなわち地震がどの地震であるかがわかっていて、記録も水平2方向と上下方向が揃っていて、数値化されているという波形は、500波形くらいです。500波形を3成分で割りますと、170記録くらいですね。170を地盤種別が3種類ありますから、1地盤種別あたり平均で50記録くらいですね。そして、50の記録を関東地方とか九州とか地域で割りますと、非常に数が減ってしまうのです。ですから、本当は関東地方と東北地方で同じような地震が起こっても、特性が違うということはわかっているのですが、こういうことを明らかにするためには、今の500波形ではとうてい足りないんです。昭和39年からやってきて現在まで30年間かかって500波形ですね。記録数を1オーダー増やしたいというと、300年位観測を続けなければならない訳です。ですから、まだまだ、現在の台数では不十分で、そこをどうするかということですね。

大橋：なるほど。これは、耐震研究室ではなくて、振動研究室がタッチしているわけですね。

川島：そうです。先ほどの話で福井地震の時、九頭龍川の河口の岩盤では、ほとんど被害は無かったということですが。

大橋：それは私の推定ですが、岩盤の上だから被害が少なかったのだと思っています。

川島：岩盤上と軟弱地盤上の違いがどうかという点もまだはっきり分かっていないのです。これは、山岸さんと関係が深い問題になりますけれども、明石海峡大橋の剛体基礎の解析で、委員会の方でいろいろと検討されました。強震記録の解析では周期の短い所ではスペクトルが大きくて、500gal~600galくらいは簡単にいってしまうのです。それで、従来のように加速度に比例する慣性力をかけると、剛体基礎は非常に苦しくなるというわけで、どうも直感と合わないのですね。それでいろいろな検討をしていて、まだ、これは来島に引き継がれていますが、まだ十分な結論は出ていません。山岸さん、その辺はいかがですか。

山岸：この前も多田安夫さんにお越しいただいてお話を伺ったのですが、このような話は昔からも分かっていた話なのですね。基準化にあたって非常に工学的ジャッジとでも申しましょうか、当時でもかなり苦勞されて明石の基準になっていると思います。ただ、今は解析法が進歩しましたので、計算機をまわせば基礎と地盤の相互作用が計算できる訳ですね。地盤も非常に非線形性が高いのですが、そういうものも組み込めるので、非常に解析技術が進歩しました。これに合わせて考え方も進歩してきたと思います。しかしながら、さきほどお話にもありましたように、実際の地盤の物性も分からないし、データもそういう記録が得られていません。ですから、明石で

は考え方としてはいったん踏み込んでみたんですが、なかなか入力地震動、物性にしても十分なものとはいえないわけですから、一つの流れの中で今後も詰めていかなくてはなりません。

基本的に分からない問題が多くあり、その上社会的要請もあり、それほど耐震だけでものが決まるようになって非常にバランスが悪いということですね。その辺の話を先ほどからいろいろとお伺いしていますが、今後もそういうものを進めていくにあたってどうしたらいいのでしょうか。

大橋：一頃は解析手法が進んで、例えばFEMみたいなものは、関門橋の下部構造をやる頃から実用化されてきたんです。今までやったことのないことをやると、とんでもない応力が出てきて、びっくりして、完全な剛体として弾性計算をやるのと、FEMを使って局部的なものをやるとその結果は全然違う訳ですね。結局、何種類かの方法でやった数値を縦において、だいたいこれとこれがいいということで線を引いたものですね。おおよそ、これより右にはないな、これより左にはないな、ということでデータに直感を含めて、ある程度経験的な判断でできるわけですよ。じゃ、真ん中か、もうちょっと右寄りか左寄りかということはわからないわけです。でも、おおよそその中にあるから、その中である安全率内に入っていると、ただし、1を割るようなことはないということで収まってきていることがあると思いますね。ただ、解析方法が進んできて、かつ、物性も正しくとらえることができればいいけれども、解析手法が進んできて、A法、B法、C法といっていると、だんだん都合の良いものを取りたくなってくるわけです。安易にとるとということは危険な場合が考えられます。ですから、全体を眺めて、完全に特異なデータははねのけて、最右翼のなかに散らばっているデータを良くみて、それに新しい解析手法の助けを借りて、最終的には判断しなくてははいけないのです。明石なんかはそういう点がありますね。

山岸：本四だけでなく、他の公団さんも非常に大きな橋梁について今そういう方向でやっております。

大橋：やはりそうでしょうね。話は変わるけれども、東京湾の12号線ですが、あの吊橋は500mを超えているからね。若戸大橋の時代は、367mで一つの事務所ができたんですよ。その事務所を抱えている局が、半分以上の精力をそこにつきこんで、事務所をバックアップしてやっていたんですよ。首都高速も事務所はあるでしょうけれども、ああいうものが簡単に計画されて、しかも、計画通りに実際化していくというのは、時代が変わってきましたよね。12号線の吊橋は立派なものですよね。昔だったら大騒ぎしていたものです。地盤だって決して良くないところで、ああいうものが進んでいくわけですからね。

川島：そうですね。地震の洗礼があると、それに従っていろいろできてくるわけですね。ただ、みんなで渡れば恐くないとよく言いますが、本当に恐くないかどうかはわからないのです。これは、12号線とは関係ありませんが。地震だって、これまでいろいろとやってきて、どこかでドンということがあるかもしれません。

松田：先ほどの話で出た酒匂川橋ですけれども、あのタイプというのはヒンジタイプで全水平力を一つの橋台でとるタイプなのです。全然、地震の洗礼を受けていないんです。小さな被害はありましたが、もう少し大きな地震が来たらどうかは解析だけでは分からないということです。今は、あのタイプも環境問題であまり使われなくなりました。と申しますのは、フレキシブルに作ってあるものですから、人家があると低周波の問題がありまして、今はもう山の中でしか使われなくなりました。

大橋：むしろ、路線でふっちゃって、橋脚の長さを短くするということですか。

松田：環境問題のあるところは、もう少し剛性の強いもので、メタルボックス桁とかP Cになるのです。これは景観や環境の問題のためですね。それと、もう1つは、うちの方で最近検討していますのは、今までは地震のエネルギーを上部工は全く受け持たないという考え方で上部と下部で分けて考えておりました。先ほど川島室長の方からもございましたように、橋梁全体で考えたかどうかということで地震時の水平力を上部工でも負担するような構造系、つまりラーメン構造になると思うのですけれども、そういうものが私どもの方ではかなり占める割合が多いですね。

大橋：それは、今度の第二東名あたりの構造物の設計の中にこのような考え方を積極的に取入れていこうということですか。

松田：いえ、もうすでに多く取入れられています。第二東名というのができましたけれども、140km²走行をいたしますと、伸縮装置はどうしようかということが問題で、走行性ですとか、サービスや景観の問題になってきます。今、それについて今後どうしようかということで、1kmくらいの連続橋を作っていくためにはどうしたらいいのかということ耐震性をも含めて考えております。うちの方では多径間連続橋ということで、重複アーチ橋というのをやってきたんです。ただ、あれはノージョイント化ということから出発しまして、アーチの補剛桁を止めて、土をいれればジョイントは無くなるのではないかと思います。実はそれが今ないのは、施工の問題があるからなんです。土木というのは、設計者ばかりが机上で考えていても、施工業者がやってくれないと、廃るとでも申しましょうか、あれもプレキャスト化とか中に入れると材料をどうしたらいいとか、いろいろアイディアを出している最中なんです。これからはプレキャスト化を進めていかなくはなかなか進歩していかないように思います。

地震は、いつ起こるか分からないということは皆頭の中では分かっているのですが、いざ、「こちらの方がお金がかかるんです」と言われますと「いや、ちょっと待てよ」というレベルなんですよね。ですから、どこまで投資していいのかというのは、非常に重要な問題だと思います。地震は地震だけで考えるのではなくて、一部使用状態でも寄与するようになるのが求められているような気がしますね。

大橋：土研あたりが面倒を見ている地震計なども、いろいろな波形をとってきて新しい情報を我々に与えてくれることもあるだろうし、あんまり大きな地震がきても困るけれども、局所的に地震があってデータがとれるかもしれません。そういうものを若干期待しながら、今までの耐震設計の考え方なり、コストの問題とか、今の時点で将来の長期計画や長期の布石みたいなものを総合的に、謙虚にレビューしなければならない時期がきているのかもしれないですね。こういうことを念頭におきながら、景観やサービスサビリティ向上の問題、メンテナンスのコストダウンのためにエキスパンションとかはなるべく減らした構造物を使用しながら、かつ耐震性を損なわないものというような方向に少し耐震設計というか耐震の手法が一步リードして受けとめてあげるといいですね。そういう方向が連続橋の問題、免震構造の問題、支承の問題等を含めて、何かいつも橋梁設計におけるその他の付属物という考え方から早く脱却するということが必要条件ですね。そういうことをふまえた上で、橋梁の設計、サービス、景観、環境への対応をより容易にするように耐震エンジニアリングを担当されているあなた方が、その方向に一步足を踏み入れて、地ならしをして、いらっしゃい、いらっしゃいができるようになってほしいということですね。

西川：まさにそれが一番大切なことだと思いますね。今までは、設計という話に対してはほとんど一対一で構造設計が対応しているという意識をもっていました。その他の景観とか環境に対し

てはその他の話として扱ってきましたね。本当は、全てが橋の設計の中に入るものですね。今やっている構造設計の価値が決して下がる訳ではなくて、全体の中の非常に大事な一部分だということを忘れてるんで、なんか窮屈で身動きがとれないところがありますね。

大橋：静的にやってね。動的なものを全て静的に置き換えてやってしまう。必要なものは風洞実験、振動実験、解析をやってということでしょう。もっと、トータルシステムがなくてははいけませんね。

大橋：橋梁計画論みたいなものが少し失せてきてしまったんだね。橋梁計画論みたいなものが必要だね。道路橋示方書の中にはかなりうたい込んであるから、あれを熟読してくださいということですかね。

西川：総括小委員会の若手グループの幹事会をやりまして、是非橋梁計画便覧を作ったらいんじゃないかと。大変な仕事だけれどもやっぱり時間がかかってもやるべきですね。

川島：示方書の全部を満足する橋がベストかという、そうじゃないかも知れないですね。やっぱり今の示方書をかいくぐっていかないと、今の時代にみんながいいと思う橋にはならないかもしれないですね。だからこそ、こういう点が大事だということを耐震設計便覧に書いて欲しいということですね。今日は非常に良いお話を伺えたので、これらを是非書き込んで、耐震設計を含めていろんな新しい提案をまとめて良い橋になるような便覧にしていきたいと考えております。

松田：トータル論がでましたが、まさに免震設計は、トータルだと思うんですね。連続化したいと設計技術者は考えていて、その中で耐震も勉強していただけますね。あれが、耐震だけで出発したらなかなか普及しないと思んですよね。

大橋：耐震工学屋が免震構造をやりたがっていると、それにはシングルでやったってしょうがないんだ、あれは連続でやると一番効果的だから、連続やりたい、連続やりたいといっているんだと世の中に思わせたいいけないんですよ。これからは、こういう構造はいままでとれなかったけれどもこうしなくてはいかんと、そういう意味では古い橋梁計画論をぶち壊さなければいけないんですよ。「Simple is the Best」と「Simple beam is the Best」というのは違うんだから。リーズナブルでしかも十分耐震設計上もそうでないものと比べて遜色がないし、おおよそ同じコストでやれると。そういうことを考えるときには、環境なりいろいろなことを考えて積極的にこういうものをお使いいただいて結構ですよというような具合にしてだんだん世の中を変えていかなくてははいけませんね。特にコンサルタントの人は現場の経験が少ないわけね。施工管理者あたりで現場に出てそれなりに現場を勉強しておられるけれども、公団等の現場で設計をやり積算をやり、仕様書を書き、そして業者とやっていくというほどの深さじゃないですからね。そういう人達に、意識の改革を徐々にしてもらおうようなことが必要です。道路協会にいるあなた方が、トータルジャパンでいろんな情報を得て、そういう情報を整理して送り出すという立場にある人達がしなければならないですね。

そんなところですかね。あまり、頭を整理しないでやっていろいろなことに飛んでしまいました。

一同：どうもありがとうございました。

2. 4 栗林 栄一氏

(1) 日 時： 平成5年10月15日(金) 14:00～16:00

(2) 場 所： 日本道路協会 特別会議室

(3) 出席者： 栗林 栄一 豊橋技術科学大学教授
大井 健一郎 建設省道路局企画課道路防災対策室課長補佐
運上 茂樹 土木研究所耐震研究室主任研究員
中島 燈 土木研究所耐震研究室研究員
山本 茂樹 本州四国連絡橋公団設計部設計第3課長代理
竹田 哲夫 鹿島建設(株)技術研究所第1研究部第2研究室長



写真-2.4.1 栗林 栄一氏

運上：本日は、栗林先生には大変お忙しい中を、お時間をいただきありがとうございます。現在、耐震設計分科会で道路橋耐震設計便覧を作成しており、その中に、将来の道路橋の耐震設計をどのように考えていけばよいのかということを書き記述したいと考えております。これに関して、耐震設計分科会の中でもいろいろな意見がでておりますがなかなかまとまりません。このため諸先輩のご意見を伺ってみようということが提案され、本日は、栗林先生にお願いした次第であります。

はじめに、出席者を紹介させていただきます。建設本省道路局企画課の大井課長補佐、本州四国連絡橋公団の山本課長代理、鹿島建設技術研究所の竹田室長、及び土木研究所耐震研究室の中島、運上でございます。

本日は、大きく三つ位のテーマを考えております。第一には過去の地震被害の教訓から道路橋の耐震設計はどうあるべきか、第二には先生は長大橋の耐震設計に関する研究を多くされていると存じますので、その方面から一般の道路橋についてどうか、第三には将来の道路橋の耐震設計はこうあるべきではないかといった点についてご意見をいただければと考えております。テーマとしては分けておりますが、全くフリーな形で進めたいと考えておりますのでよろしくお願いします。

まず最初に、地震被害の教訓についていかがでしょうか。

栗林：新潟地震の頃は、橋を落とさないようにするというのが中心的な課題でした。とにかく少しでもくらいずれてもかまわないという発想でした。そのためには、基礎の設計が重要であり、地盤の調査や液状化についての検討を行わなければならないということでした。これらを全部積み上げていった結果、橋梁はものすごく値段のはるものになってきました。今後、公共事業費が減っていくことが予想されるため、多少弱くても落橋はしない、費用のかからない橋をつくることを考えていかなければならないと考えています。

運上：費用がかからなくて落ちない橋とは、どのようなイメージの橋ですか？

栗林：橋脚を減らし、支間を延ばすことです。また、川を斜めに横断させないようにすることが考えられます。橋を落ちないようにするには、なるべく連続橋にすることと、ダンパー等のストッパーを設置することも考えられます。



写真-2.4.2 座談会出席者

大井：一昨日に道路審議会の基本政策部会が開催されまして、その中で維持修繕のための保全部会から、先生がいわれたようにジョイントの問題で橋は連続化した方がよいという提案がありました。土木研究所でも研究している免震橋梁というのがありますが、それはどのくらいまで普及するかというのが今後の課題です。また、既設橋梁のノージョイント化を実施する場合には、一晩でそのジョイントを取り替えることはできないので、まずどこかに代替路線が必要になるといった問題があります。これらのネットワークの整備といったことも重要です。

栗林：少し大胆な措置もとれるようにしなければ、工事はできないでしょう。現在、橋はメンテナンスや修理が間に合わなく、道路交通に耐えられなくなってきました。構造物は補修しなければだんだん痛んでいくわけですし、本来の機能が不十分であれば地震に強くても意味がないといえます。

それから、交通を止めるということですが、止めることが社会的に問題であるということもありますが、橋はボロボロでしょう。何とかして止めて十分な補修を行うべきだと思います。

大井：何年か前から、補修のために新幹線を半日だけ止めるということをやりました。それから道路の方でも、高速道路は止めれるんじゃないかという発想でやり始めました。しかし、止めたときに現交通をどちらに回すのかが問題であり、代替路線があれば問題は少ないわけです。

栗林：不景気が深刻化していくと、車も走らなくなるかもしれません。これからは、せいぜい代替路線を作るくらいでだんだん新しいものは作れなくなってくるでしょうから、今のものをうまく使うという工夫が必要だと思います。

運上：現橋をどう使っていくかということは、大変重要なことだと考えています。これから新しい橋を作っていく場合には、橋を長期に渡って有効に活用していくために、メンテナンスの面を考慮する必要がありますし、地震による被害もなくしていかなければなりません。そこで、今後の橋の進むべき一つの方向として、メンテナンス面と耐震面からご意見ありますでしょうか。

栗林：昔の国鉄の基準を勉強したらいかかだと思います。この基準は、ほとんどが維持基準で、設計基準なんかはほとんど書いてありません。すなわち、よく点検しろということを行っています。道路の分野では、そういったエンジニアリングがまだ育っていないと思います。橋を作る時には先端をいくけれど、できてしまったらもう知りませんよという感じがあります。

竹田：先ほど、橋の連続化についてのお話がありましたが、私どもでは主にコンクリート橋をやっておりまして、橋をラーメン化することは耐震性を上げ、メンテナンス面にもいい方法だと思っているのですが、いかがでしょうか。

栗林：昔、メナーゼヒンジの橋を長野県などで作りましたが、しばらくするとヒンジが全然動かなくなってしまったということがあります。しかし、その後全く支障はなかったといわれています。

サンフランシスコで落ちた橋のようなのはだめでしょう。サンフランシスコに高速道路ができたのが1956年で、あの高架橋ができたのが1958年ですから、初期の資金がない頃のもんです。米国の北部の方では、下部が木造のものもあります。しかし、木造のものは乾燥しているので40年近く経った今も保っています。この頃のアメリカでの橋の設計は、お金をかけないという発想だったのです。



写真-2.4.3 1989年米国ロマプリエータ地震によるサイプレス高架橋の崩壊

運上：昭和53年の宮城県沖地震では、橋のRC橋脚や支承部に損傷が多く発生しましたが、先生の宮城県沖地震についての印象はどのようなものでしょうか。

栗林：橋が被害を受けたという印象はあまりありません。修理中の錦桜橋が落ちましたが、被害は軽いと思いました。何故かという、名前は忘れましたがある鉄道の全線がだめになってしまうという非常に大きな被害があったためです。多分、その会社は倒産したと思いますよ。私は、支承がずれたぐらいなら大したことはないと思います。貧しい国では、それぐらいの被害は被害だとは思わないでしょう。新潟地震の時でも、大きな橋で支承がずれたのがありました。知らんぷりでした。まあ、あの頃は貧乏だったです。できることならば、そのような被害もないにこしたことはないと思います。

運上：今の道路橋の耐震設計では、震度法では比較的起こり得るM7の規模で50キロぐらいの地震を想定しています。地震時保有水平耐力の照査では、M8の規模で50キロぐらいで、関東地震を想定しています。宮城県沖地震の規模と被害から見て、今の耐震設計の考え方をどのように思いますか。

栗林：やはり住宅が壊れるように本来は橋も壊れなければおかしいでしょう。そこで橋の方が全然壊れないようであれば、費用のかけすぎかもしれません。全然壊れないようにする必要はないと思います。

大井：高速道路とか主要な国道などを緊急輸送路として指定し、地震後の避難とか復旧資機材の輸送に使えるようにしています。このような路線については、耐震設計を十分強化しようと考えているんですが、このことについてはどうお考えでしょうか。

栗林：避難路は必要だと思いますが、緊急輸送路は必要ないと思います。大きな地震がきてもそれほど壊れないと思います。

運上：関東地震クラスでも大丈夫でしょうか。

栗林：関東地震では横浜で被害が大きかった。東京は火災が大きかっただけで地震動で壊れたのは、1～2%位です。1～2%というと、老朽家屋だけです。だから、関東地震クラスの地震があっても首都公団の橋が落ちることはないでしょう。老朽化した橋があれば、それは問題であり、これについての対処を考えていく必要があります。

中島：先ほど、主要な道路を緊急車両の交通を確保するための道路として使うよりも、避難路としての小さな道路を整備する方が重要であるといわれましたが、緊急車両の交通を確保する道路も整備することは重要だと思うのですがいかがでしょうか。

栗林：緊急輸送の手段としてヘリコプターがあります。まず必要になるのは、医者だと思いますが、都会なら医者はかなりいるから心配ないです。北海道南西沖地震でも自衛隊が飛行機で奥尻島へ渡っています。

大井：山岳地で道路をつくる場合、山を切り盛りして造ると雨や地震により崩れる心配があります。そういう場所は、安全な施工方法としてトンネルや橋にしようと考えますが、どこを強く安全なものにするのかを判断するのは非常に難しいと思います。

栗林：どこが災害によって崩れるかを予測することは無理だと思います。アメリカのような開けた平坦な国でも雨によりしょっちゅう山崩れが発生しています。山岳道路には多少危険があってもやむをえないと思います。しかし、急傾斜地であっても街路だけは強く安全なものにした方がいいと思います。

運上：ほとんど人が住んでいないような地域よりも、人が多い地域に重点をおいて耐震性を向上させるといったことも必要ないでしょうか。そのようにすれば、都市部が非常に重要になります。都市と地方とを分けるような設計方法をきめ細かく必要があると思うのですが。

栗林：そこまで考える必要はないと思います。地域の特性を自分自身で考慮して作っていくしかないでしょう。そのためには、今の設計水準をもっと低めるというのもひとつの考え方だと思います。設計要領の文章を「しなければならない」ではなくて、「した方がよい」という感じで、そのような姿勢の変え方はあると思います。造りたいというものがあれば指針によらずに、地方自治体レベルで判断して造ることができるようなイメージです。指針はあくまでも目安であるということです。

竹田：現在、橋脚については道路橋示方書によって、0.2から0.3の設計震度と関東大震災クラスのものについて検討を行っていますが、基礎については関東地震クラスに対する検討は行っていません。基礎が重要だということであれば、今後、基礎についても橋脚と同様に関東地震クラスの地震に対する検討が必要になるのでしょうか。

栗林：基礎について調べ始めたのは新潟地震以降からで、それまでは、橋梁工学の先生方はけっこうたくさんいましたが、皆上部工ばかりを研究していました。新潟地震がきて、パイルベント基礎が被害を受けて、基礎についてもなんとかしなければならないということで本格的な研究が進みました。

ただ、そんなに時間をかける必要はないと思います。十分な耐力を確保するように、構造細目

などで縛っておけばいいと思います。結局理づめでやれといわれたってどうにもならないでしょう。地盤という非常に不確定なものがありますから、基礎にどんな力がかかるかは本当のところよくわからないと思います。

運上：橋脚の場合には大地震時でもかぶりコンクリートが剥離した段階で止めようとする考えから安全率を設定していますが、基礎の場合は関東地震クラスの最大地震に対してどこまでの損傷を許していいのかということについてはいかがでしょうか。復旧にあたっては、基礎は土の下に埋まっているものなので作り替えるということは非常に大変だと思います。

栗林：杭とフーチングの接続がどのようになっているのかが問題だと思います。実際には、あまりうまく接続されていないのではないかと考えられます。

竹田：私はあまり地震被害の現場を見たことがないんですけれども、一般的な話として、橋は総合的に見て柔らかい地盤と堅い地盤ではどちらの方が被害が多いのでしょうか。

栗林：柔らかい地盤でしょう。おそらく地震だけのせいではなく、普段から疲労などにより杭が痛んでいると思います。ロサンゼルス地震の時、地震記録は1gを越えていましたが、そこにあったアーチダムにはほとんど被害はありませんでした。ダムの周りに薬液などを注入したりして丈夫にしたためで、やはり堅い地盤の方が構造物の被害は小さいと考えられます。

運上：釧路沖地震の時に釧路で900gal以上という大きな加速度記録がとれたのですが、被害は相対的には少なかった。これについてはどうお考えでしょうか。

栗林：きっと気象台の地震計が壊れていたんじゃないのかな。あれは、たしか昭和27年ごろつけたものです。

運上：土木研究所では大楽毛橋と温根沼大橋に地震計を設置しています。その記録をみると、釧路市内の大楽毛橋の地表面で220gal、橋脚上で400galぐらいあったと思います。また、根室市に近い温根沼大橋の橋脚で450galぐらいでした。最大加速度と構造物の被害の考え方についてはどのようにお考えでしょうか。

栗林：設計の考え方で困るのは、安定照査です。転倒の照査なんて根底から考え直した方がいいと思います。全く事実と関係ないことを議論していると思います。瞬間的に力が作用しているのですから倒れるわけではないのです。従来の計算ではみんな倒れてしまわないとならないが実際には倒れていない。実証されているのにもかかわらず、我々はこの照査をずっとやってきたんです。

滑動については、ダムの考え方を取り入れるといいと思います。基本的に岩盤の強度は堤体の強度より弱いので、ダムでは摩擦強度と岩盤の強度とを足してそれを接触面の強度として設計しています。物理的には全く無意味ですが、橋のように架空の安全を計算するとダムは滑ってしまうことになるのです。転倒で決まりましたよとか、滑動で決まりましたよというのは本来はおかしいと思います。

運上：栗林先生が出された土木研究所報告の中に、転倒に関する多くの研究成果が書かれています。その中で、非線形な浮き上がりを考慮した際の設計震度の補正法がありましたが、本州四国連絡橋の検討の中では、非線形の補正は考慮しなかったと思いますが、これはどのような理由からでしょうか。

栗林：当時、私は直接基礎に作用する荷重の合力の作用位置が底面幅の $1/3$ 以内というのはおかしいと言っていました。非線形領域を考慮した場合には、 $1/6$ でもよいと言っていました。しかし、多くの先生方はその意見を取り入れてはくれませんでした。伝統的手法に従わなければならないという意見でした。結局、妥協して $1/3$ になったのです。

運上：私は最近、佐野先生の「家屋構造論」という本を見させていただいたのですが、その中に震度の定義ということで地盤の上に石がのっている絵が書いてありました。そこで、その石が地震によって動き始めるのが $0.2 \sim 0.4$ くらいの震度の時なので、 0.2 くらいの震度を設計に使うようになったとありました。橋の応答を考慮すると桁で 200 gal 程度の加速度応答であれば地盤では $75 \sim 100 \text{ gal}$ 程度ではないかと言われます。その点はどう考えられますでしょうか。

栗林：設計震度 0.2 というのは、あくまでも目安だと思います。研究者は設計震度が 0.2 であれば地盤では何 gal になると言ってもかまわないと思います。しかし、設計はあくまでも目安でやるわけですから、それはもう判断だと思います。いわば政策ともいえます。

佐野利器先生は、サンフランシスコ地震（ 1906 年）の被害地域を調査して、関東地震（ 1923 年）の前に、東京や横浜は設計震度 0.1 をとるべきであると提案しましたが、当時は誰もこの話を聞き入れませんでした。アメリカでは、ゴールデンゲート橋の設計で日本の設計震度 0.1 を引用して使うようになりました。また、入力地震動も 0.1 に設定しています。設計震度の設定は、あくまでも政策の問題だと思います。実際の地震を設計震度として表わすのは難しいと思います。

大井：地震が発生した場合には、構造物にどれくらいの力が作用するかというのは、地震の規模、距離、構造物の形によって違ってきます。そのため、設計に用いる地震力は安全度を考慮して設定しているので、実際に地震が発生しても構造物は大丈夫であるという説明は一般論としての説明になります。

栗林：現在、最も安全度をクリティカルに導き出しているのは、原子力発電所でしょう。これと比べてみれば、道路は楽だと思います。地震に対して道路にはこれだけの危険の確率がありますと言います。言いやすいと思います。「あなたの住んでる家はどれだけ強いんですか、橋はそれよりもかなり強く作られています。」と言うこともできます。

大井：北海道南西沖地震が発生した時に、このような地震が関東で発生した場合には、どのような状況になりますかという取材がありました。私どもでは、色々な文献を参考にして、関東大地震クラスの地震が発生しても、橋が落橋したり、大きな被害を受けたりはしないでしょうと考えていますが、いかがでしょうか。

栗林：実際には、 10 の -4 乗くらいの被害はあると思います。やはり、見落としなんかがありますよ。もう時効ですが、昔、複鉄筋の本数を勘違いして半分にしてしまったことがあります。そういう問題は、無いとは言えないでしょう。 10 の -4 乗くらいの危険の確率はあると思います。しかし、そういうことを根拠に危険度があると言う必要はないと思います。まあ、おそらく被害があるのはそれ以下だと思います。関東地震では、被害を受けたのは 10 の -4 乗くらいのオーダーです。

運上：現在までに振動によって落橋した橋は 15 橋程度であり、確かに落橋に至った橋というの

は実質的にはあまり無かったと思います。

大井：先日、私は川島室長と一緒に北海道南西沖地震の調査に行きまして、奥尻島や函館などを回りました。函館では震度4を記録しましたが、そこでは落橋した橋はありません。しかし、アバットが傷んでいる橋が何橋かありました。それは、アバット背面土の力がパラペットにかかり、支承が損傷を受けていました。被害は軽微でありますから、車両は通していました。ここで感じたことは、支えとなる土構造物の耐震性が十分でないということです。

栗林：盛土は安全性が低いと思います。盛土は耐震設計は行っていないでしょう。むしろ施工法が問題だと思います。北海道南西沖地震で被害を受けた地域は、ほとんどが火山灰でしょう。昔の道路工法は、悪い地盤は全て取り除いて造っていましたから問題ないと思います。しかし、最近はこのような工法は行われていません。今さら昔の工法には戻れませんが。

大井：やはり、昔は地盤の良い所を選んで作っていました。最近は場所が無くなり、水田などの軟弱な地盤に道路を作るようになってきています。ただし、土構造物は復旧は早いです。橋が落橋した場合は、復旧に時間がかかります。

運上：液状化の判定法は、新潟県沖地震が発生して昭和46年の道路橋耐震設計指針に基準化され、F₁法が55年の道路橋示方書に入りました。関東大地震のようなもっと大きな地震の場合の判定法を今後検討していく必要があると思います。

栗林：あれは原始的な設計法です。まず、根本的な現象を解明していかななくてはならないと思います。関東地震の時には、震源地付近の小田原を流れる相模川などでは昔架けた木杭の橋の橋脚が田圃の中に浮かび上がったそうです。今後も検討が必要と考えます。

運上：水中に設計される基礎は、地震による動水圧を付加重量として考えますが、本州四国連絡橋では、実際は波がバシャバシャとあたるので、そのような考え方を見直す必要があるのではないかと議論があったそうですが。



写真-2.4.4 大正12年関東地震による馬入橋の井筒の浮き上がり

栗林：そういう議論はありました。これらの研究は、電中研の畑中、九州大学の小坪、京都大学の後藤、電力中研の桜井などの各先生などが行っていますが、全員荷重効果について研究しています。抑制効果の方を研究している人はいないのです。抑制効果に関する研究をする人が出てきてもいいと思います。

山本：私どもは、動水圧についての勉強を始めてまして、最初はとりあえず文献を整理しました。今後は、運輸省の試験台を使った実験を行っていかねばならないと考えています。動水圧は、水深が大きいほど影響が大きくなります。今は動水圧は敵になってますが、これを味方にするのができれば長大橋としては非常に楽になりますので、そういった点も考えていきたいと思っています。

栗林：そうですね。動水圧を制震作用に利用する考えはありますね。

山本：もう一点教えていただきたいんですけど、我々は耐震設計上の地盤種別を決める際にはVsを重視しています。明石海峡大橋でもVsを使って設計しました。このVs値を求めるには色々な方法がありますが、我々が研究した中では、それらの方法によって値に差があることがわかりました。この点についてどのようにお考えでしょうか。

栗林：技術革新のおかげで現在では岩盤を目視確認できるようになりました。岩を見分けるということが大切だと思います。我々が目で見ても非常に堅いと思う岩盤でも、弾性係数は12,000kgf/cm²程度で非常に小さいのです。しかし、これの弾性波を計測すると結構大きな値が出たりするのですよ。

運上：さて、将来の道路橋における耐震設計の方向ということで、震災対策を含めてどのような方向に進んだら良いのかということについてご意見をいただきたいと思っています。先ほど、皆様から橋脚の数を減らし連続化すること、ラーメン構造、土と構造物との接点などの話がありましたが、これら以外で今後望ましいと考えられる構造と、その耐震設計についてご意見いただけますでしょうか。

栗林：これからは、一体構造物が多くなってきます。一例を引けば、地下鉄の場合では、地表面より下は土木の基準で、地表面より上は別の基準により構造設計しているところが一つ問題でした。ちょうどいいチャンスだと思います。少なくとも道路の方が建築物よりも耐震性が優れていると思います。今後道路としてどのような姿勢でやっていくかだと思いますね。

運上：一体構造物の基準の統一などは難しいでしょうか。

栗林：統一の問題はありますが、行政法というものが本来バラバラなものですから、それらを統一するということは行き過ぎだと思います。したがって、どのような姿勢で行くのが重要です。にじり寄る姿勢で行くか、つっぱねる姿勢で行くか。とはいっても、現在の都市部での道路事業は用地、騒音等から道路を造らせてもらうというにじり寄りの姿勢で進められていますね。

竹田：今までの橋は、どちらかというと桁橋のイメージがあったように思いますが、近年桁橋以外にも斜張橋、アーチ橋等が建設されるようになってきました。今後の新しい型式の橋についてどのようにお考えでしょうか。

栗林：鋼製の橋からコンクリートの橋に変わってきています。これはやはり、騒音や振動のことを考えれば当然の結果だと思います。どちらが耐久性の面で長持ちするかは分かりませんが、点検とメンテナンスの面には十分配慮すべきだと思います。

大井：この間の鹿児島県の豪雨では、橋の下部工が抜けて流されてしまいましたが、上部工は残っているということがありました。新しい橋は落ちるようなことはないと思いますが、耐震設計ができる前に造られた橋はまだかなり残っています。これらに対して、現在、補修が困難な場合、架け替えるという方向で事業を進めています。

山本：行政的な話になるかもしれませんが、例えば、自動車荷重がTL25になるという話があります。そうすると、上部工の補強案などができると思いますが、基礎についてはなかなかできないと思います。基礎の補強はとても難しいからです。したがって、それを先取りしたような考え方で、基礎だけを強く造るというのはどうなのでしょう。上部工の安全率と基礎の安全率などで将来を見越した安全率の考え方も必要だと思います。

栗林：やはり、基礎についても補強する方向で考えていくべきだと思います。

運上：橋全体を考えた場合、ある程度は被害はでるかもしれないが、その被害をどこで発生させるかという話があると思います。すなわち、ヒューズをどこに置くかということです。現状の設計ではまだかなり不十分なところがありますが、先ほど竹田さんがおっしゃった基礎と支承は通常の震度法による設計で、橋脚だけは地震時保有水平耐力の照査を行うということで、設計法としてのバランスはまだまだ改良していかなければならないと思います。最終的には安全率でバランスされて、何かあったときにもどこかで逃がしてやるとか、最終的にはそういう限界状態の安全率が均一化されている構造物の設計の考え方があると思います。これについてはどうでしょうか。

栗林：ヒューズはやはり補修がしやすい上部工に置くべきだと思います。しわよせを下部工にもっていくのは良いとは思いません。ただし、路線の特性とか場所によって異なるとは思いますが。現在抱えている難しい問題の一つだと思います。

大井：現在一番困っているのは、道路の中に埋め込んである占用物件です。占用物件の耐震化をどのようにやるのかということを考えています。

栗林：道路敷地内に他のものを占用させるというのは、基本的には欧米諸国の真似をしたのだと思います。新しい団地の開発などでは、団地の区分所有者の敷地内に電柱を建てるようになってきています。道路法を変えた方がいいと思います。

運上：まだまだ話は尽きませんが、予定の時間を大分オーバーしてしまいました。地震被害、耐震設計上の課題、将来の道路橋の方向、技術基準のあり方など、多方面のご意見を賜りました。これら貴重なお話を私どもの方でよくかみ砕き、耐震設計便覧の作成に反映させたいと思います。

一同：大変ありがとうございました。

2. 5 岩崎敏男氏

(1) 日 時： 平成5年4月21日(水) 12:30~14:30

(2) 場 所： 日本道路協会 特別会議室

(3) 出席者： 岩崎 敏男 前土木研究所長
川島 一彦 耐震設計分科会長(土木研究所耐震研究室長)
大塚 久哲 土木研究所振動研究室長
運上 茂樹 土木研究所耐震研究室主任研究員
杉田 秀樹 土木研究所耐震研究室研究員
水口 和之 日本道路公団技術部構造技術課
南莊 淳 阪神高速道路公団工務部設計課設計係長



写真-2.5.1 岩崎 敏男氏

川島：今日は、岩崎前分科会長にはたいへんお忙しい中を、お時間をとっていただき、大変ありがとうございます。現在、耐震設計分科会では、道路橋耐震設計便覧の作成を行っております。作業開始から約2年が経過して、ほぼ7割程度が完成した段階です。この中では、どういう橋が耐震設計の観点からよいのかという点が一番の懸案となっております。これに関して、耐震設計分科会の中でもいろいろな意見がでており、諸先輩のご意見を伺ってみようということが分科会の中で提案されました。今日は、その第4弾として、岩崎前分科会長にお願いした次第であります。

今日は、特に何もストーリーは決めてごしません。自由にご意見を伺う形で、1時間半ぐらいでお話をいただければと考えています。どうぞよろしくお願いします。

杉田：はじめに、出席者を簡単に紹介させていただきます。土木研究所から耐震研究室の川島室長、振動研究室の大塚室長、耐震研究室の運上主任研究員、日本道路公団から技術部構造技術課の水口氏、阪神高速道路公団から工務部設計課の南荘設計係長、及び、本日司会を努めさせていただきます土木研究所耐震研究室の杉田でございます。今日は、大きく2つくらいのテーマについて伺えればと考えています。1つめは、これまでいろいろな地震被害の調査されている中で、広い意味から今後道路橋がどうあるべきかという観点から見た時に、特に印象をお持ちの被害とか、注意すべきとお考えになる被害形態について、お話を伺えればと存じます。もう1つは、将来あるべき道路橋の姿を検討していく上で、このような研究が必要ではないかという点に関して、ご意見やご提案をいただければと存じております。

岩崎：今日は簡単な資料を持参して参りました（別添）。2つのテーマを挙げられましたが、どちらかといえば2つめのテーマが中心になろうかと思えます。なぜなら、どういうタイプの橋が耐震設計上よいかということは、一概にはなかなかいえないと考えるからです。様々な特徴を持つ様々な橋がありますが、耐震設計上大きな問題のあるものは少ないのではないのでしょうか。木橋などは例外ですが、日本で現在作られている橋はどのタイプの橋にせよ、若干の注意点はあるものの、特にこのタイプの橋の耐震性に問題が多いということはあまり感じておりません。工夫をしさえすれば、どのタイプであっても、さほど問題はないのではないかと思います。



写真-2.5.2 座談会出席者

資料には、橋梁の耐震設計に関して、私なりの懸案事項を5項目ほどにまとめています。まず、1項目めは、地震被害からできるかぎり学び、これに基づいて設計基準を作成していただきたいということです。このためには、まず、実際の破壊状態を十分に現地で調査して、必要に応じて強震記録の解析や理論解析を行い、さらには模型を用いた実験を行っていくことが大事です。このような中から、道路橋の破壊がどのようなパターンで起こり得るかを明らかにし、これを設計方法に反映していくことが重要です。現状は、適切な安全率を見込んだ上での力に対する設計法が主流ですが、これからは変形に対しても十分な安全性を求める設計に移行していくのではないかと考えています。

例えば、1つの破壊パターンとして、砂質地盤の液状化に起因する昭和大橋の被災があります。このような破壊パターンに対する設計方法を開発するためには、まず、液状化の発生に関する検討が必要です。このためには、詳しい地盤調査や、どの程度の地震動をどのような確率で期待すべきかという地震動の設定の問題などが大事だと思います。このような検討を行った上で、液状化が発生しないと判断できるのであれば液状化に起因する破壊パターンの検討は終わりますが、液状化の可能性があるのであれば、それがどの程度橋に悪い影響を与えるかという検討に入らなければなりません。予想される変形量や応力度があまり大きくなければ、構造寸法を変更する必要はありませんが、影響が大きい場合には、部分的な地形の改良なども重要になります。水位も含めて、地表面の形状がよくない箇所に橋を作らなければならない場合もあります。この場合、地盤改良には多額の費用がかかりますが、表面の土を少し動かすなど大きな意味でのならし工事を行えば、液状化は生じても流動化は生じさせないといった工夫もあります。崖縁のような箇所に橋脚を作るのは非常に危険ですが、そういう箇所では、深くなってもかまわないから、あらかじめ地形をならしておくことも有効でしょう。北海道では、実際にこのような工夫をしている箇所があります。地形がよくない箇所に橋脚を設ける場合には、このような地盤の改良も設計の一部だと思います。これだけで十分でない場合には、杭の本数を増やすとか、ケーソンを大きくするとか、基礎や下部構造の形状を少し工夫することで、悪い影響を最小限にできると思います。このような設計体系を作っていく必要があると考えています。これは、実際には、なかなか大変だと思いますが……。

液状化の例を出しましたが、液状化が道路橋に与える影響は、必ずしも定量的に解明されているわけではありません。判定方法については比較的研究が進んでいますが、液状化がどのように影響を与えて橋を壊すのかということになると、解明されていない点が多いのが現状です。昭和大橋のように、明らかに液状化によって壊れたものもありますが、地震による液状化の経験が多数ある中で、液状化により橋がこわれたかということ、大部分の橋はそうではない。したがって、液状化が橋に対してクリティカルになるのはどのような場合であるかを解明しなければならないでしょう。液状化については、まだ研究を行うべき項目が非常に多いと思います。

液状化に関する現状の規定には、液状化に対する抵抗率 F_L 、液状化による浮き上がりに対する安全率 F_S 、地盤ばね定数の低減係数 D_E 、などが定められています。 F_L については、浜田先生らの研究によってかなり詰められています。 F_S についても物理的にある程度詰められています、 D_E については必ずしも物理的に詰められているわけではない。現状では、工学的な判断に基づいて定められているわけですから、こうした点を今後の課題として研究していただきたいと思います。

同じ地震でも、ある橋は破壊され、ほぼ同一の条件にある橋が無傷で残る場合があります。また、同じ橋の中でも、大きな被害を受ける部分と、無傷の部分がある。このような差が何故生じるのかを検討する好例としては、1962年の新潟地震における昭和大橋を挙げることができます。10数径間のうち7～8径間はほとんど無傷で残っていたため、大型のトラックを持ち込んで自由振動実験を行いました。リュックサックに地震計を詰め込んで汽車に乗ったことが今も印象に残っています。この実験から昭和大橋の固有周期及び減衰定数を算定し、この値を使って地

盤ばねの解析を行いました。多分、実際に被災した橋について、様々な角度から応答解析を行った最初の例が昭和大橋であろうと思います。建築の専門家も、この頃には、ここまで詳細な解析は行っていなかったと記憶しています。このような、実被害に基づく調査及び解析をぜひ続けて欲しいですね。

新潟地震から約20年後、1982年の浦河沖地震によって、北海道開発局室蘭開発建設部の静内橋が被災しました。静内橋では、橋脚が大規模なせん断破壊を生じました。この時には、昭和大橋で行った調査の他に、地盤調査、材料強度試験、室内模型実験など、かなりつまこんだ調査を行いました。材料試験については、北海道開発局の試験所に依頼しました。厳寒のためにコンクリート強度が十分でないのではとの懸念もありましたが、問題ありませんでした。室内模型実験はつくばで行いました。1/5スケールの橋脚模型を10体程度用いて、どのような現象がおきたのかについてほとんどの点が解明できました。さらに、弾塑性解析など、多方面の角度から検討を加えました。解析結果は、土木研究所資料にまとめてあります。

ほとんどの現象は解析によって解明できたのですが、1つだけ今でもわからないことがあります。解析によれば、右岸のP1橋脚は、P2橋脚やP3橋脚と同じように被災していなければおかしいのに被災していない。何度か現場に確認したのですが、壊れていないとのことでした。橋脚の根元にクラックがあるはずだから見れくれという、見たけどありませんでしたとのこと。さらに、写真はとったかと聞くと、写真はとっていないとのこと、本当かどうか今だに疑問に思っているのです。時間があれば、ぜひ自分で掘り返してみたいと考えています（笑）。橋脚は、震災復旧でかなり断面が大きくなりました。2.1mであった直径が、5mになりました。さらに、万が一にも将来の地震で壊れることがないように、橋脚の回りは厚い鉄板を巻いて補強されています。これは少しやりすぎかともおもいますが（笑）。

1つの地震で、ある橋は壊れても、ほぼ同じ条件にある別の橋は壊れないことがあります。また、同じ橋でも、ある部分は壊れ、ある部分は壊れないこともあります。ほとんど同じ条件に見えても、何か差があるんですね。他の条件はほとんど同じなのに、わずかに条件が違っていると非常に大きな差がでる。幾度も地震被害を調査した経験からいえば、この差を説明できるような解析法や、この差を反映できるような基準を作っていくことが大事だと思います。わずかな設計条件の違いが、結果的に、非常に大きな影響を与えることになりますので、基準に反映するには難しい面もあると思いますが、このような方向だけは見失わないようにしていただきたいですね。

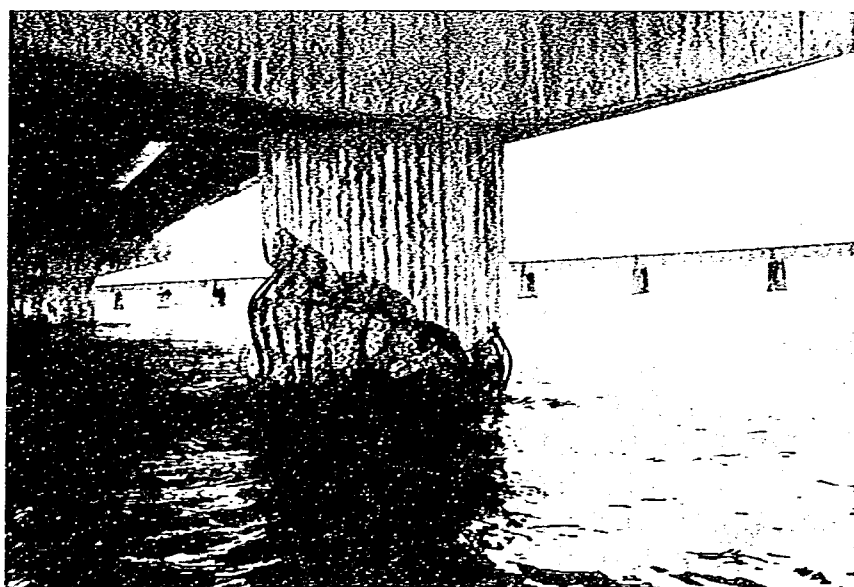


写真-2.5.3 昭和57年浦河沖地震による静内橋の橋脚の損傷

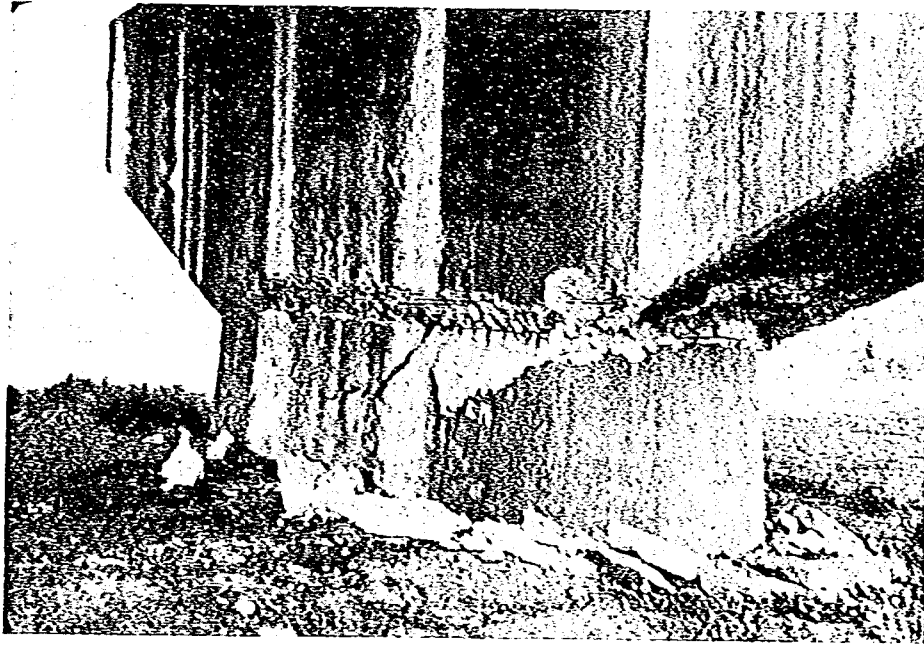


写真-2.5.4 昭和54年宮城県沖地震による千代大橋の橋脚の損傷

川島：新潟地震と浦河沖地震が現在の耐震設計に大きな影響を与えているということを、改めて感じました。静内橋については、岩崎前分科会長の下で調査させていただきました。静内橋の被害調査結果は、大きく2つの点で現在の道路橋示方書に反映されていると思います。1つめは、段落としの規定です。段落としの規定は昭和55年の示方書で改訂されましたから、厳密には昭和53年の宮城県沖地震の被害に基づいていますが、本格的な段落としに対する点検や補強は、浦河沖地震を契機として始まっています。現在も、土研や首都高などの機関で実験的な検討を行っており、また、この規定に基づいた耐震補強が各方面でどんどん行われています。

もう1つは、連続橋の耐震計算です。先ほど、P1橋脚には被害がなかったというお話がありましたが、当時、基礎研究室の浅沼さんらが解析的な検討を行い、橋軸直角方向の耐震計算に連続橋としての影響を反映すべきであることを指摘されました。土研では、連続橋の耐震計算法を開発して、平成2年度の示方書の改訂に反映しました。この計算手法の特徴は、上部工と下部工を一体として解析すること、橋脚ごとに地盤条件が異なる場合には地盤条件の差異を考慮できるという点です。ただし、この計算手法を用いて静内橋の解析を行ってみると、必ずしも実際の被害状況と一致しません。そういう点では、先ほど岩崎前分科会長が指摘されたように、まだ本当の原因が解明されているわけではなく、さらに地震被害に基づく調査が必要であると感じています。

岩崎：解析で仮定した地盤ばねが、実際と異なるのかも知れないですね。P1橋脚の周辺にはスポーツ公園があるから、他の水中の橋脚に比べて地盤が締まっている可能性があります。

川島：では、地盤が軟らかい方で被害が起きたのですね。

岩崎：地盤調査は、費用の制約から、必ずしも各橋脚ごとに行われているわけではありませんからね。ある地点での地盤条件で代表してしまうことにも問題があるのでしょうか。設計で、もう少しきめ細かい仮定ができればとはおもいますけどね。

川島：連続橋の耐震計算法の開発に際しては、何故実際の被害状況と合致しないのかを、ずいぶ

ん検討しました。結局、かなり大きく壊れてしまうと地震力の分配が変わってきますから、現状の線形計算ではこのような状況までは追えないのですね。このため、最初に損傷が生じたのがどこまでかを解析できれば、現段階ではよしとしようというのが、当時の暫定的な結論です。実際には、地盤ばねの影響もあると思いますし、様々な要因の中で、被害に最も影響が大きい要因を見いだすことが重要と考えています。

ちなみに、連続橋の耐震計算法は、結果的には違った方面に大きな影響を与えました。例えば、都市内高速のように剛性の異なる橋脚が並んでいる場合には、剛性の高い橋脚には大きな地震力がかかるし、剛性の低い橋脚にはあまり地震力がかかりません。このような影響を解析することが可能になったため、上下部構造の剛性のバランスを考えて、水平力を合理的に分散させることができるようになりました。

運上：現状の設計法は、橋としての破壊パターンがあまり反映されていないのでしょうか。個々の構造部材の破壊パターンは反映されていると思うのですが、橋全体としての破壊パターンが必ずしも反映されていないのではと思うのです。実際の破壊現象が十分にはわからないので、とりあえず安全率を大きめにみているという感じがします。日本の場合には、橋全体としての安全性の考え方があまり統一されていないように思えるのです。

岩崎：設計者がそれぞれ考える部分もあるけれど、基準を作る側が統一した考え方を示すことが重要ですね。ただし、統一した考え方を示すにしても、想定する破壊パターンが実際の現象に合致していることが最も重要です。例えば、剛体基礎の設計で、応力の作用点が底面の $1/3$ を外れたらいけないという規定があるが、実際にはこの規定で想定しているような破壊は起こらないでしょうね。

運上：被災した道路が通行できるかどうかを判定する場合には、どういう状態になったら通行止めにするといった方針を明らかにしておく必要もあると思います。現状では、主にRC橋脚の載荷実験データをもとに判断されていると思いますが、橋全体としての被災度判定の方針をもう少し明らかにしておく必要があるのではないのでしょうか。

岩崎：橋全体としての安全性の考え方には、大きく2つあるでしょう。応力的な破壊と、変形による破壊です。応力的な破壊では、コンクリートのクラックや鉄筋の降伏が生じますが、この際、自重を支えられないほどの被害であるかどうか判断のポイントになるでしょう。ただし、日本では地震時応力がかなりオーバーしても、自重で壊れた例は少ないと思います。一方、米国では応力的に破壊した例が多いですね。断面寸法が小さいために、応力が少しオーバーしただけで、自重を支えきれなくなるのです。日本では、車の通行ができなくなるのは、変形による破壊を生じた場合ではないかと思いますね。

川島：今年1月の釧路沖地震では、T型に張りだした丸ピアに多数の被害が生じました。関東地震のころの橋脚は壁式などかなり断面の大きな形状でしたから、被害が生じるにしても橋脚がフーチングからぬけ出した例（これは多数ありますが）を別にして、橋脚の被害だけについていえばクラック程度で済んだものもあります。しかし、張り出しが大きいスレンダーな橋脚が今や主流になりつつありますが、従来のマッシブな橋脚に比べて減衰も小さい分、極めて振動しやすいのです。米国では、スレンダーな橋脚の地震被害をもとに耐震設計が発展していますが、この点が日本では大きく異なっていると感じます。最近では、逆し字型橋脚やある一方向に張りだした橋脚など、特殊な断面形状を持ち断面を絞った橋脚が増えています。アメリカのように断面を絞る方向に進むのは要注意だと思うのです。



写真-2.5.5 1994年米国ノースリッジ地震による橋脚の崩壊
(サンタモニカ・フリーウェイ)

岩崎：橋脚の断面を絞るのは十分に注意すべきでしょう。また、釧路沖地震の際に目立った被害パターンとして、橋台の被害も挙げられます。地震時土圧を受けて橋台が前に出ようとするのを上部工が突っ張ったために生じた被害です。さほど大きな被害ではないにしろ、被害件数が比較的多いことから、このような被害にも注目する必要があると思いますよ。

川島：橋台が前傾して上部工にぶつかると、支承部が被害を受けます。被害の程度としては軽いのですが、修理するのは大変なのです。桁を切断するか、もしくは、橋台パラペットを取り壊すのですが、いずれにしても長期にわたる通行止めを余儀なくされます。確かに軽度の被害ではありますが、社会に与える影響を考えると、もっと抜本的に被害を無くしていく必要のある被害形態だと思います。

岩崎：橋台の被害を防ぐには、深い基礎を作るか、または、背面土圧を軽減することですね。背面土のかわりに軽量発砲スチロールなどを用いるといった方法を、具体化していかなければいけませんね。

水口：道路公団では、高盛土中に橋台を設ける場合の背面土圧の軽減方策を検討しています。橋台の高さも10mを越えるため、従来に比べて極めて大きな土圧が作用することになるのです。現在、私が考えている方策としては、背面土を薬液注入により固化する方法や、アンカーを定着できる位置まで突っ込んでしまう方法などがあります。背面土圧の軽減方策は、今後、背面土の軽量化と固化の方向に進んで行くと考えています。

岩崎：特に地方部の山中では、土工の関係で数十mの谷を埋めてしまっている箇所もあります。もとの地盤面まで基礎をおろしてはいるものの、大変な土圧を受けることになるから極めて慎重な

対応が必要でしょう。

川島：段落としの話に戻りますが、釧路沖地震では段落とし部に大きな被害を生じた道路橋があります。運上主任研究員から紹介して下さい。

運上：被害を生じた依田橋は、橋長が60m程度の3径間連続単純桁橋です。橋脚の高さは3m程度、直径は1.4m程度です。2基の橋脚のうち1基は、河川敷に位置しており、橋脚半ばまで土に埋まっています。2基の橋脚は、ともに主鉄筋の段落とし位置でせん断破壊を生じました。特に、土に埋まっていない方の橋脚では、半数の鉄筋が破断している状態です。ただし、よく見るとコンクリートが茶色に変色しており、昭和57年の浦河沖地震の際にすでに被害を生じていた可能性があります。

岩崎：なかなか災害復旧に着手できない場合もあるのでしょうか。

川島：クラックが小さくて、当時はわからなかったのかも知れませんね。

話は変わりますが、最近、地盤の液状化や流動化がクローズアップされています。土研では判定方法の開発を進めていますが、液状化や流動化は判定結果がわずかに変化しても、杭本数や工費に大きく影響します。杭の本数が非常に多くなって、経済的に大変であるとの話もよく聞きます。液状化や流動化の対策についても、ご意見を伺えればと思いますが。

岩崎：橋の周辺を全て地盤改良するのではなく、部分的な地盤改良ができないかと考えているんですよ。例えば、橋脚のまわりだけ一部分を地盤改良して壁のようにしておけば、その中で液状化が生じても流動化は生じない。また、北海道の白鳥大橋のように、橋台周辺の地盤を水平にするように改良しただけで、地盤改良はしなかった例もあります。液状化が生じても、大規模な地盤の流動化を防ごうという方法です。耐震設計基準では、当然F_Lの制限は設けなければならないけれど、莫大な費用を投じて地盤改良を行わなくても、部分的な地盤改良や地形改良等の工夫をすれば効果があるのだということを提案してもいいのではないかな。例えば、模型実験から、橋脚のまわりをどれだけ地盤改良すればよいという方法を提案できるのではないですか。



写真-2.5.6 平成5年1月釧路沖地震による松之恵橋の橋脚の損傷

大塚：建設省総合技術開発プロジェクトの中で、矢板によってどの程度液状化を防げるかといった検討を行う予定です。

川島：共同溝などの比較的断面が小さな構造物では、礫による周辺地盤の置換や地盤改良が行われています。こうした方法を応用できるかも知れません。

岩崎：橋梁が新設か既設かで、ずいぶん違うでしょう。既設に比べると新設は対策を行いやすい。ただし、原子力施設のように無尽蔵に費用をかけられる施設と異なり、橋梁の対策には経済性が要求される。100点満点の効果は期待できなくても、60点、70点とれますという方法を開発することが重要です。100点満点でなくても、地震時の変形を小さくできれば、落橋等の大きな被害を防いで、地震直後の緊急交通を確保できる。

大塚：橋脚の永久変位をどこまで許すかという点が、今後、重要になってくるでしょうね。また、橋の変形量を把握するためにも、液状化や流動化の定量的な推定手法の開発が重要だと考えています。

岩崎：理論的に詰めるのと同時に、既往の物理現象を詳細に調査する必要がありますよ。交通確保の観点から抑えるべき橋脚の変形量の上限など、一応の目安が得られるのではないですか。

大塚：迂回路等の交通特性によって箇所ごとに条件は違うと思いますが、例えば、地震発生から一両日中に啓開できるという条件がどの程度の変形量に相当するのかを、既往の事例から整理しておく必要がありますね。

川島：これに関連して、橋梁がどの程度の耐震性を確保すべきであるかという点に、非常に関心を持っています。結局、耐震設計といっても、経済や行政の影響が大きいのです。特に行政の影響は大きくて、例えば、地方では一両日中に交通を確保すればよくても、都市部ではそうはいかない。都市部と非都市部、さらに言えば、東京と非東京で橋梁に必要とされる耐震性のレベルが大きく異なるように思うのです。特に近年では、大地震に対しても絶対に壊れない道路が必要とされていますし、このために、現行の設計震度を大幅に引き上げてよいのではないかといった意見も多く聞かれます。道路橋の持つべき耐震性のレベルは今後どのような方向に進むのか、また、耐震性のレベルをいかにして定めるべきかという点に関して、ご意見を伺えればと思います。

杉田：ご用意いただいた資料と関連いたしますので、3～5番目のお話を伺えればと存じますが。

岩崎：まず、3番目の項目は動水圧の考え方の見直しに関するものです。現在、設計に用いる動水圧の算定には、ウェスターガードの式を少し変形した式が用いられています。橋脚を例にとると、橋脚が排除した水の重量の75%分だけ橋脚が重くなったと仮定して設計するわけです。しかし、これはもともと重力式ダムを対象としたものですから、動水圧が片側のみに作用する状態を想定しているのです。この式が全周を水に囲まれた橋脚にも適用できるのかというと、これは明らかに本当ではない。せいぜい20～30mの水深であれば、多少安全側の値を与える程度でよいと思うのです。例えば、東京湾横断道路の場合には水深が30m弱であり、橋脚もかなり太いから、これが排除した水の重量を加えてもあまり効きません。しかし、これから建設されようとする水深50mを越えるような大水深の構造物では、影響は大きいと思うのです。動水圧の評価が大きいために、本来100mですむ橋脚が120mになったら、費用や時間の観点から大変な差だと

思いますね。安全性の観点ばかりでなく、動水圧が物理的にどうなのかを、改めて考える必要があると思うのです。

また、大水深の構造物であれば、通常は静的設計ではなく、動的設計されるのだと思います。動的設計では、動水圧を重力加速度で割って得られる質量を付加質量と見なすのが一般的です。問題は運動方程式で、付加質量を左辺に考慮するのはわかるのですが、右辺の荷重項にまで考慮している。これは、物理的におかしいのです。

静的設計も動的設計も、物理的に検討すれば、さらに合理化される方向で答が出るだろうと思います。大事なテーマと思い長く暖めていましたが、やっと着手できる立場と時間を得ることができましたので、土研等の協力も得て検討していきたいと考えているところです。

4番目の項目は、設計震度の設定方法に関するものです。設計震度 k は、必ずしも地震動の最大加速度 A_{max} を重力加速度で割ったものではありません。 A_{max} は物理現象から決まりますが、 k には様々なファクターが含まれています。ファクターとしては、経済や政治、すなわち、道路が持っている、構造物が持っている、世の中が期待している重要性の度合いなどがあります。そして、こうしたファクターは、時代とともに変化していくものなのです。

私が土研に物理的に詰めていただきたいと思うのは、地盤条件が変化する場合の A_{max} です。地盤加速度が地盤条件によって非常に大きく変動することは、既往の地震からよくわかっていると思うのですが、現状の基準では地盤条件による差異はせいぜい2割程度でしかありません。強震観測記録を十分に活用して、是非検討していただきたいと思うのです。

最後の項目は、耐震設計基準に対する姿勢に関するものです。耐震設計の基本思想は時代とともに微妙に変化しますが、耐震設計基準を定める上での姿勢は変わらないと思います。つまり、物理現象をできるだけ忠実に詰めておいて、その後に工学的判断を加えるということです。工学的判断を行う際には、耐震設計の基本思想に関連して、経済や政治情勢に関わる要因を適切に考慮することが重要です。それから、原子力施設などは絶対壊してはいけないという思想で耐震設計がなされていますが、これは非常に特殊な場合であり、道路橋については非常に難しいことだと思います。全ての橋が絶対に壊れてはいけないということではなく、あるルートだけは壊してはいけないとか、ある地域だけはこわしてはいけないとかという思想はあってもよいと思います。できるだけ物理現象を煮詰めてもらって、最後は経済・政治のファクターをうまく取り入れて、適切な工学的判断をしていただきたい。話が散漫になりましたが、私からの話は以上です。

川島：現在の道路橋示方書に規定される設計震度について、ご意見を伺いたいと存じます。

従来の震度法で考えている設計震度は0.2～0.3ですが、震度法と修正震度法を改めて見直そうとした際に、少し問題がありました。震度法では、地盤が1振動すれば、橋も1振動するというのが基本的な前提です。しかし、実際に観測してみると、地盤が1振動すると橋の振動は2～3程度に増幅します。地盤と同じように振動するのは固有周期が非常に短い橋で、一般には、固有周期が0.1秒であっても増幅するのです。したがって、固有周期が非常に長い橋を除けば、橋はすべて地盤に対して2～3といった増幅率で振動すると見なければならぬ。ところが、修正震度法で使っている1.25という増幅率は、橋が弾性振動する状態では、非常に小さいのです。これが、平成2年の道路橋示方書の改訂の中で震度法と修正震度法を改めて見直そうとした際に、一番問題があった所なのです。工学的判断で現状のように定めたのですが、これについてご意見をいただければと存じます。

岩崎：橋で応答倍率が小さいのは橋台くらいでしょう。橋脚の応答倍率は、実際にはもっと大きいでしょうね。

川島：計算すると、2～5倍くらいになります。

岩崎：ただし、非常に大きな地震では、応答倍率は少し下がるのではないですか。

川島：開北橋や板島橋の強震記録をみると、橋脚の応答倍率はほとんど下がらないですね。地盤の加速度が大きいと応答倍率が下がるかということ、地盤の加速度が400～500 galになっても、そう劇的に下がってはいないのです。

ただし、橋脚が非線形域に入ってくれば、増幅率は下がると思うのです。地震時保有水平耐力照査の規定では、大地震時における増幅率の低減が、じん性の補正係数として評価されています。橋脚がどこまでも弾性的に振動するとすれば、現状の地震時保有水平耐力照査では、弾性応答震度で0.7～1.0程度まで見込んでいることになります。耐震設計で相手にするような大規模地震では構造物の弾性応答の加速度が1 gを越える場合もあるのですが、現状の設計体系では0.7～1 gくらいが常識的な線ではないかと考えているわけです。現状の設計体系は、線形領域で0.2～0.3 g程度の地震力を見込む体系と、非線形の効果は別途じん性の補正係数で考慮することにして、橋脚が弾性的に振動するとした場合に1.0 g程度の地震力に対して、塑性域のねばりを許して設計する体系に分かれるわけですね。この体系の中で、震度法及び修正震度法で考慮されてきた増幅率1.25の整理の仕方が難しいと感じているのです。地盤加速度が0.2で増幅率が1.25であるから、橋の振動は0.25というのはおかしいんですね。橋が0.25で増幅率が2.5であるから、地盤加速度は0.1程度を見込んでいると考えないと事実と整合しないのです。

また、橋梁ではありませんが、地中構造物の耐震設計は、地表面が0.2で、基盤面ではこの3/4の0.15というトーンで作られています。そうしますと、地中構造物の設計震度の考え方と、橋の設計震度の考え方が整合しないのです。半地下半地上構造や地下構造物と地上構造物を一体とするような場合に、この問題は特にクローズアップされてきます。地上と地下は、それぞれ別の設計体系の中で育ってきたのですが、今の段階でどのように整理すべきか迷っています。

岩崎：応答変位法と震度法で、入力的基本的な考え方が整合していないということですね。

川島：動的解析のみで橋を設計しようとすると、こうした不整合が最も効いてくるのです。従来のように地盤面で200 gal程度の加速度を考えると、普通の橋であれば、橋脚では確実に500 galは出てしまうのです。こうなると、断面力計算では当然震度法と合わない。意識的に短周期成分の卓越した入力を使えば、震度法とも整合するのですが、このような解析は全く意味がないのです。道路橋示方書に示される標準地震波は、最大加速度が80 gal程度ですが、この程度の地震力を入力してはじめて、橋脚で300 gal程度の応答になるのです。

岩崎：地盤、基盤、構造物のあらゆる所が健全だとすれば、構造物の応答は1 gということになる。日本では比較的軟弱な地盤に建設されることが多いから、固有周期も長いし、減衰も大きい。現在の設計法を大幅に変える必要はないと思いますよ。

川島：南荘さんから、何かございませんか。

南荘：全体的な話になりますが、破壊パターンに応じて適切な安全率を設定することが重要と思います。例えば、同じ地震を受けても、構造部位によってエネルギーの受け持ち方やダメージの生じ方に大きな違いがあります。動的解析で1発で解析してしまうと、それらしいイメージが出てくるでしょうが、通常の設計で上部工や下部工だけを考えると、実際に設計基準が本当なのか疑問が出てきます。中でも入力については、川島室長がいわれたように、現状のものが必ず

しも社会・経済的にみてよいのかどうかは、まだまだ議論の余地があると思うのです。この点についてはいかがでしょうか。

岩崎：現状の設計は、全て許容応力度法を基本としています。しかし、入力も計算法も全てにながしかの仮定に基づいて規定されているのだから、計算して得られた値は大きな意味を持つものではないのですよ。そこで、許容値なり安全率という概念がある。安全率というのは無知率、あるいは無駄率なのです。無知だからこそ、安全率が大きくなる。安全率が大きいからいいんだというのは、自分が無知だからいいんだということに等しいんですよ。設計で考える破壊パターンは、実態と一致していなければならないけれど、ほとんど全ての項目が一致していないのではないですかね。荷重にしろ計算法にしろ、実態に近づけなくてはいけない。安全率については、地震・風・腐食等の全ての現象に対して、全ての構造部位がほぼ等しい安全率を持っていることが本当はいいのでしょうね。至難の技だとは思いますがね。

基準を作る側は、設計者がこうした点をあまり考えなくても済むように、設計基準を作らなければいけないのでしょう。土研、道路公団、阪神公団は、設計基準の中のどこからどこまでが本場で、どこからどこまでが仮定であるかという境界を、よく知っておかなければいけません。往々にしてそういう人もいますけれど、基準に規定してあることが全て正しいと思ってはいけません。境界を定めるにはジャッジが必要ですし、ジャッジをめぐって様々な問題が起こると思いますが、是非委員会等を通じて勉強していただいて、設計者が個人的なジャッジをしなくていいようにしなければいけないと思いますね。ご質問の主旨からは外れたかも知れませんが、非常に大切な点だと思います。

南荘：本当は、橋全体としてバランスのとれた設計が望まれていると思うんです。しかし、この基本的な思想が、なかなか示方書には反映されにくいと思うのです。

岩崎：荷重を例にとってみても、示方書の値が実際の現象に即しているとはいいい難い。安全率をなくすためには、何回もいうように、実際の現象を正確に測らなければいけない。これが研究の基本でしょうね。土研にも有効に使われていないデータがたくさんあると思いますが、是非もう一度掘り起こして、何度も何度も見直して、基準に反映しなければいけません。それが、研究所の大きな強みなのです。特に、大塚室長の研究室は測るのが仕事ですから、十分に検討していただきたいですね。ところで、動水圧については、どこかで研究するという話を聞いていますか。

大塚：湾口道路に関して、今年は模型実験を行うという話を聞いております。動水圧がどのように効いてくるかという点について、ある程度解明できるのではないかと考えています。

岩崎：模型実験は、ある程度解答を用意してから行った方がいいですね。

川島：動水圧の算定には、構造物の変形の効果は入っているのですか。

岩崎：入っていません。構造物は剛体として考えています。

川島：動水圧は、L1やL2という区分では、どのように考えていることになるのですか。地震時保有水平耐力照査の規定を設ける際に、動水圧をどのように扱うべきかについて議論がありました。現状の動水圧の算定は、0.2～0.3の設計地震力に対して算出されていると思うのですが、さらに大きな地震力が作用する場合には、実際にはどのように動水圧が作用するのしょう。

うか。

岩崎：慣性力が最大になる時に、同じ方向に、動水圧が作用することはない。したがって、非常に大きな地震力を考える場合には、慣性力の最大値と動水圧の最大値を重ね合わせる必要はないでしょう。慣性力の最大値に対して動水圧を低減するか、動水圧の最大値に対して慣性力を低減するのでしょうか。

川島：構造物の変形を考慮すると、動水圧もかなり変わってくると思うのですが。

岩崎：現状では、動水圧の算定に際して、大きく3つの仮定を設けております。すなわち、構造物の可撓性、慣性力と動水圧の位相差、及び、入力ランダム性です。これら3つの現象が実際にどうなっているのかはまだ十分に把握されていません。何通りかの解答を用意して、模型実験等により適切な着地点を探すことになるのでしょうか。ちなみに、水理模型実験では、模型の精度が実験結果を大きく左右します。ダム関係の研究者の協力を得るのがよいですね。

川島：港湾技術研究所などでも水理実験を行っているようなのですが、結局、ウェスターガードの式でよいのだという結論に無理に向かっているような気がするのです（笑）。

岩崎：自分達だけ変わったことをしたくないというのはあるからね。動水圧と慣性力を重ね合わせる必要はないのではないかな。動水圧による破壊パターンに対する照査では、動水圧だけを考える。また、慣性力による破壊パターンに対する照査では、慣性力だけを考える。液状化や流動化とも似ていると思うのですよ。いずれも、振動が終わってから現象が生じるのだから、慣性力の影響と重ね合わせる必要はない。

大塚：水は、土と同じように、強度側と荷重側の両方に作用する可能性があるのですね。つまり、現状ではシビアな方向にばかり考慮している。剛性項に考慮する必要があるのかも知れない。

岩崎：今後道路橋の耐震設計基準を変えていくためには、一般橋ばかりでなく、長大橋の設計を合理化するための研究を積極的に行っていくことが重要ですね。液状化の判定法も、最初は本四に関連して研究を開始したのだからね。研究の中で F_L や D_E が開発されて、何年か後には設計基準に反映された。新しいことを始めるには、相当の費用と時間がかかりますからね。設計を合理化できればこれだけメリットがありますよといって、積極的に研究の場を開拓していくことが大事ですよ。

杉田：それでは、本日はお忙しい中を、予定時間を30分も超過してご意見を賜り、たいへんありがとうございました。いろいろ貴重なお話を伺いましたので、私どもの方でお話いただいた内容をよくかみ砕いて、耐震設計便覧の作成に反映させていただきたいと存じます。大変ありがとうございました。

3. ま と め

以上、地震被害から学んだ教訓と今後技術開発が必要とされる項目に関して、座談会方式によって検討してきた。以上の調査結果の中から、道路橋の耐震設計法を合理化していく上で今後重要な課題を、①地震被害からの教訓、②耐震設計の方向、③耐震性に優れた橋梁に分類してまとめると、以下の通りとなる。

1. 既往の地震被害から教訓

- 1) 長周期構造物で設計震度を落とす際には、変位の推定精度が低いということに気をつけなければならない。ばねを仮定すれば計算上は一応の答えは出てくるが、地盤の変形も含めた全体の計算精度は低いことを十分知った上で設計しなければならない。
- 2) 八千代橋は、中央部の橋脚が25～30センチも移動したが、落橋は免れた。大きな地盤変動をどこまで設計に考慮するかという点の検討が必要である。
- 3) 昭和大橋は落橋し、八千代橋は落橋寸前、万代橋はかろうじて交通機能を果たした。しかし、原型復旧費でみると万代橋が一番費用を要し、復旧費が一番安くすんだのは昭和大橋であった。橋梁建設費と維持費、復旧費のトータルコストを考えることが必要である。
- 4) 昭和大橋の落橋以後、パイルベント橋脚は、耐震性が低いということで使われなくなっている。しかし、きちんと設計すればパイルベントが全てだめということではない。
- 5) 現在の道路橋示方書に至るまでには多数の地震を受け、震害が耐震設計の考え方や手法のレベルアップをうながしてきた。福井地震、新潟地震、宮城県沖地震と続いた後、日本には大きな地震は起きていない。したがって、現状は、最近の研究成果が実際の地震によりチェックできないでいるとみてもよい。耐震工学を一つの工学とするならば、絶えず、実験や解析、シミュレーション手法を通してチェックすることによって進歩がある。
- 6) 耐震設計法を定める際の基本的な判断根拠は震害という事実である。震害調査はあくまでも、それ以前の構造形式・設計方法に対する経験を与えるものでしかないことを認識した上で、新形式の橋に対する耐震性の検討を行っていく必要がある。
- 7) 耐震設計は、地震動、地盤等まだまだ経験的にしか計れない分野を抱えた設計分野である。
- 8) 1つの地震である橋は壊れても、ほぼ同じ条件にある別の橋は壊れないことがある。他の条件がほとんど同じでもわずかに条件が違えば非常に大きな差がでる。この差を説明できるような解析法や、この差を反映できるような設計基準を作っていくことが重要である。
- 9) 地震時土圧を受けて橋台が前に出ようとするのを上部工が突っ張ったために橋台に生じた被害が多い。大きな被害ではないが、発生頻度は高く、また復旧には長期に渡る通行止めを必要とする。このような被害を低減することを考えていくべきである。橋台の被害防止には、基礎を深くするか、背面土圧を軽減する必要がある。後者には、軽量発砲スチロールの利用が考えられる。

2. 耐震設計基準の方向性

(1) 耐震設計法

- 1) 「外力」、「計算」、「照査」の3つのうち、「照査」と「入力」のバランスのとれた設計が重要である。
- 2) 構造物の大きさ、形状、振動エネルギーという概念が、現在の基礎の安定照査法に取り入れられていない。
- 3) 力と変位の世界で議論する他に、トータルエネルギーの議論がないと、どこかで計算がおかしくなる。
- 4) 示方書では、下部、上部、耐震と分かれているが、構造物としては一つのものであり全体と

して見ていくことが重要である。上下部一体で、耐震性も加味した全体の計画論を示した橋梁計画指針のようなものが必要ではないか。

5) 橋全体としてどのような破壊パターンとなるかを常に考えておくことが重要である。

(2) 橋梁の重要度の考え方

- 1) 本当に交通を途絶してはいけない箇所では、建設費が2倍になろうが3倍になろうがきちんと設計しなければならない。経済性、耐震設計の投資額、橋の重要度の関係を整理する必要がある。
- 2) 重要度に関しては、行政判断が大きい。特定路線のようにこれだけは絶対に大震災でも交通確保のためにいるのだという構造物がある。
- 3) 震度Ⅲくらいで地盤加速度で数十Gal程度という時に被害が出るというのは問題であるが、大地震がきて周辺が壊滅状態の中で、橋梁のみが被害もなく残っていることはバランスとしておかしいのではないか。
- 4) 大地震が起って避難するとか、物資の輸送をするとか、都市が壊滅したというときに道路も壊滅したのでは、その後の市民生活に大きな影響が出る。応急的にすこし直せば、都市生活を営めるくらいの物資の輸送に使えることが重要ではないか。
- 5) 地震というのは異常事態であり、社会的な影響を考えなければならない。常時には橋が落ちても大事故があったですむが、異常時は心理的に非常に不安であり、この点をよく配慮すべきことである。

(3) 地震力について

- 1) 強震記録によれば、1000galとか500galとか大きな加速度がでるが、橋は何ともないものもあり、加速度と設計震度とは直接には結びつかない。加速度がそのまま地震力ではなく、現在は震度という形を使って総合的な設計を行っている。
- 2) 設計震度は、必ずしも地震動の最大加速度を重力加速度で割ったものではない。最大加速度は物理現象から決まるが、設計震度には経済や政治、すなわち、道路構造物が持つべきと世の中が期待している重要性の度合いなどが含まれる。重要度は、時代とともに変化していく。
- 3) 地盤ではなく橋に生じた加速度が震度であるべきである。橋に大きな加速度が生じて壊れなかったのは、動的強度が大きかったためである。動的強度と橋に作用する加速度のバランスの観点から、よく震度を見ていく必要がある。
- 4) 諸外国では、ほとんど地震時保有水平耐力照査という流れの中で、より実際に近い外力と動的強度の中から耐震設計論を組み立てている。いつまでも震度法という約束ごとだけの世界にいと、国際的に孤立してしまうのではないか。

(4) 液状化

- 1) 液状化が道路橋に与える影響は、まだ定量的に解明されていない。液状化の判定方法については比較的研究が進んでいるが、液状化がどのように影響を与えて橋を壊すのかということになると、未解明な部分が多い。
- 2) 液状化した際には、土が動水圧的あるいは動土圧的な作用をするのではないか。
- 3) D_r については、工学的な判断が大きく、今後さらに研究する必要がある。
- 4) 液状化対策として、橋の周辺を全て地盤改良しなくても、部分的な地盤改良でも効果的ではないか。例えば、橋脚のまわりだけ部分的に地盤改良して壁のようにしておけば、その中で液状化が生じて流動化は生じない。

(5) 免震設計について

- 1) 宮城県沖地震の被害経験から、支承というのは、ある程度以上の力が来たら壊れる1つのヒューズとして機能させるという考え方もある。これによって下部構造に過大な慣性力が作用するのを防ぐ。こういう意味では、支承を使用するということ自体が広い意味で免震設計かもしれない。
- 2) ゴム支承や免震支承というのは構造的に特性がはっきりしている。実験すれば特性がわかる性格のもので、岩や土とは違う。特性を明らかにして、積極的に使っていいと見られる。
- 3) 免震支承が材料として特性がはっきりしていれば、免震設計によって地震力を低減させていいのではないかと。ただし、耐久性については注意を払う必要がある。
- 4) 免震設計は超多径間連続橋に使える。鉄道のレールでいえば、ロングレールに相当する。免震設計の採用により、超多径間連続化もどんどん可能になるであろう。
- 5) 最近、大きなゴム支承が使われ始めたが、まだ大きな地震の洗礼は受けていない。今後のデータの蓄積が重要である。
- 6) 多径間連続橋のようにこういう構造はいままでとれなかったが、こうすればできるという時には、古い橋梁計画論は壊していかなければならない。

(6) 土との接点

橋は、どこかで土と接触しなくてはいけないから、接触点の処理が重要である。橋本体の耐震性は高まっているが、アバットやパラペットという構造は耐震的ではない。土と接する部分では、大きな変形を生じるという前提に立って議論する必要がある。

(7) 動水圧について

動水圧の考え方の見直しが必要である。これから建設されようとする水深50mを越えるような大水深の構造物では、動水圧の影響が大きく、動水圧をより精度よく評価する必要がある。

(8) 設計基準のあり方について

- 1) 示方書は、市町村の土木係の方でもある程度分かり、また、コンサルタントの設計者が理解できる程度の決め方をしないと間違いが多くなる。
- 2) 免震設計等の新しい技術はどんどん進んでいる。示方書はどうしてもそれまでの実績のある設計法、構造形式を前提にするが、新しい技術を潰さないような条文にしておかなければならない。
- 3) 橋梁の設計耐用年数は50年くらいであり、地震はその間にくるかもしれないし、こないかもしれない。これに対して膨大な費用を費やすのは必ずしも合理的ではなく、主荷重で決まった寸法、強度でできるだけ収まるような設計をするのが経済的な設計といえる。その中で耐震性の高い橋梁を考えるのが良い橋梁計画ではないか。
- 4) 現状の設計は、全て許容応力度法を基本としている。しかし、入力も計算法も全ていくつかの仮定に基づいたものであり、計算して得られた値は大きな意味を持つものではない。安全率というのは無知率、あるいは無駄率である。無知率を小さくしていく方向に向かうべきである。
- 5) 基準を作る側は、設計基準の中のどこからどこまでが本場で、どこからどこまでが仮定であるかという境界をよく知っておく必要がある。ジャッジをめぐって様々な問題が起こるが、設計者が個人的なジャッジをしなくていいようにしなければいけない。
- 6) 基準があるためにデザイナーの自由裁量範囲が非常にせまくなる。本来、基準は必要最小限事項を規定するという考え方もある。構造物は、千変万化でありこれに対応するためには技術者の技術力を必要とする。基準は人の作ったもので、人によって運営されるものであり、基準を守ればよいということだけになっては、技術力は生かされなくなってしまう。技術は個性のあるところに育ち、はぐくまれて行くもので、マニュアルエンジニアにだけはなるべきではな

い。

3. 耐震性に優れた橋梁

- 1) 耐震性の高い橋梁、落橋しない橋梁というのは、設計で想定した地震力よりも強い地震力を受けた場合でも大丈夫でなければならない。
- 2) 耐震的に優れているという橋は、設計の時点で耐震上付与すべきアイデアが設計に反映されていて、その考え方が製作や架設を通して現場に備わっていることが第一である。
- 3) 耐震設計を行うということは、期せずして丈夫なものを作るという方向に向いている。それを逆にうまく利用して、耐震設計と長寿命化というのを結びつけていくことが一つのコンセプトとしてありえるのではないか。
- 4) 多少弱くても落橋はしない、経済的な橋をつくることも考えなければならない。このためには、橋脚を減らし、支間を延ばし、またなるべく連続化することが有効であろう。
- 5) 景観やサービスビリティ向上、メンテナンスのコストダウンを許しながら、かつ耐震性を損なわない方向に耐震設計が向かってほしい。
- 6) 橋梁の耐震設計で学際的な議論が必要である。建築物、地下トンネル、鉄道等、多方面の分野の意見を聞いた方がよい。
- 7) 連続橋の問題、免震構造の問題、支承の問題等を含めて、耐震設計がいつも橋梁設計における付属物という考え方から早く脱却する必要がある。
- 8) 橋梁の設計、サービス、景観、環境への対応をより容易にするように耐震エンジニアリングを担当されている方が、その方向に一步足を踏み入れて、地ならしをしてほしい。

道路橋の耐震設計に関する研究

— 地震被害から学んだ教訓と今後の
技術開発 —

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第3277号

平成6年7月(1994)

川島一彦, 運上茂樹
杉田秀樹, 中島燈

要旨

本文は、さらなる道路橋の耐震設計法の向上を図るために、既往の道路橋の地震被害について再度振り返るとともに、これから学んだ教訓について調査し、今後、道路橋の耐震設計に関して技術開発が必要とされる課題について調査した結果をとりまとめたものである。

キーワード: 道路橋, 耐震設計, 地震被害, 教訓, 技術開発



郵便はがき

五十円切手
をはって下
さい

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

耐震研究室
行

No. 003

No. 003

配布先氏名



配布先住所

土木研究所資料第 3277 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印