
研究展望

Review

研究展望

免震設計技術の発展と今後の展望

DEVELOPMENT AND FUTURE SCOPE OF SEISMIC ISOLATION OF STRUCTURES —A REVIEW—

川島一彦*

By Kazuhiko KAWASHIMA

1. ま え が き

近年、耐震設計と並んで「免震設計」が各所で実用されるようになってきた。免震設計とは文字どおり、地震の振動に“耐える”（耐震設計）のではなく、“免れる”という発想からきている。地盤振動が伝えられる結果構造物が振動するのであれば、構造物を地盤から切り離しておけば、構造物の振動を大幅に軽減できるのではないかというのが免震設計の基本的な発想である。ただし、着想としては古くから存在したが、1970年代に至るまで免震設計が実用された例はほとんどない。これには、実用的で信頼性に富む免震装置が開発されていなかったという理由のほかに、この当時はまだ地震動の記録が少なく強震地動の性質がわかっていなかった、非線形動的解析によるコンピュータ・シミュレーション手法や大型振動台を用いた実証実験手段が整っていなかった、等の理由を挙げることができる。1970年代に入り実験・解析技術の進歩と強震地動の研究の進展に支えられて、免震設計を実用できる時代を迎えつつある。

免震技術の適用範囲を、藤田は、①機器レベルの免震、②床レベルの免震、③構造物レベルの免震、に分類している¹⁾。精密機械、原子力、建築の分野では、それぞれ多少趣を異にする技術開発が図られつつある。土木構造物の用途種別はさまざまであるが土木技術者に関心があるのは、主として構造物レベルの免震技術であろう。したがって、ここでは構造物レベルの免震技術の現状と今後の展望を橋への適用を中心にして紹介する。

なお、わが国の橋に対する免震設計の利用はこれからの段階にある。したがって、海外、特にニュージーランドでの利用状況を中心として紹介することを最初に断っておきたい。

2. 技術開発の歩み

(1) 免震設計とは

免震設計とは、何らかの装置または機構を用いて構造物の地震応答を低減しようという設計法の総称である。見方によっては非常に広範囲のものまでを含むが、近年、建築物、橋への適用が可能となってきたことから脚光を浴びている免震設計の基本的な考え方は、以下の三点である²⁾。

a) 地震力がある一定値以上になると固有周期を長くし、地震力を低減するために、構造物を柔らかく支持する。構造物を柔らかく支持する装置をアイソレータとよぶ。

b) 単に、構造物を長周期化しただけではアイソレータに生じる変位が過大になることがあるため、エネルギー吸収装置を併用して使用上問題とならないレベルにまで変位を低減する。エネルギー吸収を図る装置をダンパーとよぶ。

c) 風や制動荷重のように常時作用する荷重により構造物が有害な振動を生じないように抵抗力をもたせるために、ある一定以上の地震力が作用する以前にはアイソレータもしくはダンパーに十分な剛性をもたせておく。

アイソレータとしては、一般に積層ゴム支承が用いられる場合が多い。中間に何枚も鋼板が入っているため、上下方向には十分な剛性を確保しつつ水平方向には非常に柔らかく支持することができる。適切に設計すると水

* 正会員 工博 建設省土木研究所地震防災部耐震研究室長
(〒305 茨城県つくば市大字旭1)

Keywords: seismic isolation, base isolation, isolator, damper

平方向と上下方向の剛性の比を1:1000程度にすることができるといわれている。エネルギー吸収装置には、軟鋼を用いたものと鉛を用いたものがある。また、アイソレータとダンパーを別々にしたものと、一体にしたものがある。

アイソレータとダンパーの役割を地震応答スペクトルを用いてもう少し具体的にみてみよう。構造物の建設地点でどの程度の地震動が生じ得るかは個々の地点ごとに異なるが、いま、マグニチュード8の地震が建設地点から50 km程度の位置に生じると仮定する。川島らによる距離減衰式³⁾を用いるとこのときの加速度応答スペクトルは図—1(a)のようになる。一方、この構造物が図—1(a)の点線に示すように、固有周期0.5秒付近では0.25の設計水平震度により設計されているとすれば、0.25 Gの加速度応答までは、各部の応力が弾性状態のまま抵抗できることになる。実際には、地震時の荷重組合せおよび許容応力度の割増しのせいで、これよりももう少し大きな地震力まで構造物は弾性的に挙動するが、ここでは簡単のためこの影響を無視する。構造物の応答が0.25 Gを超えると、構造物には損傷が生じ始めるが、非線形域においても十分な粘りがあれば、大地震時にも大被害を受けずにすむというのが、耐震設計の基本的な考え方である。

いま、免震設計を用いないで、普通の耐震設計をした場合にはこの構造物の固有周期 T が0.5秒、減衰定数 h が5%であるとする。この場合には0.5秒の固有周期に相当する0.75 Gの地震力(図—1(a)中の S_A^* 点)が生じるが、これを0.25 Gまで引き下げ得れば、この構造物は弾性挙動できることになる。

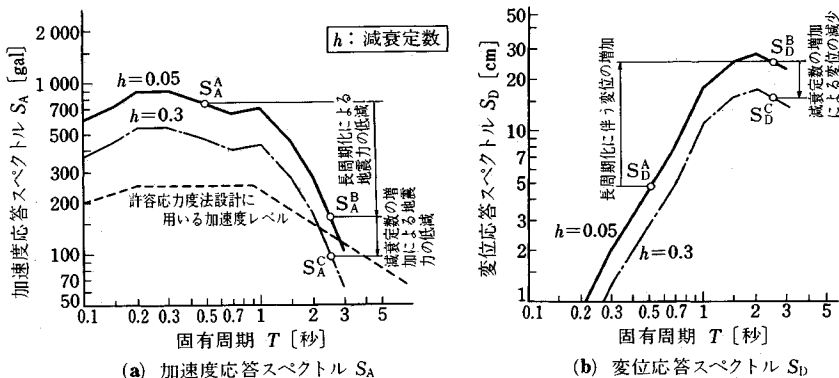
まず、アイソレータにより構造物を柔らかく支持し、固有周期を0.5秒から2.5秒に伸ばしてみよう。これにより構造物に生じる地震力は0.75 G (S_A^*) から0.16 G (S_A^*) に低下する。しかし、図—1(b)に示すように長周期化すると変位は4.7 cm (S_B^*) から25 cm (S_B^*) に増

大する。ここで、ダンパーを用いて構造物の減衰定数 h を5%から30%に大きくしてみよう。このようにすると、地震力は0.16 G (S_A^*) から0.095 (S_A^*) に低下し、変位も25 cm (S_B^*) から16 cm (S_B^*) に低下する。このように、アイソレータとダンパーを併用することにより、構造物の変位を許容される範囲に抑えつつ、地震力の低減をはかることができるのである。

(2) 技術開発の経緯

免震設計のアイデアはかなり昔からあり、たとえば1909年にはイギリス人医師 Calantarients によりアメリカで免震構造に関する特許が申請されているという^{4),5)}。これは建物の基礎と地盤間に滑石を置き、両者間を絶縁しようとするものである。わが国でも当時すでに同種の免震設計のアイデアがあったとされるが、特許として認められたのは関東地震直後の1924年に鬼頭三郎および山下興家が最初といわれている。鬼頭は図—2(a)に示すように球座にボールを挿入したボールベアリングタイプの支承を、また、山下はすべり支承と復元力を与えるばねの併用を、それぞれ提案している。このほかにも類似の装置が多数提案されており、中には構造物を液体に浮かせて支持させようというアイデアまで出されている⁶⁾。これらの発想はいずれも構造物と地盤間の縁を切ろうというもので、絶縁型の免震とでもよぶべきものである。

これに対して、構造物の固有周期と地震動の卓越周期、あるいは地盤の固有周期に着目し、これらをなるべく相互に離して構造物の地震応答を低減させようという発想が生まれてきた。たとえば、長大橋のようにもともと固有周期が長い構造系において、桁を弾性支持することにより、一層の長周期化を図り、地震応答を積極的に引き下げようという設計がこれに対応する。ごく一般の橋で固有周期が短い構造系に対しても、長周期化を図り、長大橋と同様の地震応答の低減を図ろうというわけである。長周期化を図る機構や装置としては、表—1に示す



図—1 地震応答スペクトルを用いて表わした免震設計の効果

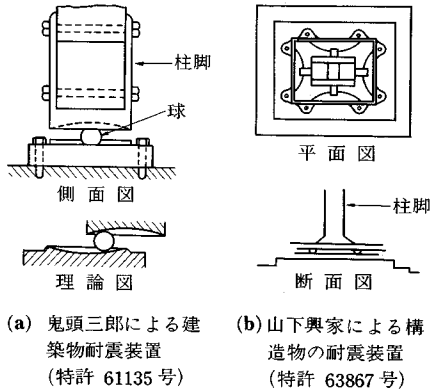


図-2 初期の頃の免震設計（絶縁）のアイデア

表-1 構造物の長周期化を図る機構および装置

原理	機構	装置
絶縁	すべりを利用	すべり支承
	コロの利用	ボールベアリング、ローラーベアリング ボールと球座の組合せ、ローラーと円筒座の組合せ
	流体支持	
長周期化	弾性材料による支持	ゴム支承、積層ゴム支承
	リンク機構の利用	リンク沓
	ロッキング機構	ステッピング装置
	構造物の弾性を利用	構造物の基部を柔軟にする

ように各種の提案がある。

絶縁および長周期化の発想は古くからあったが、これらは一部を除き、ほとんど実用化されなかった。この理由は、地震力は低減できるとしても、地盤に対する構造物の相対変位が大きくなり過ぎたり、原点に復帰しなかったりするためである。

これに対して1970年頃から構造物と地盤間の相対変位を抑えるために絶縁もしくは長周期化と同時に構造物の運動エネルギーを吸収する装置を併用しようという考え方が現われてきた。これが近代的な意味での免震設計法であり、後述するようにニュージーランドで実用的な免震支承が開発されて以後、各国で大きく実用化の段階を迎えつつある。いかに有効に運動エネルギーの吸収を図るかは、現在、各機関の研究開発の中心となっており、これについては、次章に示す。

以上のほかに、構造物の地震応答を低減する方法として、近年、動吸振器と能動式ダンパーの利用が研究されつつある⁷⁾。動吸振器とは構造物に付加質量もしくは振り子を取り付け、これが振動することにより構造物本体の振動を低減しようというものである。一例を挙げると、名港西大橋の主塔架設時の風による振動抑制に利用された動吸振器⁸⁾がこれにあたる。能動ダンパーは、構造物

に振動系を付加し、これに外部からエネルギーを供給することにより構造物の振動を抑止しようというものであり、ダイナミックダンパーあるいは、アクティブコントロールとよばれる新しい振動制御法である。アメリカ・ニューヨーク市の Citycorp Center ビルの風による制振や、高架橋周辺の地盤振動対策に使用された実績がある⁹⁾。以上のように動吸振器および能動式ダンパーは、従来、主として風による振動や交通振動の制御に用いられてきたが、最適制御理論を応用して、これを地震応答の低減にも利用しようという研究が進められている¹⁰⁾。しかしながら、風や交通振動の制御に比較すると、地震応答を実用的なレベルにまで低減するために要するエネルギー制御量は桁違いに大きく、まだ、具体的な手法は研究段階にあるといえよう。なお、このような方法は、一般に、制振設計とよばれ、免震設計とは区別される場合が多い。

(3) 橋の耐震設計におけるわが国独自の免震化の試み

以上のような免震設計の開発と並行して、わが国では独自の免震化の試みが、特に、多径間連続橋を中心に地震時水平力の分散という形で進められてきた。いわゆる日本流のダンパーとよばれる装置の利用がこれに当たるが、これと免震設計との関連について示しておこう。

都市内高架橋では、継手による騒音、振動を軽減すると同時に、不静定次数を高め耐震性の向上を図るため多径間連続化が図られつつある¹¹⁾。地震時水平力がある特定の橋脚に分散する代わりに、バランスよく多数の橋脚に分散させるための方策の1つとしてわが国では従来から表-2に示すように粘性型ダンパー¹²⁾の利用と弾性固定方式の採用という2種類の考え方が採り入れられてきた¹³⁾。

粘性型ダンパーは、桁と橋脚天端の相対速度に応じた粘性減衰力を発揮するもので、クリープや温度変化などの緩やかな動きに対してはほとんど抵抗しないが、地震動のように速い振動に対しては大きな抵抗力を発揮し、事実上固定支承と同じ機能を果たす。ダンパーの粘性を

表-2 わが国の橋に採用された免震化（地震時水平力の分散）の試み

機能	装置
粘性型ダンパー	オイルダンパー
	ダンパーストッパー
	粘性せん断型ストッパー
弾性固定	ゴム沓
	血ばね
	リンク沓
	弾性拘束ケーブル
	SUダンパー

変化させると、桁の振動が最小になるところがあり、このような使い方をした場合には、上述のエネルギー吸収型の免震設計そのものとなる。しかしながら、わが国では、温度変化により粘性が変化すると期待したとおりの振動の低減がいつも得られるとは限らない、振動応答を最小にするダンパーの粘性は入力地震動によって異なる、等の理由で粘性を十分大きくし、地震エネルギーの吸収を図るというよりもストッパーとして機能する設計が追求されてきた¹⁴⁾。この意味では、わが国で従来から使用されてきたダンパーは、ダンパーストッパーとよぶべきもので、この点において、免震設計とは異なるのである。

もう1つの免震化の試みは、ゴム沓、ケーブル、皿ばね¹⁵⁾等により、桁と橋脚を弾性的に固定し、地震時水平力の分散（一部は、長周期化も図っている）を図るものである。この中で、特に注目されるのは、SUダンパーである^{16), 17)}。SUダンパーは桁を可動支承で支持し、桁と橋脚をケーブルで弾性固定したものである。あるレベル以上の地震力が作用すると、支承の摩擦が切れ、摩擦力によるエネルギー吸収が生じるとともに、ケーブルにより柔らかく支持されるため長周期化による地震応答の低減を図ることができる。したがって、前述した長周期化とエネルギー吸収の両者を兼ね備えており、免震設計の範疇に位置付けることができる。SUダンパーは1963年12月に首都高速道路1号線芝海岸高架橋で最初に使用された。ニュージーランドにおいて1974年に最初の免震橋（South Rangitikei橋）が建設されたのと比較しても独創的な技術開発であったといえることができる。

3. 免震装置の開発

(1) ニュージーランドにおける免震装置の開発

近年の実用的な免震装置および免震設計法の開発にはニュージーランドの貢献が大きい。ニュージーランドにおける免震装置の開発は、科学工学研究省の物理工学研究所において1970年から開始された。免震装置は材料面から軟鋼を使うタイプと鉛を使うタイプに分類される。現在までに開発された主要な免震装置は以下のとおりである。

a) 軟鋼を用いた免震装置

エネルギー吸収材として軟鋼を用いるものである。当初、軟鋼のほかに低炭素鋼やアルミニウム等の使用も検討されたが、各種試験の結果、軟鋼が最も優れていると判断された。疲労に対する寿命を高めるために非線形域に入る部分ではできる限り溶接は行わず、加工後、熱処理が行われる。主要な免震装置（図-3参照）には以下のものがある¹⁸⁾。

① ねじりばりタイプ

最も初期の段階に実用化されたもので、はりの両端を固定し、中央のアームに作用する上下力によってはりが塑性域のねじり変形をすることにより、エネルギー吸収を図ろうというものである。比較的大きな力（450 kN、±80 mm）の免震装置ができることが特徴で、後述するSouth Rangitikei橋において実際に用いられた。

② 片持板タイプ

片持板の全長にわたり曲げモーメントによる降伏が生じるように板の形状を工夫している。溶接が主体の加工となるため、当初溶接後の熱応力でひびわれを生じたりしたが、その後、溶接法および加工法に改良を重ね、240 kNの作用力に耐える装置が製作できるようになった。

③ 曲げばりタイプ

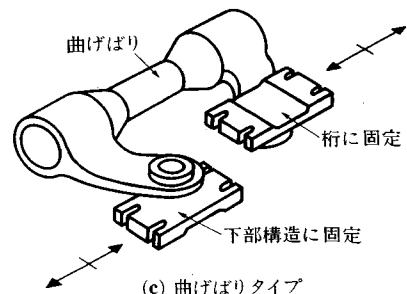
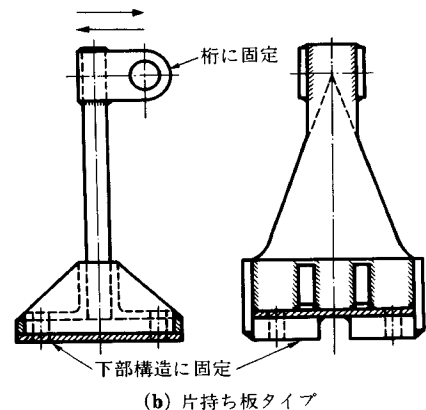
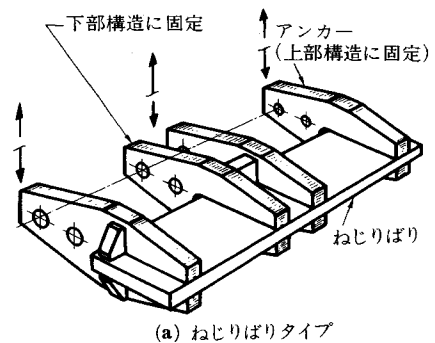


図-3 軟鋼を用いたダンパーの例

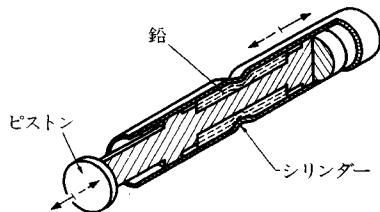
両端のアームに水平力が作用すると、これが円柱状軟鋼棒に伝わり、塑性域での曲げ変形によりエネルギー吸収を図るものである。載荷実験結果をみるとほとんど矩形に近い安定した履歴ループを描く。軟鋼タイプの免震装置の中では最も安定した装置で、後述する Cromwell 橋で実用されている。

b) 鉛を用いた免震装置

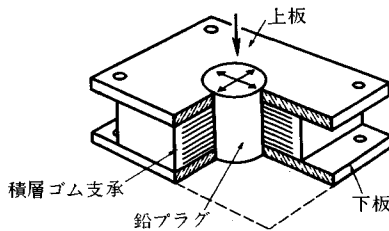
エネルギー吸収材として鉛を用いるもので、主要な免震装置(図-4参照)には以下のものがある¹⁹⁾⁻²¹⁾。

① 鉛押し出しダンパー

オリフィスでしばり込んだ空隙を鉛が塑性変形しながら通過する際のエネルギー吸収を利用するもので、シリンダーにオリフィスを加工したものと、ピストンに膨らみをもたせたものの両者がある。荷重と変位の関係は図-5に示すようにほとんど矩形の安定した履歴ループを描く。エネルギー吸収材料として鉛を用いる理由は、塑性変形後の鉛の独特な回復能力にある。すなわち、図-6に示すように押し込みにより鉛に塑性変形を与える

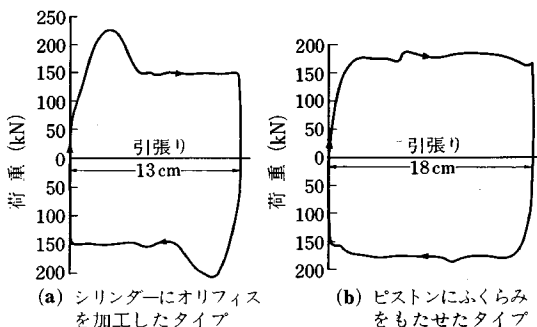


(a) 鉛押し出しダンパー



(b) 鉛プラグ入り積層ゴム支承

図-4 鉛を用いたダンパーおよび免震支承



(a) シリンダーにオリフィスを加工したタイプ

(b) ピストンにふくらみをもたせたタイプ

図-5 鉛押し出しダンパーの履歴ループの一例

と、鉛の結晶粒子は長く引き伸ばされ、結晶のずれが生じる。その後、加熱すると塑性ひずみの影響から解放されて、回復→再結晶→結晶粒子の成長、という順で塑性変形前の状態に戻る。金属材料に塑性変形を与えた後に加熱し、1時間以内に50%の粒子を再結晶させるのに必要な温度を再結晶温度とよぶが、鉛の特徴はこの再結晶温度が他の金属に比べてきわめて低い点にある。すなわち、鉄、銅、アルミニウムの再結晶温度は、それぞれ450°C、200°C、150°Cであるのに対して、鉛の再結晶温度は20°Cにすぎない。したがって、鉛は常温においても結晶粒子の回復、再結晶、再成長がすみやかに生じ、ひずみ硬化の影響が生じにくく、また、金属疲労の心配も少ない。

ダンパーにより吸収されるエネルギーは、基本的に鉛の塑性変形に伴う熱エネルギーとして消費される。したがって、繰返し載荷に伴う温度上昇とこれによる減衰力の低下が問題となりそうな気がするが、Robinsonらは載荷実験に基づき大きな問題はないと指摘している。すなわち、15 kNの鉛押し出しダンパーを用いて加振振動数1 Hzで1800回の繰返し載荷を連続して加えたところ、ダンパーの表面温度は210°Cで定常状態に達したという。また、-20°Cで冷やして実験した結果も、25°Cの常温状態での実験結果とほとんど変わらなかったと報告されている。

ただし、温度上昇に伴う減衰力の変化はこれよりももう少し複雑であり、まず、一般に温度が上昇すると、押し出し力が減少するため、エネルギー吸収能は減少傾向を示す。これに対して、鉛の回復、再結晶は温度上昇があるとより早く生じるため、ひずみ硬化の影響は小さくなり、鉛の塑性的性質の回復が早くなる。結局、両者がバランスして、たとえ過度な力が作用しても、このために異常な温度上昇が生じ装置を破損させるようなことは

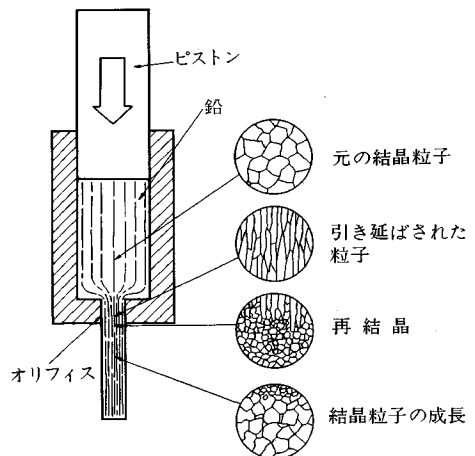


図-6 塑性変形した金属の再結晶過程

ないといわれている。

なお、鉛押し出しダンパーの特徴は長ストロークの装置が容易に得られることと、降伏後の剛性が非常に小さいため、この領域に入った後の地震力を正確にある一定値以下に制御できる点にある。±20 cm のストロークで 150 kN クラスの装置であれば、外径 15 cm、全長 1.5 m、自重 100 kg 程度で製作できるという。

② 鉛プラグ入り積層ゴム支承

ニュージーランドにおいて最も使用実績の多い支承であり、この支承が開発されたために、免震設計が急速に普及したといっても過言ではない。鉛プラグ入り積層ゴム支承は図-4 (b) に示すように鋼板とゴムを加硫接着した積層ゴム支承の中央に鉛プラグを圧入したものである。穴の体積よりも 1% 程度大きめの鉛プラグを積層ゴム支承に圧入し、両者を一体化させる。適当な上載荷重が作用すると、鉛プラグと鋼板およびゴムの一体化がさらに促進され、支承に水平力が作用した場合に鉛プラグの全長にわたり一様に塑性ひずみが生じる。

図-7 は載荷実験から求めた履歴ループの一例であり、ほぼバイリニア形の履歴を描く。図中には積層ゴム単体の履歴も示してある。積層ゴムの剛性を k_r とすれば、鉛プラグ入り積層ゴム支承の初期剛性は約 $10k_r$ 、降伏後の剛性はほぼ k_r となる。ゴム支承の弾性復元力により鉛プラグがクリープするため、仮に残留変位が生じても自然に原位置に復帰する能力を有している。

(2) わが国における免震装置の開発

わが国においても建築物、原子力発電所、機械・コンピュータ施設への利用を中心にして免震装置の開発が進められている²²⁾。特に、建築物の分野においては、大手建設会社を中心に自社の研究棟、社員寮等の試験施工を終え、商用ビルの建設も一部で開始される段階にある。免震ビルの建設には、建築基準法第 38 条の規定による特別認定を受ける必要があり、現在までに 14 棟がこの認定を受けている²³⁾。

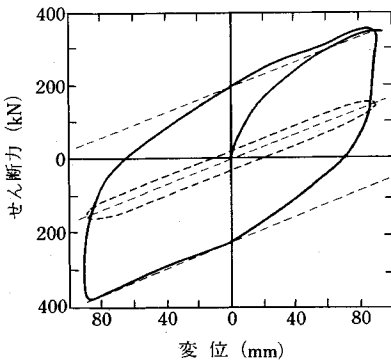
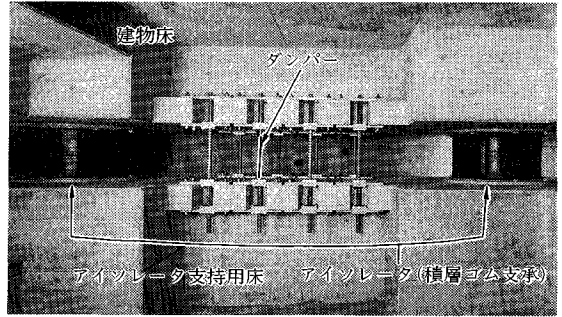
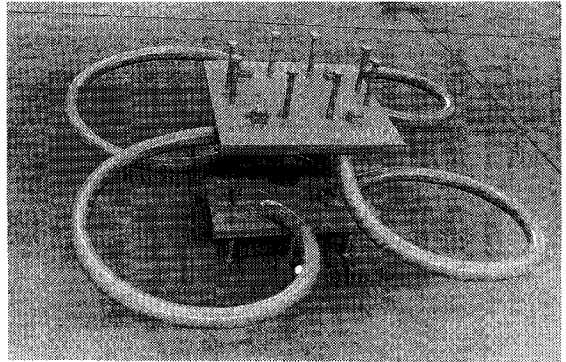


図-7 鉛プラグ入り積層ゴム支承の履歴ループの一例 (細い破線は積層ゴム支承単体の履歴ループ)



(a) 直線型弾塑性ダンパーとアイソレータ



(b) コイル型弾塑性ダンパー (別途、アイソレータを用いる)

図-8 わが国の免震建築に用いられている弾塑性ダンパーの例

表-3 わが国の建築物に用いられている免震装置 (ダンパー) の種別

ダンパーの材質	形 式	ビル数[棟]
軟 鋼	直線型弾塑性ダンパー	3(21%)
	コイル型弾塑性ダンパー	4(29%)
	支持台付弾塑性ダンパー	1(7%)
鉛	鉛プラグ入り積層ゴム支承	3(21%)
粘 性 体	粘性ダンパー	1(7%)
そ の 他	摩擦タイプ	2(14%)
合 計		14(100%)

これにつき、どのような免震装置 (ダンパー) が使用されているかを示すと、表-3 のようになる。鉛プラグ入り積層ゴム支承が 3 棟、軟鋼を用いた弾塑性ダンパーが 8 棟で使われている。軟鋼を用いた弾塑性ダンパーには、図-8 に示すようにまっすぐな鋼棒やせん状に曲げた鋼棒を用いるもの等があり、鋼棒の材質・形状に各種の工夫が凝らされている。また、粘性ダンパーの利用も図られている。

4. 免震設計法

(1) 免震設計を可能にしたソフトウェアの開発

免震設計を可能にしたのは、免震装置というハードウェアの開発が進められたことと同時に、これを使いこ

なす設計法，すなわち，ソフトウェアの開発が進んできた点が見逃せない。免震設計では，設計で想定した以上の地震動が生じた場合に構造物の安全性が確保されるかという点が特に重要である。これは，機械振動のように，一般に作用外力がコントロールできる範囲にある場合とは異なり，土木構造物に固有のきわめて厳しい条件である。

免震設計法を具体的に基準の形にまとめたものとしては，現在のところ，建築物を対象とした北カリフォルニア構造工学技術者協会の免震設計暫定要綱²⁴⁾と橋を対象としたニュージーランドの免震設計法^{25), 26)}がある。ここでは後者の設計法を紹介する。

(2) 免震設計の基本となる耐震設計法

免震設計法を示す前に，密接に関連しているので耐震設計法の概要について示しておく。ニュージーランドの道路橋の耐震設計では，中程度の地震 (moderate earthquake)，設計地震 (design earthquake)，設計地震を上回る地震 (shaking exceeding design earthquake) の三者に対して，それぞれ以下のような状態を想定して耐震設計することとされている²⁷⁾。

a) 中程度の地震

中程度の地震に対しては軽微な損傷以上の損傷を生じないように，基本的に弾性域内で抵抗する。ここで，中程度の地震としては，橋梁の耐用年数 T_b (100 年を想定) の 1/2 程度の再現期間を有する地震をいう。

b) 設計地震

設計地震に対しては，地震後少なくとも数時間以内には適当な応急復旧により緊急車両の通行が確保される程度の損傷しか発生しないものとする。ここで，設計地震とは，橋梁の耐用年数内に発生する確率が 50 % 以上の地震 (すなわち，再現期間 150 年の地震) をいう。

c) 設計地震を超える地震

設計地震を超える地震が生じて，橋のいかなる部分も崩壊してはならない。応急復旧により緊急車両の通行が可能であるとともに，完全に元どおりに復旧できなくても，本復旧により再使用可能でなければならない。

ただし，上記の 3 種類の地震に対してそれぞれ耐震設計すると計算の手間がかかり過ぎるため，設計地震に対してのみ耐震設計することとしている。再現期間 150 年に相当する設計地震力 (水平地震力) H は，次のように与えられる。

$$H = C_\mu ZW \geq 0.05 ZW \dots\dots\dots (1)$$

ここで， H ：設計地震力

C_μ ：橋の靱性率 μ に基づく基本水平地震力係数で，次式で与えられる。

$$C_\mu = \beta A_\mu \dots\dots\dots (2)$$

A_μ ：非線形応答スペクトルで図-9 により与え

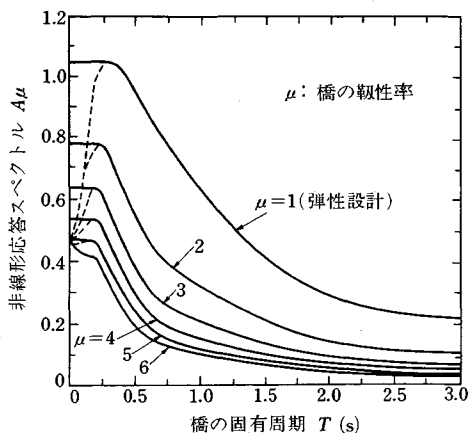
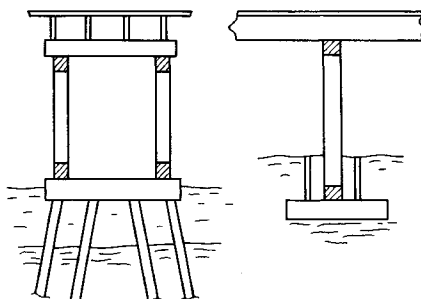
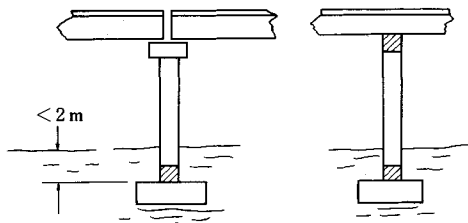


図-9 非線形応答スペクトル A_μ



(a) 靱性率 6 まで許せる構造形式



(b) 靱性率 4 まで許せる構造形式

図-10 耐震設計に許容できる靱性率の例

られる。

β ：地域別補正係数で 1.0~0.48 の値をとる。

Z ：重要度別補正係数で，走行台数に応じて 1.0~0.71 の値をとる。

ここで，図-9 に示す A_μ は， $\beta=1.0$ の地域に属する深い沖積地盤上での加速度応答スペクトル (減衰定数 $h=5\%$) であって，再現期間 150 年に対応する値を 6 種類の靱性率に対して示したものである。

設計地震時に許容される橋の靱性率は，構造特性だけではなく塑性ヒンジができた場合の発見および補修の容易さを基本に定められている。一例を図-10 に示す。

(3) 免震設計法の基本的な考え方

大地震に対しても橋が弾性限度にあるように設計する

と、非常に大きな断面が必要となり、現実的な設計ができない。このため、橋脚等塑性ヒンジにおけるエネルギー吸収を図り、地震応答を下げることを明確に計算に取り入れている点がニュージーランドの耐震設計法の特徴である。しかしながら、塑性ヒンジという限定された箇所とはいえ、設計地震時には被害が生じるわけであり、その復旧は高価なものとなる。したがって、塑性ヒンジと同等な効果をもたらす装置はできないものか、というのが、免震装置開発の基本的な考え方であった。したがって、ある意味で粘りを考慮したニュージーランド流の耐震設計法を推し進めた結果が免震装置の開発、ひいては免震設計法の開発につながってきたといえる。免震設計法のルーツは粘りを考慮した耐震設計法にあるという点が重要である。許容応力度法に基づく耐震設計法を長く採用してきたわが国では免震設計の考え方は理解されにくく、また、免震設計を生み育てる土壤が限られていたといえよう。

以上の設計思想からもわかるように、橋梁の耐震設計に免震設計を導入する利点を挙げると、以下のようなになる。

① 概念的に設計思想が簡単である

地震エネルギーが集中する位置を限定しているわけであり、初めからこの箇所に被害が発生してもよいように、また、場合によっては地震後に取り替えが簡単となるように設計、製作、施工すればよい。このため、概念的に設計が単純明快となる。

② 構造部材の損傷をコントロールできる

免震装置以外の構造部材の損傷をなくするか、もしくは軽微なものに限定することができる。

③ 経済的な設計ができる

免震装置の採用により、下部構造に作用する地震力を分散、軽減できる。この結果、下部構造として粘りの少ない部材の使用も可能となり、経済的な設計とすることができる。さらに、下部構造の強度、粘り等が十分でない既存橋の耐震補強にも利用できる。

免震設計というと、従来、わが国では上記③の効果のみが強調され、ややもすると現状よりも耐震性の低い構造物になるのではないかと危惧される場合があるが、①および②が基本であり、結果として③の効果も生まれることに注意しなければならない。

免震設計の基本方針は、上述した3種類の地震タイプごとに以下のように設定されている。

a) 中程度の地震

エネルギー吸収は免震装置のみで行い、構造部材にはいかなる損傷も生じさせない。

b) 設計地震

経済性と地震発生頻度を勘案して構造部材の強度を定

める。しかしながら、免震設計を採用した場合の降伏に対する構造部材の余裕度は、免震装置を用いない通常の耐震設計で考慮されているものと、同等以上の値が確保されるようにする。

c) 設計地震を超える地震

上部構造および下部構造に破壊が生じることはやむを得ないが、どのような順番でどこに破壊が生じるかを正しく配慮して設計する。このために、粘りのある部材とない部材の強度に差をつけ、また、構造細目にも十分留意して設計を行う。

また、このような基本方針を達成するために、試験により十分機能の立証された免震装置を用い、設計地震以上の地震に対する挙動が十分制御できるものを使用するとしている。

5. 免震設計により建設された橋の例

(1) 施工実績

免震橋は、ニュージーランド、アメリカ、イタリア²⁸⁾等で建設されている。免震設計の定義に、長周期化による地震力の低減やダンパーストッパーによる地震時水平力の分散を含めるとわが国にも多数の施工実績があることは前述したとおりである。

ニュージーランドでは施工中のものも含めると現在42橋の免震橋がある。また、下部構造の耐震補強を要する既設橋に対して、既存支承を免震支承に取り替えるだけで耐震補強した橋が数橋ある³⁰⁾。実際に使われている免震装置を分類すると表-4のようになる。ダンパー材として鉛を用いた橋が全体の84%を占め、軟鋼を用いた橋は16%と少ない。全体としては、鉛プラグ入り積層ゴム支承の使用事例が圧倒的に多い。

一方、アメリカにおいても、ここ3~4年の間に免震設計により耐震補強された橋が5橋、新設橋が1橋ある^{31),32)}。免震支承としてはすべて鉛プラグ入り積層ゴム支承が用いられている。

ここでは、ニュージーランドにおいてどのような免震

表-4 ニュージーランドにおいて免震橋(42橋)に用いられている免震装置の種別

ダンパーの材質	形 式	橋数(パーセンテージ)	
軟 鋼	ねじりばりタイプ	1(2%)	7(16%)
	片持ち板タイプ	5(12%)	
	曲げばりタイプ	1(2%)	
鉛	鉛押し出しダンパー	3(7%)	36(84%)
	鉛プラグ入り積層ゴム	33(77%)	
合 計		43(100%)	

注) 鉛押し出しダンパーと鉛プラグ入り積層ゴムを併用している橋が一橋あり、ここでは両者にそれぞれ含めてカウントしてある。したがって、免震装置を用いた橋の総数は42橋である。

橋が作られているかを見てみよう。

(2) ねじりばりタイプの免震装置を用いた例

South Rangitikei 橋は、図-11 に示すように橋長 315 m (45.5+4@56+45.5 m) の単線鉄道橋であり、最初の免震橋として 1974 年に竣工した。William Clayton ビルに免震設計が利用されたのが 1982 年であるから、この橋は近代的な免震設計を取り入れた最も初期の構造物の 1 つということが出来る。上部構造は、PC 箱桁で、橋脚は高さ約 70 m という非常に背の高い RC 門形ラーメンである。

この橋の特徴は図-12 に示すように橋脚基部に免震装置 (図-3 (a) 参照) を設け、橋軸直角方向に大きな地震力を受けると、引張力を受ける側のラーメン橋脚が浮き上がり (ステップするとよんでいる)、この際に図-13 に示す免震装置の働きでエネルギー吸収を図ろうとするものである。きわめて大胆な発想であり、この橋をみたとき、耐震設計においてこれだけのことが可能であるのならば別の面でも橋梁をもっと自由な発想で作れるのではないかと、強い印象を受けたものである。

免震装置としては 1 柱当たり 2 個、したがって 1 橋脚当たり 4 個、5 本の橋脚で 20 個が用いられている。1 装置当たりの復元力は 40 tf、ストロークは ±80 mm である。

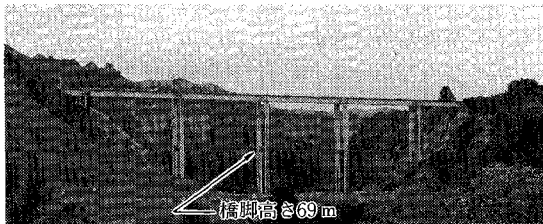


図-11 世界最初の免震構造物 South Rangitikei 橋

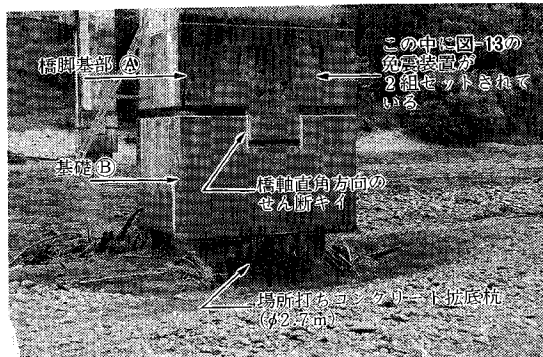


図-12 橋脚基部のヒンジ部

(図-13 に示す免震装置がヒンジの直上に取り付けられている)

(3) 曲げばりタイプの免震装置を用いた例

Cromwell 橋は、図-14 に示すように橋長 272 m の 5 径間連続鋼トラス橋であり、壁式橋脚および重力式橋台によって支持されている。基礎は RC 場所打ち杭および直接基礎である。上部構造は、ゴム支承によって支持されており、左岸側の橋台上に図-15 に示すように曲げばりタイプの免震装置が 6 個 (降伏荷重 30 tf) 取り付けられている。

(4) 鉛プラグ入り積層ゴム支承を用いた例

オークランド市内に建設中の Grafton 橋は図-16 に示すように橋長 59.6 m の 3 径間連続場所打ち T 桁 (2 主桁) 橋であり、橋脚は壁式逆 T 形、橋台は逆 T 形となっている。図-17 は鉛プラグ入り積層ゴム支承のセット状況を示したものであり、60 cm×50 cm の支承が橋台、橋脚上に各 2 個、計 8 個使用されている。鉛プラグの降

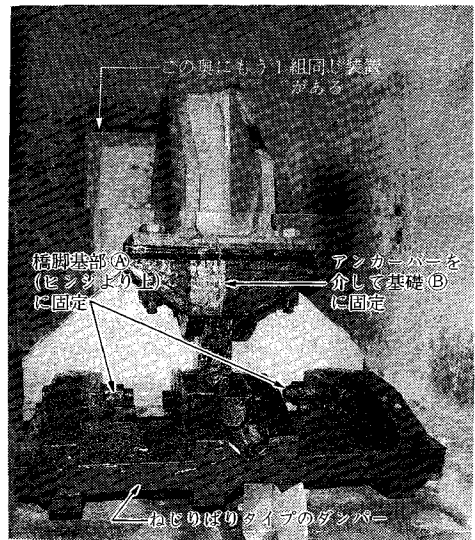


図-13 ねじりばりタイプの免震装置 (中央の板の反対側にもう 1 組同じ装置がある (図-3 (a) 参照))

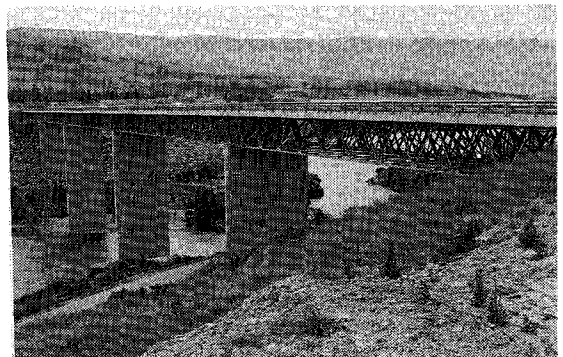
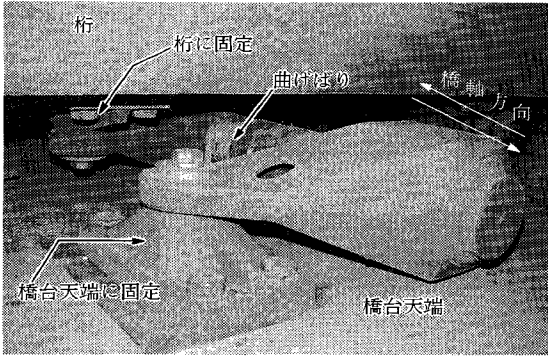
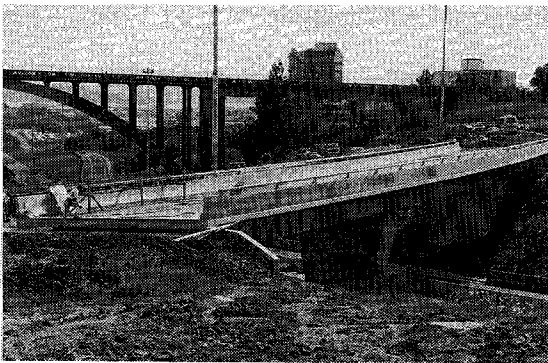


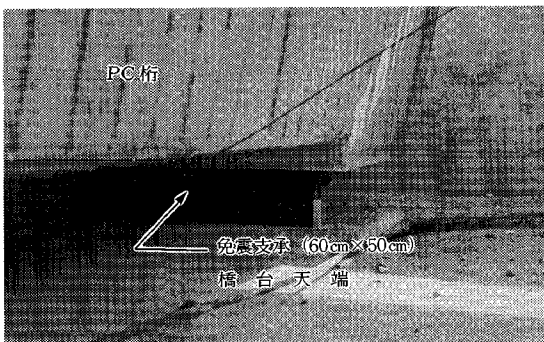
図-14 Cromwell 橋



図—15 曲げばりタイプの免震装置 (Cromwell 橋, 図—3 (c) 参照)



図—16 Grafton 橋 (建設中)



図—17 鉛プラグ入り積層ゴム支承のセット状況 (橋台上)

伏荷重は支承 1 個当たり 13.5 tf で、これは死荷重反力の 5.3% に相当する。

6. わが国への適用—今後の展望—

わが国の『道路橋示方書 V 耐震設計編』(日本道路協会, 昭和 55 年) には、昭和 44 年の『道路橋耐震設計指針』の段階から「地震の影響の低減を期待する構造」を規定した条項が設けられている。この条項に従ったわが国独

自の免震化の試みについては 2. に示したとおりであるが、橋に対する本格的な免震設計の導入は、今後の段階ということになる。

道路橋への免震設計の利用については、現在、(財) 国土開発技術研究センター「免震装置を有する道路橋の耐震設計研究委員会 (昭和 61~63 年度)」(委員長: 片山恒雄東京大学教授) において鋭意検討が進められつつある^{33), 34)}。現在までの検討で明らかとなった事項を示すと以下のようなになる。

(1) 上部構造系の固有周期が 1 秒未満の橋であれば、これを 1~3 秒程度に長周期化することにより、地震力の低減が可能である。免震設計の適用性は長周期化のメリットが生かしやすい下部構造があまり高くない橋に対して高い。

(2) 地盤条件の良好なニュージーランド、アメリカ等と異なりわが国では基礎周辺地盤の変状により大被害を受けた事例が多い。地盤変状が生じる可能性のある箇所では、現在よりも不静定次数を引き下げる免震設計の適用は現実的ではない。免震設計の適用が可能なのは良好な地盤上に建設される橋である。

(3) 大地震に対する橋の耐震性の検討が可能な耐震設計体系を採用しておかないと、免震設計の意義と効果を十分理解できない。わが国では免震設計の採用は、工費低減よりも大地震時の耐震性の向上に重点を置くべきである。このようにしても適切に設計すると、結果的に工費の節減が期待される。

(4) 橋梁用の免震支承は、設置スペースの関係で建築用のものよりコンパクトであることが要求される。当面はアイソレータとダンパーが一体となった鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰ゴムを用いた免震支承等の利用が有利であろう。新材料の開発に伴い、さらに橋梁に適した新しい免震支承の開発が必要であり、また、可能であろう。

(5) 免震設計を活用し、超多径間連続化を図り、ノージョイント化に大きく貢献できる可能性が高い。

上記研究委員会においては、3 年間の研究成果を道路橋に対する免震設計ガイドライン (案) の形でとりまとめる予定としている。

7. あとがき

免震設計技術はニュージーランドのみならず、近年わが国の建築部門やアメリカ等においても活発に取り入れられつつあるが、これだけ普及するようになった理由の 1 つは、鉛プラグ入り積層ゴム支承という実用的な免震装置の開発にあったということができる。これはニュージーランド物理工学研究所の Skinner, Tyler, Robinson 博士らを中心とするわずか数人のグループにより開

発されたものである。この成果をニュージーランド公共事業開発省が積極的に橋梁や建築物に取り入れ、改良と工夫を重ねた結果、現在世界中が注目する技術にまで成長してきたことは、新技術の開発とその実用および普及の過程を知るうえで興味深い。

さらに重要な点は、免震装置というハードウェアを使いこなすソフトウェア（免震設計法）が粘りを基本とするニュージーランド流の耐震設計法の延長上に作られているという点である。免震設計のルーツが粘りを基本とした耐震設計法であることを忘れてはならない。このようなソフトウェアがなければ、免震装置は単なる絶縁用の機械部品に過ぎず、土木構造物に実用されなかったであろう。このことは、設計体系を作る際にどのような状態に対して設計するのかを十分認識しておくことの重要性を示している。許容応力度法に基づく耐震設計法の中からは免震設計の発想は出てこなかったことを強調しておきたい。

ともあれ、近代の実用的な免震設計技術はニュージーランドで開発され、わが国の橋にも導入できる可能性が高いといえよう。もともと上下部構造の結合に支承を使用しており、また、支承を据え付けるべき橋台、橋脚が存在しているという点で免震設計の適用性は建築物よりも橋の方が高いと考えられる。ニュージーランド等における免震設計技術の開発および実用化の努力に敬意を払いつつ、大地震時の耐震性の向上を中心とする耐震設計の基本的な考え方を明確にしたうえで、今後わが国においても道路橋等の耐震設計に免震設計の考え方を取り入れていくことが期待される。

謝 辞：本稿をとりまとめるに際して、ニュージーランド公共事業開発省の D. K. Kirkcaldie 氏（招へい研究員として昭和 63 年 1～2 月に土木研究所に滞在）、アメリカ Computer Engineering Service（株）の I. Buckle 博士および電力中央研究所 塩尻弘雄博士には多数の資料の提供を受けた。また、東京大学生産技術研究所の片山恒雄教授、建設省土木研究所 岩崎敏男研究調整官からは、本稿の取りまとめに際し、貴重なご助言を得た。「免震装置を有する道路橋の耐震設計研究委員会」の委員、幹事の皆様には、免震設計の基本的な考え方につき、種々ご指導を受けた。ここに記して、厚くお礼申し上げます。次第である。

参 考 文 献

- 1) 藤田隆史：免震技術の現状と将来，日本機械学会論文集（C編），第51巻，第461号，pp. 8～14，1985.1.
- 2) Buckle, I. : Development and Application of Base Isolation and Passive Energy Dissipation—A World Review, Proc. of A Seminar and Workshop on Base Isolation and Passive Energy Dissipation, pp.153～174, San Francisco, U. S. A., 1986.3.
- 3) 川島一彦・相沢 興・高橋和之：最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式，土木研究所報告，第166号，1985.9.
- 4) 利泉正哲：免震構造は，いま，建築技術，No.416，pp.55～62，1988.4.
- 5) 松田泰治・青柳 栄・塩見 哲：免震構造に関する調査，電力中央研究所報告，1985.10.
- 6) 萩原 豊，ほか4著者：浮場式原子力発電所浮体構造物の地震応答特性（その1），（その2），U3850，87011，電力中央研究所，1986.3，1987.8.
- 7) Takahashi, T. and Kuranishi, S. : Dynamic Behavior of Flexible Structures with Vibration Absorber, Proc. 7th World Conference on Earthquake Engineering, pp.17～24, Istanbul, Turkey, 1980.9.
- 8) 加納 勇・津村直宣・川人達男：名港西大橋の塔の動吸振器方式耐風制振装置，土木学会第39回年次学術講演会，1984.10.
- 9) 矢作 枢・吉田和彦：高架橋における交通振動のアクティブコントロール，土木学会論文集，第356号/I-3，pp.435～444，1985.4.
- 10) 古石喜郎・武藤 浄：アクティブマスダンパによる構造物の振動制御，日本機械学会論文集（C編），第52巻，第473号，pp.237～243，1986.1.
- 11) 日本道路公団技術部構造技術課：多径間連続橋の研究，橋梁と基礎，Vol.78-2，pp.33～39，1978.2.
- 12) 伊関治郎：粘性ストッパー，プレストレストコンクリート，Vol.21，No.4，pp.103～107，1979.8.
- 13) Katayama, T., Kawashima, K. and Murakami, Y. : Current Seismic Design Consideration for Reducing Seismic Lateral Force of Highway Bridges in Japan, Proc. New Zealand-Japan Workshop on Base Isolation of Highway Bridges, pp.11～20, Wellington, New Zealand, 1987.11.
- 14) 松村駿一郎・福岡 悟・水元義久・中田恒和：ダンパーを用いた多径間連続橋の耐震設計，橋梁と基礎，Vol.82-5，pp.31～37，1982.5.
- 15) 金光 宏・樋口康三：吊構造部を有する橋梁の変位制御に関する考察，本四技報，No.18，pp.9～13，1981.10.
- 16) 上前行孝：ダンパー方式による橋梁耐震設計法の研究，東京大学提出学位論文，1970.
- 17) 遠藤有昭：免震構造を用いた9径間連続PC箱桁橋の設計と施工，（上），（中），（下），橋梁と基礎，Vol.84-9，pp.10～16，Vol.84-10，pp.36～40，Vol.84-11，pp.42～48，1984.9，1984.10，1984.11.
- 18) Skinner, R.I., et al. : Hysteretic Dampers for the Protection of Structures from Earthquake, Proc. of New Zealand-Japan Workshop on Base Isolation of Highway Bridges, pp.28～45, Wellington, New Zealand, 1987.11.
- 19) Robinson, W.H. and Greenbank, L.R. : An Extrusion Energy Absorber Suitable for the Protection of Structures during an Earthquake, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.4, pp.251～259, 1976.

- 20) Robinson, W.H. : Lead-Rubber Hysteretic Bearings Suitable for Protecting Structures during Earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.10, pp.593~604, 1982.
- 21) Tyler, R.G. and Robinson, W.H. : High-strain Test on Lead Rubber Bearings for Earthquake Loadings, *Bull. of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol.17, No.2, pp.90~105, 1984.6.
- 22) Fujita, T. : Earthquake Isolation Technology for Industrial Facilities—Research, Development and Application in Japan—*Bull. of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol.18, No.3, pp.224~249, 1985.9.
- 23) 北川良和：免震技術とその効果，*コンクリート工学*，Vol.24, No.3, pp.99~104, 1986.3.
- 24) SEANOC : Tentative Seismic Isolation Design Requirements, 1986.9.
- 25) Ministry of Works and Development : Design of Lead-Rubber Bearings, Civil Engineering Division, 818/A, New Zealand, 1983.
- 26) Blackley, R.W.G. : Analysis and Design of Bridges Incorporating Mechanical Energy Dissipating Devices for Earthquake Resistance, *Proc. of New Zealand-Japan Workshop on Base Isolation of Highway Bridges*, pp.64~92, Wellington, New Zealand, 1987.11.
- 27) Chapman, H.E. : The New Zealand Philosophy and Design Loadings, *Proc. of New Zealand-Japan Workshop on Base Isolation of Highway Bridges*, pp.21~27, Wellington, New Zealand, 1987.11
- 28) Parducci, A. and Medeot, R. : Special Dissipating Devices for Reducing the Seismic Response of Structures, *Proc. of Pacific Conference on Earthquake Engineering*, pp.329~340, Wairakei, New Zealand, 1987.8.
- 29) Billing, I.J. and Kirkcaldie, D.K. : Base Isolation of Bridges in New Zealand, *Proc. of New Zealand-Japan Workshop on Base Isolation of Highway Bridges*, Wellington, New Zealand, 1987.11.
- 30) Stuart, C.R. : Seismic Retrofitting of Highway Bridges in New Zealand, *Proc. of New Zealand-Japan Workshop on Base Isolation of Highway Bridges*, Wellington, New Zealand, 1987.11.
- 31) Zelinski, R. : California Department of Transportation Bridges Earthquake Retrofitting Program, *Proc. 2nd Joint U.S.-Japan Bridge Workshop on Performance and Strengthening of Bridge Structures and Research Needs*, pp.213~217, San Francisco, U.S.A., 1985.8.
- 32) Buckle, I.G. and Mayes, R.L. : Seismic Isolation of Bridges Structures in U.S.A., *Proc. U.S.-Japan Workshop on Bridge Engineering*, pp.1~23, Tsukuba, Japan, 1987.4.
- 33) (財)国土開発技術研究センター：免震装置を有する道路橋の耐震設計研究報告書，1987.3.
- 34) (財)国土開発技術研究センター：ニュージーランドにおける橋梁の免震装置調査報告書，免震装置を有する道路橋の耐震設計研究委員会現地調査団，1987.12.
- 35) 川島一彦：ニュージーランドにおける道路橋の耐震設計技術，*土木技術資料*，Vol.30, No.9, 1988.9.
- 36) 川島一彦：ニュージーランドにおける道路橋の免震設計技術，*土木技術資料*，Vol.30, No.10, 1988.10
(1988.8.4・受付)