

震災と土木地震工学

Seismic Hazard and Lifeline Earthquake Engineering

久 保 慶三郎*

Keizaburo KUBO

本所での 30 数年間研究してきた土木構造物の地震工学的研究のうちから、震害を統計的な数量で表しうる橋の耐震性評価とその手法、地下埋設管の震害率と地盤との関係および地震動最大加速度との関係について述べ、あわせて震害の人的物的損害の分析から土木地震工学研究の必要性を強調したものです。

1. はじめに

定年退官を迎えての退官記念講演の機会を借りて、30 数年本研究所で主として研究してきた土木構造物の地震工学的研究を述べることにします。地震の影響を考慮して構造物の地震時挙動、地震に対する耐力を研究し、より耐震的な構造物を研究する部門を昔は耐震工学とか耐震構造学とか、あるいは応用地震学とか呼んでいたわけですが、最近は地震工学という言葉が主として使われています。地震工学以外の呼称は地震学と構造学の両者を総括して表現していない点で難があったわけですが、地震工学がうまい表現だということになり、今日では広く使用されております。この呼称は、1956 年頃から使われ始めたように思われます。1906 年にサンフランシスコに大地震があり、その 50 周年を記念して 1956 年に世界のこの分野の研究者が集まり、研究発表会（これが第 1 回の世界地震工学会議と呼ばれるようになります）を開催した機会に初めて Earthquake Engineering という言葉が用いられました。この言葉の直訳が地震工学であり、例えば世界地震工学会議、国際地震工学会というように広く、また公式的に使用されております。ところが最近では地震工学という言葉の上に他の言葉を冠して、新しい研究分野を表すことが流行してまいりました。1 例をあげると Lifeline Earthquake Engineering があります。この分野は建物とか住宅建築とは異なる都市供給施設、都市への輸送施設の地震工学的研究を行う分野です。この名称は、1973 年頃に米国で使われ始めたものです。ライフラインとは、生命線と訳されるわけで、ガス管、水道管、電気・通信、オイルパイプライン、道路および鉄道などの都市への輸送、供給施設はまさに都市にとっては生命線的存在であるわけです。標題の土木地震工学は今日初めて使用する言葉であります。地震工学のうち、土木構造物の地震時挙動、耐震設計を研究する分野を土

木地震工学と名付けた次第で、筆者の研究してきた分野はまさに土木地震工学の何ものでもないと申せます。

2. 地震による損失

最初に地震工学のバックグラウンドになっています物的および人的損害と地震との関係、換言すれば震災の特性について言及します。図-1 は地震の規模（マグニチュードで表します）と死者数との関係を示しています。横軸には理科年表からとった人命の犠牲の出た地震の規模、縦軸にはその地震によって生命を奪われた人数がとってあります。この場合地震後発生した火災による焼死者は除いてありますし、外国での例は抜いてあります。図から関東地震の死者数が飛び抜けて大きいことがわかりますが、近似的には右上がりの曲線で地震のマグニチュードと死者数の関係がそれほど大きい誤差がなく表すことができるように思われます。地震の規模が 7.0 を越えると急速に人命の損失が増加することもわかります。

現在地震予知の重要性が強調され、東海地震の関連で駿河湾とその周辺地区の地震および地形変動の観測網が強化されていますが、東海地震関連で予知できるマグニチュード (M) は約 8 以上といわれています。本年 3 月 21 日の浦河地震は予知できなかったわけですが、予知可能な地震がマグニチュード 8 と仮定しますと、図-1 から M=8 の地震の犠牲者は約 1 万人と推測されますので、地震予知が成功すると約 1 万人が地震の犠牲にならなくてすむようです。すべての住民が予知のあと全員避難するとも考えられませんが、地震の犠牲者の数は 1 万人より減少するかも知れませんが、地震予知は人的損失の救助には有効でありましょう。しかしながら地震予知ができて、構造物の補強を完了する時間的余裕があるとは考えられませんが、地震による物的損失は地震予知とは直接関係がないでありましょう。

中国で 1976 年の 6 月早朝に M=7.8 の地震が唐山市を襲い、市民は就寝中のために崩壊した瓦礫の下敷きになり、中国側の公式発表によりますと、60 万市民のうち

* 東京大学名誉教授

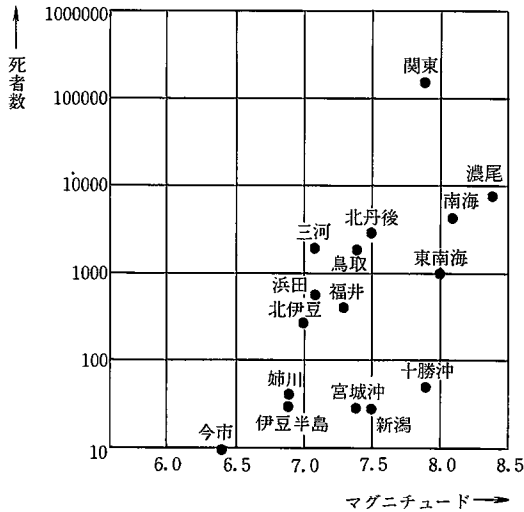


図-1 地震の規模と死者数

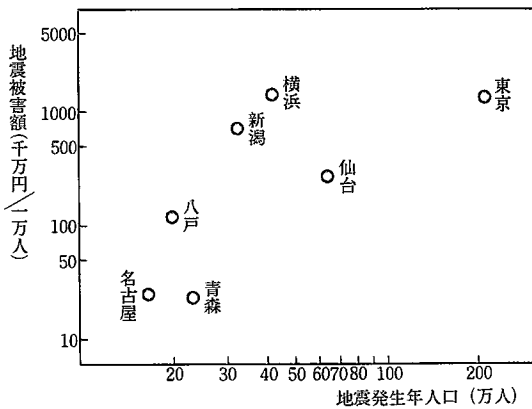


図-2 地震による損失

24 万人の生命が奪われ、16 万人が負傷したとなっておりますので、もし唐山の場合地震予知が成功しておれば、図-1 の平均値以上の人命が助かったことになります。

つぎは地震による物的損害、換言すれば地震予知のみによつては救済しえない損失について述べます。図-2 は昨年大学院を卒業した院生の佐藤浩君の論文から借りてきたものですが、横軸には地震発生時の該当都市の人口が、縦軸には人口 1 万人に対する地震による 1 次被害の金額が 1 千万円単位でとってあります。図中には東海地震 (1944) による名古屋、十勝沖地震 (1964) による青森市と八戸市が分けて、関東地震 (1923) の横浜市のそれぞれの被害額が記されています。図から判断しますと、大被害を発生させるような地震が発生しますと、人口当たりの被害額は人口とともに大きくなるように思われます。その原因は必ずしも明瞭ではありませんが、都市の諸施設は人口とともに増加し、それぞれの構造物の耐震性には差はあるものの、近似的には施設が増加すれば物的損失も大きくなることを示しているのではないで

しょうか。図から判断しますと、人口 1 千万人の都市での被害額は約 50 兆円となります。この額は昭和 55 年度の物価で換算した金額でありますから、50 兆円と申しますと、国民総生産の 4 分の 1 とか 5 分の 1 とかの額であります。この大きい物的損失が 1 つの破壊的地震で瞬時に生じてしまうことになります。

以上の人的物的損失の調査から、地震予知により人的損失を軽減することはできるが、物的損失の軽減にはあまり有効ではなく、国民総生産の数分の 1 にも達する物的損失を少なくするのは地震工学の研究の成果にかかっているといえましょう。

人類の生命と財産を地震から守ることの難しさは、ユネスコのキャッチフレーズの変化からも理解できます。すなわち、1964 年の「地震学と地震工学に関する政府間会議」でのユネスコのキャッチフレーズは「人類を地震から守る」ことであったが、1976 年の「震害軽減のための政府間会議」では標題のように、震害は皆無にできるものではなく、軽減すべきものと変化してきたわけです。

3. 土木地震工学小史

わが国における地震工学がいかに発展してきたかを振り返ってみることにします。1981 年の濃尾地震はわが国および世界における地震工学誕生の契機であったと思います。この地震で愛知県北部および岐阜県は大被害を受けました。濃尾地震以前のわが国の建設技術は、地震の影響を考慮していない欧米の建築技術 (それらの国の地震活動度は低く、設計に地震の影響を考慮する必要がなかった) の直輸入であったわけですが、しかし、明治の先輩はこの地震を教訓として、わが国においては建造物を設計する場合は必ず地震の影響を考慮すべきことを悟ったわけです。1892 年には震災予防調査会ができて、当時の地震学および地震工学の権威者を委員として発足し、地震工学の研究が本格的に実施されることになりました。したがって地震工学の研究は現在までたかだか 90 年程度の年限しか経っていないわけであり、震災予防調査会はいまだに精力的に研究を進め、関東地震の調査報告書を最後に幕を閉じるわけですが、その間 100 号の報告書を出版しています。100 冊の報告書のうち地震工学の発展の中で忘れてならないのが、1915 年に出版された 83 号の報告書であり、その題は耐震家屋構造論 (佐野利器博士著) であります。この報告書は震災予防調査会が誕生して約 4 分の 1 世紀が経って出版されたもので、内容は今日でも広く耐震設計の基本になっています。静的震度法の提案であります。この報告書では地震の影響をいかに設計にとり入れるかが述べられており、地震の現象は複雑ではあるが設計に地震の影響を考慮する場合は、自重に設計震度を乗じた荷重を、構造物の重心の位置で水平に作用させて構造物の安定および強度を精査

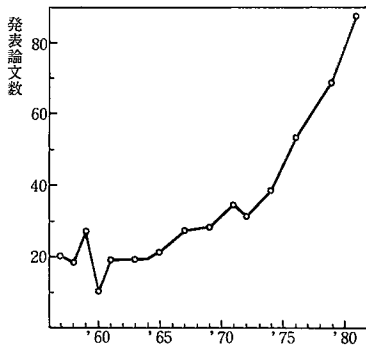


図-3 研究発表論文数の増加傾向 (土木学会)

すればよいと述べてあります。まさに構造物の耐震設計法の発明がなされたわけです。

土木の分野では、1933年に物部長穂博士著の「土木耐震学」が出版されました。物部博士は震災予防調査会の委員として活躍され、ダムの振動、煙突の震害の研究を初め多くの研究成果を挙げられましたが、今日でも地震時土圧の公式に物部博士の名前がついていて、この土圧の計算式は広く使われています。この本の中には、橋の橋脚の耐震強度の計算法も述べられていますが、これをベースに1933年以降に土木工学の分野でも地震工学的研究が活発に行われるようになりました。1955年には岡本舜三先生の「アーチダムの実験的研究」が出版され、土地地震工学の研究に新しい転機が作られたわけです。1950年頃までは地震国のわが国においては、肉厚の薄いアーチ型のコンクリートダムは、その耐震性に疑問ありということで、アーチダムの建設は許可されていませんでした。しかし、アーチダムの経済的有利さは無視することができないので、岡本先生が電力関係の技術者と協同して、模型実験、数値計算などを進めて、アーチダムの耐震性を確認された報告書が上述のものであります。この研究は模型実験や数値計算の手法という、従来この分野の研究ではあまり用いられなかった手法を開発しながら、アーチダムの動的挙動を解析し、ついにアーチダムの建設の基礎固めをした点意義深いものがあります。また、本研究は1956年の第1回世界地震工学会議以後の新しい研究の流れの出発点にも位置していると考えられます。

1945年に不規則入力を受ける1自由度系の応答計算が電子計算機を用いることで、数値解析が可能であるという論文が発表され、この技術を構造物の地震応答に応用した論文が発表されてくるのが、わが国においては1956年以降になります。今日の超高層建物、長大スパンの橋などの耐震設計に用いられている構造物の動的解析手法、構造物の実物振動試験、実験室内の模型振動実験などの手法が1955年以降に開花してくるわけです。1955年以降における土地地震工学の発達を度合いを土木学会

の耐震工学研究発表者の数でみてみることにします。図-3は、1956年以降の研究発表会(原則として年1回となっています)における発表論文数の変化を示したものでして、1956年には約20で、その後数年間はなかなか増加していなかったのが、1970年くらいから急速に増加しはじめて、1980年には90編に近い論文が発表されていることを示しています。図-3は、発表者数または論文数ですが、土地地震工学の分野の研究も同じ傾向で年を追って非常に活発になってまいりました。

4. 橋の震害の特徴

これまでの研究でわが国の構造物の耐震性はかなり向上してきました。このことは東欧または中近東などでは地震の強さがそれほど強くないにも拘わらず、住宅などを初めとして構造物が地震によって破損する例が多く見られることによって理解できると思います。しかしながら、わが国の構造物が震害にまったく免疫性があるとも言え切れなく、ユネスコのキャッチフレーズのように震害は軽減することは可能ですが、無くすることはできません。強い地震に襲われまると、落橋も出現することになります。写真-1は、1964年の新潟地震による昭和大桥の落橋事故で、写真-2は、昭和大桥より少し下流にある万代橋の地震後の状況を示しています。万代橋は鉄筋コンクリート造りのアーチ橋で軽微な被害を受けたに止まり、地震後唯一の橋として信濃川の兩岸にまたがる新潟市の交通の動脈となり、震災後の復興に活躍しました。万代橋は、恩師の福田武雄先生が設計された橋で、設計震度は0であったのに反し、落橋した昭和大桥の設計震度が0.2であったのは皮肉な現象でした。

アーチ橋の耐震性が秀れていることは外国でも実証されています。写真-3は、ユーゴスラビアのスコピエ市(筆者がユネスコの専門家として、1969～72年の間に3回訪問し、大学院で講義した大学のある町)の中央を流れるバルダル川に架設された石造アーチ橋です。1963年のスコピエ地震で周辺の建物は瓦解しましたが、15世紀に建造された石造の橋は地震でもビクとせず、現在も無事に役目を果たしています。アーチ橋が地震に強いことは、関東地震の報告書にも述べられており、関東地震後の東京の復興のときに聖橋(お茶の水駅の近くにありますが)をはじめとしてアーチ橋が多く建設されたわけです。

昭和大桥の教訓として、橋の桁同志を連結して、各個撃破的に落橋しないようにすることを教えられました。最近では、建設省あるいは道路公団等で落橋防止構造を設計に取り入れるように強く指導しています。六本木付近の首都高速道路公団の橋桁を見ても、桁と桁とが鉄板またはピンで連結されているのが見られます。これは一種の落橋防止構造です。写真-4は、落橋防止構造が設備されていたためにほとんど被害らしいものはなかった例で

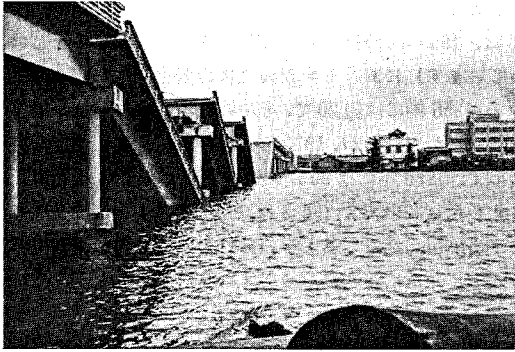


写真-1 落橋した昭和大橋

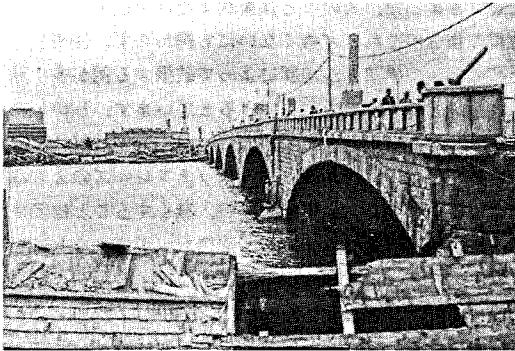


写真-2 万代橋

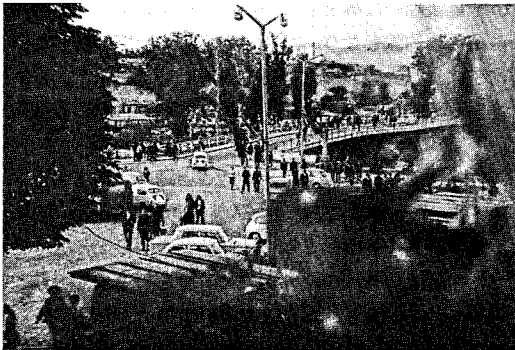


写真-3 スコピエの石造アーチ橋

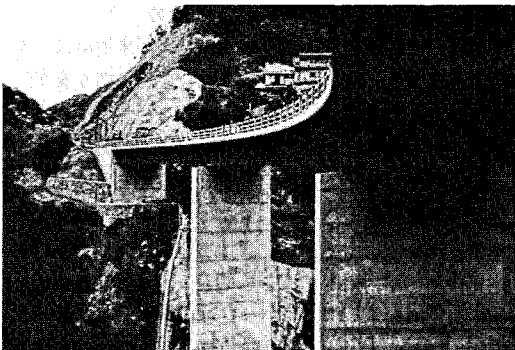


写真-4 五十鈴橋

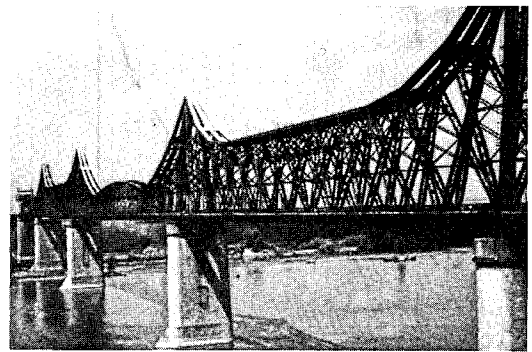


写真-5 ルーマニア国の落橋防止つき鉄道橋

す。この橋は五十鈴橋と名付けられ、3 径間の連続桁橋で、この橋の桁は橋台と鉄製の平板で完全に結合されており、そのために 1975 年の伊豆半島沖地震の震源地の近傍に位置していたにも拘わらず、無被害に近い優れた耐震性を示したわけです。桁と橋台とを連結していた鉄板が強い引張力を受けた跡は歴然としており、橋台のコンクリートは鉄板の近傍で剥落していましたが、橋桁自身は無疵でした。

落橋防止構造が有効に作用した例として、ルーマニア国のドナウ河を横断する鉄道橋（定着桁の径間長：160 m、吊桁の径間長：80 m）をあげることができます。この橋は 1895 年にイタリアの技師サリーニによって設計施工された橋で、全景を写真-5 に示します。この橋の形式はゲルバートラス橋で、張出し部のある定着桁部とこれに支えられた吊桁部とから成り立っています。吊桁の支承に約 150 mm の長尺ボルトが挿入してあり、吊桁の支承の大移動を防ぐ仕組みになっていましたが、この長尺ボルトがルーマニア地震のときにうまく作動し、定着桁同志が少し広がったため吊桁の支承のローラーが 1~2 本支承部からはずれてはいましたが、150 mm のピンの拘束力で吊桁の落橋を防止できたわけです。

5. 橋の震害予測

過去の震害事例を見ますと、同じ架橋であっても、ある形式の橋は地震に強いのに反し、他の形式の橋は地震に弱いことがわかります。橋の耐震性を数量的に評価することができますと、橋の震害を予測することが可能になります。定量的に橋の耐震性を評価するためには、橋の耐震強度を詳細な計算によって行う方法が採られてきました。しかし、この方法では時間と経費が多く必要であるために、多くの橋の耐震性を短期間に判定する手法としては不適当となります。

上述の手法に代わるものとしては、各構造細目ごとに点数を付し、橋全体の総合評価の点数を求め、その数値の大小で橋の耐震性を評価しようとする簡易判定手法が数例実施されてきました。構造細目としては、例えば橋

表-1 サンプル橋の特性と指定震害度

サンプル番号	項目 橋梁名	地 盤			液状化		桁構造		支 承			ピアノの高 さ (m)			径間数		天端幅		震度階			基礎工		サ ン プ ル の 指 定 震 害 度 の 階
		2 種	3 種	4 種	無	有	アーチ	単 純 ゲ ル バ ー	普 通	M・M	0 5	5 10	11 15	1	2	1.4 m 以下	1.4 m より大	5	6	7	バ イ ル ベ ン ト	杭	二 柱 ケ ー ソ ン	
1	豊 口 橋			○	○			○	○			○			○		○		○				○	3.0
2	玉 川	○			○			○	○				○		○		○		○				○	3.0
3	井 細 田		○		○			○	○		○				○	○				○		○		3.5
4	酒匂川(鉄・落下部)			○	○			○	○		○				○	○				○			○	3.0
5	酒匂橋(道路)		○		○			○		○	○				○		○			○	○			5.0
6	早 川 (道)		○		○			○		○	○				○	○				○			○	3.0
7	昭 和 大 橋			○		○		○		○		○			○	○		○				○		4.0
8	東 跨 線 橋		○			○		○		○		○			○	○		○				○		4.0
9	板 垣 橋		○		○			○		○		○			○		○			○			○	4.0
10	心 吹 橋			○	○			○	○		○				○	○			○		○			2.5
11	東北線・荒川橋(高)			○		○		○	○		○				○		○	○					○	2.0
12	東海道線・六郷川			○	○			○	○				○		○	○		○					○	2.0
13	八 千 代 橋			○		○		○	○			○			○	○		○					○	3.0
14	酒匂川(鉄・落下せず)	○			○			○	○		○				○		○			○			○	1.5
15	蓬 来 橋			○	○			○	○			○		○			○		○				○	2.0
16	花 園 橋			○	○			○	○			○		○			○		○				○	2.0
17	大 江 橋			○	○		○		○			○			○		○		○				○	1.0
18	早 川 (鉄)	○						○	○		○				○		○			○			○	1.0
19	舞 子 川	○			○			○	○						○		○			○			○	1.0
20	第 1 緑 町			○	○			○	○		○			○			○			○			○	1.0
21	第 2 緑 町			○	○			○	○		○			○			○			○			○	1.0
22	常盤線隅田川(低)			○	○			○		○		○			○		○	○					○	1.5
23	" (高)			○	○			○	○		○				○	○		○					○	0.8
24	東北線荒川橋(低)			○	○			○	○			○			○		○	○					○	1.5
25	綿糸町高架			○	○			○	○		○				○		○	○					○	1.0
26	隅田川(道)			○	○			○	○				○		○		○	○					○	1.0
27	"			○	○			○	○				○		○		○	○					○	1.0
28	"			○	○			○	○				○		○		○	○					○	1.0
29	通 船 橋		○		○			○	○		○				○	○		○			○			1.5
30	万 代 橋			○		○	○			○		○			○		○	○					○	1.0

桁の構造、橋脚の基礎、橋脚の材料、基礎の構造などに分類し、強度の低いものほど高い点数で評価し、各該当細目ごとの評価値を総計した数値をもって、その橋の耐震性を数量的に調査しようとするわけです。したがって、高い評価値の橋ほど大被害、落橋の可能性が高くなります。この方法では各構造細目別の評価は担当の学識経験者の個人的な判断によるので、個人差が非常に大きい欠

点があります。この簡易判定法はすでに東京、大阪および京都市内の橋の耐震性の判定に使用されていますが、評価に個人差があり過ぎるので客観性に欠ける欠点があります。

筆者らが東京都の防災会議の仕事の1つとして、橋の震害予測の研究に従事したことがあります。筆者らの方法は橋の耐震性を数値で評価する点は上述の簡易判定方

法と似ていますが、該当項目を勘で評価する代わりに、数量化理論Ⅰ類を用いて、少し科学的に評価値を決めることにしました。計算に用いた被害橋は30で、一覧表を表-1に示します。表-1の右から第1列の数値は*i*番目の橋梁の震害の程度を表していて、大被害の橋は5.0、無被害の橋を0として、震害の程度に応じ、表では0.8から5.0までの数値を割り振ったものです。次は、橋の震害に関係すると思われる項目（例えば地盤の種類、径間数、橋の構造形式、橋脚の高さ、地震の強さなど）を選び、各項目を適当なカテゴリー（地盤について述べますと、Ⅰ種からⅣ種地盤までの4箇のカテゴリー）を設定し、すべてのカテゴリーの重み係数（震害の大小に貢献する度合と同じ）を未知数にして多元連立1次方程式を解いたわけです。項目の選定もいくつかのケースを試算して、工学的に妥当と思われる解の得られる項目、カテゴリーを表-1のように決定し、計算を進め、表-2に示す計算結果を得ました。地盤に関する重み係数を例にとって説明しますと、Ⅱ種地盤（洪積地盤で代表されます）の値が1.0、Ⅲ種地盤（沖積地盤が該当）の値が1.86、層厚の厚い軟弱層はⅣ種地盤ですが、その重み係数は、1.60となったわけです。Ⅰ種地盤上で震害を受けた橋が表-1のデータに入っていなかったために、Ⅰ種地盤の重み係数は計算されませんでした。表-2の各項目の欄にレンジの値が記入されていますが、レンジとは当該項目中のカテゴリーの最大値を最小値で除した値です。レンジの大小は、橋の耐震性にその項目がどのくらい貢献しているかを示す値であります。表-2の計算結果から橋の耐震強度に最も大きく影響している項目は上から3番目の桁構造であることがわかります。桁構造の項目のレンジは3.0で、その次のレンジ値が、2.64の地震の強さ（震度階で表示されています）となります。

表-2の計算結果の中には、工学的判断では納得のいかないものもあります。例えば、Ⅳ種地盤上の橋梁の方がⅢ種地盤上の橋より震害を受け易い、すなわちⅢ種地盤の重み係数の値が、Ⅳ種地盤のそれより大きくなっていますが、これは工学の常識とは矛盾しているように思われます。また、Ⅰ種地盤の重み係数を決めなければなりませんし、落橋防止構造の設置されている橋をどのように評価するかなど、現実存在する橋の耐震性評価が可能になるように作業を進めることが必要でした。方法としては表-2の計算結果を基にして、工学的判断を利用して、未解決のカテゴリーの重み係数を決め、表-3の結果を得たわけです。考え方は、落橋防止構造をもつ橋の重み係数は普通の橋のそれを4割下げて、0.6とし、また連続桁橋の耐震強度は単純桁橋とアーチ橋の中間と考えるのが妥当と考えられたので、中間値の2.0を割り当てたわけです。

表-3の値を東京都に存在する260の橋について適用

表-2 数量化Ⅰ理論による解析結果

j	項 目 名 称	範 時		重み係数 W_{jk}	レンジ
		k	名 称		
1	地 盤	1	2 種	1	1.86
		2	3 種	1.86	
		3	4 種	1.60	
2	液状化	1	無	1	2.01
		2	有	2.01	
3	桁構造	1	アーチ	1	3.00
		2	単純・ゲルバー	3.00	
4	支 承	1	普 通	1	1.15
		2	M・M	1.15	
5	橋台・橋脚 の高さ	1	≤ 5 m	1	1.72
		2	5 ~ 10 m	1.72	
		3	≥ 10 m	1.68	
6	径間数	1	= 1	1	1.75
		2	≥ 2	1.75	
7	天端幅	1	≤ 1.4 m	1	1.25
		2	> 1.4 m	0.80	
8	震度階	1	V	1	2.64
		2	VI	2.41	
		3	VII	2.64	
9	基礎工	1	パイルベント	0.15	1.36
		2	杭	0.11	
		3	二柱ケーソン	0.11	

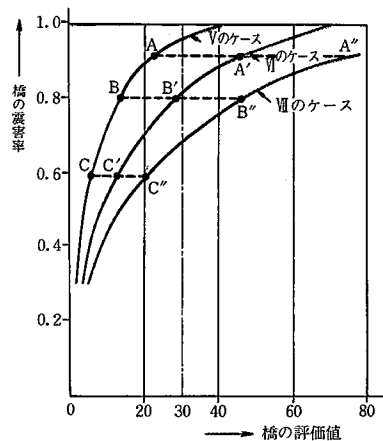


図-4 東京都の260橋の累積加積曲線

して、それぞれの橋の評価値を求めたところ、工学的常識に反する結果はできませんでした。図-4は、260橋架の評価値の累積加積曲線です。横軸には橋の評価値を、縦軸には橋の数を百分率で表示しています。1番

表-3 上部構造の落下に重点をおいた橋梁の耐震性判定基準

項 目	範 疇	垂み係数	備 考
地 盤	1 種	0.5	地盤種別は「道路橋耐震設計指針」4.3.(2)の区分による
	2 種	1.0	
	3 種	1.5	
	4 種	1.8	
液状化	無	1.0	「道路橋耐震設計指針」3.7.による。
	おそれあり	1.5	
	有	2.0	
桁構造	アーチ・ラーメン	1.0	
	連 続 桁	2.0	
	単純・ゲルバー	3.0	
支 承	落下防止あり	0.6	ゲルバーに漆接があれば落下防止。MMは同一橋脚上の2つの可動支承の意味。
	普 通	1.0	
	M ₁ M ₂	1.15	
橋台・橋脚の高さ	≤5 m	1.0	高さは橋台・橋脚の地表面高の最大値。
	5～10m	補間値	
	≥10m	1.7	
径間数	= 1 1	1.0	連続桁は1連が1径間。ゲルバーは吊りスパン、アンカーアームスパンの和。
	≥ 2	1.75	
天端幅	広い(A/S ≥ 1)	0.8	A = 実距離、S = 「道耐震」5.2.2 の値
	狭い(A/S < 1)	1.2	
	ゲルバーのかけ違い	D ≥ 1	A = 実距離、D = A/60 (地盤1～3種)、D = A/70 (地盤4種)。
		D < 1	
震度階	5	1.0	
	5.5	1.7	
	6	2.4	
	6.5	3.0	
	7	3.5	
基礎工	パイルベント以外	1.0	摩擦杭など明らかに弱体なものは1.4とする。
	パイルベント	1.4	
橋台・橋脚の材料	レンガ・無筋コンクリート	1.4	
	上記以外	1.0	

左の線は全橋架が震度5の強さの地震動を受けた場合に260の橋の評価値がどのように分布するかを示しています。評価値30の線は橋が地震時大被害を受けるか否かの限界値と考えられますので、震度5の地域では2～3%の橋がかなりの被害を受けることが図-4から読みとれます。図中の真中の曲線が震度6の地域内の橋の特性を表わしていて、震度6の地域では、14～15%の橋が大被害を受けると推測されます。さらに、地震が強くなり、震度が7となりますと、その地域の橋の約30%が破壊すると考えられます。これらの予測値は落橋の限界値として

30を仮定して求められたものですが、評価値も誤差を含んでいますし、限界値も多少変動しますので、定性的傾向に主眼を置いて、地震の強さの増大とともに、落橋する橋が概数としてどのぐらい増すものかを見ていただきたいと思います。

図の曲線上にA、BおよびC（他に”あるいは”をつけたものもあります）はそれぞれⅢ種地盤上の多径間の単純桁数あるいは、それと類似の橋の評価値を示すもので、B点はⅡ種地盤上の落橋防止つき多径間の単純桁数のそれを、C点はⅡ種地盤上のアーチ橋で代表される橋

の評価値を示しています。地震の強さは5ですが、地震の強さが6あるいは7になりますとAはA'からA''へと、B、Cについても目標の転移をして、それぞれB'、B''またはC、C''となると予測されます。この場合も落橋の限界値を30としますと、Aのグループの橋は震度6および7の地域で大被害を受けると考えられますが、Bのグループの橋は震度7に到って、初めて被害が生じることになります。また、Cのグループの橋は震度が7の地域にあっても、その評価は30以下となるので、被害は生じないと推測されます。

6. ライフライン地震工学の研究

地震時の都市への輸送および供給施設をライフライン構造物と称し、上述の橋もその1つであります。その他ガス、水道、オイルパイプライン、道路、鉄道などもライフライン構造物であります。最近では「電信・電話のケーブルも地下埋設管に通っていますので、ライフライン地震工学の研究対象も広がってまいりました。

都市の生命線ともいうべき、上述の諸構造物の地震工学的研究はそれほど古いものではなく、1964年の新潟地震を契機にして研究が本格化することになります。アメリカではわが国より少し遅れて、1971年のサンフェルナンド地震がきっかけとなり、1974年にアメリカ土木学会の中に、ライフライン地震工学特別委員会が設置され、研究を急速に発展させ、設計基準をまとめる努力を始めたわけです。

筆者は、東京都の防災関係の調査研究を推進する必要から、ライフラインの耐震性の研究および耐震設計法の開発を始めました。最初に行ったのが、水道管の震害と地盤との関係でした。震害の予測の観点から、定性的分析ではなく、定量的に分析することを試みました。岡本舜三先生の研究では、家屋は軟弱地盤で最も被害率が高かったが、水道管の被害率は軟弱地盤とローム地盤との

境界付近で最大であったことが述べられていますが、筆者も関東地震による東京の水道管の震害データを用い、地盤と震害率との関係を調査しました。図-5は水道管の震害率（単位長さ当たりの破損箇所数）と地盤との関係を示したものです。地盤の良否も数値化して表示することにし、数値化する基準を表-4に示します。東京都を1kmのメッシュに分割し、各メッシュの地盤を表-4の数値と、4種の地盤の混合割合を面積比で配分した値とで評価しました。したがって、図-5の左の1.0~1.5の地盤は山の手の地盤を、3.5~4.0は下町の軟弱層地盤を代表しています。図-5から判断しますと、水道管の震害率の最大になる地盤は3.5~4.0の軟弱層地盤ではなく、ローム層と軟弱層が混在している2.5~3.5の地盤であることが結論されます。関東地震による東京の水道管の震害

表-4 基準の地盤とその数値

評価値	地 盤 種 別
$C_1=1.0$	よく締まった基盤上のローム層
$C_2=2.0$	河・谷底の地盤で、5~10メートルの表層
$C_3=3.0$	10~20メートルの沖積層
$C_4=4.0$	層厚30メートル以上の沖積層

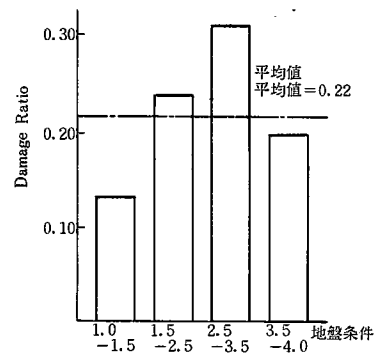


図-5 水道管の震害率と地盤との関係

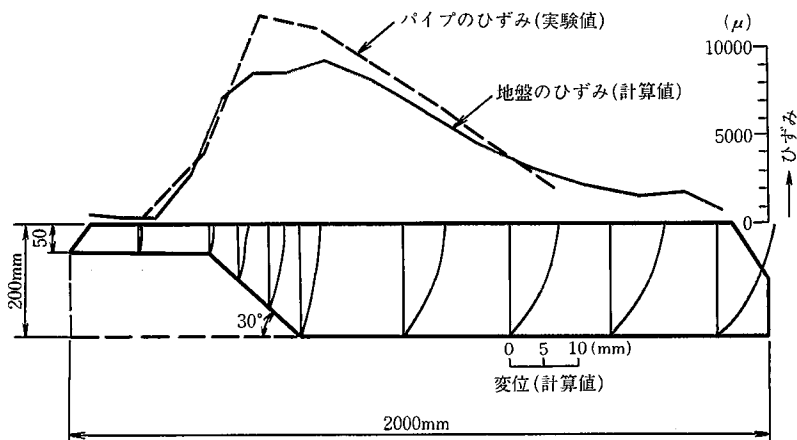


図-6 傾斜した基盤をもつ地盤のひずみ分布

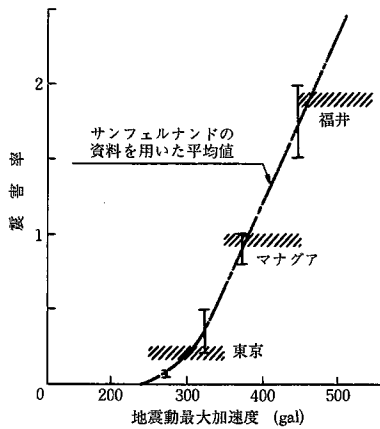


図-7 地盤加速度と震害率との関係

率が0.22ですから、約5 kmに1箇所 の破損が発生していますが、ローム層地盤、換言すれば、均一な堅い地盤では震害率が0.13位で、地盤の悪い所の震害率の約半分となっています。

地下埋設管の破損は地盤内のひずみに直接影響されていることは、地盤の比較的均一でない(図-5の2.5~3.5)地盤で震害率が最大となっていることから明らかです。このことは傾斜した基盤上の表層内ひずみ分布を解析した図-6の結果からも説明されます。この研究は模型振動実験と有限要素法を用いた数値解析とを図-6の単純化した地盤について行ったものです。図中の点線は実験値を、実線は解析解を示していますが、表層の厚さが厚いところ(図中の右半分)より、表層の厚さが変化している部分、換言すれば、基盤の傾斜している区間で地盤のひずみが急に増加していることがわかります。地盤内の変位振幅は表層の厚さが厚い区間で最大になっていますが、表層厚の減少とともに、変位振幅も小さくなりますが、単位の長さ離れた位置での変位振幅の差は表層厚の変化のある区間で大きくなっていることがわかります。

最後に、水道管の震害率と地盤加速度との関係を述べます。両者の関係を示したものが図-7でして、1971年のサンフェルナンド地震の資料を用いてまとめたものです。ロスアンゼルス市および周辺地区に約200台の強震計が設置されていたので、地盤上の最大加速度分布をかなり綿密に求めることができたのと同時に、ロスアンゼルス市の水電力局には詳細な水道管(鉛コーキング継手

の铸铁管)の震害分布図が完成していたので、両者から地盤加速度と水道管の震害率との関係を解析できたわけです。

地盤加速度は、250~300ガル、300~350ガル、350~400ガル、400~500ガルの4段階に区分し、それぞれの区分の地域内の水道管の震害率を求め、図-7の各加速度区分内の上下限値を画き、その中央値を曲線で結んだものが図-7の1点鎖線です。図から判断しますと、地盤加速度が250ガル以下では水道管の震害はほとんど発生しないが、350ガルを越えると急速に震害率が高くなることが明らかとなりました。なお、他の地震による水道管の震害率も参考のために図中に記入してあります。ただし、この場合は水道管の震害率は資料がありましたが、地震加速度についてはデータがなかったので、関東地震の東京の地盤加速度は250~350ガル、1972年のマナグア地震(M=6.3)のマナグア市のそれは350~450ガル、福井地震の福井市のそれは450~550ガルと仮定し、図中では幅を持って書いてあります。図-7の曲線は以上の3つの地震のデータとも矛盾していないことが判明しました。図には記入してありませんが、1977年のルーマニア地震(M=7.2)によるブカレスト市内の水道管の震害率は0.07で、地震当時作動していた唯一の強震計の最大加速度は200ガルであったので、この結果も図-7の結論とは矛盾するものではないわけです。

7. お わ り に

最近、筆者が作成に直接的に関係した耐震設計基準は次のものです。1980年に高圧ガス導管・中低圧ガス導管の耐震設計指針、1979年に水道施設の耐震工法指針、1979年のLNG地下式貯槽の設計指針および同じ年のトンネル耐震継手、1976年の地下埋設管路の耐震継手などです。これらはそれぞれガス関係の技術者、水道技術者、鉄管製造の技術者と共同して作成したもので、該当の構造物の耐震設計技術の向上にいくぶんかの貢献をしているものと考えます。

この稿を終わるに当たって、約30年間土木地震工学の研究および耐震設計基準作成の作業にご協力いただいた関係各位に深謝するとともに、片山恒雄助教授はじめ研究室の職員の方に厚くお礼申し上げる次第です。

(1982年5月31日受理)