

橋梁の耐震強度の判定

Determination of the antiseismic strength of a bridge by

久保 慶三郎*・片山 恒雄*

Keizaburo KUBO and Tsuneo KATAYAMA

1. 橋と地震

昭和の初期に鋼橋の耐震設計法が規準化され、すでに50年が経過したが、その間に福井地震、新潟地震を初めとして、マグニチュード7.0以上の地震だけで、約30の地震(理科年表による)がわが国を襲っており、建物・橋などに被害が発生した。このことは耐震設計法の規準の制定やその後の研究にもかかわらず、橋の震害がなくなっていないことを示している。

日本鉄道施設協会の「地震と鉄道」によると、マグニチュードが6.0, 7.0, 8.0の地震で橋に多少なりとも被害の出る領域の半径はそれぞれ5 km, 25 km, 100 kmとなっている。もっとも落橋または橋脚の大亀裂によって、橋が使用不能になる範囲は上述の領域よりはるかに小さいものである。これらの大被害は地盤特性、設計に際しての耐震的配慮の有無などによるものと考えられ、大規模の地震の震源に近い所の橋で軽微な被害にとどまっている例もある。¹⁾ 設計規準もその後数回にわたり改訂され、震害経験および研究成果をとり入れて改善されているので、これから設計される橋の耐震強度は過去のそれらよりは向上しているものと考えられる。

しかしながら、過去の設計規準により設計された既設の橋を来るべき地震から護ることは非常に重要なことであり、特に大地震時に大衆が避難用に使用する橋を補強しておくことはさらに重要である。橋を地震から護るとか、補強するとかいっても、対象となっている橋の耐震強度を知ることが先決である。橋の耐震強度が判定され弱点が明瞭になれば、補強方法はおのづから解決されるであろう。以下に橋の耐震強度の判定の問題に含まれる要因とその影響度について述べたいと思う。

2. 過去の判定規準

橋の耐震強度を評価するのに点数制度をとると便利なのはすぐ思い付く方法で、地震危険度の評価が標準の値より大きければ危険だとし、十分低ければ大地震時にも軽微な被害にとどまると推定する考え方にもとづいている。すでに東京都、大阪および京都市内の道路橋および関東地方の鉄道橋などで点数制による橋の地震危険度

の判定方法がとられている。この方法においては、まず評価すべき項目、例えば地盤とか橋の現状とかをきまなければならない。京都および大阪市内の橋については、地盤条件、考えるべき地震の強さ、上部構造の健全度の現況、橋脚の建造材料、建設年月日、基準となった設計示方書などについて調査され、例えば良好の地盤は1点、軟弱な地盤は3点というように評価し、すべての項目についての評価点数を加算し、多い点数の橋ほど地震時に危険と判断した。しかしこの方法ではある項目に致命的な欠陥があっても、それで評価された点数は他の項目が低い点数である場合は、総計の点数には陽に現われにくい欠点をもつことになる。京都市内の橋の危険度の判定に際しては、この欠点を除くため、点数制のみにたよらない総合評価方式がとられた。すなわち各項目の評価を見て、重みを乗じた形で地震危険度を判断した。東京の橋の場合は調査項目をふやし、径間数、径間長、および上部構造の重量などが追加されている。東京の場合は総計の点数によって、橋の耐震性が判断されている。以上の方法で共通していることは、各項目の評価額は全く調査員の経験および技術的判断に依存していることである。したがって、上述の例における調査対象項目も調査員の勘に頼っているし、同一の事象に対する評価額も相違しているという矛盾が起こっている。この欠点を最大限に除去すべく、筆者らは、数量化理論を用いて、過去における震害をうけた橋をデータにして各項目の評価をなるべく客観的に行うことを試みた。

3. 数量化理論による項目別の重み係数

過去に震害を受け、資料や震害状況の明瞭な橋30をサンプルとして選んだ。これらの橋は関東、福井、新潟の各地震によって被害を受けた橋である。数量化理論第1類³⁾を用いることとしたので、各橋の震害度を点数で評価しなければならない。評価の基準としては落橋したか否かに重点をおくことにし、落橋したものは点数を高くし、落橋の軽微なものほど低い点数とした。これらの点数は表-1の最右欄に示した。完全に落橋したものは5点を与え、一部分落橋したものは3.5~4点を、軽微な被害の橋は0.8~1.0点を与えた。今回の震害度の評価は前述のごとく、けたの落下に注目して行ったものである。で、注目する点が異なれば、当然異なった震害度の評価

* 東京大学生産技術研究所 第5部

表-1 サンプル橋の特性と指定震害度

| サン プル 番 号 | 項 目 範 疇 橋 梁 名 | 地 盤 | | | 液状化 | | 桁構造 | | 支 承 | | ピ ア の 高 さ (<i>m</i>) | | | 径間数 | | 天端幅 | | 震 度 階 | | | 基 礎 工 | | サ 指 定 震 害 の 度 |
|--------------------|---------------------------------|-----|---|---|-----|---|-----|---|-----|---|---------------------------------------|---|----|-----|---|----------|----------|-------|---|---|-------|---|---------------------------------|
| | | 2 | 3 | 4 | 無 | 有 | ア | 単 | 普 | M | 0 | 5 | 11 | 1 | 2 | 14 | 14 | 5 | 6 | 7 | パ | 二 | |
| | | 種 | 種 | 種 | | | ー | 純 | 通 | ・ | と | と | と | | と | <i>m</i> | <i>m</i> | | | | イル | 柱 | |
| 1 | 豊 口 橋 | | | ○ | ○ | | ○ | ○ | | | ○ | | | ○ | | ○ | | ○ | | | | ○ | 3.0 |
| 2 | 玉 川 | ○ | | | ○ | | ○ | ○ | | | | ○ | | ○ | | ○ | | | ○ | | | ○ | 3.0 |
| 3 | 井 細 田 | | ○ | | ○ | | ○ | ○ | | | ○ | | | ○ | | ○ | | | ○ | | ○ | | 3.5 |
| 4 | 酒 勾 川 (鉄・落下部) | | | ○ | ○ | | ○ | ○ | | | ○ | | | ○ | | ○ | | | ○ | | | ○ | 3.0 |
| 5 | 酒 勾 橋 (道路) | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | ○ | | | | ○ | | ○ | | | ○ | ○ | | | 5.0 |
| 6 | 早 川 (鎗) | | ○ | | ○ | | ○ | ○ | | ○ | ○ | | | ○ | | ○ | | | ○ | | | ○ | 3.0 |
| 7 | 昭 和 大 橋 | | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | | | ○ | | ○ | | 4.0 |
| 8 | | | ○ | | | ○ | | ○ | | ○ | ○ | | | ○ | | ○ | | | | | ○ | | 4.0 |
| 9 | 板 垣 橋 | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | | | ○ | | ○ | | | ○ | | | ○ | 4.0 |
| 10 | 小 吹 橋 | | | ○ | ○ | | ○ | ○ | | ○ | | | | ○ | | ○ | | | ○ | | ○ | | 2.5 |
| 11 | 東 北 線 ・ 荒 川 橋 (高) | | | ○ | | ○ | | ○ | ○ | | ○ | | | ○ | | ○ | | | | | | ○ | 2.0 |
| 12 | 東 海 道 路 ・ 六 郷 川 | | | ○ | ○ | | ○ | ○ | | | ○ | | | ○ | | ○ | | | | | | ○ | 2.0 |
| 13 | 八 千 代 橋 | | | ○ | | ○ | | ○ | ○ | | | ○ | | | ○ | | ○ | | | | ○ | | 3.0 |
| 14 | 酒 勾 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 | 錦 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 |

となるし、計算で求められる各項目の重み係数の値も異なった値となる。

つぎに震害に直接的に影響すると考えられる項目を選定しなければならない。検討をはじめた段階ではなるべく多くの項目を設定し、解析の進展にともなって削除または変更が行われた。例えば、橋の架設年度、換言すれば橋の古さについて一応検討したが、古い橋が必ずしも地震に弱いとは限らないことが明らかになったので、架設年度は項目としないこととした。橋脚設置位置の地形、いかにいえば、橋脚が斜面上にあるか平坦な地形にあるかについても一応考慮すべき項目としたが、震害のサンプルとして選んだ橋は全部が平坦な地形に設置されていたので斜面上の橋脚は平坦地の橋脚より耐震強度は低いと考えられたが、橋脚設置位置の地形も項目としないこととしていた。同様の理由で橋げたが直線か曲線か、または斜めに川を横断しているか否かも最終的には項目としては考えないこととし、次の9ヶの項目について重み

係数を求める計算を試みた。

- 1) 架設地点の地盤種別 (1種~4種)
- 2) 砂地盤の液状化の有無
- 3) 橋げたの構造 (単純げた・アーチなど)
- 4) 丈承の状態 (鋼板・鋳物製)
- 5) 橋脚の高さ
- 6) 径間数 (1.2以上)
- 7) 橋脚の天端巾 (1.4 m以下・1.4 m以上)
- 8) 架橋地点の地震の強さ (気象庁の震度階、V・VI・VII)
- 9) 基礎の形式 (杭式・ケーソン・パイルベント)

以上の9項目を括弧内のような範疇(カテゴリー)にわけて、*j*番目の項目の*k*番目のカテゴリーの重み係数を以下に述べるようにして求めた。各項目のカテゴリーは表-1に示されている。

添字 *j* は項目を示しているの、*j* = 1 は地盤種別の項目をあらわしている。添字 *k* はカテゴリーを示しており、

地盤種別の項目では $k = 1, 2, 3$ はそれぞれ第2種地盤, 第3種地盤, 第4種地盤を示している. また添字 i はサンプル番号を示し, 表-1のサンプルの橋の上から順次に番号が付けられた. 次の特性をもつ x_{ijk} を導入する. x_{ijk} はサンプル i の j 番目の項目の k 番目のカテゴリーに該当事項(表-1の白丸印)があるものは1とし, 該当事項のない場合は0とする. したがって1番目のサンプルについて述べると

$$x_{113} = x_{121} = x_{132} = x_{141} = x_{152} = x_{162} = x_{172} = x_{182} = x_{183} = 1$$

となり, それ以外の x_{ijk} は0である.

j 番目の項目の k 番目のカテゴリーに対し重み係数を w_{jk} であらわし, サンプルでの震害度の推定値を α_i としたとき, α_i は記式で表わされるとする.

$$\prod_{j=21}^9 \prod_{k=21}^{2 \text{ or } 3} w_{jk}^{x_{ijk}} = \alpha_i$$

式中の x_{ijk} はある項目内のいずれか1つは1で残りは0であるので, 上記の左辺は実質的には九つの w_{jk} の積である. w_{jk} を求めるときは先に0.8~5.0の間で橋げたの落下に注目して査定した震害度 $A_i = \alpha_i$ とした.

$\alpha_i = A_i$ として上記の両辺の常用対数をとれば, $\log w_{jk}$ を未知数とする連立1次方程式となる. 未知数の数は連立方程式の数より多いので最小自乗法を用いて, 解の適合度を最大にするべく計算を行った.

4. 解析結果

前節で述べた方法によって求めた重み係数 w_{jk} を表-2に示す. 地盤の項目から, 第8番目の震度階の項目までについては, 各項目のカテゴリーのうち1つは重み係数を1として計算しているため, 第9番目のカテゴリーの重み係数はすべて1より小さい値となっているが, これは橋の震害度の査定を0.8~5.0までとしたために生じたもので, 重要なことは各項目の最小値と最大値の比, すなわち数量化理論というレンジであり, レンジが大きい項目が橋の耐震強度の判定に大きい影響をもっていることを意味している.

表-2の計算結果は工学者の常識的判断と異なる傾向を示す項目もでてくる. 例えば, 地盤の項目では, 工学の一般通念では最も悪い地盤すなわち第4種地盤の重み係数はそれより良質な第3種地盤のそれより大きいと考えられるが, 計算結果は逆になっている. 同様な現象は橋脚高さの5~10mと10m以上との間にも見られる. このような結果は, サンプル数が十分でないことと, サンプルの性質に偏りがあることによって生じたものと考えられる.

計算結果は上述の矛盾を含んでいるが, 次のような知

表-2 数量化I理論による解析結果

| J | 項目 | | 重み係数 w_{jk} | レンジ |
|---|----|----------|---------------|------|
| | K | 名称 | | |
| 1 | 1 | 2種 | 1 | 1.86 |
| | 2 | 3種 | 1.86 | |
| | 3 | 4種 | 1.60 | |
| 2 | 1 | 無 | 1 | 2.01 |
| | 2 | 有 | 2.01 | |
| 3 | 1 | アーチ | 1 | 3.00 |
| | 2 | 単純・ゲルバー | 3.00 | |
| 4 | 1 | 普通 | 1 | 1.15 |
| | 2 | M・M | 1.15 | |
| 5 | 1 | ≤ 5 m | 1 | 1.72 |
| | 2 | 5 ~ 10 m | 1.72 | |
| | 3 | ≥ 10 m | 1.68 | |
| 6 | 1 | = 1 | 1 | 1.75 |
| | 2 | ≥ 2 | 1.75 | |
| 7 | 1 | ≤ 1.4 m | 1 | 1.25 |
| | 2 | > 1.4 m | 0.80 | |
| 8 | 1 | V | 1 | 2.64 |
| | 2 | VI | 2.41 | |
| | 3 | VII | 2.64 | |
| 9 | 1 | パイロベント | 0.15 | 1.36 |
| | 2 | 杭 | 0.11 | |
| | 3 | 二柱ケーソン | 0.11 | |

見も得ることができた. すなわち, 桁の落下に重点をおいて計算すると, 震害に最も大きく影響する項目は上部構造の形式であり, つぎに地震動の激しさ, 地盤の液状化などが重要であることが判明した. 径間数の項目の結果から考えると, 単純げたを何らかの方法で相互に連結し, 連続ばり的な構造作用をもつようにすることは有効な耐震対策であることが推定される. また関東地震の報告書に述べられている, アーチは耐震性の最もすぐれた橋であるという結論と全く一致する計算結果が得られた.

5. あとがき

表-2の計算結果に技術的判断を加えて, 落下防止装置をつけた橋, 連続げたなどの特性も評価できるようにすると同時に, この評価方法を応用して現存の橋の耐震性を推定するようにすることも, この研究の1つの発展であるが, 各種の橋の地震時挙動の数値解析を行い, 表-2の各項目別の評価の妥当性を究明するのも重要な研究課題であろう. (1977年1月17日受理)

参考文献

- 1) 久保慶三郎: 地震 (IV地震と輸送・交通施設) 東大出版会 1976年11月
- 2) 久保慶三郎・片山恒雄: 橋梁の震害予測に関する方法, 第12回自然災害科学総会シンポジウム講演論文集 1975年10月
- 3) 林知己夫: 数量化の方法, 東洋経済新報社 1974年8月