

(97) 設計震度の道路橋の総費用に与える影響

環境庁大気保全局	正員	中島 威夫
建設省工本研究所	〃	岩崎 敏男
日本技術開発(株)	〃	〇嶋山 龍二
	〃	佐伯 光昭

1 まえびき

構造物の設計震度は 耐震安全性と経済性の両者のバランスを保つように設定されるべきではない。合理的に、最適な設計震度を設定するためにには 耐震安全性という概念と同一概念、すなわち金銭価値に換算する必要がある。このように観点から、費用便益の方法により、構造物の最適な設計震度を求めようとする研究が、近年、盛んに行なわれ始めた。大部分の研究は建築物⁽¹⁾を対象としているが、猪熊等は、道路橋を対象として、費用便益分析を行なった。^(2,3)

本研究は、比較的橋脚高さの低い(6~9m程度)一般の道路橋を対象に費用便益分析を実施し、設計震度と総費用期待値(初期建設費と地震による損失期待値之和)の関係を求め、地震危険度の異なる地域、および地盤種別による差異を比較検討するものとする。基本的な方法は、既往の研究と変わりはないが、各費用の推定をより現実的なものとするに努めた。すなわち設計震度ごとの初期建設費用は、設計条件を設定し、予備設計レベルで概算した。被害橋梁ばかりではなく、地震当時存在した震央距離ごと全橋梁数も考慮し、被害確率マトリクス(Damage Probability Matrix)を作成、被害を推定した。また、ごく簡単なモデルで間接被害を推定し、直接被害(復旧費用)のみを考慮した場合と比較した。

2. 費用便益の方法

水平設計震度 R_H で設計された道路橋(以下、橋または橋梁と呼ぶ)の地震危険度 a を考慮した1年当りの総費用期待値を、次式で定義する。

$$TEC(R_H) = IC(R_H) \cdot S + EDL(R_H) + EIDL(R_H) \quad (1)$$

ここで、

$TEC(R_H)$: 1年当りの総費用期待値	$EDL(R_H)$: 1年当りの地震による直接損害期待値
$IC(R_H)$: 初期建設費用	$EIDL(R_H)$: 間接損害期待値

である。Sは初期建設費用を1年当りの額に換算する係数であり、

$$S = i(1+i)^T / \{(1+i)^T - 1\} \quad (2)$$

と表わされる。ここで、 i は利子率、 T は償還の期間(年)である。式(1)における直接損害額期待値は、

$$EDL(R_H) = \sum_j (\sum_i P_{DSj} / I_i(R_H) \cdot P_{Ii}) \cdot DL(DS_j) \quad (3)$$

と書くことができる。ここで、

DS_j : 被害の状態 ($j = 1, 5$; 後述)	$P_{DSj} / I_i(R_H)$: I_i が発生した時、 a の橋が DS_j の状態にある確率; 被害確率マトリクス (Damage Probability Matrix)
P_{Ii} : 地震動強度 I_i ($i = 1, 4$) の年発生確率	
$DL(DS_j)$: DS_j が起こった時の直接損害額 (復旧費とする)	

間接損害の期待値は、同様にして次式で求める。

$$EIDL(R_H) = \sum_j (\sum_i P_{DSj} / I_i(R_H) \cdot P_{Ii}) \cdot IDL(DS_j) \quad (4)$$

ここで、

$IDL(DS_j)$: DS_j が起こった時の間接損害額 (後述)。

3. 初期建設費用の推定

鉄筋コンクリート橋脚1基の設計震度ごとの建設費用を、予備設計レベルで推定した。設計条件を表1に示す。基礎型式は最も一般的で、基礎とし、橋脚高さは、6m、9mとした。ここでは、H=6mの場合のみについて結果を示す。橋脚本体の設計は、建設省標準設計に基づく。上部工は単純合成版橋とし、地盤種別ごとに経済スパンを設定し、上部工反力を定めた。地盤は、不況により整理された⁽³⁾ 我国における代表的な中橋の地盤タイプに基づき、層厚、N値をばらつかせて、各地盤ごとに3〜5ケースのモデル地盤を設定した。

昭和57年ににおける積算単価を概算した橋脚1基(H=6m)の建設費用と水平設計震度の関係を図1に示す。範囲の広い4種地盤は、かなりばらつか、図1に示すように、直線と設計震度ごとの平均的費用を推定することにした。

4. 被害確率の推定

新潟地震、宮城県沖地震の道路橋震害資料に基づき、被害確率マトリクスを推定した。まず、各種の震害報告書から、被害橋梁の位置と被害度をリストアップした。被害度は、建設省土木研究所の分類⁽⁴⁾を参考にし、上部工、下部工を合わせた以下のランク(式(3)のDS_j)とした。すなわち、DS₀:無被害、DS_I:補修不要の軽被害、DS_{II}:中被害、局部的な損傷、DS_{III}:大被害、上部工、下部工のいずれかが再使用不可能な損傷をこうむったが、または、両者が補強補修を必要とする被害を受けた。DS_{IV}:全体的破壊、再使用不能。

被害確率を推定する際には、震央距離ごと(すなわち、地震動強度ごととする)の被害橋梁数とともに、地震当時存在した全橋梁数が必要である。そこで、道路区画および新潟、宮城県沖地震当時の道路統計年報から、震央距離20kmごとの全橋梁数(橋長15m以上)を推定し、各震央距離区域の被害橋梁数と比べると、ことにより、被害確率を算定した。さらに、最大加速度の距離減衰式から、最大加速度の条件付き被害確率、すなわち、式(3)の $\alpha P_{DSj}/I_c$ を求めた。最大加速度の推定は、宮城県沖地震に対しては、田中による2点直線法⁽⁵⁾の同地震に対する距離減衰式⁽⁵⁾を使用した。しかし、新潟地震ではほとんど加速度記録が得られていないので、道路橋示方書所定設計補に示した、第3種地盤に対する距離減衰式⁽⁵⁾を使用し、震央距離ごとの最大加速度を推定した。

このようにして得られた被害度ごとの被害確率と最大加速度の関係を図2に示す。同図には、対数回帰による被害確率推定曲線も示している。必ずしもよい相関とは言えないが、新潟地震と宮城県沖地震の結果が、比較的よく整合している。なお、同図中の被害度IIIの推定曲線は、被害度IIとIVの曲線の平均値とばっている。これは被害度IIIの場合の回帰が困難であったことにもよる。

表1 橋脚の設計条件

橋梁形式	くい基礎を持つ単純支持桁橋(道路橋)	
費用算定対象	くい基礎含む鉄筋コンクリート橋脚一基	
設計震度	水平震度	$K_H=0.0, 0.1, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$
	鉛直震度	$K_V=0.0$
上部構造	型式	単純合成版橋
	支間	2種地盤 30m
	3種地盤 40m	
	4種地盤 50m	
幅員	19m	
下部構造	型式	T型円形柱式橋脚(標準設計による)
	橋脚高さ	H=6m H=9m
	上部工反力	2種地盤 40 ton/m(支間30mに対応)
	3種地盤 50 ton/m(支間40mに対応)	
4種地盤 60 ton/m(支間50mに対応)		
基礎	くい基礎 鋼管φ600、厚さt=12mm	
材質	コンクリート 設計基準強度 210kg/cm ²	
	鉄筋 SD30	
	鋼管ぐい STK41	
地盤	2種地盤(3ケース) 3種地盤(4ケース) 4種地盤(5ケース)	

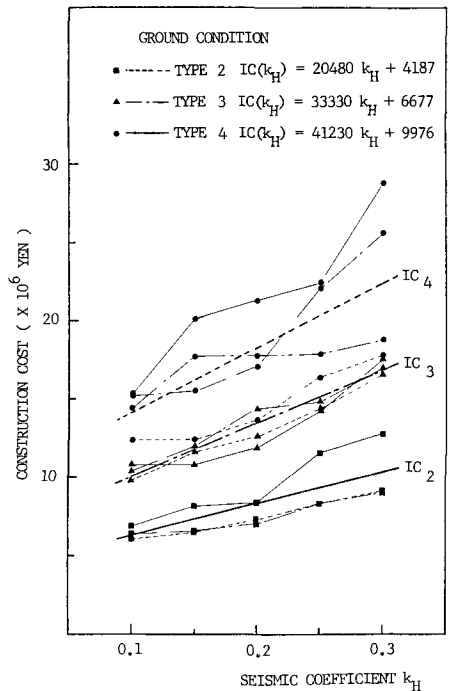


図1 設計震度と橋脚1基の建設費用の関係(H=6m)

図2に示す最大加速度と被害確率の関係は、 $k_H = 0.2$ の場合に対応するものとする。費用便益分析を行なうためには、他の設計震度に対する被害確率も必要である。またまた被害資料はほとんどないといふ。そこで、猪熊等⁽²⁾による設計震度、震度階ごとの平均被害率(=復旧費用÷建設費用)、アンケート調査結果を参考にし、 k_H が0.2以外の場合の被害確率を推定することとした。具体的には、 $k_H = 0.2$ と1とした時、 $k_H = 0.1, 0.3$ の被害率 α を各震度階について求め、この α を、設計震度に対する被害 α の起り易さと判断し、補正係数として $k_H = 0.2$ の場合(図2)に乘じ、各設計震度ごとの被害確率マトリクスを推定した。結果を表2に示す。 $k_H = 0.15, 0.25$ の場合も求め、後の費用便益分析で使用している。なお、震度階の加速度への変換は、通常言われている対応関係に従った。

5. 損害額の推定

直接損害額DL(DS_j)は橋梁の復旧費用と定義し、新潟、宮城県中地震における平均被害率から求めるものとする。被害率ごとの平均被害率を表3に示す。初期建設費用にこの α を乘じ、直接損害額を推定する。

一口に間接損害といっても、道路交通機能低下による波及効果は計り知れないものがある。本研究では、橋の交通機能低下による本来あるべき交通量の減少、あるいは交通に要する費用の相対的増加という観点からの間接被害を考慮することにし、迂路のある場合、ない場合の単純な交通システムに対して、間接損害評価モデルを作成した。

間接損害額は、道路計画における費用便益分析で通常考慮される走行便益、時間便益を、各々、走行損失、時間損失と読み替えることにより、両者の和として推定する。走行および時間損失は次式で与えられる。⁽⁶⁾

$$CT = Ve \cdot CR \cdot LAB \cdot D \quad CTM = Ve \cdot TAB \cdot CT \cdot D \quad (5)$$

ここに、CT: 走行費用(円), CTM: 時間費用(円), Ve: 交通量(台/日), CR: 走行単価(円/台・km), CT: 時間単価(円/台・分), LAB: 距離(km), TAB: 所要時間(分), D: 復旧時間(日)である。

式(5)を基本として、迂路の有無、橋の機能状況(正常、制限交通、通行止の3種の状態を仮定)により、間接損害額を推定した。表4に間接損害評価の一列を示す。完全に通行止の場合には、平常時に要する費用(式(5)CTとCTMの和)がそのまま損失と見做した。また、迂路時、制限交通時には、平常走行時と差を損失を評価した。表4の値は、都市間距離LAB=50km(迂路使用した場合は55km)とし、各種車両、

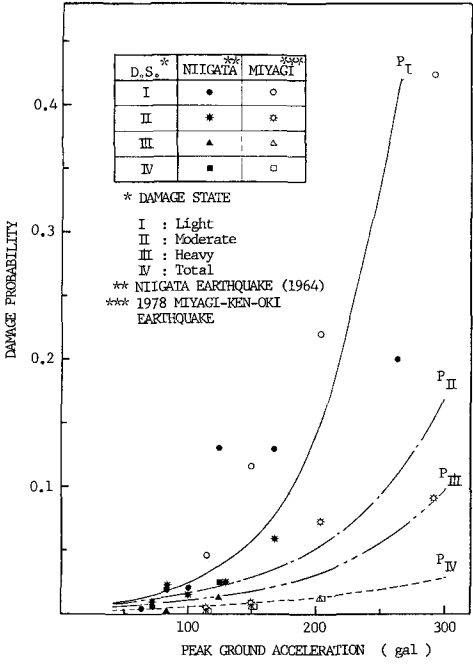


図2. 被害確率と最大加速度の関係 (新潟地震、宮城県中地震)

表2. 被害確率マトリクス

DAMAGE STATE		PGA	50 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 300	300 ~
$k_H=0.1$	I		0.040	0.126	0.668	1.000
	II		0.031	0.063	0.187	0.580
	III		0.021	0.040	0.112	0.331
	IV		0.010	0.017	0.036	0.082
$k_H=0.2$	I		0.015	0.057	0.334	1.000
	II		0.012	0.029	0.094	0.305
	III		0.008	0.018	0.056	0.174
	IV		0.004	0.008	0.018	0.043
$k_H=0.3$	I		0.005	0.023	0.134	0.500
	II		0.004	0.012	0.037	0.153
	III		0.002	0.007	0.022	0.087
	IV		0.001	0.003	0.007	0.022

表3. 平均被害率 (新潟地震、宮城県中地震)

DAMAGE STATE	MEAN DAMAGE RATE (%)
I	1.40
II	8.75
III	33.07
IV	74.42

表4. 間接損害額の評価例

DAMAGE STATE	INDIRECT LOSS (YEN)	
	CASE 1	CASE 2
0	0	0
I	0	0
II	0	0
III	37573 · Ve*	37573 · Ve
IV	50266 · Ve	38079 · Ve

CASE 1

NO DETOUR

CASE 2

DETOUR

* Ve: CAPACITY (Vehicle/day)

復旧期間を適切に反定し求めたものである。あくまで評価の一列である。

6. 試算例

前節までの結果を総合し、式(1)により設計震度ごとの総費用期待値を試算した。札幌、東京、福岡における3種および4種地盤を対象とした。各地点、地盤種ごとの最大加速度の年確率は、通常の地震危険度解析の方法により算定した。結果を図3~5に示す。橋脚高は6m、間接損害は迂迴路のない場合の結果のみを示す。H=9m、迂迴路のある場合でも傾向はほとんど変わらない。建設費用、損害額の算定において、橋長200mの橋を考へ、上部工費用も考慮している。

図3は間接損害を考慮しない場合の結果である。東京の3種地盤(図中TKY 3)で、 $k_H = 0.2$ が総費用最小となつて、この場合、地盤全右方への傾向を示し、設計震度を上げるとの経済効果はあらわれない。明治以降の震災経験を考へるとはなすも、納得しにくい。この結果は、間接損害評価の重要性を物語っていると考へられる。図4は間接損害を考慮した時の各費用期待値の内訳を示したものである(東京、3種地盤、交通量 $V_e = 5000$ 台/日)。迂迴路のない場合(表4のCase 1)の結果である。この例では、直接損害、間接損害期待値はほぼ同じレベルとなつて、各地点における間接損害も考慮した総費用期待値と設計震度の関係を図5に示す(交通量 $V_e = 5000$ 台/日)。各地点の地震危険度を反映した結果となつて、福岡では $k_H = 0.1$ 程度、札幌では $k_H = 0.1 \sim 0.2$ 程度、東京では $k_H = 0.3$ 程度が総費用期待値を最小にする設計震度となつて、これは、ここで、地点による差異は、純粹に地震危険度の違いによるものであり、各都市の特性(交通システム、交通量、人口等)は、まづ考へず、注意されたい。

7. あとがき

本研究を開始した当初のみくろみは、現行示方書に示される地域種および重要度係数の見直しであった。ところが、これまで述べてきたように、分析の各過程において多くの条件を設定しなければならず、とてこの目的が達成したとは言えない。しかし、上記種をより合理的なものとしていくためには、経済的方面からアプローチの必要も否めない。今後、直接損害、間接損害の推定に対しより詳細な検討が必要である。

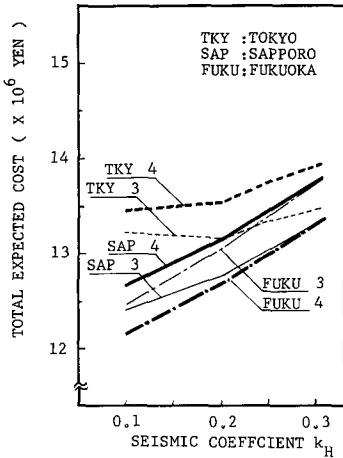


図3. 設計震度と総費用期待値
— 間接損害を考慮せず

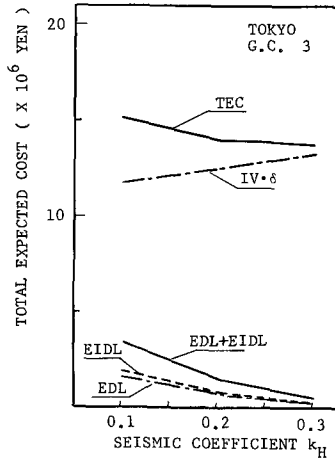


図4. 総費用期待値の内訳
— 東京3種地盤

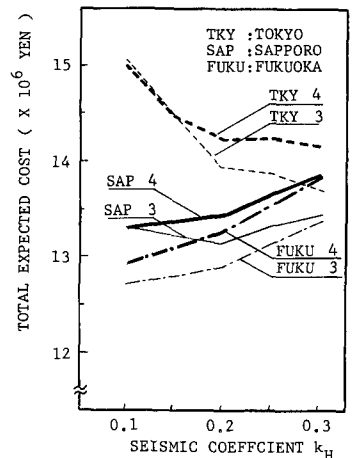


図5. 設計震度と総費用期待値
— 間接損害考慮

参考文献

- (1) E.H. Vanmarcke, "Seismic Design Decision Analysis," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 101, No. ST5, May, 1975.
- (2) 猪熊, 片山, 久保, 道路橋の地震被害率に関する基礎的研究, 道路橋の設計水平震度の選択に関する1つの考え方, 生産研究, 32巻7号, 昭和55年7月.
- (3) Y. Ohsaki and O. Sakaguchi, "Major Types of Soil Deposits in Urban Areas in Japan," Soils and Foundations, Vol. 13, No. 2, June, 1973.
- (4) 建設省土木研究所, 新潟地震調査報告, 土木研究所報告, 第125号, 昭和40年6月.
- (5) 田中, 最近の被害地震における最大加速度の大きさについて, 第7回地震震動シンポジウム, 日本建築学会, 1979年3月.
- (6) 倉沢, 肥田, 高速道路に関する費用便益分析マニュアル, 道路交通経済, No. 11, 1980年4月.