

# (73) 交通システム機能を考えた道路橋の耐震性評価

東京大学生産技術研究所 ○ 野中 昌明  
東京大学生産技術研究所 片山 恒雄

1. まえがき これまでの被害地震の例にも見られるように、道路橋の被害にともなう交通規制は復旧活動や地域住民の日常生活に何らかの支障を与えてきた。しかし、現行の道路橋の耐震設計はこのような損失を十分に反映できるものとなっていない。道路橋を真に耐震的なものにするためには、単体構造物としての安全性と震害が交通機能に及ぼす影響を考慮しなければならない。著者らは、いままでに道路橋が耐用期間中に被る直接被害額と耐震投資の大きさの兼ねあいから道路橋の最適な耐震設計震度を求めてきたが<sup>(1)</sup>本報告ではさらに交通機能に及ぼす損失を加味するため、簡単な道路網モデルを例題にとりあげ、道路橋が通行規制を受けたときの交通流の変動を求めることにより道路橋の利用者損失を考察した。現時点では計算に用いた仮定は単純化されており、試算結果はあくまでも例題的意味あいの強いものである。

2. 交通量の配分計算と余剰便益の損失 道路網をリンクとノードでモデル化したとき、各リンクを流れる交通量の増加に対して旅行時間は線形的に増加するものとする。等時間原則に基づき、ノード間に存在する各経路に交通量を配分する。利用者はどの経路の所要時間がいくらで、またどの経路が最短であるかを正確に知っているわけではないが、利用者が常により所要時間の短い経路を求めていった場合最終的には「選択される経路について所要時間が皆等しく、それ以外の選択されないどの経路の所要時間よりも小さい」という平衡状態に近づくとする考え方をする。<sup>(2)</sup>たとえば、Fig. 1に示す道路のノード①-③間にある2つのルートでは、各々のルートの配分交通量と旅行時間の関係は図に示すように与えられる。すなわち、 $T_1 = T_2$ となるように $V_1, V_2$ をきめる。このようにして当該ノード間の供給曲線が求まる。道路橋の通行規制には通行止・時間規制の2種類だけを考え、時間規制の場合は当該道路橋を含むリンクの旅行時間の増加割合が平常時に比べて2倍の傾きをもつものと仮定した。

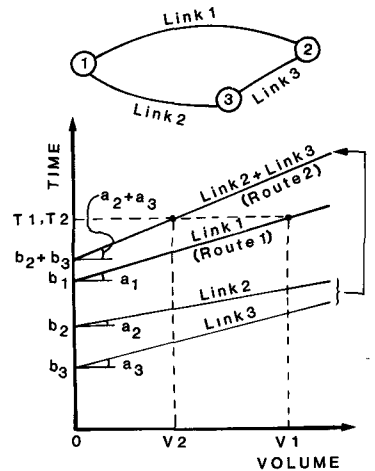


Fig. 1 等時間原則による交通配分方法

利用者の需要・旅行目的によって地震後の交通量は大きく異なるが、各ノード間の需要曲線として平常時の交通量・旅行時間を基準にしてFig. 2に示す2本の傾きの異なる直線を仮定した。以下に示す例題では、それぞれの需要曲線を用いた配分計算の結果をCASE 1, CASE 2としている。地震後、交通量の集中や迂回による旅行時間の増加により、供給曲線の切片・勾配が大きくなる。この供給曲線と需要曲線の交わった点が当該ノード間の規制時の配分交通量と旅行時間を与える。平常時の道路網では $(V, T)$ で機能していたものが、地震後には $(V_1, T_1)$ または $(V_2, T_2)$ の機能に変化することになる。この機能変化にともなう利用者の余剰便益の損失は図に示す台形の面積で与えられる。

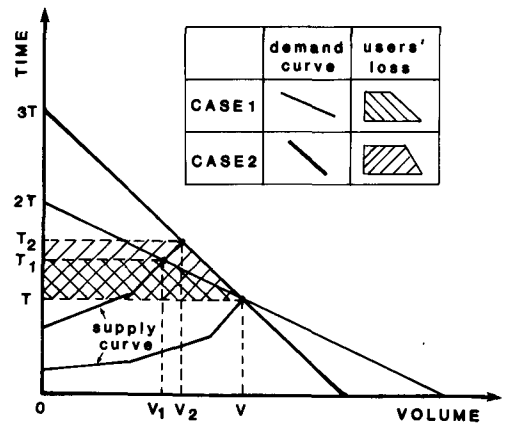


Fig. 2 需要曲線、供給曲線と余剰便益の損失

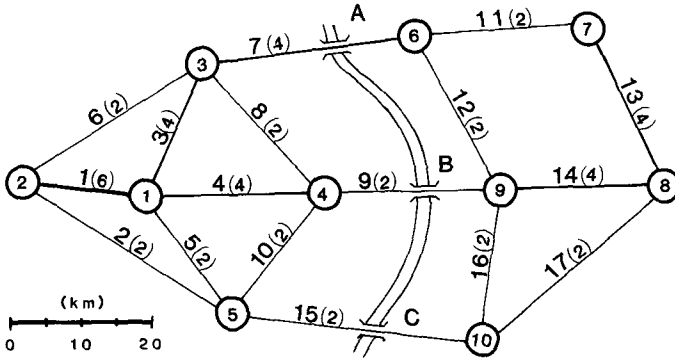


Fig. 3 解析に用いた道路ネットワーク

Table 1 走行時間関数の定数

Link No.	a	b
1	0.00017361	15.00
2	0.00233335	42.00
3	0.00026042	15.00
4	0.00032552	18.75
5	0.00133333	24.00
6	0.00200000	36.00
7	0.00039062	22.50
8	0.00166667	30.00
9	0.00166667	30.00
10	0.00166667	30.00
11	0.00166667	30.00
12	0.00166667	30.00
13	0.00032552	18.75
14	0.00032552	18.75
15	0.00233335	42.00
16	0.00166667	30.00
17	0.00233335	42.00

### 3. 道路網の配分計算と考察

1日交通量が特定の12時間に平均的に流れるものと仮定し、Fig. 3に示すようなリンク数17、ノード数10、道路橋A,B,Cの3橋からなる簡単な道路網モデルの配分計算を行う。括弧内の数字は車線数を表わす。個々のリンクの走行時間関数の定数 {a (分/台・半日), b (分)} をTable 1のように与えた。ある特定な地震によってもたらされる個々の橋梁の通行規制は互いに独立とし、その発生確率を以下のように与えた。

通行止になる確率 = 0.1

時間規制になる確率 = 0.2

全部で27通りある規制パターンのうち、全道路橋が地震後まったく規制をうけない確率は0.343, 少なくともどれか1橋が通行止となる確率は0.271となる。各ノード間の交通量・旅行時間の変動を求めた結果、道路橋を経由しないものは交通量・旅行時間にそれほど変化がみられなかった。Table 2は橋梁A,B,Cのいずれかを經由するノード間の交通量と旅行時間を信頼度90%, 95%について示したものである。各欄の上段2行が信頼度90%の配分交通量(台/日)

Table 2-1 90,95%の信頼度に対する配分交通量・旅行時間(CASE1)

	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	total
①	6166(80%) 78.3(+13) 0(0%) -	1092(84%) 119.9(+17) 534(41%) 164.3(+61)	3487(83%) 143.9(+21) 3458(82%) 144.7(+22)	2286(76%) 114.1(+22) 2262(75%) 114.9(+23)	61(76%) 128.2(+25) 61(76%) 128.2(+25)	13092(80%) 6315(39%)
②	875(84%) 93.2(+13) 0(0%) -	397(86%) 134.9(+16) 168(37%) 193.7(+75)	1384(95%) 159.1(+7) 1357(94%) 162.0(+10)	472(94%) 128.3(+7) 455(91%) 132.3(+11)	85(71%) 137.7(+31) 61(51%) 158.5(+52)	3213(90%) 2041(57%)
③	13320(67%) 48.4(+12) 0(0%) -	371(79%) 90.1(+16) 0(0%) -	717(84%) 125.1(+17) 577(68%) 142.7(+35)	880(77%) 95.5(+18) 637(55%) 111.8(+35)	168(84%) 132.3(+18) 160(80%) 137.2(+23)	15456(68%) 1374(6%)
④	513(86%) 470(78%) 100.9(+18)	112(93%) 129.3(+8) 108(90%) 132.8(+12)	194(69%) 116.5(+27) 95(34%) 148.2(+59)	3454(53%) 85.8(+27) 0(0%) -	281(94%) 101.4(+6) 255(85%) 109.8(+14)	4554(58%) 928(12%)
⑤	235(87%) 123.3(+14) 192(71%) 140.5(+31)	122(94%) 149.1(+9) 116(89%) 155.1(+15)	282(72%) 135.0(+28) 276(71%) 136.7(+31)	4697(87%) 109.4(+13) 4406(82%) 114.7(+18)	1761(50%) 89.6(+50) 0(0%) -	7097(73%) 4990(51%)
						43412(72%) 15648(26%)

Table 2-2 90,95%の信頼度に対する配分交通量・旅行時間(CASE2)

	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	total
①	6576(85%) 84.3(+19) 2942(42%) 146.0(+81)	1138(88%) 129.2(+26) 872(67%) 171.4(+68)	3782(90%) 147.6(+25) 3711(88%) 151.6(+29)	2579(86%) 118.1(+26) 2529(84%) 121.1(+29)	69(86%) 132.2(+29) 68(85%) 134.4(+31)	14144(87%) 10122(62%)
②	922(89%) 98.8(+18) 426(41%) 175.5(+95)	411(89%) 143.6(+25) 302(66%) 200.2(+82)	1395(96%) 163.8(+12) 1385(96%) 165.8(+14)	474(95%) 134.2(+13) 461(92%) 140.2(+19)	92(77%) 156.1(+50) 89(74%) 162.1(+56)	3294(92%) 2663(75%)
③	15217(76%) 53.7(+17) 0(0%) -	394(84%) 98.5(+24) 123(26%) 184.2(+110)	748(88%) 134.1(+26) 689(81%) 149.1(+41)	945(82%) 104.8(+28) 844(73%) 118.4(+41)	181(91%) 135.7(+21) 178(89%) 139.0(+25)	17485(77%) 1834(8%)
④	530(88%) 102.4(+19) 500(83%) 110.7(+28)	114(95%) 132.4(+11) 111(93%) 140.2(+19)	213(76%) 131.8(+42) 181(65%) 152.2(+63)	4139(64%) 100.8(+12) 2047(32%) 138.4(+80)	278(93%) 109.4(+14) 272(91%) 113.5(+18)	5274(68%) 3111(40%)
⑤	242(90%) 131.6(+23) 221(81%) 148.5(+39)	125(96%) 151.7(+12) 122(94%) 157.4(+17)	328(84%) 139.3(+34) 325(83%) 141.1(+35)	4964(92%) 112.5(+16) 4709(87%) 121.6(+25)	2115(60%) 107.2(+47) 1022(29%) 144.5(+85)	7774(80%) 6399(66%)
						47971(80%) 24129(40%)

と旅行時間（分）下段2行が信頼度95%のものである。括弧の中には平常時の配分交通量に対する割合（%）及び平常時よりも余分にかかった旅行時間（分）が示してある。②-⑧, ②-⑨, ④-⑦は両CASEで平常時の90%以上の交通量が確保できている。これらに代表されるノード間は平常時に利用している経路にくらべてそれほど旅行時間が余分にかからない代替経路が存在することを示している。一方、平常時に橋梁Aに大きく依存している③-⑥や④-⑨（橋梁B）、⑤-⑩（橋梁C）では、交通量の低下が著しい。これらのノード間は迂回して目的地に達するには平常時にくらべて時間がかかりすぎるため、需要曲線の大きさから考えてできないことを意味している。需要の大きいCASE2のほうが規制後の交通量が多く旅行時間も余計にかかる。以上より、地震後の道路橋の利用者損失はその橋梁がどういう路線に存在するかということだけではなく、利用者の需要の大きさや代替橋梁の位置関係に大きく影響する。なお、これらの道路橋を経由する交通量の合計は、平常時の交通量（60,010台/日）に対して信頼度90%でそれぞれ72%（CASE1）、80%（CASE2）、信頼度95%で26%（CASE1）、40%（CASE2）である。これらはただ単純に和をとったものであり、これからただちに道路網全体の信頼性について述べることはできないが、信頼度が90%から95%になると極端に交通量が減少するのは、平常時に特定の橋梁に依存していた経路が信頼度90%を越えると通行止になり、迂回路をとりはじめるからである。

次に、個々の道路橋の交通規制が道路網の機能損失にどの程度の影響を与えるかを調べる。27通りの規制パターンについて、余剰便益の損失を全ノードについて求めた合計を外的基準に、橋梁A,B,Cをアイテム、無被害・時間規制・通行止をカテゴリとして数量化I類の統計解析を行った（Table 3）。橋梁Aでは規制

Table 3 数量化I類解析から得られたカテゴリ・スコア  
( $\times 10^3$ )

item	A Bridge		B Bridge		C Bridge	
	CASE1	CASE2	CASE1	CASE2	CASE1	CASE2
no regulation	-55.5 (0.0)	-176.1 (0.0)	0.0	0.0	0.0	0.0
time regulation	222.1 (277.6)	216.2 (392.3)	228.9	339.8	120.4	176.8
suspension	799.3 (854.8)	1685.6 (1861.7)	557.2	1089.2	333.7	636.6

なしのとき負の損失を被るなど計算結果に不合理な面もあるが、たとえばCASE1で橋梁Aおよび橋梁Cが通行止になると、道路網利用者が平常時に享受していた余剰便益のうち、それぞれ約 $800 \times 10^3$  (台・分),  $334 \times 10^3$  (台・分)の減少になり、利用者1台1分あたりの時間損失を25円で換算すると、次のようになる。

$$800 \times 10^3 \text{ (台・分)} \times 25 \text{ (¥/台・分)} = \text{¥ } 20 \text{ million}$$

$$334 \times 10^3 \text{ (台・分)} \times 25 \text{ (¥/台・分)} = \text{¥ } 8.35 \text{ million}$$

個々の道路橋が同じ通行規制をうけても道路橋利用者から奪われる余剰便益の損失が大きく異なる。それぞれの道路橋が等しい地震危険度を有するからといってそのまま等しい耐震性を与えることは合理的ではなく何らかの方法により利用者損失の重みを考える必要がある。

**4. 利用者損失を考慮した設計震度算定の考え方** ある大きさ  $IL$  の地震動が来襲したとき、ある耐震性  $k$  をもつ道路橋が通行規制  $s$  を受ける確率が  $Ps(k, IL)$  で表わされるものとする。これに個々の道路橋の交通規制時における利用者損失と地震の発生率をかけあわせることにより耐用期間中に利用者が被る余剰便益の損失の期待値が求まる。これに耐震投資、平均被害率等を加えることにより、個々の橋梁の利用者損失を加味した総損失率は次式で与えられる。

$$TLR(k) = IC(k) + \delta \{1 + IC(k)\} \frac{EALR(k)}{100} + \frac{\delta \lambda \sum TUL(s) \{ \sum Ps(k, IL) SR(IL) \}}{COST}$$

ここで、  $s$  : 橋梁の規制状態 (0 : 規制なし, 1 : 時間規制, 2 : 通行止め),  $k$  : 設計震度,

$TUL(s)$  : 規制状態  $s$  のときの余剰便益の損失,  $EALR(k)$  : 期待年被害率,

$COST$  : 耐震を考えないときの建設費用 (¥),  $IC(k)$  : 耐震投資,

$\lambda$  : 車1台1分あたりの時間費用,  $\delta$  : 耐用年数,  $IL$  : 気象庁震度階。

このように、この総損失率は、耐震に対する投資額（第1項）、道路橋の被害額（第2項）、被害時の利用者の機会損失額（第3項）の和を耐震を考えないときの道路橋建設費で基準化した形になっている。 $TLR(k)$ が最小のときの設計震度が経済的に最適な設計震度 $k_{opt}$ をあたえることになる。交通規制の有無は、一般に被害橋の安全性に関する技術的判断と周辺社会に与える影響に関する行政的判断の両者を加味して決定されてきており<sup>(3)</sup>この確率を推定することは難しい。専門家の判断を仰ぐなどして $P_s(k, IL)$ の値は慎重に決めなければならないが、一般に被害程度が大きい橋梁ほど通行規制を受けやすいといえるので、ここでは確率の絶対量に問題があるが1つの計算例として交通規制の発生する確率を設計震度と気象庁震度階との関係から求まる平均被害率 $CMDR(k, IL)$ <sup>(1)</sup>の形状をそのまま用いて、次式の関係で表わした。

$$P_1(k, IL) + P_2(k, IL) = \frac{CMDR(k, IL)}{100}$$

ただし、 $P_1(k, IL)$ と $P_2(k, IL)$ の大きさは、 $k, IL$ にかかわらず2:1の比率とおいた。たとえば平均被害率が30%の場合時間規制をうける確率 $P_1(k, IL)$ は0.2、通行止になる確率 $P_2(k, IL)$ は0.1とした。通行止・時間規制の期間はそれぞれ28日・7日、A, B, Cの各道路橋の建設費はそれぞれ2.5, 2, 2億円、耐用年数は50年、年平均地震発生率は大阪地区のものを用いて利用者損失を加味したの道路橋A, B, Cの最適設計震度とそのときの総損失率を試算した(Table 4)。得られた総損失率・最適設計震度には利用者損失の重みが反映されている。これらの値は需要曲線のとり方によって顕著な変化が見られるため、現実には道路網の地震時交通需要を推定する際には慎重に行う必要があろう。

Table 4 利用者損失を考えた最適設計震度と総損失率

$i(\%)$	Without users' loss		With users' loss											
			A bridge (¥250million)		B bridge (¥200million)		C bridge (¥200million)							
	$TLR$	$k_{opt}$	CASE1	CASE2	CASE1	CASE2	CASE1	CASE2						
5	0.238	0.29	0.309	0.30	0.384	0.30	0.298	0.30	0.350	0.30	0.273	0.30	0.303	0.30
10	0.362	0.16	0.470	0.28	0.546	0.30	0.457	0.27	0.512	0.30	0.425	0.23	0.463	0.28
15	0.429	0.06	0.605	0.21	0.707	0.29	0.586	0.20	0.666	0.26	0.535	0.15	0.594	0.20
20	0.442	0.00	0.709	0.15	0.849	0.23	0.682	0.14	0.793	0.20	0.608	0.09	0.694	0.14

5. あとがき 本報告では、簡単な道路網モデルを用いて地震時にとられる交通規制によって道路橋利用者が被る損失を交通量配分問題を応用して試算した。さらにこの結果から個々の橋梁が利用者の損失に与える影響を求め、これを道路橋の総損失率に組込むことにより利用者損失を加味したときの最適な設計震度を決定する手法を紹介した。より複雑なネットワークにある多くの道路橋の利用者損失を求める場合には個々の道路橋に確率的な規制発生モデルを考えたシミュレーション解析が可能であると思われる。需要曲線の仮定や通行規制を受ける確率のもつ意味、また交通渋滞を考えた場合はどうなるかなど、現実の道路網に適用する上でいくつかの問題点が残されているが、これらの点を改善していくことにより道路橋の耐震性を考える上で有用な資料が得られるものとなろう。

6. 謝辞 本研究を行うにあたり、中央大学の鹿島先生にいろいろと助言を頂いた。等時間原則に基づく交通量配分に関し、岡山大学の井上先生から貴重な資料を頂いた。ここに記して感謝の意を表わす。

7. 参考文献 (1) 野中昌明・猪熊康夫・片山恒雄：道路橋の地震被害率と設計震度選択に関する基礎検討，土木学会論文報告集，第340号，1983年12月。(2) 井上博司：道路網における等時間原則による交通量配分に関する基礎的研究，1975年10月。(3) 国土開発技術研究センター震災復旧技術研究開発土木委員会：昭和57年度建設省土木研究所委託 震災構造物の復旧技術の開発に関する報告書，昭和58年3月。