

道路交通システムの機能上の耐震性の一評価方法*

EVALUATION OF EARTHQUAKE PERFORMANCE OF TRANSPORTATION SYSTEMS

川 上 英 二**
By Hideji KAWAKAMI

1. 序 論

活発な地震帯上にある本邦において地震災害を検討する場合、地震災害の程度に及ぼす交通システムの被害の程度の影響は非常に大きい。交通システムの機能低下が地震直後における消防車、救急車、災害復旧車などの緊急車の活動を妨げ、火災などの二次災害を大きくさせるのみでなく、地震後長期にわたって日常生活および産業活動に支配的な影響を及ぼすことが過去の震害の例より明らかである。これら交通システムの地震後における挙動を分析し検討することは防災上重要であると考えられる。その際、各交通施設の耐震性を seismicity, 地盤条件, 構造物の強度などにより評価するばかりでなく、機能面からシステムの耐震性を検討する必要がある。さらに、逆に各交通施設を計画設計する際には、システムが全体として所要の機能上の耐震性を保持するために十分な強度を各施設に対し決定し、この結果に基づいて各施設を耐震設計する必要がある。

従来、耐震工学の分野で、道路・橋梁・トンネルなど各施設の耐震性の検討がされており¹⁾、一方、交通工学の分野でもおもに平常時における交通システムの機能に関する研究が数多くなされている^{2), 3)}。また、近年、交通システムをライフラインという大きな範ちゅうでとらえ、おもに、供給・需要地点間の連結性に着目したシステムの機能上の耐震性の検討が行われている^{4)~14)}。これらの基本的な研究に基づいて、さらに交通システムの特質を考慮することにより、地震後における交通システムの機能上の耐震性を評価する方法を確立することは重要であると考えられる。一方、最近、交通システムの地震時における安全性を検討した研究としてはいくつかの研究が報告されている^{15), 16)}が、その多くは問

題点の指摘または定性的な解析方法を示すにとどまっており、システムの機能上の耐震性が十分に評価されるための手法が展開されているとはいえない。また、高橋ら¹⁷⁾は災害時における道路網の交通流をマルコフ過程と仮定して解析を行っている。しかし、この研究はドライバーが事前に通行不能の情報を全然もっていない場合についての交通流の解析方法を示したものであり、地震の発生の際と通行不能箇所との関係を考慮していないのみならず、システムを構成する各施設のシステム内における地震後の位置づけまたは役割を検討していないため、各施設の耐震設計を行うに際して有用な情報を得るためには不十分なものとなっている。

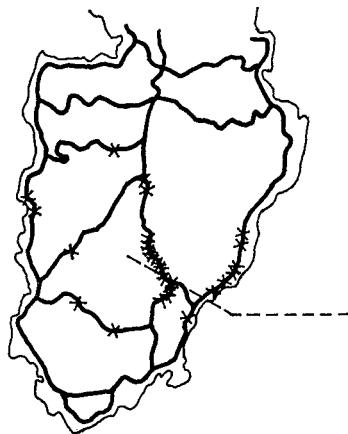
本論文では、交通システムとして道路交通システムを取り上げ、まず、システムを構成する各施設の地震による破壊を評価するための確率論的なモデルを組み立てた。次に、モンテカルロシミュレーションを用いて地震後の連結性から調べたシステムの状態を検討するための方法を展開し、さらに、交通量配分の手法を用いてシステムの機能の低下の程度を評価するための方法を、また、地震後における各道路の役割を評価するための方法を提案した。最後に、数値計算例として、1978年の伊豆大島近海地震により実際に被害が生じた伊豆半島の道路網に本手法を適用し、その有用性を検討した。

2. 伊豆大島近海地震による道路施設の破壊状況

図-1は数値計算の対象の一例とした伊豆半島の道路交通システムである。ただし、本図では国道、主要地方道、道路公園の有料道路、県道天城有料道路のみを示してあるが、これらの道路は伊豆半島のいわば動脈的な交通システムを形成しているものと考えられる。図中×印は1978年の伊豆大島近海地震によるこれら幹線道路のおもな破壊箇所の分布を、静岡県の下田・熱海・沼津各

* 土木学会年次学術講演会I部, 1980年で一部発表

** 正会員 工博 埼玉大学助手 工学部建設工学科



図一 伊豆大島近海地震（1978）による幹線道路の不通箇所（静岡県下田・熱海・沼津各土木事務所の資料によるものを恒石らの論文¹⁸⁾より引用した）

土木事務所の資料に基づいてまとめた恒石らの論文¹⁸⁾から引用して示したものである。ただし、図中に示した被害箇所は地震後に一定期間全面通行止めとなった箇所であり、小規模の崩落、路肩のゆるみなどで片側通行となった箇所は含まれていない。これらの破壊は、伊豆半島の大部分が山地・丘陵地であるという自然条件を反映して、平野部の軟弱地盤に帰因するような被害は少なく、稲取に出現した地震断層による被害を別にすると、大部分が斜面崩壊によって生じたものである。地震後数日にわたって交通路は至る所で遮断され、交通途絶地域（孤立地域）が生じたばかりでなく、道路交通システムが完全に復旧されるのに地震後数か月を要している。

3. 道路施設の破壊確率の推定

地震による道路交通システムの機能低下の原因としては、斜面崩壊、橋・トンネルの破壊、道路の亀裂・段差、落下した看板・ビル外装材・横断歩道橋などの障害物、道路周辺の火災、交通信号の破壊などを挙げることができ、これらの破壊が発生する確率は概略以下のような手順で求めることができる。

① 地震発生場所、規模、およびその頻度についての seismicity に関する研究に基づいて、システムに被害を及ぼす大規模地震の震源モデルを設定する。

② 地震の規模、震央距離および地震動の強さの関係を示す attenuation 式、および地盤条件と地震動の強さとの関係に関する研究に基づいて、各地点における地震動の強さを算定する。

③ 斜面、橋梁、トンネル、道路面などの各施設構造物に②で求められた強さの地震動が外力として作用した場合に、これらの構造物が破壊する確率を、構造物の強

度、特性などを考慮して算定する。この方法の一例として、斜面崩壊の発生確率の算定方法について以下に詳述する。

地震による斜面崩壊の発生に関する研究は従来数多く行われており、これらの研究は以下の3つの方法に大別することができる。

① 地質学的な考察に基づき、斜面崩壊の定性的な原因を推定する方法

② すべり面を考慮して土圧論を用いて力学的に解析する方法

③ 過去の震害記録を数多く集め、これらを統計的に解析する方法

伊豆大島近海地震（1978）により発生した斜面崩壊に対しても以上の3つのそれぞれの方法により研究が行われている。たとえば恒石ら¹⁸⁾は①の方法を用いて、おのおの斜面崩壊のおもな原因を、地表風化・熱水変質・断層破砕などの作用により斜面を構成する岩盤の強度が低下していること、あるいは降下火山物質などの固結度の小さい二次的堆積物が斜面を被覆していることなどであると推定している。また、岩崎ら¹⁹⁾は②の力学的方法に基づいて、有限要素法を用いて斜面の崩壊に対する安全性を論じている。

一方、田村²⁰⁾は③の方法に基づき、地震のマグニチュード、震央距離および斜面崩壊の発生箇所数（多発域、散發域の2種類に分けて表示）の関係を、過去の多くの震害記録を統計的に整理することにより求めている。この結果に、国井ら²¹⁾は伊豆大島近海地震（1978）の結果を追加しデータの数を増加させている。また、これとは別に、道路1km当たりの被害箇所数と断層線²¹⁾からの距離との関係を詳細に求めている。

また、荏本ら²²⁾は③の統計解析的方法である数量化理論を用いて道路の被害発生頻度と被害発生要因との関係を論じている。ただし、被害発生頻度としては道路1km当たりの被害箇所数を用い、また、被害発生要因としては、擁壁の構造、高さ、傾斜角、複合構造の有無、震源と斜面とのなす角度、震源距離、施工条件を用いている。そして、単位距離当たりの被害箇所数の平均値 ν を斜面の各要因についての状態から推定する式を算出している。

以上の関係を用いれば、対象とするシステム内の細分割されたすべての道路区画に対して、単位距離当たりの斜面崩壊による被害発生平均箇所数 ν を推定することが可能であり、ここでは各破壊が独立であるポアソン過程であると仮定すると、長さ l の道路区画が安全である確率は

$$P = \exp(-\nu l) \dots \dots \dots (1)$$

で算定できる。さらに、都市 i, j をつなぐ k 個の直列

な道路区画から構成される1本の道路が安全である確率 $s q_{ij}$ (以下サフィックス s, f は survive, failure の頭文字を表わす) は、各区画に対する v_1, \dots, v_k および l_1, \dots, l_k を用いて P_1, \dots, P_k を算定し、これらの積で求められる。つまり、

$$s q_{ij} = \prod_{l=1}^k P_l \dots \dots \dots (2)$$

4. 連結性を考慮した道路交通システムの耐震性の評価

前述したように地震直後に交通途絶地域(孤立地域)が生ずることは、緊急車の活動を妨げ二次災害を大きくさせる原因となる。地震直後においても、緊急車のための交通路が確保され、また、病院・消防署などの緊急施設が有効に機能するように配置されていることは災害を最小限に食い止めるために重要なことであると考えられる。以上の観点に基づいて、まず、道路交通システムの耐震性を評価するに際して、システムを単純に節点とリンクから構成されるネットワークシステムとモデル化して取り扱うこととする。そして、連結性を評価の尺度として採用することにした。地震後の連結、非連結は節点ペア間によって異なるから、その耐震性は節点ペアそれぞれに対し確率で与えられることになるが、節点ペア間に1つ以上の非破壊のパスが存在する場合、そのペアは連結であると定義し、その確率——連結確率 $s p_{ij}$ (i, j は2つの節点番号のペア)——を耐震性を表わす値と考えた^{9),10)}。

式(2)で示したようにすべてのリンクについて非破壊確率 $s q_{ij}$ (i, j はリンクの両端の節点番号)が推定でき、また各リンクの破壊が互いに独立であるものとする。従来、節点ペア間の連結確率 $s p_{ij}$ を求める方法として、SSSP^{9),10)}、ブル代数⁷⁾、またはモンテカルロ法を利用した方法が提案されている。本論文では田村・川上^{9),10)}により提案されたモンテカルロ法を用いた方法を用いて節点ペア間の連結確率を算定し、この性質を検討した結果(1)に示す)に基づいて、連結性から調べたシステムの構造を視覚的に把握すること(2)で展開)を試みた。

(1) 非連結確率の性質

以上で定義した節点ペア ij の連結確率に対し、非連結確率 $f p_{ij}$ を

$$f p_{ij} = 1 - s p_{ij} \dots \dots \dots (3)$$

で定義すると、この値は節点ペア ij 間に非破壊であるパスが1つも存在しない確率である。この非連結確率 $f p_{ij}$ はすべての節点ペア ij に対して次の4つの性質を

もっている。ただし、ここでは節点が破壊しないものと仮定した。

$$0 \leq f p_{ij} \dots \dots \dots (4)$$

$$f p_{ii} = 0 \dots \dots \dots (5)$$

$$f p_{ij} = f p_{ji} \dots \dots \dots (6)$$

$$f p_{ij} \leq f p_{ik} + f p_{kj} \dots \dots \dots (7)$$

式(4)は $f p_{ij}$ が確率であり、0と1との間の値であることより、また、式(5)は節点 i はそれ自身の節点 i と非連結となることはないことより明らかであり、また、式(6)は道路が一方通行とはならずネットワークが無向であることを表わしている。最後の式(7)の三角不等式は次のように証明できる。

つまり、任意の3つの節点 i, j, k のうち2つずつのペア $(i, j), (i, k), (k, j)$ が連結している場合の事象の集合をそれぞれ集合 H_{ij}, H_{ik}, H_{kj} で表わし、非連結である場合の事象の集合をその補集合 $\bar{H}_{ij}, \bar{H}_{ik}, \bar{H}_{kj}$ で表わすと図-2に示すベン・ダイアグラムが得られる。ところが $(i, k), (k, j)$ がともに連結の場合 $i \rightarrow k \rightarrow j$ のパスが存在し、 (i, j) は連結である。したがって、集合

$$H_{ijk} = \bar{H}_{ij} \cap H_{ik} \cap H_{kj} \dots \dots \dots (8)$$

は空集合となる。さらに、この関係は i, j, k に対してサイクリックに成立し、図-2の斜線部は空集合となり、次式が成立する。

$$\bar{H}_{ij} \subset (\bar{H}_{ik} \cup \bar{H}_{kj}) \dots \dots \dots (9)$$

したがって、式(7)が証明される。これら4つの性質(式(4)~(7))より非連結確率 $f p_{ij}$ は距離としての性質をもっていることがわかる。

(2) システムの構造の視覚化

(1)で導いたように非連結確率 $f p_{ij}$ が距離としての性質をもっていることを利用して、本節ではシステムを構成する n_0 個の節点を n_0 次元ユークリッド空間に非連結確率 $f p_{ij}$ を距離として配置することを考えた。もとより、式(4)~(7)の距離としての条件だけからは、節点をすべての距離が厳密に満足されるようにユークリッド空間に配置することができるとはいえない。しかし、システムの構造の概略を把握するためにはこの空間を選ぶことが適当であると考えた。さらに、このシステムの構造を鮮明に視覚化するため多次元尺度構成法²³⁾を適用した。これは多数の集団の集団構造を理解するための手法であり、2つずつのもの関係(相違の度合あるいは距離)を用いて、これらを空間配置して、この空

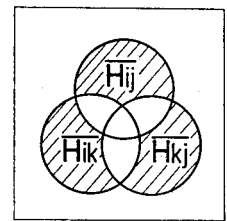


図-2 ベン・ダイアグラム

間内のばらつきの最も大きい方向に座標軸を直角に順次決めて、少ない次元でデータの構造を把握する方法である。

n_0 個の節点の重心を原点とした場合、原点から節点 j または k に至る 2 つのベクトルの内積は節点間の距離 $f p_{ij}$ を用いて次式のように

$$b_{jk}^* = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{n_0} \sum_{j=1}^{n_0} f p_{jk}^2 + \frac{1}{n_0} \sum_{k=1}^{n_0} f p_{jk}^2 - f p_{jk}^2 - \frac{1}{n_0^2} \sum_{j=1}^{n_0} \sum_{k=1}^{n_0} f p_{jk}^2 \right] \dots\dots\dots (10)$$

表わされる。ところが、上述の原点にもう 1 つの m 次元の直交座標系を考え、節点 j の座標を $\{x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{ja}, \dots, x_{jm}\}$ で表わせば b_{jk}^* は内積であるから

$$b_{jk}^* \approx \sum_{a=1}^m x_{ja} x_{ka} \dots\dots\dots (11)$$

と近似できる。したがって、ばらつきの最も大きい方向に座標軸を直角に順次定めた場合の節点 j の第 a 番目の座標軸に対する座標 x_{ja} は次式で求められる。

$$x_{ja} = \sqrt{\lambda_a} z_{ja} \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_a \geq \dots \geq \lambda_m \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0$ を行列 $[b_{jk}^*]$ の固有値とし、 $\{z_{1a}, \dots, z_{na}\}$ を固有値 λ_a に対する基準化された固有ベクトルとする。この場合、 m 次元までで表わされる分散の割合（累積分散率） r は次式で求められる。

$$r = \sum_{a=1}^m \lambda_a / \sum_{a=1}^n \lambda_a \dots\dots\dots (13)$$

5. 交通容量を考慮したシステムの機能低下の評価

前章で展開した方法は連結性のみに着目した、おもに地震直後における交通途絶地域（孤立地域）を対象とした解析であり、緊急車のための交通路の耐震強度、およびシステムの形状の決定、または緊急施設の配置を決定する際に役立つものと考えられる。これに対し、これらシステムの破壊が地震後長期間にわたって日常生活、産業活動に与える影響を考える場合、システムの復旧期間中の機能低下の状態を交通容量をも考慮して予測しておく必要があると考える。また、さらには、システムの機能の耐震性の観点から調べた各道路の役割を明確にし、この結果を各道路の耐震設計強度の程度に反映させておくことが望ましいと考える。以上の観点から本章の (1) では容量をも考慮した解析方法について概説し、(2) では簡単な例を用いてシステムの機能の耐震性の観点から調べた各道路の役割の評価方法について検討した。

(1) 機能低下の評価方法

本評価方法は、大別して

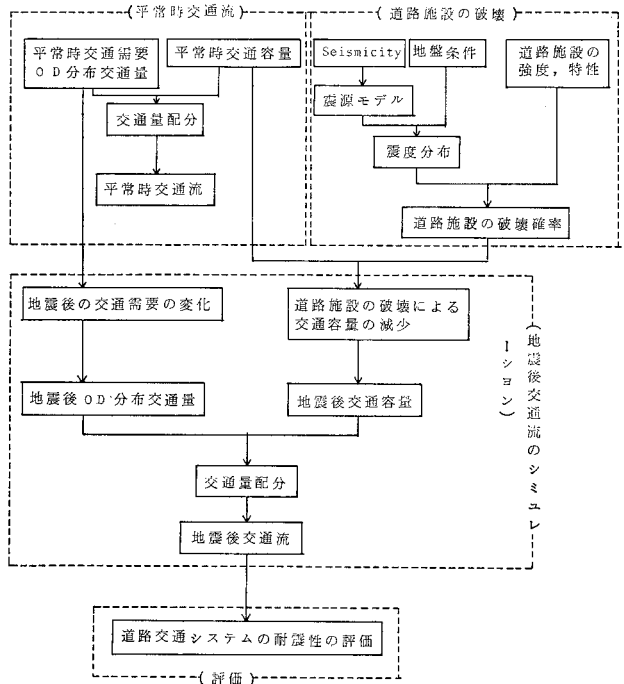
- ① 平常時の道路交通流の解析
- ② 地震による道路施設の破壊確率の推定
- ③ 地震後の交通流のシミュレーション
- ④ 交通システムの耐震性の評価

の 4 つの手順から構成されている（図—3 参照）。

① 平常時の道路交通流の解析は、各ゾーンの発生交通量・吸引量から OD 分布交通量を推定し、道路網を考慮して交通流を解析する方法であり、従来、交通工学の分野で提案されている方法を用いる。

② 地震による道路施設の破壊確率の推定にあたっては、3. に示したように seismicity、地盤条件、構造物の強度などを考慮して算定する。その場合、各施設の破壊確率を破壊程度関数として求めておく必要がある。

③ ②で求めた破壊確率を用いて各道路施設の破壊のシミュレーションを行う。ここでは、これらの破壊により各道路の交通容量が減少するものと仮定し、各道路の地震後の交通容量を推定する。一方、交通需要について考えると、この量も地震後には平常時と比較して大きく変化するものと考えられる。地震が及ぼす社会的・経済的影響により、また各トリップの目的によりこの変化の程度は大きく異なるものと考えられる。さらには、この交通需要量はこれから求めようとしている地震後の交通



図—3 道路交通システムの耐震性の評価方法

流の状態により影響を受けるものと推察される。しかし、ここでは簡単化のため、この影響は考慮しないものとする。また、これらの交通容量、交通需要量は、地震発生後の各復旧段階で異なるものであり、それぞれの復旧段階に応じて解析を行う必要があると考える。以上求めた地震後の交通容量と交通需要量とから地震後の交通流を算定する。この際用いるべき交通量の配分方針は平常時とは異なるものと考えられる。しかし、第1近似としては平常時の交通配分方法を用いてもよいと考える。得られた交通配分の結果は道路の破壊状況に依存し、ここでは破壊を確率事象であると考えているため、このシミュレーションを多数回繰り返す。

④ ③に示したシミュレーションにより求まる地震後の交通流を統計的に分析し、地震に対する道路交通システムの機能上の耐震性の評価を行う。また、システムの耐震性の観点から各道路の役割を評価する。

(2) 地震後における各道路の役割の評価

(1) で示した方法を本節では簡単な道路交通システムのモデルに適用した。単純なモデルの例として、二大都市(節点①, ②)を幹線道路(リンク①-③, ③-②)および一般道路(リンク①-④, ④-②)の並列な2本の道路で結んだ道路交通システムを考え(図-4)、平常時のOD分布交通量を表-1のように仮定した。各運転者は最短時間のルートを選ぶものと仮定し、また平常時には道路の混雑はなく、一定の制限速度(40 km/h)で走行できるものと仮定し、各道路に配分される交通量を算定し、配分交通量のちょうど2倍が道路の容量としてシステムが設計されているものと考え、各道路の容量は表-2に示すようになる。一方、道路の破壊箇所は互いに独立なポアソン過程であり、単位距離当たりの破壊の期待件数をリンク①-③では0.3か所/kmと大きく、他のリンクでは0.05か所/kmと小さく仮定した。また、破壊の程度 r は

$$r = 1 - \frac{\text{地震後の交通容量}}{\text{平常時の交通容量}} \dots\dots (14)$$

で与えられ、この値を0~1の間で一様分布する独立変数と仮定した。また、各リンクの交通容量は、そのリンク内の破壊箇所にお

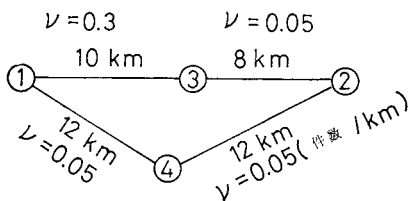


図-4 簡単な道路交通システムのモデル

表-1 各節点間のOD分布交通量

節点番号	1	2	3	4
1	0	560	140	100
2	560	0	190	100
3	140	190	0	0
4	100	100	0	0

表-2 各リンクの交通容量(平常時)

リンク	交通容量
①-③	1400
①-④	200
②-③	1500
②-④	200

る容量の最小値に等しいものと考えた。また混雑度 K (道路の交通容量に対する断面交通量の割合) と (走行速度) V の関係として図-5を仮定し、また、各運転者は地震後にお

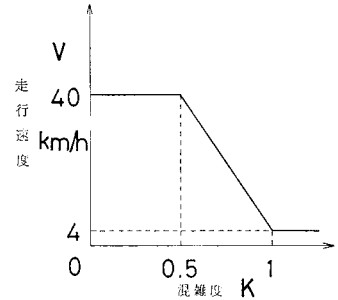


図-5 混雑度と走行速度との関係

いても最短時間のルートを選ぶものと考え、ダイクストラ法および分割配分法を用いて交通量配分を行った。

地震後の交通流のシミュレーションを50回繰り返す。横軸に混雑度(地震後の交通容量に対する断面交通量の割合)、縦軸に犠牲度²⁴⁾(平常時の交通容量に対する断面交通減少量の割合)をとり、各道路別にまとめたものが図-6である。システムにまったく破壊が生じていない平常時には、上記の仮定より混雑度は0.5であり、犠牲度は0であることから、各道路の状態は図の中央に位置している。また、各リンク内の破壊の程度(最大値 r_{max} 、平常時および地震後の混雑度 (K および K')、犠牲度 G の間には次の関係が存在する。つまり、

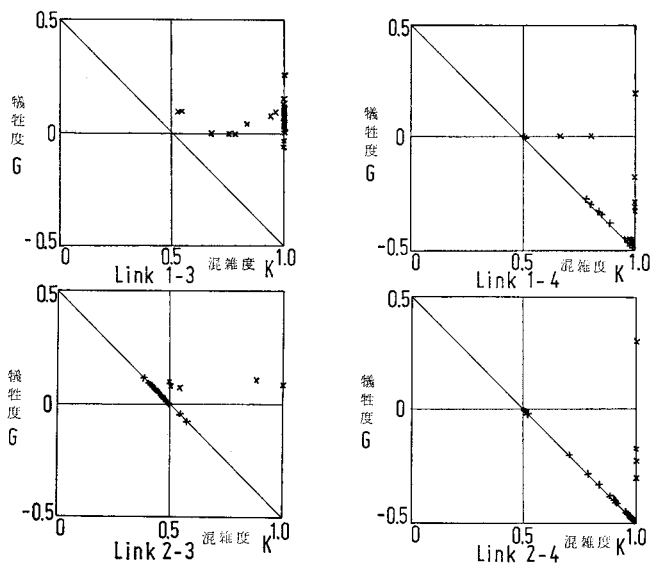


図-6 各リンク別に調べた混雑度と犠牲度との関係

交通容量を地震前後それぞれに対し Y, Y' とおき、断面交通量を同様に D, D' とおくと、犠牲度 G は次式のように変形される。

$$G = (D - D') / Y$$

$$= D/Y - (D'/Y') \times \{1 - (Y - Y') / Y\}$$

.....(15)

ところが、

平常時の混雑度 $K = D/Y$ (16)

地震後の混雑度 $K' = D'/Y'$ (17)

破壊程度のリンク内最大値
 $r_{max} = (Y - Y') / Y$ (18)

を用いると、

$$G = K - K'(1 - r_{max})$$

.....(19)

の関係が得られる。平常時の混雑度 $K=0.5$ である本例に対して得られるリンク内の破壊程度の最大値が一定である線を 図-7 に示してある。

図-6 より各リンクに対する混雑度および犠牲度の値を比較すると、リンク①-③では右上に、リンク②-③では左上に、リンク①-④および②-④では右下に分布していることがわかり、これらの値はリンクによって大きく異なることが認められる。また、これらの分布の相違は次のように説明できる。つまり、他のリンクと比較して破壊確率が大きいリンク①-③では、交通容量が地震後減少し、混雑が著しくなり、したがって他のルートへ交通が迂回するために交通量が減少しやすくなり、混雑度は平常時 (0.5) より大きくなり、犠牲度は正の値を示す。一方、リンク②-③では、直列に連なる他のリンク①-③の破壊により他のルートへ交通が迂回するため交通量が減少し、地震後道路がすきやすくなる。つまり、混雑度は平常時より小さくなり、犠牲度は正の値を示す。また、リンク①-④、②-④は、並列なリンク①-③の破壊により、大都市節点①、②間の交通が迂回してくるために破壊しなくても混雑しやすくなる。つまり、並列な他のリンクの破壊により交通量が増

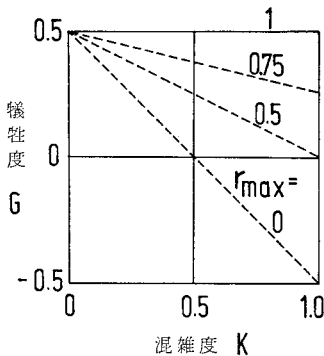


図-7 各リンク内の破壊の程度の最大値 r_{max} 、混雑度 K 、および犠牲度 G の関係

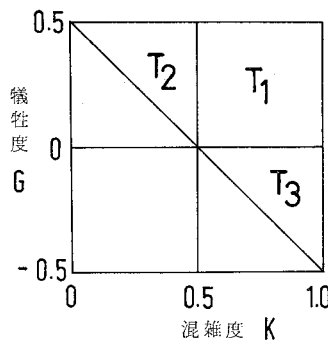


図-8 混雑度-犠牲度、 $K-G$ 面の3区画への分割

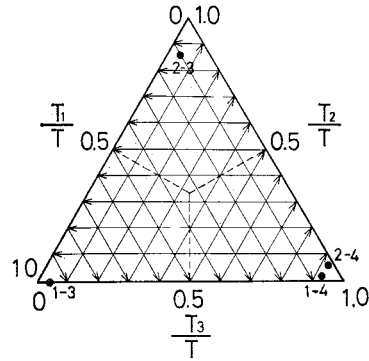


図-9 三角座標を用いた各道路の特性の表示

え (犠牲度 < 0)、したがって、混雑度が平常時より増加するリンクである。ただし、以上で用いた直列、並列の考えは、大都市節点①、②を需給節点と考え、節点③および④における需要供給量 (発生吸引交通量) は無視した場合に適用できる考えである。

以上得られた結果を用いて、システムの耐震性の観点から調べた各道路の役割を明確にするため、図-8 のように平常時 (混雑度=0.5, 犠牲度=0) を原点とみなし、3つの区画に分け、各区画内に生じたシミュレーションの結果の個数を数え上げた。右上、左上、右下の区画内のプロット数をそれぞれ T_1, T_2, T_3 とおき、シミュレーションの全回数に対するそれぞれの値、 $T_1/T, T_2/T, T_3/T$ を3軸とし、三角座標を構成し、各道路について示したものが 図-9 である。ただし、

$$T_1/T + T_2/T + T_3/T = 1$$

.....(20)

であることを利用している。図-9 より、リンク①-③は左下に、リンク②-③は中央上に、リンク①-④、②-④は右下に明瞭に分かれて位置している。この図で T_2/T の値が大きい、つまり上方ほど、すきやすい道路を示しており、逆に下方ほど、混雑しやすい道路を示している。一方、 T_3/T の値が大きい道路 (右方) は、他の道路の破壊により混雑しやすい道路を示し、 T_1/T の値が大きい道路 (左方) は、その道路自体の破壊により混雑しやすい道路を示している。

6. 数値計算例

本章では、実際の道路交通システムの一例として、図-10 に示した伊豆半島の道路網を対象とし、道路施設の破壊確率の推定、連結性を考慮したシステムの耐震性の評価、交通容量を考慮したシステムの機能低下の評価を行った。

(1) 連結性を考慮したシステムの耐震性

まず最初に、震源位置、地盤条件の影響を除いてシステムの形状の影響のみを考慮して、システムの構造を4. に示した手法を適用して算定した。ここでは道路 1 km 当たりの破壊箇所期待数 $\nu=0.05$ か所/km と仮定し、式 (1), (2) を用いて各リンクの非破壊確率 s_{qij} を算定し、田村・川上^{9),10)}により提案されたモンテカルロ法を用いた方法に従い、すべての節点ペア間の連結確率 s_{pij} を算定した(表-3 参照)。ただし、本表中の節点番号、リンク番号は図-10 に示してあり、また、シミュレーションの回数は 50 回とした。この結果に 4. (2) で示した方法を適用し、システムの構造の視覚化を

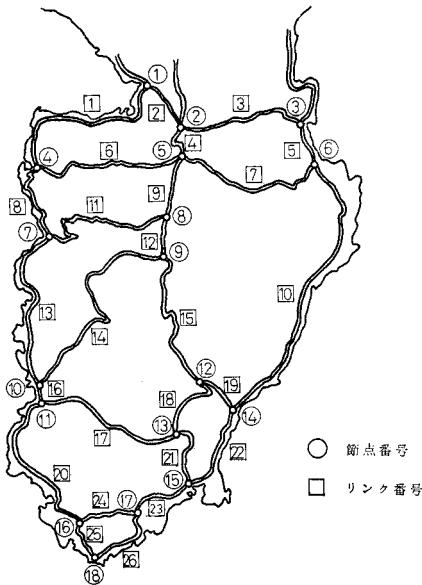


図-10 伊豆半島の道路交通システムのモデル

試みた。図-11 に第 1, 第 2 主軸を図-12 に第 3, 第 4 主軸をそれぞれ横軸、縦軸として、連結確率から調べたシステムの構造を示してある。図-10 のシステムの地図上の形状と図-11 とを比較すると、第 1 主軸が南北に、第 2 主軸が東西に対応し、実際のシステムの形状が多少変形されて、図-11 が求められていることがわかる。つまり、節点間の地図上の相対距離が大きいほど、非連結確率が大きいように設計された道路網であることが認められる。

次に、システムの形状の影響に加えて、震源位置および地盤条件の影響をも考慮してシステムの構造を算定した。ここでは、各リンクの破壊箇所の期待数を図-1 に示した伊豆大島近海地震 (1978) による各リンクの破壊箇所数に等しいと仮定した。前と同様に非破壊確率、連結確率を算定し、図-13 に第 1, 第 2 主軸を横軸、縦軸とした、連結確率から調べたシステムの構造を示して

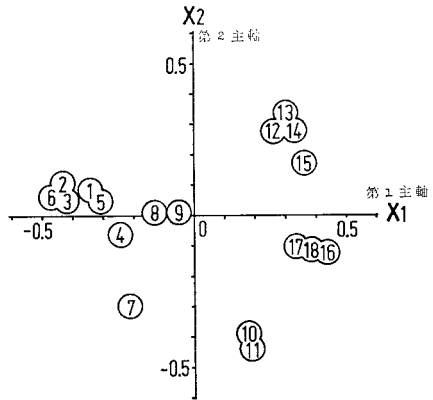


図-11 節点①~⑮相互間の非連結確率を距離とした多次元尺度表示-第 1, 2 主軸-(道路 1 km 当たりの破壊箇所の期待数 $\nu=0.05$ か所/km)

表-3 節点ペア間の連結確率

節点番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	100	80	36	56	68	38	38	44	38	20	14	16	16	16	16	12	14	12
2		100	52	56	86	52	38	56	46	22	16	18	18	18	18	14	16	14
3			100	26	44	80	18	34	28	12	10	12	12	12	12	10	10	10
4				100	52	26	56	42	34	26	20	20	16	20	20	16	18	16
5					100	46	34	68	58	24	18	22	22	22	22	18	22	20
6						100	16	32	26	10	8	12	12	12	10	8	8	8
7							100	44	36	44	32	18	14	16	18	16	16	16
8								100	86	38	32	42	36	40	38	28	32	30
9									100	38	34	46	40	44	42	28	32	30
10										100	82	28	24	26	30	40	36	38
11											100	26	22	24	28	40	36	38
12												100	80	98	68	34	42	40
13													100	78	64	30	38	36
14														100	68	34	42	40
15															100	56	66	62
16																100	84	88
17																	100	90
18																		100

($\times 10^{-2}$)

④ ③で得られた平常時の配分交通量のちょうど2倍の量が道路の容量としてシステムが設計されているものと仮定した。

一方、道路施設の破壊については、3. で概説したような手順で推定することが可能である。seismicity, 地盤条件, 構造物の強度などを考慮して破壊箇所を推定する必要がある。たとえば斜面崩壊という破壊モードに対しては、各道路に沿う斜面の状況と震度分布から破壊確率を推定することが可能であり、他の破壊モードに対しても同様に破壊確率を推定する必要がある。これら破壊確率の推定値はシステムの安全性を評価する際に最も基本的な役割を果たすものであり、解析結果の信頼性を高めるためにはこの推定の精度を向上させることが必須である。実際の道路網の解析に際しては、最も精度のよい詳細なデータを使用し、考え得る限りの多くの要因を考慮に加えた解析が必要である。しかし、一方、基礎的な研究に際しては、いたずらに解析を複雑にすると、計算時間・容量のうえから問題となるばかりでなく、各要因と結果との対応を把握しにくくなる。本節では、まず、道路網が不規則な形状をしていることによる影響のみを考え、各道路の破壊確率はその長さのみによって決まる場合を考えた。そして、ここでは、一例として、各道路の破壊に関して次の簡単な仮定を設定した。

① 道路の破壊箇所は互いに独立なポアソン過程であり、道路の単位距離当たりの破壊の期待件数を一定値 0.2 か所/km であると仮定した。

② 単純なモデルの場合 (5. (2)) とまったく同様に、破壊の程度を式 (14) のように、交通容量の減少量と関連付け、この値 r を 0~1 の間で一様分布する独立変数であると仮定した。

さらに、地震後の交通流のシミュレーションを行うに際し、ここでは次のような仮定を行った。

① 各リンクの交通容量は、そのリンク内の破壊箇所における容量の最小値に等しい。

② 混雑度と走行速度との間に 図-5 の関係が成り立つ。

③ 各運転者は最短時間のルートを選ぶものとする。

④ 地震後の OD 分布交通量は平常時のものと等しい。

地震後における交通需要量は、前述したように、平常時とは大きく異なるものと考えられる。地震が及ぼす社会的・経済的影響により、また各トリップの目的により、さらにはこれから求めようとしている地震後の交通流の状態により、また地震発生後の各復旧段階で大きく異なるものと考えられる。しかし、ここでは簡単のため一例として、地震後の OD 分布交通量が平常時のものと等しいと仮定して計算を行った。今後、地震後の交

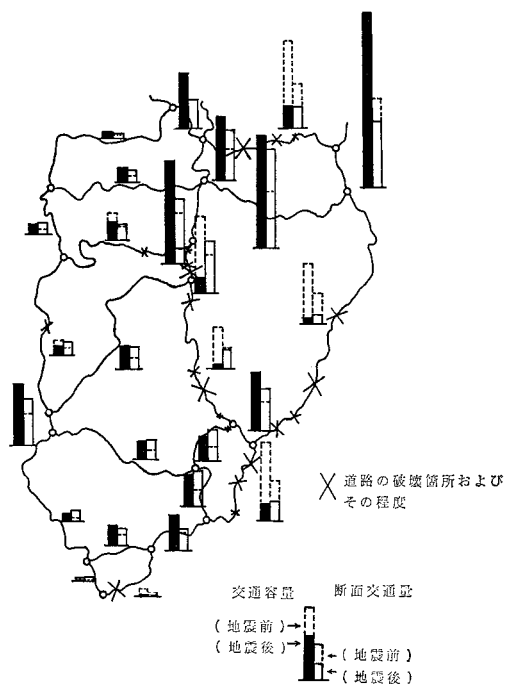
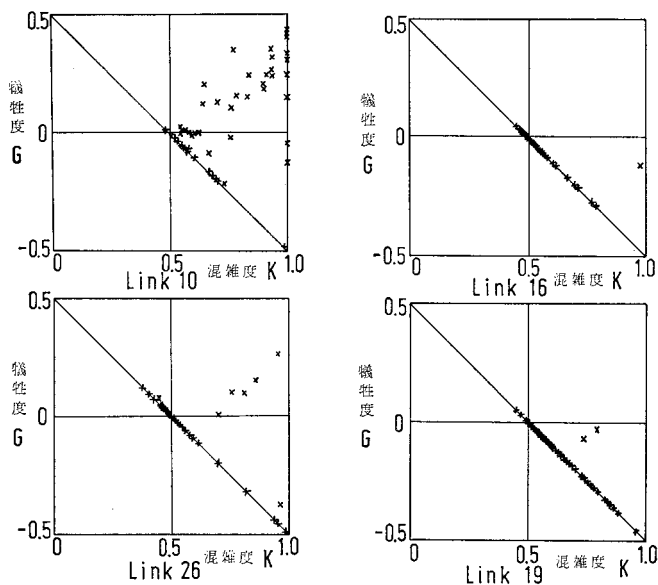


図-14 シミュレーション結果の一例

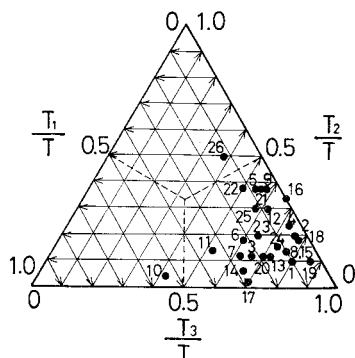
通需要の予測に関する問題は重要な問題となると考えられる。その際、伊豆半島地域の交通の特徴である観光交通量をも十分に考慮して解析を行う必要があると考える。

得られたシミュレーションの結果の一例を 図-14 に示す。×印は道路の破壊の位置と程度とを示し、また、各道路に対し、交通容量および断面交通量をそれぞれ左右の棒グラフで示し、さらに、各棒グラフに対して、地震前と地震後の交通量がそれぞれ破壊および実線で示してある。仮定により、地震前の断面交通量は、地震前の交通容量のちょうど半分にて定めてある。

同様のシミュレーションを 50 回繰り返して、横軸に混雑度、縦軸に犠牲度と取り、各道路別にこれらの値をプロットした。この一例としてリンク 10, 26, 16, 19 に対する図を 図-15 に示す。さらに、5. (2) に示した手法に従い三角座標を用いて各リンクの特性を表わしたものを 図-16 に示す。この図より、リンクは特性の面からみて、リンク 10, リンク 26, リンク 16 を一例とするグループ、リンク 19 を一例とするグループの 4 つのグループに大別されることがわかり、5. (2) の簡単なモデルの場合と同様に、各道路の特徴をシステムの耐震性の観点から検討することが可能である。つまり、リンク 10 は長いリンクであるため破壊する確率が大きく、そのリンク自身の破壊により混雑しやすいリンクである。一方、リンク 26 は他のリンクの破壊の影響を受け交通量が減少し、混雑しないリンクである。また、リンク 16



図一15 各リンク別に調べた混雑度と犠牲度との関係



図一16 三角座標を用いた各道路の特性の表示

を一例とするグループは、他のリンクが破壊することに影響されて混雑する場合がやや多いリンクであり、リンク 19 を一例とするグループは、他のリンクの破壊により混雑する場合が多いリンクである。

以上、連結性または容量をも考慮した2つの観点から道路交通システムの耐震性の評価方法を展開し、また、地震後のシステムの状態および各道路のシステム内における役割を分類、評価するための方法を提案し、その適用例を示した。

もとより、地震後のライフラインシステムの機能低下の状態を震害調査の一環として実際に調査するようになってきたのはこの数年であり、伊豆大島近海地震の際にも地震後の交通量の測定は行われていない。また、数値シミュレーション結果においても多くの仮定を設定するため、得られた結果が地震後の状態を正確に表わしているものではない。本方法は今後さらに改良発展させ、地

震後の実際の交通流との関係を確立させる必要があると考える。本研究結果は、その第1段階として、地震後の機能低下の状態を調査するうえでの新しい視点を与えるものであり、また、将来、道路交通システムの耐震設計規定を改良し、システムの機能上の安全性をも考慮に加えるうえでの新しい知見を与えるものとする。

7. 結 論

本研究は地震に対する道路交通システムの機能上の安全性を評価するための方法を確立し、さらには、地震後のシステムの状態をその機能面から検討し、地震後のシステムの状態、およびシステムを構成する各道路のシステム内における役割を明らかに評価するための方法を確立する目的で実施されたものであ

る。

(1) 第1に、過去の地震による道路施設の破壊状況の一例として、伊豆大島近海地震 (1978) によるものを概説した。これらの多くの震害記録に基づいて、道路交通システムの機能低下の原因を列挙し、この大部分の原因である各道路施設の破壊に関する従来の多くの研究の一例として、ここでは斜面崩壊の発生に対する解析手段および得られている結果について概説した。そして、これらの研究成果を反映してシステムの機能上の耐震性を評価するための確率論的なモデルを組み立てることが可能であることを示した。本研究はこれらの従来の研究成果に対する新しい利用方法を提示したものであり、今後、この新しい利用方法を考慮したこれらの研究のさらなる進展が望まれる。

(2) 第2に、地震直後において、交通途絶地域 (孤立地域) が生じることは緊急車の活動の妨げとなり、二次災害を大きくさせる原因となると考え、各地域間の連結性に着目し、地震後のシステムの状態を検討するための方法を展開した。ただし、連結性を表わす指標としては、すべての節点ペア間の連結確率をモンテカルロ法により算定したものをを用いた。次に、非連結確率が距離としての性質を満足することを明らかにすることにより、多次元尺度構成法を用いて、連結性の観点からシステムをいくつかのサブシステムに分割することを試みた。さらに、この方法を伊豆半島の道路網に適用した結果、本道路網は破壊がシステム全体に一樣に生じた場合には、節点ペア間の地図上の距離が大きいかほど、非連結確率が大きくなるような形状を有する道路網であり、孤立地域が発生しやすいようには設計計画されていないにもか

ならず、伊豆大島近海地震のような断層が生じた場合には、2種類の孤立地域が発生する、つまり、道路施設に多くの被害が生じる震源域内の孤立地域、および、震源から遠く道路施設の被害は少ないにもかかわらず孤立してしまう地域があることが認められた。これらの結果は、対象とする大規模地震に対して、地震直後においても緊急車のための交通路が確保されるように交通システムの形状を決定し、また、各構造物の強度を決定するに際して、または、病院・消防署などの緊急施設が有効に機能するように配置するに際して利用できる資料となり得るものと考えられる。

(3) 第3に、システムの破壊が地震後長期間にわたって日常生活・産業活動に与える影響を考えた場合、システムの復旧期間中の機能低下の状態を交通容量をも考慮して予測しておく必要がある。また、さらには、システムの機能の耐震性の観点から各道路の役割を明確にし、この結果を各道路の耐震設計強度の程度に反映させておくことが望ましいと考えた。まず、容量をも考慮した道路交通システムの地震後の機能低下の評価方法を展開した。これは、平常時の交通流を基本として地震後の交通容量を各道路施設の破壊を考慮して推定し、一方、地震後の交通需要量を推定し、この両者を用いて地震後の交通量配分を行う方法である。そして、このシミュレーションを多数回繰り返すことにより、道路交通システムの耐震性を評価する方法である。さらに、得られた結果を各道路の耐震設計強度の程度に反映させるため、各道路の地震後の役割を混雑度、犠牲度の2つの指標を用いて評価する方法を提案した。さらに、三角座標を用いて各道路の特性を表わすことを試みた結果、すべての道路は、地震後のシステム内における役割の面から、①その道路自身の破壊により混雑する道路、②他の道路の破壊によりすきやすい道路、③他の道路の破壊により混雑しやすい道路の3種類に大別できることがわかり、また、これらの結果は直列、並列の考えを用いて説明することが可能であることがわかった。さらに、この方法を伊豆半島の道路交通網に適用した結果、同様の分類が可能であることが示された。

以上、道路交通システムの耐震性の評価方法を展開し、また、地震後のシステムの状態、つまり各道路のシステム内における地震後の位置づけまたは役割を検討するための方法を提案した。さらに検討すべき点も多く残されているが、本方法は道路交通システムの耐震設計法を改善していくうえでの新しい有用な情報を提供し得るものと考えられる。

謝辞：本論文中の4.に関しては、著者が東京大学生産技術研究所第1部、田村重四郎教授の指導のもと

に行った内容である。また、5.に関しては筑波大学社会工学系の石田東生氏に助言をいただいた。本研究中の数値計算に関しては埼玉大学建設基礎工学科の卒業論文生であった石井良雄君（現・パシフィックコンサルタンツ）に、また、図面の作成にあたっては埼玉大学文部技官の堀野浩美君にご協力をいただいた。末筆ながら深謝の意を表します。

参考文献

- 岡本舜三：耐震工学，オーム社，1971。
- 八十島義之助・花岡利幸：交通計画，技報堂，1971。
- 佐々木 綱：都市交通計画，国民科学社，1974。
- Panoussis, G.: Seismic reliability of lifeline networks, Seismic Design Decision Analysis-Report No. 15, MIT, Dept. of Civil Eng. Res. Rep. R 74-57, 1974.
- Taleb-Agha, G.: Seismic risk analysis of networks, Seismic Design Decision Analysis-Report No. 22, MIT, Dept. of Civil Eng. Res. Rep. R 75-49, 1975.
- Shinozuka, M., S. Takada and H. Kawakami: Risk analysis of underground lifeline network systems, US-South East Asia Symposium on Engineering for Natural Hazards Protection, Manilla, Philippines, Sept. 1977.
- Shibata, H. and M. Tsuchiya: Fundamental concept of aseismic design of earthquake resistant lifeline systems and industrial facilities, The Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering, ASCE, 1977.
- 田村重四郎・川上英二：ライフラインのネットワークシステムの耐震性の一評価方法について，生産研究，30巻7号，1978。
- 伯野元彦・斉藤嘉則：ライフ・ラインの耐震性に影響する因子，第15回地震工学研究発表会講演概要，1979。
- 田村重四郎・川上英二：モンテカルロ法による地中埋設管システムの耐震性の評価方法，土木学会論文報告集，第311号，1981。
- Isoyama, R. and T. Katayama: Practical performance evaluation of water supply networks during seismic disaster, ASCE Specialty Conference on Lifeline Earthquake Engineering, 1981.
- 星谷 勝・小池精一：ライフラインの地震災害における復旧予測モデル，土木学会論文集，第308号，1981。
- 篠塚正宣・小池 武：埋設ライフラインシステムの連結性能に関する地震危険度解析，第311号，1981。
- 川上英二：少数種類の構造物からなるライフラインシステムの耐震性の評価，土木学会論文集，第312号，1981。
- Britz, K., P. Edelstein and I. Oppenheim: Measurement of earthquake performance of transportation systems, The Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering, ASCE, 1977.
- Longinow, A., E. Bergmann and J. Cooper: Bridge retrofitting selection of critical bridges in a road network, The Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering, ASCE, 1977.
- 高橋邦雄・堀井雅史・福田 正：災害時における道路網の交通流予測，第16回自然災害科学総合シンポジウム，1979。
- 恒石幸正・伊藤谷生・狩野謙一：岩盤強度よりみた伊豆大島近海地震の道路災害，第15回自然災害科学総合シンポジウム，1978。
- 岩崎敏男・川島一彦・森本 巖：斜面の地震応答特性の

- 一解析，第 35 回土木学会年次学術講演会講演概要集，第 I 部，1980.
- 20) 田村俊和：地震により表層滑落型崩壊が発生する範囲について，地理学評論，51-8，1978.
- 21) 国井隆弘・望月利男・松田馨余・田村俊和：1978 年伊豆大島近海地震の地震断層と各種被害の分布，第 15 回自然災害科学総合シンポジウム，1978.
- 22) 荻本孝久・国井隆弘：1978 年伊豆大島近海地震における道路斜面の被害分布と被害発生要因の解析，第 35 回土木学会年次学術講演会講演概要集，第 I 部，1980.
- 23) Torgerson, W.S.: Theory and Method of Scaling, John Wiley, 1958.
- 24) 建設省土木研究所・長大橋設計センター：交通量推計に関する調査解析，1978.

(1981.9.7・受付)
