

ロマ・プリエタ地震によるサンフランシスコ湾岸地域の交通サービスへの被害分析と交通運用策の評価

Analysis of Functional Effects of the 1989 Loma Prieta Earthquake on the San Francisco Bay Area Road Network and Evaluation of Traffic Management

若林拓史*・亀田弘行**

Hiroshi WAKABAYASHI and Hiroyuki KAMEDA

A highly reliable road network provides sure and stable traffic service by offering drivers alternative routes even when some part of the network is damaged in a disaster. The closure of San Francisco Oakland Bay Bridge caused by 1989 Loma Prieta Earthquake brought heavy functional damage on San Francisco Bay Area road network. For the purpose of road construction and traffic management for a highly reliable road network, the identification of effects of disaster is substantial. However, no opportunity of disaster analysis from the point of traffic view has been carried out in Japan due to the lack of basis data. This paper presents the analysis of functional effects of road network based on San Francisco Bay area traffic data. Functional effects of road network capacity, average travel time and terminal reliability are identified before and after the earthquake, including the evaluation of transportation share effects with BART(Bay Area Rapid Transit) and of the additional HOV(High-Occupancy-Vehicle) lanes effects.

Keywords: Loma Prieta Earthquake, road network performance, functional effects, road network reliability, network capacity, evaluation of traffic management

1. 序論

(1) 道路網の地震時信頼性研究の意義

信頼性の高い道路網は、地震・水害等の自然災害が発生してネットワークの一部が通行不能あるいは機能低下した場合でも、確実に安定した交通サービスが提供されるとともに、災害復旧時においても安定した救援活動や物資輸送サービスが期待できる。このため、道路網の信頼性を評価し、信頼性の高い道路網の整備計画や交通の管理運用計画を策定することは、今後の防災対策の観点からきわめて重要である。特に道路網においては、あるルートが閉鎖された場合、大量の迂回交通が発生して、他のルートの円滑な走行性にも重大な影響を与える。したがって、交通ライフラインの視点からは、ネットワーク

キーワード：ロマ・プリエタ地震，道路網，機能被害評価，信頼性
* 正会員 工博 大阪府立工業高等専門学校 助教授
(〒572 寝屋川市幸町26-12)

** 正会員 工博 京都大学防災研究所 教授
(〒611 宇治市五ヶ庄)

の一部の機能喪失がネットワーク全体の機能喪失に及ばないように、道路整備計画の策定および交通の管理運用計画を確立する必要がある。

(2) 都市地震防災問題における位置づけ

近年このことが重要視されるようになったことは、災害事例を都市における地震災害に限定すれば以下のような背景および歴史的経過がある¹⁾。まず、現代都市での地震防災への努力は、次の2つに分類できる。すなわち、

- (a) 都市の「耐震安全性」の向上、および、
- (b) 都市の「耐震信頼性」の向上である。

ここに、耐震安全性とは、人命・財産への危害からの解放であり、耐震信頼性とは、本来の都市機能が支障なく遂行されることへの保証である。これに対し、都市震害のタイプは、①市街地火災型、②構造物被害型、③生活・社会機能支障型に分類できる。

①は、市街地での大規模な出火、延焼による都市の壊滅的な破壊であり、関東大震災(1923,死者・行方不明14.3万人,全壊家屋12.8万戸)が代表事例である。

②は構造物の損傷・破壊による人命・財産への危害であり、福井地震(1948, 死者3700人, 全壊家屋3.6万戸)が代表例である。③は、ライフライン系の被害による都市機能の喪失・低下であり、宮城県沖地震(1978, 死者28人, 全壊建物1300棟)が相当する。都市震害に対する努力は従来、(a)の耐震安全性に重点が注がれてきた。震害を経験するごとに耐震設計基準の制定や改訂がなされたり、構造物の耐震強化や不燃化への努力がなされてきたのが歴史的経緯である。この耐震安全性が、今後も重要な課題であることはいうまでもないが、近年は、都市機能が地震時にも損なわれないこと、すなわち耐震信頼性に対する要求水準が高まってきた。すなわち、③の生活・社会機能支障型の地震に対して都市の抵抗力を高めることへの要請である。この背景は2つ考えられる。(i)ひとつは、宮城県沖地震や日本海中部地震(1983)の場合のように、都市全体の安全性が極端に損なわれるほどの被害ではないのに、ライフライン系の破壊により都市の生活・社会機能が数週間にわたって阻害されるという地震後の状況がしばしば見られるようになったことである。これは、都市の耐震安全性が向上したことによって、耐震信頼性に対する要請が相対的に浮上したことを意味している。(ii)いまひとつは、現代都市の中核的機能がライフライン系に全面的に依存することになった結果、都市の耐震信頼性を確保することの社会的な重要性が飛躍的に増大したことである。

以上の背景と時間価値の増大やJust in Time等に代表されるような経済活動の高度化によって、ライフラインの1つである道路網に対しても上述のような信頼性が要請されるようになったのである。

しかしながら、この課題に対しわが国の状況は次の問題点を有していると考えられる。

- 1) 道路ストックに対し、交通の需要が多い。
- 2) 都市圏での地震災害が最近少ないために、災害時の道路交通計画を強力に推進するためのインパクトとなるデータ及び事例研究が不足している。
- 3) 道路交通における災害時対策策定のための方法論が十分には確立していない。

特に2)に関して、道路の交通機能の被害は、構造物や施設の被害と異なって、被害量や被害額を直接「観察」することができず「分析」を必要とする。

また、都市高速道路を含む現代の都市構造が形成された最近の30数年の間、関東大震災や福井地震のような都市部を直撃する地震が発生しておらず、研究の手掛かりとなる基礎データも存在しないために、災害時の事例研究をする機会も存在しなかった。このため、計画実務者にとっては、災害時には不確定要素がきわめて多いこともあって道路および交通状況の理解が抽象的かつ定性的になり易く、3)の問題も加わって体系的かつ科学的根拠をもった災害対策に結びつかない可能性を有している。同時に、防災対策推進のインパクトとなるリアリティの不足にもつながっている。

(3) 1989ロマ・ブリエタ地震の発生と 本研究への動機

効果的な災害対策を講じるためには災害時の道路状況を定量化し、道路機能の被害を同定する必要がある。1989年10月に発生したロマ・ブリエタ地震では、ベイブリッジが1カ月間使用不能という被害が生じたサンフランシスコ湾岸地域において地震前後の交通データが収集され²⁾、このデータをもとに災害時における道路網の交通からみた被害分析と対策の評価が可能となった。この地震および地域は、以下の特徴を備えていて、わが国の大都市圏と類似点が多い。

a) サンフランシスコ湾岸地域の都市圏人口は約600万人であり、これは中京都市圏の約700万人に近い。また、軟弱地盤における地震動の増幅や液状化により、被害が建物や橋梁をはじめ、電力・ガス・上水道・交通・通信システム等のライフライン系に大きな被害を及ぼした。軟弱地盤の存在は、首都圏(人口約2700万人)、京阪神都市圏(同約1500万人)等の沿岸域都市圏とも共通している³⁾。

b) 道路ストック、特に高速道路網は日本に比べてきわめて多いが、本論文の道路網容量の項で述べるように朝夕のピーク時には渋滞が発生するほどの需要が存在している。

c) 建物等の都市施設への壊滅的な被害は免れ得たので都市活動のポテンシャルが地震前の状態に速やかに回復した。その一方、ごく一部の道路区間の損傷で道路網のネットワークとしての機能は大きく損傷し、その回復まで、生き残った道路網で通勤・業務等の都市交通を支えなければならなかった。こ

これは、都市の耐震安全性が比較的確保されているわが国では十分起り得ることである。

以上のことから本研究では、道路網の評価をネットワーク論的な評価値として捉え、

① 災害前後の道路交通状況を説明（再現）し、得られた交通指標をもとに信頼性をはじめネットワークを多面的に評価する方法論を開発し、

② この方法論を本地震に実証的に適用してその有効性を示し、その場合にとられた諸対策の事後評価を行って今後の参考とすることを目的としている。具体的には、対象地域において利用可能なOD表がないのでこれを推定し、地震前後のネットワーク評価および臨時的にとられた交通対策の評価を、道路網容量、ノード間所要時間、ノード間連結信頼性に関して分析した。本分析から同様の災害がわが国に発生した場合の状況を垣間見ることができる。

2. ロマ・プリエタ地震による道路網被害の概要

ロマ・プリエタ地震(Loma Prieta Earthquake)は、1989年10月17日午後5時4分15秒（現地時間：Pacific daylight time)に発生した。地震規模は、マグニチュード7.1である。

ロマ・プリエタ地震の被害の多くは、震央からの距離が約50km以内で地震の影響が著しく大きかった地域に集中しているが、震央から約100kmとやや離れたサンフランシスコ市及びその周辺で比較的古くか

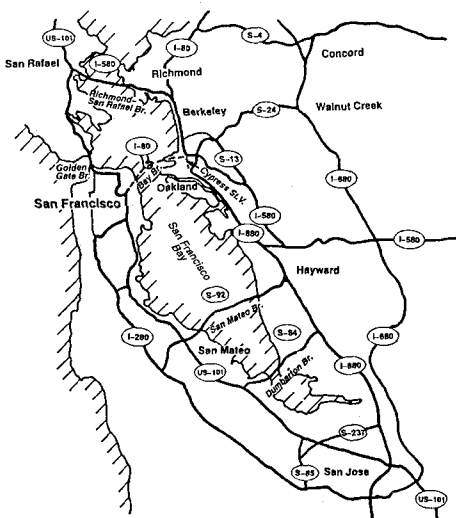


図-1 サンフランシスコ湾岸地域の高速道路網（点線は不通箇所）

ら発達した市街地においても被害が局所的に発生している。震央とサンフランシスコ市との距離は、日本でいえば東京から沼津の距離に相当する。

ロマ・プリエタ地震では、サンフランシスコ湾の東西を結ぶ橋梁群の中核的ルートであるベイブリッジ(図-1参照)が、渡り桁の一部落橋によって使用不能に陥り、この地帯一帯の道路交通事情が一変した。これにより、サンフランシスコとオークランドを直結する大量交通機関はBART(Bay Area Rapid Transit：湾岸地域高速鉄道)のみとなり、ベイブリッジが閉鎖された10月17日から11月17日までの1カ月間、BARTの乗客が急増した。また、BARTへ転換しなかった交通は、残された橋梁へと迂回行動をし、これらの橋梁の交通負担が大きく増加した(図-2)。このため、カリフォルニア州交通局(CALTRANS)では、混雑が激しくなると考えられる高速道路の区間やインターチェンジ付近で、臨時の車線(HOV専用車線と一般交通用の補助車線)を設置可能な限り増設し、交通需要の増大に対応した。

ベイブリッジは1カ月後に開通し、迂回ルートへの負担は解消したが、他にも残る不通箇所の影響が依然として続いている。特に、南からサンフランシスコ市に入るUS101号線とI280号線の2つのルー

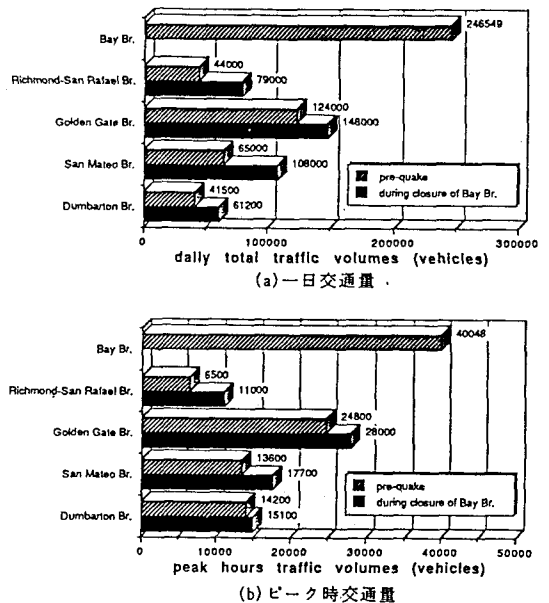


図-2 ベイ・ブリッジと周辺4橋における地震前およびベイ・ブリッジ閉鎖中の交通量の比較 (CALTRANS資料より能島暢呂氏によって作成)

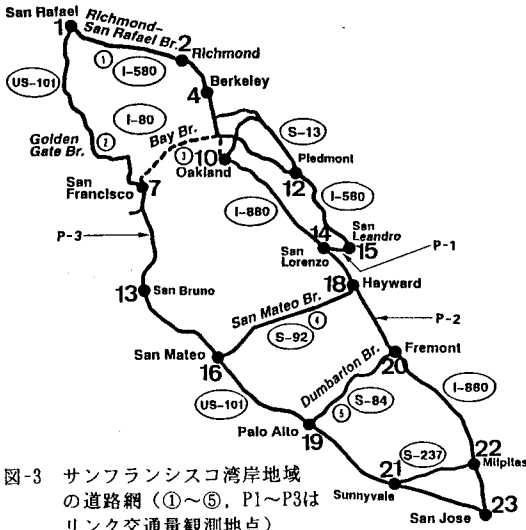


図-3 サンフランシスコ湾岸地域の道路網(①~⑤, P1~P3はリンク交通量観測地点)

トでは、市の中心部に交通を分配する枝線の多くが不通のままのため、ベイブリッジの開通後もこの部分がボトルネックとなり、朝の混雑が激しい状態が続いている。また、オークランド市内のI 880号線のCypress高架橋の崩壊(多数の死者が発生した)で同市の環状高速道路の一部が欠如した状態となったため、この地域の通過交通への影響が続いている。

3. OD交通量の推定

サンフランシスコ湾岸地域では利用可能なOD表が存在しないため、各セントロイドの夜間人口と対象道路網の観測リンク交通量²⁾を利用して、重力モデルのパラメータを最尤法によって推定する方法とSmockの配分アルゴリズムとを組合せたJ. Holmらの方^{4), 5)}によって地震前のOD表を推定した。

対象ネットワークを図-3に示す。観測リンク交通量は、CALTRANSによる調査データ²⁾を利用した。調査時点は、一部を除き1988年秋である。図-3における観測地点①~⑤は、1日交通量データであるが、P-1~P-3地点は午前4時から午前10までの各時間交通量しか得られていない。そこで、他の1日観測地点の時間交通量(図-4参照)から当該時間帯の1日交通量に対する比率を求め、この比率からP-1~P-3地点の1日交通量を推計した。次に、ネットワークデータについて説明する。まず、ノード間距離はAA A(American Automobile Association)による値(単位はマイル)を用いた。車線数は、実際に走行して得

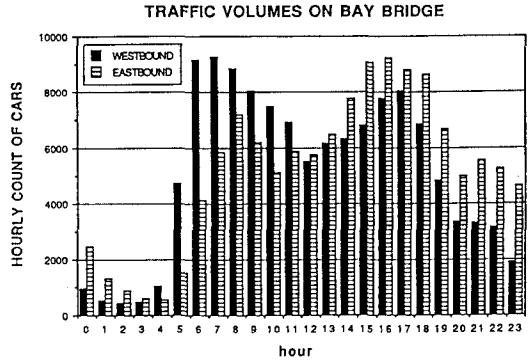


図-4 ベイ・ブリッジの時間交通量(1988 Fall)(CALTRANS資料より能島楊呂氏によって作成)

たビデオ画像より解析して与えている。リンクの所要時間 t を与える走行時間関数は、B. P. R. 関数、

$$t = t_0 \{ 1 + \alpha (v_a / C_a)^\beta \} \quad \dots(1)$$

を使用した。ここで、 v_a はリンク a のリンクフローであり、パラメータ α , β の値は米国での一般的な値 0.15, 4.0 を用いた。 C_a は 1 日交通容量であり、1 時間交通容量と K 値から求めた。 K 値は、HCM 1985⁶⁾ によれば 11.5%~7% で与えられるが、この値を変動させて OD 表の感度分析を行ったところ、ネットワークが粗いこともあって OD 交通量にほとんど変化がなかった。また、零フロー時走行時間 t_0 は、対象ネットワークでの速度制限 55~60 マイルが実際の走行経験より妥当と考えて、60 マイル/時の走行時間を与えている。これらのネットワークデータは、後述の分析においても共通して用いている。次に、対象地域の土地利用パターンとして、各セントロイドにおける夜間人口を 1985 年および 90 年の人口データ^{7), 8)} から内挿法で求めた。両時間断面における人口の変化は少なかった。

以上のデータを前提条件として、対象ネットワークにおける 16 セントロイド間の OD 交通量 T_{ij} を推定した。未知変数の最尤推定値の判断基準は、Holmらによる分散値を用いた。このとき、Holmらの方法では ω 値および重力モデル ($T_{ij} = b E_i E_j d_{ij}^{-\gamma}$, E_i, E_j は各ゾーンの経済指標, d_{ij} は距離抵抗) での b, γ 値を与えなければならない。 ω の値については、Holmらの方法では n 回繰り返して計算後の計算交通量 $v_a^{(n)}$ と観測リンク交通量 v_a^* との誤差 ϵ_a が正規分布 $N(0, (v_a^{(n)})^\omega \sigma^2)$ に従うとしている。 $\omega = 0$ のときは、交通量の標準偏差とリンク交通量の

大きさそのものは無関係となり、 $\omega = 1$ のときは、平均値と分散が比例する。 $\omega = 2$ のときには、標準偏差と交通量の大きさが比例する。つまり、変動係数(σ_s / v_s)が一定となる。ここでは、飯田・高山の研究²⁾等を参考にして $\omega = 2$ を採用した。重力モデルの距離抵抗パラメータ γ については、 γ の値を変化させて、Holmらによる分散値が最小となる $\gamma = -2.8$ を選んだ。これらの値を用いた結果、重力モデルのパラメータ b の推定値は、 9.9×10^{-4} であった。全交通量は、約205万台(内々交通量を除く)であった。

得られたOD交通量が妥当であるかどうかをみるため、OD交通量を配分して、各観測リンクにおける観測交通量と配分交通量を比較した。配分手法は、Smockの配分アルゴリズムと分割増加配分法を用いた。結果を図-5に示す。Holmらによるケーススタディによると、95%信頼区間の幅は交通量にもよるが、10,000台/日の場合には $\pm 5,200$ 台/日である。これによると、得られた結果は、良好にリンク交通量が算出された区間が大部分であるが、そうでない区間も存在する。この原因は次のように考えられる。本研究では、対象地域域外から(へ)の交通を、境界セントロイドから発生(集中)する交通で代替している。重力モデルでOD交通量を推計するモデル構造上、周辺部にいくほど誤差が大きくなるが、特に境界セントロイドの人口が小さい場合にはこの現象が顕著となる。また、リンク交通量観測地点が限られ

ているため、ネットワークを外縁部に拡大できなかつたのも一因であると考えられる。しかしながら、本研究ではベイブリッジ閉鎖の影響を見るのが主目的であり、地震前のベイブリッジ交通量が比較的良好に推計されていることから、以後の分析ではこのOD交通量をベースとして考察することとした。

4. 解析対象ケースの設定

次の4ケースについて道路網の評価を行う。

- ① 地震前のネットワークに地震前のOD表を負荷したケース
- ② 地震後のネットワークに地震前のOD表を負荷したケース
- ③ 地震後のネットワークに地震後のOD表(地震前のOD表よりBARTへの転換を考慮して作ったOD表)を負荷したケース
- ④ ③のネットワークに実際に使用されたHOV(High-Occupancy-Vehicle)レーンを追加したケース

①のケースは地震前の状況を再現しようとするケースである。②のケースは、地震前の交通需要が地震後もそのまま損傷したネットワークに流れようとしたときの状態を評価しようとしている。③のケースは、BARTの期間中の乗客増11.2万人が自動車交通から転換した交通量と考え、地震前OD表からBARTへの転換交通量を自動車1台あたりの乗車人数を考慮して減じたOD表を用いたものである。地震後のOD表は、地震後の観測リンク交通量からも推計できているが、ピーク時のみの観測点での交通量が渋滞領域と考えられることからかなり過小のOD交通量が算出され、実際の需要を反映したOD表ではないと判断した。④のケースは比較的現実を表していると同時にBARTの役割が評価できると考えられる。④のケースでは、車種別OD表がないのでHOVと非HOVを分けた分析は不可能である。ここでは、HOVレーンや補助車線の平均的なネットワークでの効果を評価するにとどまっている。

5節の道路網容量では、解析を1日単位で行うので3節と同じネットワーク諸元であるが、6, 7節のOD間所要時間および信頼性解析では解析を1時間単位で行うこととし、そのため以下の設定を行った。まず、道路のサービス水準は、HCMでのサービス水準DとEを用い、交通容量はそれぞれ1600,

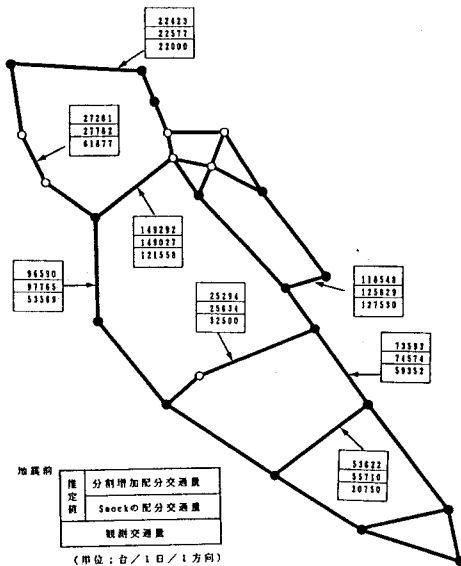


図-5 OD表の配分結果と観測リンク交通量(地震前)

2000台/時/車線とした。また、1日単位のOD交通量を時間交通量に変換するための時間係数を3種類用意し、これらの組合せで計算を行った。

5. 道路網容量によるネットワークのマクロ的評価

道路網容量とは、固定されたODパターンのもとでOD交通量のある配分原則に従って漸次増加させていったとき、そのネットワークで処理し得る最大トリップ数である。すなわち、道路網の各道路区間の容量が与えられた場合、すべてのOD交通がとくに著しい渋滞に遭遇することなく、円滑な走行移動が可能な最大総トリップ数である。ここでは、配分の過程における経路探索を利用した方法¹⁰⁾で、前節の4ケースについて道路網容量を算出した。これによってベイブリッジが道路網容量に与えた影響およびBARTやHOVレーンの果たした役割が評価できる。結果を表-1に示す。まず、ケース①では、地震前の道路網容量は約144万トリップであり、ベースとした全OD交通量(内々トリップを除く)205万トリップを下回っている。道路区間における混雑度をネットワークにも拡張適用できるとすると、混雑度が1.0~1.5の状態は朝夕のピーク時間帯を中心に渋滞が起こる

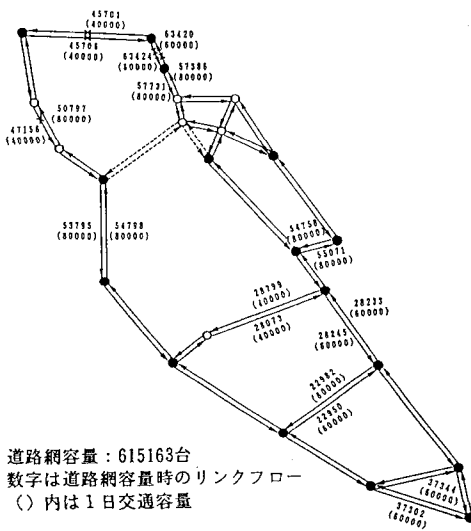
状態とされている¹¹⁾。ケース①では混雑度は約1.4となり、地震前から朝夕のピーク時を中心にかなりの渋滞が起こっていたと推測される。ケース②では道路網容量は約61万台と約82万台減少する。道路網の処理能力がベイブリッジ等の不通により、格段に落ちたことがうかがえる。このときの状態を図-6に示すが、図の右上のリッチモンド市を中心にカットセット(ネットワークが非連結となるためのリンクの集合)が生じていることがわかる。これは、リッチモンド発着の交通にパークレイからの迂回交通が加わったためであると考えられる。ケース③では、道路網容量は約79万台となり、ケース②に比べると約18万台増加している。カットセットの位置は変わらないので、この増加量がBARTの果たした役割であると評価できる。ケース④では、ケース③に比較して道路網容量はまったく増加しなかった。これは、HOVレーン等の臨時的レーンが橋梁の一部区間や取り付け部において、レーンの非増設道路区間には含まれているところが多いことからと考えられる。このことは、交通需要の多い区間は通常でもその道路幅員の限度まで運用されていることが多いことから、地震時の交通運用にある一定の限界があることを示していると考えられる。しかし、道路網容量の観点からは臨時レーンの設置効果は少ないが、後述するように他の指標ではその効果がみられ、ネットワークの多面的な評価が重要であることが示される。

表-1 道路網容量の変化

ケース設定	道路網容量
① 地震前ネットワーク + 地震前OD表	約144万トリップ
② 地震後ネットワーク + 地震前OD表	約62万トリップ
③ “ + BARTへの転換を考慮したOD表	約79万トリップ
④ 地震後ネットワークwith HOV ₂₊ + “	約79万トリップ

6. OD間所要時間からみたネットワーク評価

ネットワークのマクロ的評価に対し、ここではOD毎の評価を行う。OD間の平均的所要時間を評価値とし、交通量配分の最終過程から得られるOD間所要時間を算出した(表-2)。例えば、表-2の左側2列では、オークランド~サンフランシスコ間の朝のピーク時の所要時間が、地震前ではベイブリッジ経由で計算上17~27分であったものが、地震後はこれがSan Mateo橋経由となり、ケース③で100分~165分となったことが示されている。表では、参考のために地震後と同じ経路を利用した際の所要時間も示している。しかしながら現実では、それ以上の所要時間がかかったことが報告されている。例えば、San Mateo橋の所要時間は、1989年11月での実地走行の所要時間は約1時間30分(夕方ピーク時東方向行き)



道路網容量: 615163台
数字は道路網容量時のリンクフロー
()内は1日交通容量

図-6 道路網容量時のカットセット(地震後ケース②)

表-2 ノード間所要時間

時間係数	0.10	0.10	0.08	0.08	0.06	0.06
交通容量	2000	1600	2000	1600	2000	1600
① 地震前ネットワーク+地震前OD表						
(1)	17.80	27.10	13.61	17.80	11.72	12.97
	56.76	66.37	52.79	56.76	50.87	52.15
(2)	19.30	28.31	15.00	19.30	12.95	14.32
	37.34	43.34	34.76	37.34	33.56	34.37
(3)	62.23	81.58	53.25	62.23	48.98	51.83
	62.23	81.58	53.25	62.23	48.98	51.83
② 地震後ネットワーク+地震前OD表						
(1)	140.18	247.10	89.42	138.04	59.41	82.10
(2)	135.70	259.02	83.52	135.70	55.78	72.40
(3)	101.84	184.49	66.89	101.84	52.16	62.30
③ 地震後ネットワーク+地震後OD表(BARTへの転換を考慮)						
(1)	100.52	165.28	67.46	100.52	53.61	61.74
(2)	86.13	162.23	62.12	86.13	46.83	58.84
(3)	81.60	129.96	59.44	81.60	50.26	56.01
④ 地震後ネットワーク(HOVレーン追加)+地震後OD表						
(1)	90.04	143.54	63.03	90.04	52.28	58.74
(2)	74.91	122.58	55.04	74.91	44.08	52.16
(3)	77.27	125.88	57.95	77.27	49.74	54.96

備考：ノードペア (1) Oakland-San Francisco
(2) Berkeley-San Francisco
(3) San Jose-San Francisco

地震前においては、上段：Bay Bridgeを使ったときの所要時間

下段：地震後と同じ経路を使ったときの所要時間

単位：ノード間所要時間(分)、交通容量(台/時間/車線)

と報告されている¹²⁾。計算上の所要時間は約60分であり、B.P.R. 関数の渋滞領域の計算となっているのが原因と考えられる。また、通勤時の出発時間を3時間早めて出勤したケース等も報告されている。したがって、所要時間の評価では、B.P.R. 関数の容量を超過した部分で所要時間が計算されていること、現実の渋滞領域では交通流の不安定現象や合流にともなうさらなる時間遅れがあること、等を考慮しなければならない。したがって、このような状況下での所要時間の評価は、最低限必要な所要時間であり、実際の所要時間はそれ以上必要であると考えの必要がある。以上のことから、サンフランシスコ湾岸域の道路交通が被った時間損失は甚大なものであったことがうかがえる。

7. 連結信頼性からみたネットワーク評価

最後に、道路網の連結信頼性の評価を行う。道路網の連結信頼性とは、所与の期間中、道路網の任意のノード間において、あるサービスレベル以上での走行移動が保証される確率的指標と定義される。この信頼性は代替性の指標であり、ある経路が通行不能となっても、代替経路が確保されて円滑に目的地へ到達できる程度を表している。本地震では、サンフランシスコ市の壊滅的な被害は免れ得たので都市活動が速やかに回復し、道路網の回復まで残存した道路網で都市活動を支えねばならなかった。したがって、この指標の災害時における意義は重要である。

表-3 ノード間信頼度

時間係数	0.10	0.10	0.08	0.08	0.06	0.06
交通容量	2000	1600	2000	1600	2000	1600
① 地震前ネットワーク+地震前OD表						
(1)	0.0038	0.0000	0.5918	0.0038	1.0000	0.8266
(2)	0.0000	0.0000	0.1244	0.0000	0.9971	0.5221
(3)	0.0000	0.0000	0.0284	0.0000	0.9264	0.1159
② 地震後ネットワーク+地震前OD表						
(1)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0438	0.0000
(2)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0192	0.0000
(3)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0952	0.0000
③ 地震後ネットワーク+地震後OD表(BARTへの転換を考慮)						
(1)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6586	0.0009
(2)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4017	0.0000
(3)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6494	0.0012
④ 地震後ネットワーク(HOVレーン追加)+地震後OD表						
(1)	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.9234	0.0080
(2)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3932	0.0000
(3)	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.8740	0.0050

備考：ノードペア (1) Oakland-San Francisco
(2) Berkeley-San Francisco
(3) San Jose-San Francisco

単位：交通容量(台/時間/車線)

この信頼性を評価するためには、迂回行動によって経路交通量が変化すればネットワーク信頼度も変化することを評価モデルに内包化する必要がある。このため本研究では、地震前及び地震後の一定期間の交通量を定常的かつ平均的な交通状態とし、リンク信頼度推計法¹³⁾・¹⁴⁾およびノード間信頼度推計法¹⁵⁾によって主要3ノード間の連結信頼度を求めた。前者のリンク信頼度推定法は、リンク信頼度をリンクへの需要がリンクの交通容量を超えない確率と定義し、交通流の平均値回りの確率変動を仮定してリンク信頼度を推計する方法である。具体的には、交通量配分によって推計した交通需要の平均値と交通容量等の入手容易な交通指標から変動係数の推計を介在させてリンク信頼度を決定するモデル構造である。すなわち、リンクフローの需要変動が平均 \bar{v}_a 、分散 σ^2_a の正規分布 $N(\bar{v}_a, \sigma^2_a)$ に従うと仮定する。次に変動係数を被説明変数とする負の指数型の関係式を用いる¹³⁾。

$$COV = \sigma_a / \bar{v}_a = \alpha \cdot \exp\{-(g + \delta) \cdot \beta\} + \gamma \dots (2)$$

ここに、COV：変動係数、g：混雑度(交通量 \bar{v}_a /交通容量 C_a)、 α 、 β 、 γ 、 δ ：パラメータである。混雑度gの確率密度関数 $f(g)$ を得ると、リンク信頼度 r_a は、

$$r_a = \int_0^1 f(g) dg \dots (3)$$

として得られる。本研究ではリンクフロー変動に正規分布を仮定している。1回の交通量配分でリンク信頼度の推計が可能のため、この方法は、データ制約の多い予測や代替案比較に十分耐えられる効率的

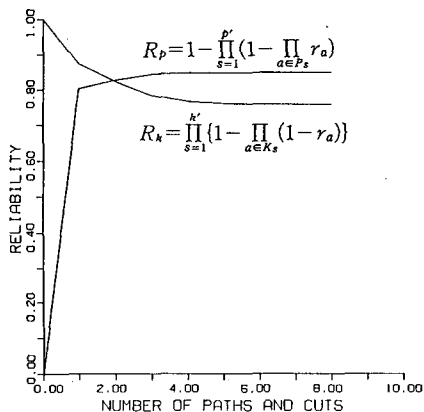


図-7 交点法による信頼度算出例(Oakland-San Francisco間)
(ケース①, 時間係数0.06, サービス水準D)

な信頼性解析法である。リンク信頼度を与件としてノード間信頼度を求める方法は交点法¹⁵⁾を用いた。

計算結果を表-3に示す。左側4列がピーク時間帯交通に対応する。この時間帯では地震前から相当な交通渋滞が発生していたことが推測され、連結信頼度はきわめて小さい。したがって、地震後の②③④のいずれのケースでも信頼度はきわめて小さく算出される。これに対し右側2列は、昼間時の交通量に対応している。②のケースでは、連結信頼度が地震前に比べて相当減少することが示されている。③のケースでは、②のケースに比べると相当改善されており、BARTが交通量を分担し、道路網信頼度の向上に果たした役割が評価できる。④のケースにおいてはHOVレーンと非HOVレーンを区別せず平均的に扱ったが、それでも信頼度が増加したことが示されている。これは、車種を制限したレーンを増設することによって、ノード間信頼度を向上させることができることを示している。交通混雑が生じている状況下で連結信頼性を向上させることは困難なことであるが、このような車線の増設は信頼性向上のための1つの有力な手段である。わが国においては、バス専用レーンが同等の機能を果たすと考えられ、災害時における一定の役割が認められる。同時に、救急車や消防車等の緊急自動車の走行性にも寄与するものであると考えられる。

8. 結語：今後の課題とわが国での交通防災対策

本研究では、災害時の効果的な道路網運用の手がかりを得るために、災害時の道路状況を定量化し、

道路機能の被害を同定した。わが国の道路網に比較すればサンフランシスコの道路網は、比較的よく整備されているとよい。しかし、このような道路網さえネットワークの一部が損傷するときわめて大きな悪影響を及ぼすことが定量的にも明らかとなった。これに対し、わが国の道路網は、その容量ぎりぎりの状態で運用されているとよい。また、リーズナブルな代替経路はあまりないといふ。また、大量輸送機関も混雑した状態で運行がなされており、道路交通を代替する余力はあまりない。したがって、予めよく計画された道路網運用策を構築しておかないと、災害時には交通の大混乱が予想される。その対策としては、a)新たな道路網整備を災害対策と連携させて構築する、b)種々の交通管理運営策を組み合わせる、等が考えられる。紙幅の関係で多くを述べられないが、交通ライフラインの機能損傷を最小限にするための交通防災計画が必要であると考えられる。

本研究の成果は、亀田らによるロマ・プリエタ地震による被害調査結果²⁾と若林・飯田らによる道路網の信頼性評価法¹³⁾⁻¹⁵⁾を統合することによって得られたものである。本研究の遂行にあたり、京都大学飯田恭敬教授の熱心な御支援を得た。また、本研究の解析では京都大学工学部(都市耐震センター)出井惣太君の御協力を得た。記して深謝の意を表する次第である。

参考文献：

- 1) 亀田弘行：都市震害の経験に学ぶ、一都市の耐震性は向上しているか、京都大学防災研究所公開講座・都市の防災[1], pp.93-116, 1990.
- 2) 亀田弘行・浅岡彦彦・小川信行・能島暢呂：ロマ・プリエタ地震がサンフランシスコ湾岸地域の交通システムに与えた影響、都市耐震センター研究報告別冊第7号, 1991.
- 3) 佐藤忠信：国内外における都市地震災害、一わが国のライフラインは大丈夫か、京都大学防災研究所公開講座・都市の防災[2], pp.73-92, 1991.
- 4) 飯田恭敬・高山純一：リンクフローによるOD交通量推計モデル、土木学会土木計画学講習会資料【交通ネットワークの分析と計画：最新の理論と応用】, pp.97-104, 1987.
- 5) Holm, J. et al.: Calibrating Traffic Models on Traffic Census Results Only, Traffic Engineering and Control, Vol.17, No.4, pp.137-140, 1976.
- 6) 交通工学研究会：1985道路の交通容量(Highway Capacity Manual 1985), コロナ社, 昭和62年.
- 7) 1980 Census Populations or Latest Available Estimates, Rand Mc.Nally 1986, Road Atlas, p.120, Rand Mc.Nally & Co. Offices, 1986.
- 8) 前掲7)の1990版.
- 9) 飯田恭敬・高山純一：高速道路における交通量変動特性の統計分析、高速道路と自動車, Vol.24, No.12, pp.22-32, 1981.
- 10) 佐佐木綱・飯田恭敬：交通工学, pp.177-178, 国民科学社, 1992.
- 11) 首都高速道路公団・交通工学研究会：交通量推定手法の改良研究報告書, p.123, 昭和58年.
- 12) 亀田弘行：1989年ロマ・プリエタ地震によるサンフランシスコ湾岸地域等の被害に関する調査研究、文部省科研費(No.01102044)総合研究(A)研究成果報告書, No.B-1-3, p.232, 1990.
- 13) 若林拓史・飯田恭敬：交通量変動に起因する道路網の所要時間信頼性評価、土木学会第46回年次学術講演会概要集第4部, pp.430-431, 1991.
- 14) 若林拓史・飯田恭敬・井上陽一：シミュレーションによる道路網の交通量変動分析とリンク信頼度推定法、土木学会論文集(掲載予定), 1993.
- 15) 飯田恭敬・若林拓史・福島博：道路網信頼性の近似解析方法の比較研究、土木学会論文集, No.407/IV-11, pp.107-116, 1989.