

迂回交通量を考慮した阪神間道路網の連結信頼性評価と重要区間評価： 現況および将来道路網に対して

名城大学 若林拓史*

阪神淡路大震災における交通システムの被害特色は、都市交通と国土幹線交通の両交通システムが狭い地域に集中していたため、地域レベルおよび全国レベルで大きな影響もたらされたこと、また、立体交差部分の落橋が2つの交通システムの同時共倒れのシステムダウンを多数引き起こした点である。今回の地震被害を通じて、① 代替経路および交通システムの分散化による交通ネットワークの信頼性の向上、② 立体交差部等の重要区間の耐震性のさらなる強化、等の必要性が再認識された。

本稿では、従来から開発してきた道路網信頼性解析と確率重要度解析に基づいて、立体交差部の重要度をモデル解析し、兵庫県の現況および復興道路網に対し、被害想定シナリオを複数設定し、信頼性と確率重要度の緊急的な計算を行った。得られた結果の概要は、(1) 六甲山北部ルートによって神戸市への連結信頼性は向上するが、(2) (1)のルートが中国自動車道の信頼度に大きく依存するため中国道の重要度が大きく算出され、何らかの対策が必要等が明らかとなった。また、1989 ロマ・プリエタ地震での事例をとりあげ、余裕のある道路構造について考察した。

1. はじめに

1995年1月17日午前5:46に発生した阪神淡路大震災(M7.2)では、死者不明6,055名、倒壊建物11万戸以上の被害をもたらした。戦後我が国最大の災害となった。今回の地震では、狭い地域に交通システムが集中していたために、そのほとんどすべてが利用不能となった。これが今回の地震による交通システム被害の最大の特徴である。また、交通システムの冗長性が事前に十分構成されていないと、大都市圏において同様な被害の発生する可能性が高いことも認識された。

本論文では、阪神淡路大震災における交通システムの問題点を議論した上で、道路網の連結信頼性を計算し、信頼性を向上する観点から重要な区間を確率重要度で評価する方法を示す。簡単なネットワークを対象に、今回の地震で問題となった立体交差部の確率重要度が他の区間の確率重要度と大きく異なる

ことを示し、さらに、兵庫県の復興ネットワークでの信頼性および確率重要度を試算する。また、1989 ロマ・プリエタ地震での事例をとりあげ、余裕のある道路構造について考察する。

2. 阪神淡路大震災における交通システムの課題

今回の地震における交通システムの問題点は、① 都市交通、② 国土幹線交通、③ 地区内交通とに分けて論ずることができる。また、④ 立体交差部の問題点も露呈した。

(1) 都市交通ネットワーク

まず、都市交通ネットワークは、橋梁や盛り土の被害、斜面崩壊、地盤の液状化などにより寸断されたため、その交通がほとんど不可能になった。そのことが原因となって地震直後から大渋滞が発生し、消防活動、救出救急救命活動等が大きく阻害され地震被害が拡大することとなった。さらに、緊急物資輸送、復旧活動等にもきわめて大きな支障をもたらした。このような経験を通じて、都市交通ネットワークを平時からどのように構成するかが問題となっている。以下にその課題を述べる。

Key Words: 交通網計画, 防災計画, ネットワーク交通流

* 正会員 工博 名城大学都市情報学部 (〒509-02 可児市虹ヶ丘
4-3-3 TEL:0574-69-0131 FAX:0574-69-0155)

a) 信頼性の高い道路網の構築

大地震が発生しても交通システムの損傷は最小限に食い止められ、かつ交通システム全体としてはその代替性、冗長性が発揮されて交通の流れには極力影響が及ばないように、道路網信頼性の向上策をはかることが重要である。

b) 柔軟性を兼備した危機管理計画

地震の発生直後から復旧過程に至るまでに発生する緊急的交通をいかに処理管理し、交通システムが麻痺しないように運用する、交通規制・道路網運用・情報提供を含む総合的な交通システムの危機管理計画の構築が重要である。この危機管理計画は、震度別、発生時刻別、被害規模別、地域別、対策シナリオ別、対策メニュー別に策定されることが必要で、さらに時系列的（地震直後、その日の夕方まで、翌日、2～3日後、1週間後、2～3週間後、1カ月後、...）に構築される必要がある。この計画には、状況の変化に現場で十分に対応できるようにするため、従来日本の災害マニュアルにはあまりなかった『Policy』の項目が必要である。

c) 道路網の階層的構築

b)と関連して、道路網上を流れる交通の種類に応じて、交通システムを機能別に階層化することも重要である。これは、大きく分けて、① 地域外から地域内に向かう緊急物資輸送や救出救急救命活動等の交通と、② 地域内での避難（この場合の自動車の使い方には議論が必要であるが）や端末的物資輸送のための地区内交通とを分離することが重要で、そのためには長期的展望に立って道路網の階層的構築を進める必要がある。

(2) 国土幹線交通ネットワーク

国土幹線交通については、主要な交通システムが兵庫県南部に集中していたために、重要な東西基幹交通が長期にわたって遮断され、わが国の物流人流に大きな影響を与えた。

このことから、議論は上記 a)～c)と同様となるが、特に国民経済に重要な影響を有する国土幹線交通は、地質学的に同じ地域を避けて冗長的に構成することの必要性を示唆している。従来、国土幹線交通軸は、採算性や経済性を重視して整備されてきたが、今後は、高い信頼性を維持するための路線整備

を考える必要がある。密接関連性指標のうちの代替性機能をより広域に適用し、例えばある重交道路線の交通量が容量に対して一定基準を超えると、新たな代替路の整備を考えるという観点が必要になると考えられる。この考え方は、従来交通路整備が進まなかった過疎地域の活性化にもつながるもので、人口の地方分散化にも寄与すると考えられる。また、道路交通と船舶交通等の連携等、異なるモードとの一体的運用も必要であろう。

(3) 地区内交通ネットワーク

建物倒壊によって地区内細街路の閉塞が生じた。これによって、地域住民の避難、避難所との往復、買い物等の日常交通が影響を受けたばかりではなく（現在でも影響が残っている）、水道・ガス・電力の復旧工事に多大の支障が出た。塚口¹⁾は、道路幅員について車両の通行可能性、歩行者の通行可能性に分類して道路障害を分析している。復旧工事では現場への車両の到達性が重要であるにもかかわらず、多数の閉塞によって復旧現場への経路がわからず、ほとんど迷路解き状態となった。このため、迅速な最短経路探索が必要とされた。家屋倒壊等に起因する地区内道路網寸断による影響とその対策は、今後の重要な課題となった。

(4) 立体交差部分の問題

今回の地震では、交通システムが輻輳的に構成されていたので、立体交差部分の落橋によって2つの交通システムの共倒れのシステムダウンが多数発生した。これは新しい地震被害の形態である。

こうした部分の重要度が改めて認識され、設計基準の見直しや、その冗長性をどのように確保するかが重要な問題点として指摘された。本論文では、この問題にも触れている。

3. 最近の都市地震被害の特徴

阪神・淡路大震災以外の最近の都市地震として、米国の大都市を襲った1981シルマー地震、1989ロマ・プリエタ地震、1994ノースリッジ地震が挙げられる。これらの都市地震に関して、震後のODパターンの変化の大小、都市の経済活動の回復の早さ、交通ライフラインの損傷の程度に関して概略的に分

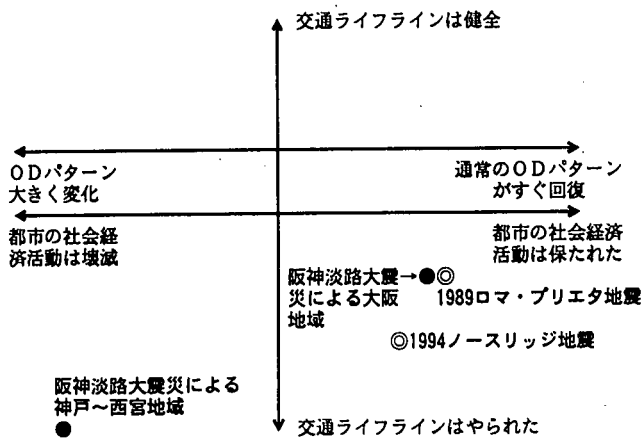


図-1 最近の都市地震の位置づけ

類すると図-1のようになる。同じ直下型地震であり、1年前の同じ日にロサンゼルスで発生したノースリッジ地震と阪神大震災とは地震の規模が違うことがわかる。最近の地震工学（耐震工学, Earthquake Engineering）が取り組んできた対象は、都市の耐震安全性の向上、および都市の耐震信頼性の向上²⁾であったから、この対象とする地震被害は、第4象限のものであり、阪神大震災ではこの前提が大きく崩れたといえる。ただし、大阪地区の都市高速道路網の損傷は、ロサンゼルスとほぼ同様と思われる。

以上述べてきたように、今回の地震被害を通じて、ネットワークの一部が機能不全に陥っても、ネットワーク全体としては機能を果たす³⁾ことの重要性が再認識された。また、単なる連結信頼性ではなく、円滑な交通サービスで地域間を連結することの重要性も認識された。さらに、信頼性の高い通路の確保が、救急車や消防車等の緊急自動車の通行に便宜を与え、救出救急救命活動や消防活動によって災害の拡大を防ぐことに大いに貢献する⁴⁾ことも再認識されたといえる。

4. ブール演算法と確率重要度

筆者らは、道路網の質的水準の評価指標として信頼性を提案し、種々の効率的計算法を提案している。ここでは、ネットワークにおけるノード間信頼度 R をブール演算法⁵⁾で計算する。ノード間信頼度 R は、各リンクの信頼度ベクトル r の関数であり、

$$R(r) = E \left[1 - \prod_{s=1}^p \left(1 - \prod_{a \in P_s} X_a \right) \right] \quad (1)$$

で与えられる。ここに X_a は、リンク信頼度 r_a を

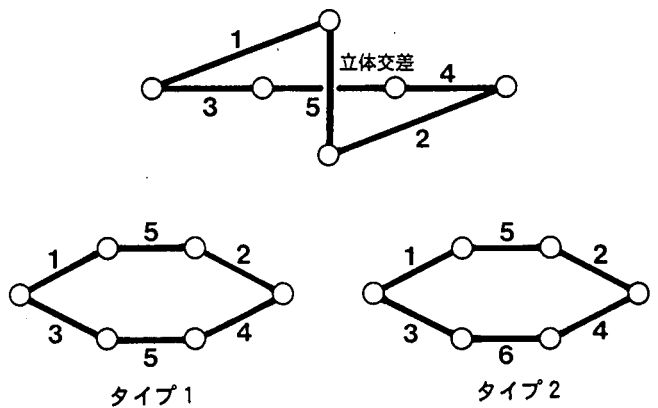


図-2 立体交差とその等価的表現

表-1 立体交差部確率重要度

| 信頼度 | | 確率重要度 | |
|---------|--------|--------------|--------|
| | | タイプ1 | タイプ2 |
| リンク信頼度 | link 1 | 0.9000 | 0.1710 |
| | link 2 | 0.9000 | 0.1710 |
| | link 3 | 0.9000 | 0.1710 |
| | link 4 | 0.9000 | 0.1710 |
| | link 5 | 1.0000 | 0.9639 |
| | link 6 | 1.000(Type2) | -- |
| ノード間信頼度 | | | 0.9639 |

$E[X_a] = r_a$ で与える確率変数であり、 P_s は s 番目のミニマルパスセット、 p は選択パス数である。 p がノード間のすべてのパス数とすると R は信頼度の厳密値を与え、部分的なパスであれば下限値を与える⁵⁾。リンク信頼度のリンク間での従属性は考慮していない。本ブール演算法では、式(1)を記号処理的なアルゴリズムで多項展開し、ブール演算処理を行って信頼度を求めている。

リンク a の確率重要度 IP_a は、

$$IP_a = \partial R(r) / \partial r_a \quad (2)$$

で与えられる⁵⁾。確率重要度には $0 < IP_a \leq 1$ という性質があり、そのリンクの信頼度の維持(もしくは向上/低下)がノード間信頼度の維持(向上/低下)に与える影響度を知ることができる。確率重要度の高いリンクでは信頼度の維持の重要性がより高く、またそのリンク信頼度の低下がノード間信頼度の低下に大きく寄与するために、冗長性を高める必要性も高いといえる。ブール演算法では計算過程で確率変数の情報が保存されるため、このような解析的な分析が可能である。

図-2上のような簡単なネットワークでリンクの共有(左図)と通常の並列システム(右図)を比較すると、ノード間信頼度は同じであるのに、確率重要度が大きく異なっていることがわかる(表-1)。

このように、確率重要度を用いることで、立体交差部の重要度を計量化できることがわかる。

5. 兵庫県道路網における信頼度と確率重要度

図-3は新聞等で発表された復興ネットワークとされる道路網である(実線が現況ネットワーク、破線が将来ネットワークを示す)。このネットワークの特徴は、従来は神戸市内は主に東西間交通路のみで構成され、南北軸交通路が不足していたのに対し、六甲山北部の東西道路と南北方向道路によって接続し信頼性を高めようとしている点である。このネットワークに対しノード間(大阪~三宮間)の信頼度と確率重要度を計算する。交通量等のデータは地震直後の諸状況を考慮し、自力入手容易なものとして土木学会緊急報告会資料⁶⁾、阪神高速道路交通量調査資料⁷⁾、『高速道路と自動車』⁸⁾等の交通量データ(1994年10月実績値)を用いた。将来ネットワークに対しても同じ交通量を用いている。計算のフローは図-4に従っている。なお、本計算結果は比較的常識的で妥当な結果を与えているが、あくまでも地震直後の緊急的な計算であり、今後厳密な交通量配分を伴う追加的な計算を必要としている。

本分析の特徴は、

- ① 交通量を考慮した信頼性解析であること、
- ② 確率重要度を計算していること、
- ③ いくつかのルートが寸断された場合を設定し(シナリオ設定法)、その場合の信頼性解析を迂回交通量を考慮し、数種のケース間比較を行っていること(ただし、交通量配分は行なわない簡略な考慮である)、
- ④ ネットワーク形状の代替案を考え、その信頼度と確率重要度も計算していること、
- ⑤ 信頼度計算が簡便であり、将来予測や代替案比較に耐えられること、である。

なお、リンク信頼度 r_a の推定は、交通量変動に起因するものとし、文献9)の方法によった。交通量変動値は大阪地域で観測された値¹⁰⁾を用いた。得られた結果を表-2に示す。この結果はピーク時交通に対応している。平常時の信頼度(BASE)および神戸線・湾岸線・43号線(の1/2容量)・中国道が通行不能となり2号線が代替経路となり迂回交通を引き受けた場合(CASE 6 今回の地震に相当する)、

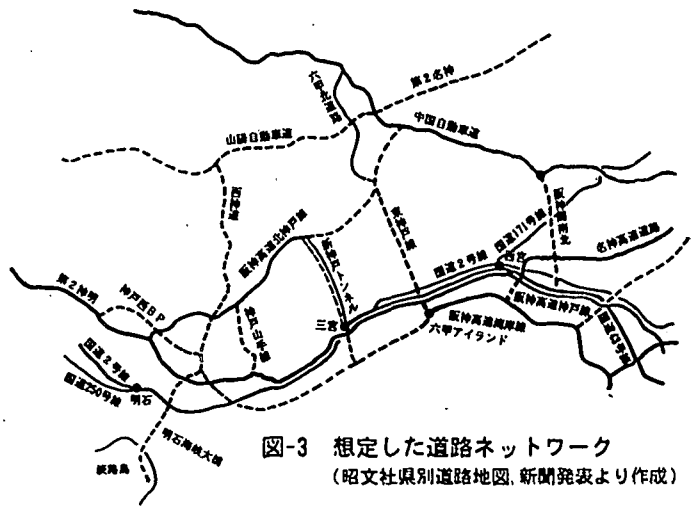


図-3 想定した道路ネットワーク
(昭文社県別道路地図、新聞発表より作成)

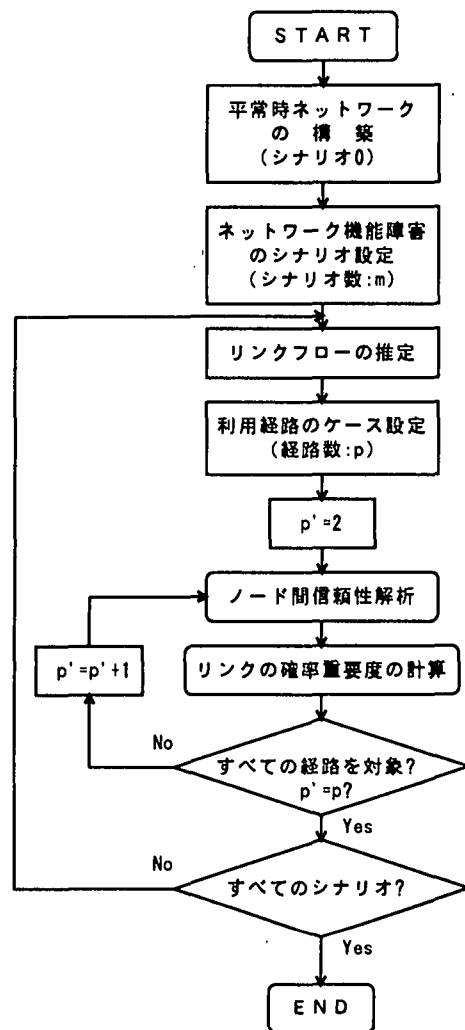


図-4 ネットワーク信頼性評価のフロー

およびその中間的な被害想定について信頼度を計算している。BASE ケースから、平常時でも2号、43号、神戸線では渋滞が発生し、連結信頼度があまり高くないことがわかる。この3経路に湾岸線を加えると、同線は交通量が飽和していないために、信頼度が格段に向上することがわかる。また、

表-2 兵庫県復興ネットワークの信頼度と確率重要度の高いリンク（連結信頼度：大阪～三宮，時間係数0.10）

| 想定ケース | 追加経路 | 国道2号+国道43号 | +阪高神戸線 | +阪高湾岸線 | +名神・阪高 | +中国・北神戸・TN | +中国・東神戸・43 |
|-------|----------------------------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|
| BASE | 全リンク健在 | 0.4849 | 0.4849 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| | 確率重要度 | 2号(0.6046) | 2号(0.6046) | 湾岸(0.5151) | 湾岸(0.5151) | 湾岸(0.0793) | 湾岸(0.0097) |
| CASE1 | 神戸線のみ不通 代替：2号，湾岸 (43号余力なし) | 0.0095 | 0.0095 | 0.2800 | 0.2800 | 0.5735 | 0.5735 |
| | 確率重要度 | 43号(0.0392) | 43号(0.0392) | 湾岸(0.4776) | 湾岸(0.4776) | 中国道(0.5868) | 中国道(0.5868) |
| CASE2 | 神戸線・43号不通 代替：2号，湾岸 | 0.000006 | 0.000006 | 0.000006 | 0.000006 | 0.00005 | 0.00005 |
| | 確率重要度 | 2号(0.0001) | 2号(0.0001) | 2号(0.0001) | 2号(0.0001) | 中国道(0.0062) | 中国道(0.0062) |
| CASE3 | 神戸線・43号1/2不通 代替：2号，湾岸 | 0.0021 | 0.0021 | 0.0063 | 0.0063 | 0.0237 | 0.0237 |
| | 確率重要度 | 43号(0.0097) | 43号(0.0097) | 湾岸(0.0378) | 湾岸(0.0378) | 中国道(0.2207) | 中国道(0.2210) |
| CASE4 | 湾岸線のみ不通 代替：神戸線 | 0.4849 | 0.4849 | 0.4849 | 0.4849 | 0.5522 | 0.5522 |
| | 確率重要度 | 2号(0.6046) | 2号(0.6046) | 2号(0.6046) | 2号(0.6046) | 2号(0.5256) | 2号(0.5256) |
| CASE5 | 中国道のみ不通 代替：湾岸線 | 0.000006 | 0.000006 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 |
| | 確率重要度 | 2号(0.0001) | 2号(0.0001) | 湾岸(0.0476) | 湾岸(0.0476) | 湾岸(0.0476) | 湾岸(0.0476) |
| CASE6 | 神戸・湾岸・43・中国全滅 代替：2号 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | 確率重要度 | (0.0) | (0.0) | (0.0) | (0.0) | (0.0) | (0.0) |

CASE1では、六甲山北部ルートによって信頼性は向上するが、そのルートが中国自動車道の信頼度に大きく依存するため中国道の確率重要度が大きく算出され、何らかの対策が必要等のことが明らかとなっている。また、CASE2以下では、迂回交通量が大きいために、六甲山北部ルートによっても信頼性は大きくは向上しないことがわかる。しかしこの場合も、中国道の確率重要度は大きく算出されるので、このルートの信頼度を維持することが重要である。

6. 余裕のある道路構造の必要性

ここでは、1989年にサンフランシスコで発生したロマ・プリエタ地震での事例をもとに、余裕のある道路構造について考える。

(1) 地震の概要

ロマ・プリエタ地震(Loma Prieta Earthquake)(M7.1)は、1989年10月17日午後5時4分15秒(現地時間：Pacific daylight time)に、カリフォルニア州サンフランシスコ郊外で発生した。地震被害の多くは、震央からの距離が約50km以内に集中しているが、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

東西間交通の中核的ルート(サンフランシスコ市とオークランド市を直結する)であるベイ・ブリッジの橋脚上の渡り桁が落橋し、復旧までの1カ月間、往復合計10車線が閉鎖となって湾岸地域の交通に大きな影響を与えた。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、これらのルートでは交通の大渋滞が発生した。例えば、San Mateo橋(S-92号線：ベイ・ブリッジの不通による主要な迂回ルートであった)の所要時間は、1989年11月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)と報告されている¹¹⁾。この橋梁長は約6マイルであり、通常の所要時間は5～6分である。また、通勤時の出発時刻を3時間早めて出勤したケース等も報告されている。

(2) CALTRANSによる交通対策とその効果推計

このため、CALTRANS(カリフォルニア州交通省)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、図-5に示すように臨時の車線(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

待される効果が得られない可能性がある。

また、追加したレーンの運用法も重要である。自然災害によってある区間が通行不能となり、大量の迂回交通が発生して、ネットワークの広範な部分に大きな影響を及ぼす場合、既存道路区間に追加レーンを設置する余地があることはきわめて有用である。このレーンを他のレーンと同様、一般車に解放すれば、それだけ道路区間の混雑緩和が計られるであろう。しかし共倒れの的に全レーンが麻痺する可能性がある。一方、この追加レーンを緊急自動車やHOV(わが国においてはバスレーンに相当する)等の限定された車種にだけ優先的に解放して、地域間に比較的円滑な経路を確保しておくことは、災害後という緊急時において重要なことである。しかしながら、混雑の程度によっては、優先レーンを設けずに一般車線として運用する方が全車線の円滑な運用を促進してかえって望ましい交通状態となるかもしれない。したがって、追加レーンの運用法を議論しておくことが重要である。

7. 結語

今回の地震での教訓は、道路網と道路構造は平常時からもっと余裕のある計画を実現する必要があることである。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く、またリーズナブルな代替経路はあまりない。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。今回の地震被害は、従来の効率性重視の交通施設計画の虚を突かれた形であり、効率性を交通施設整備の合理的基準としてきた従来の交通計画が反省を迫られている。

したがって、わが国においては、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。どのような交通運用策をもって、災害後の交通ネットワーク運用を図るのか、真剣な議論が必要とされるであろう。また、道路網が理想的条件を備えたとしても、地震直後には渋滞が発生することを想定するべきである。

このために本論文では以下について議論してきた。

(1) 国土幹線交通、都市交通、地区交通別に信頼度の高い道路網の構築を行うこと。

- (2) 柔軟性を兼備した危機管理計画を策定すること。
- (3) 道路網を階層的に構築すること。
- (4) 立体交差部の耐震性を強化すること。
- (5) 余裕のある道路構造とすること。

また、

- ① 状況を迅速に把握すること、
 - ② 迅速に適切な対策を打つこと(今回、警官は人命救助でその任には十分につけなかった)、
 - ③ 交通規制の情報を迅速に公表すること等、
- が重要であるが、今回の地震ではすべての面で課題が残された。それぞれの対策が必要である。

そして、これらの諸対策はそれぞれがバラバラにあるのではなく、有機的にパッケージ化して機能させる必要がある。また、それぞれの都市・地域の特性に応じて、交通の危機管理計画を構築しておく必要があるといえる。

参考文献：

- 1) 塚口博司：道路幅員について、交通工学、Vol.30、増刊号、pp.18-21、1995。
- 2) 若林拓史・亀田弘行：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及交通運用策の評価、土木計画学研究・論文集 10、pp.103-110、1992。
- 3) 飯田恭敬・若林拓史：ODパターンと道路網パターンの相違による道路網信頼性のマクロ的考察、交通工学、Vol.23、No.3、pp.9-19、1988。
- 4) 若林拓史・飯田恭敬：交通管理運用策による道路システムの信頼性向上効果、土木計画学研究・講演集 14(2)、pp.51-54、1991。
- 5) 飯田恭敬・若林拓史：ブール代数を用いた道路網ノード間信頼度の上・下限値の効率的算出法、土木学会論文集、No.395/IV-9、pp.75-84、1988。
- 6) 土木学会：阪神大震災震害調査緊急報告会資料、pp.53-61、1995。
- 7) 阪神高速道路起終点交通量調査報告書、阪神道路公団。
- 8) 高速道路統計月報、高速道路と自動車、Vol.38、No.1、92-95、1995。
- 9) 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及リンク信頼度推定法、土木学会論文集、No.458/IV-18、pp.35-44、1993。
- 10) 寺田幸紀・西村 昂・日野泰雄：感知器データによる自動車交通量の変動特性の分析、平成3年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集、pp. IV-10、1991。
- 11) 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、文部省科学研究費(No.01102044)総合研究(A)突発災害研究成果重点領域「自然災害」総合研究班、No.B-1-3、p.232、1990。
- 12) 若林拓史・亀田弘行：ロマ・プリエタ地震後のサンフランシスコ湾岸地域の道路網運用の効果分析及災害時の道路網計画、都市計画論文集 30(forthcoming)、1995。
- 13) 建設省道路局企画課：道路審議会答申「21世紀に向けた新たな道路構造のあり方」-新時代の「道の姿」をもとめて-について、道路交通経済、1995-1、No.70、pp.11-56、1995。

Reliability Assessment and Probability Importance
of Highway Network
under the 1995 Great Hanshin Earthquake

By Hiroshi WAKABAYASHI

The Great Hanshin Earthquake hit Hanshin Area on January 17, 1995. Almost all transportation systems were damaged, including grade separation intersections. In this paper, firstly, the effect and subject for the future are presented. Next, the importance of grade separation intersection is discussed, using probability importance in the reliability analysis. Thirdly, reliability analysis and probability importance analysis are carried out for the Hyogo revival highway network. Finally, desirable cross-sectional components of highway structure are discussed.