1989ロマ・プリエタ地震後の道路網運用の事後評価と災害時の道路網計画

Post-Earthquake Traffic Management: A Case Study of the San Francisco Bay Area Highway Network in the 1989 Loma Prieta Earthquake

若林 拓史*・亀田 弘行**

Hiroshi WAKABAYASHI and Hiroyuki KAMEDA

1. はじめに

わが国の大都市圏を地震が襲う可能性が以前から指摘されているが，わが国と同様の地震多発地帯である米国カリフォルニア州では近年多くの地震が現実に発生している．これらの被害が，建物被害はもとより都市のライフライン系に大きな被害をもたらしていることから，ライフライン地震工学研究者を中心に，わが国のライフラインの地震時信頼性に大きな関心が集まっている．

中でも，わが国の交通ライフライン，すなわち都市圏道路網は，その交通容量に対してぎりぎりの条件下で運用されているといわざるを得ない．ネットワークの構成要素は十分な耐震強度のもとで設計施工されているが，万一，地震災害が都市道路網を襲ってその一部に損害を与えた場合，地震災害が経済活動には大きな影響を与えず，ネットワークの完全な回復まで，残されたネットワークで経済活動を支えなければならない状態が生じたとすれば，その影響を把握し適切な道路網運用を行うことはきわめて重要な課題である．しかし，わが国では関東大震災以来大きな都市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，このような分析を行う機会は存在しなかった．

1989年10月に発生したロマ・プリエタ地震によって，サンフランシスコ湾の東西間交通の中核的ルートであるベイブリッジの渡り桁が一部落橋し，復旧までの1カ月間，湾岸地域の交通に大きな影響を与えた．この間，鉄道交通であるBARTが代替的役割を果たした他，臨時的なHOVレーンの増設による交通運用が行なわれた．前回の分析[1),2)]では，地震前後で観測された交通量データ[3)]を利用して，地震前後における道路網交通への影響を，BARTの果たした役割やHOVレーン設置効果も含めて定量的に分析したが，HOVレーン設置の厳密な評価は行っていなかった．本稿では，HOVレーン設置の効果に焦点を当てて報告する．この分析結果から道路ストックの豊富なサンフランシスコ湾岸地域でも地震後の緊急的な道路網運用だけでは効果が期待できず，我国においても災害時の運用を予め考慮した道路網構築や他の交通機関との連携が極めて重要であることが明らかとなった．

2. HOVレーン評価の方法と結果

ベイ・ブリッジの閉鎖期間中，サンフランシスコ湾岸地域の道路網の混雑を少しでも緩和するため，カリフォルニア州交通局(CALTRANS)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

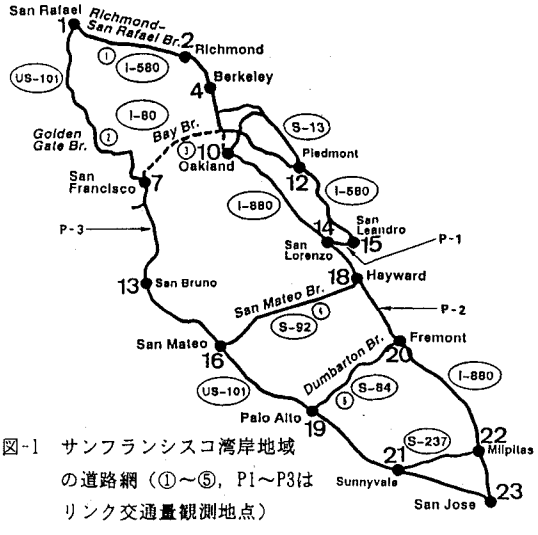

図-1 サンフランシスコ湾岸地域の道路網（①～⑤，P1～P3はリンク交通量観測地点）

キーワード：交通管理，道路計画，ロマ・プリエタ地震，防災計画

* 正会員 工博 大阪府立工業高等専門学校助教授 建設工学科（〒572 寝屋川市幸町 26-12 TEL:0720-20-8584 FAX:0720-21-0134）

** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所（〒611 宇治市五カ庄 TEL:0774-32-3111 Ex.3220 FAX:0774-33-0963）

表-1 HOV／一般レーン利用別の主要都市間旅行時間

	a	b	c	d	e	f
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）	17.81	27.09	13.64	17.81	11.72	12.98
	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）	138.05	256.21	90.57	138.05	59.41	82.41
（2）	135.71	259.06	83.53	135.71	55.78	72.41
（3）	101.85	184.52	66.90	101.85	52.16	62.31
③ 地震後ネットワーク＋地震後ＯＤ表（BARTへの転換を考慮）						
（1）	100.53	165.28	67.46	100.53	53.61	61.75
（2）	86.14	162.23	62.12	86.14	46.83	58.85
（3）	81.61	129.96	59.44	81.61	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）（A）	88.24	142.51	62.55	88.24	52.22	58.44
（1）（B）	82.51	138.06	62.42	82.51	52.20	58.34
（1）（C）	90.32	142.68	62.68	90.32	52.28	58.75
（2）（A）	74.82	134.69	55.04	74.82	44.08	52.16
（2）（B）	69.09	120.73	51.87	69.09	41.91	48.61
（2）（C）	80.78	149.21	58.33	80.77	50.74	63.06
（3）	77.29	120.34	57.95	77.29	49.74	54.96

備考：ＯＤペア（1）Oakland － San Francisco;
（2）Berkeley － San Francisco;
（3）San Jose － San Francisco.
ケース④においては，(A)HOVレーンを区別しない場合の旅行時間；(B)HOVレーンを区別した場合のHOVレーン利用時の旅行時間；(C) 一般レーン利用時の旅行時間；ただし，ＯＤペア（３）における最短経路上には，HOVレーンの増設はなされなかった．
また，地震前においては，上段：Bay Bridgeを使ったときの旅行時間；
下段：地震後と同じ経路を使ったときの旅行時間
単位：ＯＤ間旅行時間（分），交通容量（台／時間／車線）

チェンジ付近で，路肩を使った臨時の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．

この分析を本格的に行おうとすると，発生・集中交通量の段階からの車種別交通需要推計を行う必要があるがデータ制約上，このような分析は不可能である．このため次の分析手順によって本研究を行った．まず，分析開始当初は対象地域のＯＤ表が利用可能でなかったため，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[3]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らの方法[4]によってＯＤ表を推定した．この方法によって推定された総交通量は約205万トリップ(内々交通量を除く)であった．この推定精度を確認するため，後にMTC(Metropolitan Transportation Commission)から入手したＯＤ表をもとに，若干より広範囲であるもののほぼ同一地域の総交通量を推計したところ約268万トリップであり，限られた観測リンク数からの推定量としての精度は高かったといえる．得られたＯＤ表をSmockの方法および分割増加配分法によってネットワーク配分し，観測リンク交通量や所要時間の再現性を検討した．次に，時間交通量に変換するための時間係数および交通容量の組み合わせをいくつか与え，朝夕のピーク時と昼間時の交通状態を再現し，同時にノード間平均所要時間およびノード間連結信頼性（交通需要が交通容量を超えないサービス水準でノード間が連結される確率）を算出する．HOVレーンの評価は，観測リンク交通量から得られた時間帯ごとのHOV比率を与件として上記で得られたリンク交通量をHOVと非HOVを分離し，所要時間分析と信頼性分析を再計算した．

ノード間平均所要時間に関する主要な都市間での結果を表-1に示す．ここで，計算ケース①～③は次のように解釈できる[1]．①は，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であり，地震前の交通状況を再現し，他の計算ケースの比較基準とするものである．②は，地震後のネットワーク(増設レーンなし)に地震前のＯＤ表を負荷したケースで，地震後の損傷したネットワークに地震前の交通需要がそのまま流れようとした交通状況を評価しようとしている．③は，地震後のネットワークに地震後のＯＤ表を負荷したケースである．地震後のＯＤ表は，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．地震後のＯＤ表は，地震後の観測リンク交通量からも推計したが，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．③のケースではネットワークへの過大な交通需要を緩和したBARTの役割が評価できる．

計算ケース④の(A)～(C)を見ることでHOVレーンの効果がわかる．ここに，(A)は，車線の増設を単に車線数が増加したケースとしたもので，追加レーンは全車両によって均等に利用されるものとしている．(B)は，増設車線がHOVレーンとして運用された場合のHOVレーン利用時の旅行時間，(C)は，一般レーン利用時の旅行時間である．ケース(A)をケース③と比較すると旅行時間は若干改善されているといえ，車線増設の効果が認められる．しかし，HOVレーンによる旅行時間短縮効果は，例えば，バークレイ～サンフランシスコ間の旅行時間を考えると，ケース(A)では74.82分(タイプa)と算出されているのに対し，HOVレーンを区別した分析を行うと，(B)と(C)の差は11.68分となり，この差はリッチモンド橋に増設されたHOVレーン

表-2　災害時の運用を考慮したネットワークにおける主要都市間旅行時間

	a	b	c	d	e	f
時間係数 交通容量	0.10 2000	0.10 1600	0.08 2000	0.08 1600	0.06 2000	0.06 1600
仮想ケースⅠ：橋梁上で追加レーンを設定						
(1)(A)	80.29	124.54	59.79	80.29	51.64	56.70
(1)(B)	73.31	108.86	59.07	73.30	51.33	56.00
(1)(C)	82.70	138.42	60.45	82.70	51.88	58.29
(2)(A)	65.64	103.31	* 50.08	65.64	42.38	* 47.81
(2)(B)	58.13	87.63	45.93	58.13	39.18	43.15
(2)(C)	* 73.45	119.61	* 54.40	* 73.44	52.17	62.11
(3)(A)	77.32	122.66	57.94	77.32	49.59	54.95
(3)(B)	77.32	122.66	57.94	77.32	49.59	54.95
(3)(C)	77.32	122.66	57.94	77.32	49.59	54.95
仮想ケースⅡ：US-101号線上で追加レーンを設定						
(1)(A)	89.84	141.87	62.87	89.84	52.55	58.55
(1)(B)	96.12	146.30	64.83	96.12	51.82	56.33
(1)(C)	88.61	138.13	62.48	88.60	53.26	60.69
(2)(A)	86.01	128.11	62.09	86.00	46.83	58.82
(2)(B)	86.01	128.11	62.09	86.00	46.83	58.82
(2)(C)	86.01	128.11	62.09	86.00	* 46.83	* 58.82
(3)(A)	60.29	85.37	51.73	60.29	48.22	50.41
(3)(B)	65.53	101.80	53.44	65.53	* 47.00	47.01
(3)(C)	59.48	82.66	51.48	59.48	49.62	54.24
仮想ケースⅢ：仮想ケースⅠとⅡの組合せ						
(1)(A)	* 69.09	*107.76	* 56.07	* 69.08	* 51.12	* 54.12
(1)(B)	* 67.19	* 87.54	* 56.45	* 67.19	* 49.50	* 52.33
(1)(C)	* 68.14	*104.93	* 55.75	* 68.14	* 51.62	* 55.84
(2)(A)	* 65.61	* 94.60	* 50.08	* 65.60	* 41.49	* 47.81
(2)(B)	* 52.03	* 67.62	* 43.30	* 52.03	* 37.57	* 40.54
(2)(C)	78.96	*114.82	57.14	78.96	53.49	66.62
(3)(A)	* 58.54	* 79.59	* 51.11	* 58.54	* 48.00	* 49.97
(3)(B)	* 62.70	* 92.33	* 52.44	* 62.70	* 47.00	* 47.01
(3)(C)	* 57.93	* 77.61	* 50.94	* 57.93	* 49.19	* 53.39
参考ケース：全道路区間で追加レーンを設定						
(1)(A)	61.13	84.85	53.04	61.13	50.36	52.04
(1)(B)	55.44	66.03	50.34	55.44	43.01	43.02
(1)(C)	61.72	87.66	53.08	61.72	51.14	54.56
(2)(A)	55.08	74.32	46.04	55.07	39.46	44.32
(2)(B)	42.56	51.22	38.52	42.56	33.01	33.01
(2)(C)	66.66	95.47	53.09	66.66	55.44	65.55
(3)(A)	57.02	75.09	50.37	57.02	47.84	49.44
(3)(B)	60.25	85.19	51.25	60.25	47.00	47.01
(3)(C)	56.60	73.62	50.29	56.60	48.87	52.36

（注）*：ケースⅠ～Ⅲの中での最良値を示す．
備考：ＯＤペア　（１）Oakland － San Francisco
（２）Berkeley － San Francisco
（３）San Jose － San Francisco
タイプ別評価
（Ａ）HOV レーンを区別しない場合の旅行時間
（Ｂ）HOV レーンを区別した場合の HOV レーン利用時の旅行時間
（Ｃ）　〃　一般レーン利用時の旅行時間
単位：ＯＤ間旅行時間（分），交通容量（台／時間／車線）

表-3　災害時の運用を考慮したネットワークにおける主要都市間連結信頼度

	a	b	c	d	e	f
時間係数 交通容量	0.10 2000	0.10 1600	0.08 2000	0.08 1600	0.06 2000	0.06 1600
仮想ケースⅠ：橋梁上で追加レーンを設定						
(1)(A)	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.9621	0.0093
(1)(B)	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.9621	0.0093
(1)(C)	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.9619	0.0082
(2)(A)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4182	0.0001
(2)(B)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4182	0.0001
(2)(C)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4113	0.0001
(3)(A)	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.8963	0.0054
(3)(B)	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.8963	0.0054
(3)(C)	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.8963	0.0050
仮想ケースⅡ：US-101号線上で追加レーンを設定						
(1)(A)	0.0000	0.0000	0.0023	0.0000	0.8767	0.0407
(1)(B)	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.8770	0.0607
(1)(C)	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000	0.8382	0.0039
(2)(A)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	*0.4729	0.0008
(2)(B)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	*0.4730	0.0010
(2)(C)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	*0.4472	0.0001
(3)(A)	0.0000	0.0000	0.1659	0.0000	0.9993	0.5050
(3)(B)	0.0000	0.0000	0.0171	0.0000	*1.0000	*1.0000
(3)(C)	0.0000	0.0000	0.2351	0.0000	0.8456	0.0114
仮想ケースⅢ：仮想ケースⅠとⅡの組合せ						
(1)(A)	0.0000	0.0000	*0.0156	0.0000	*0.9849	*0.1232
(1)(B)	0.0000	0.0000	*0.0029	0.0000	*0.9865	*0.1574
(1)(C)	0.0000	0.0000	*0.0168	0.0000	*0.9750	*0.0166
(2)(A)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4261	*0.0011
(2)(B)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	*0.4730	*0.0022
(2)(C)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4160	*0.00016
(3)(A)	0.0000	0.0000	*0.3196	0.0000	*1.0000	*0.6990
(3)(B)	0.0000	0.0000	*0.0590	0.0000	*1.0000	*1.0000
(3)(C)	0.0001	0.0000	*0.4028	0.0001	*0.9556	*0.0358
参考ケース：全道路区間で追加レーンを設定						
(1)(A)	0.0001	0.0000	0.6382	0.0001	1.0000	0.9239
(1)(B)	0.0000	0.0000	0.1459	0.0000	1.0000	1.0000
(1)(C)	0.0006	0.0000	0.7665	0.0006	1.0000	0.2904
(2)(A)	0.0000	0.0000	0.1515	0.0000	1.0000	0.4501
(2)(B)	0.0000	0.0000	0.0123	0.0000	1.0000	1.0000
(2)(C)	0.0000	0.0000	0.2775	0.0000	0.5373	0.0057
(3)(A)	0.0004	0.0000	0.6040	0.0004	1.0000	0.9045
(3)(B)	0.0000	0.0000	0.2263	0.0000	1.0000	1.0000
(3)(C)	0.0006	0.0000	0.6745	0.0006	0.9860	0.1203

（注）*：ケースⅠ～Ⅲの中での最良値を示す．
備考：ＯＤペア　（１）Oakland － San Francisco
（２）Berkeley － San Francisco
（３）San Jose － San Francisco
タイプ別評価
（Ａ）HOV レーンを区別しない場合の連結信頼度
（Ｂ）HOV レーンを区別した場合の HOV レーン利用時の連結信頼度
（Ｃ）　〃　一般レーン利用時の連結信頼度
単位：交通容量（台／時間／車線）

のみの所要時間差が反映されたものとなっている．なお，サンノゼ～サンフランシスコ間での最短経路上では HOV レーンの増設はなされなかったので，計算結果は１とおりだけである．

このように，旅行時間の改善は HOV レーン区間だけにとどまっており，ＯＤ間全体での旅行時間の短縮に関して，HOV レーン設置の効果はあまり顕著でなかったといえる．これは，実際に追加された HOV レーンの区間長が短かったり，クリティカルな箇所に設置されていなかったためである．信頼性解析ではその効果はさらに小さかった．このように，災害後に策定された道路網の増強対策には自ずと限界があることも明らかとなった．つまり，交通需要の多い区間は通常でも道路幅員の上限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は，ある一定の限界があることを示している．このことは，道路建設時から，災害時あるいは災害後の運用を考慮した道路網計画が重要であることを示唆している．現時点においてこの目的達成のためには，平常時の道路網整備計画に防災計画をセットにしておくことが最も近道ではないかと考えられる．

３．災害時の運用を考慮した余裕あるネットワーク

この観点から，道路幅を予め余裕を持たせて構築しておき，地震後の緊急時に追加レーンを運用することを考える．あるいは，車線の幅員を削減したり路肩等を利用して車線数の増加が図れる場合を考える．このような場合の効果を定量化する．

定量化には２つの目的がある．１つは，追加レーンの設置によってどのような効果が期待できるかということである．もう１つは，追加レーンの運用法を議論するものである．追加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が，共倒れ的な結果を招く可能性もある．一方，追加レーンを HOV 等の限定された車種にだけ優先的に解放すれば，円滑な交

通路を確保することができる．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と考えられる．したがって，両者の比較評価が必要である．

この分析のため，サンフランシスコ湾道路網に，仮想的に１レーンの追加設置が可能であったものとし，種々のケースを設定した．設定するケースは以下の通りである．

（１） 仮想ケースＩ：すべての橋梁で追加レーンを設定

サンフランシスコは半島という地形のため，対岸からの流入交通は，サンノゼからのUS-101号線を経由する場合を除くと必ずどこかの橋梁を渡る．現実にとられた対策では，橋梁の幅員制限により，追加車線は橋梁前後の取付道路にしか設置できなかった．橋梁部では，追加レーンの設置は構造的にきわめて困難なものであることから，すべての橋梁について予め追加レーンを増設可能としたものである．

（２） 仮想ケースⅡ：US-101号線で追加レーン設定

人口約82万人のサン・ノゼと人口約72万人のサンフランシスコの２大都市を結ぶフリーウェイUS-101号線は，きわめて需要の多い道路であり，地震後はベイ・ブリッジ不通から迂回してきた車が流入して，渋滞がさらに増大する結果となった．このような主要都市を結ぶ幹線道路の車線数を増設することによって，どれほどの効果が得られるかをこのケースによって分析する．

（３） 仮想ケースⅢ：仮想ケースＩとⅡの組合せ

このケースは，相乗的効果をねらって両者を組み合わせたものである．

（４） 参考ケース：全道路区間で追加レーン設定

都市道路網においてこのようなケースが理想であるが，現実に実行することはきわめて困難である．しかし，このケースによって追加車線数が１車線の場合の最大の効果を知ることができる．したがって，他のケースの効果を評価する上でも重要なケースである．

結果を表-2に示す．まず，参考ケースの結果からいえることは，１車線でもレーンの追加が可能であれば地震後にも地震前の交通状態に近い状態が回復し得るということである（例えば(3)のＯＤペア）．仮想ケースＩでの結論を要約すれば，参考ケースと格差が大きく，地震後のケース④（表-1）と大差がなく，橋梁上での車線増設の効果はあまり得られない．仮想ケースⅡでは，US-101号線上の交通が改善されたのみで，他への普及は大きくなかった．しかしながら，これらを組み合わせた仮想ケースⅢでの効果は相当大きく，表-2で触れることのできなかった他の２とおりの設定ケースを含む中での最良値を達成でき，地震前の交通サービスに近い状態まで回復が可能であることが明らかとなった．ただし，区間長が相当長いこと，あるいは他の道路区間との相乗効果を誘導するように設定することが重要だということである．そうでないと，中途半端な投資になり，期待される効果が得られない可能性がある．相乗効果については，幹線道路あるいは橋梁部にHOVレーンを単独に増設した場合は，対象とするＯＤ間にしか効果が発現しないのに対し，同時に増設すれば両者の最良値以上の効果が得られることが明らかとなった．また，旅行時間はあくまでも平均的な値であるのに対し，信頼性の観点からは共倒れになり得るケースもあることが明らかとなった（表-2,3の仮想ケースⅡのＯＤペア(3)のタイプｆ）．このことから，レーンの運用は状況に応じて柔軟に対応できることが必要であることがわかる．

４．おわりに

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いってよい．また，リーズナブルな代替経路はあまりないといってよい．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．交通の防災対策を（例えばシナリオを設定して）具体化しておくことが今後の課題であると考えられる．

参考文献：１）若林・亀田：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価，土木計画学研究・論文集10, pp. 103-110, 1992.
２）若林・飯田・亀田：ロマ・プリエタ地震がサンフランシスコ湾岸地域の道路網連結信頼性に与えた影響分析，土学会第47回年講概要集第１部, pp. 1496-1497, 1992.
３）亀田・浅岡・小川・能島：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.
４）Holm, J. et al. :Calibrating Traffic Models on Traffic Census Results Only, Traffic Engineering and Control, Vol. 17, No. 4, pp. 137-140, 1976.