

高速道路盛土の地震被害関数の構築と2次元FEM解析に基づく震動特性の把握

Fragility curves of expressway embankment and seismic response characteristics based on 2D FEM analysis

08TM0346 水野 菊
Kiku Mizuno

指導教員 山崎 文雄

SYNOPSIS

This study constructs the fragility curves of expressway embankments in order to estimate the damage distribution immediately after an earthquake. Based on the fragility curves, major damages that disrupt ordinal expressway traffic may occur when the peak ground velocity exceeds approximately 40.0 cm/s. The fragility curves constructed in the present study are helpful for predicting the damage distribution on expressways soon after an earthquake. In addition to that, seismic response characteristics of expressway embankment are investigated in detail based on microtremor measurements and two-dimensional FEM analyses. The amplifications and predominant periods are evaluated with respect to the heights of expressway embankment.

1 はじめに

高速道路には地震により大小様々な被害が生じる。高速道路は、通常時のみならず、災害発生時の被災地の救援や復旧にも欠かせないものであり、地震後早期に被害状況を把握し復旧することが望まれる。2004年新潟県中越地震では、とくに盛土部分の被害が多く発生し、関越自動車道の堀之内インターチェンジ(IC)～越後川口IC間では、大規模な盛土の崩壊が発生している。また、その後のいくつかの地震においても、高速道路盛土の被害は多数報告されている。そこで、本研究では、近年発生した複数の地震時の被害データおよび地震動記録をもとに、高速道路盛土の被害程度と地震動強さの関係について統計的な分析を行い、高速道路盛土の被害関数を構築する。

また、地震動が比較的小さかったと推定される区間でも被害が生じていることが確認されている。このことに関しては現地の地盤・地形条件が影響しているとも考えられるので、地盤データや現地調査を通してより詳細な検討を行い、被害発生メカニズムを明らかにする必要がある。とくに高速道路盛土の高さは、被害発生と関連があると考えられ検討を要する。そこで本研究では、2次元FEM解析を行い、本線(のり面)/基準地盤のスペクトル比(H/H)から推定される卓越周期や振幅比を用いて、盛土の震動特性を把握する。また、その結果を常時微動観測と比較し、高速道路盛土の震動特性の把握を行う。

これらの分析結果より、高速道路盛土の被害推定法の精度向上を目指す。本研究で構築された高速道路盛土の被害関数は、地震被害の早期把握や通行規制の再検討の一助になることが期待される。

2 高速道路盛土の地震被害関数

既往の研究¹⁾において、高速道路盛土の被害関数が構築されているが、本研究では新たに2003年十勝沖地震、宮城県北部地震、2007年新潟県中越沖地震の高速道路盛土被害データと推定した面的地震動分布を加えて、高速道路盛土

部の被害程度と地震動強さの関係について統計的な分析を行う。以下、2007年新潟県中越沖地震を例として地震動分布推定法を示す。

高速道路における地震被害の程度と地震動の強さの関係を整理するためには、被害の発生した地点の地震動強さを評価する必要があるため、任意の地点の地震動強さを面的ないし線的に推定する手法が必要となる。本研究の地震動推定法の流れを図2-1に示す。地震計によって観測された地表面最大速度(PGV)を地盤増幅度で割り戻すことで基準地盤(S波速度600m/s)におけるPGVを求めた。基準地盤に対するPGVの増幅度は、地震ハザードステーション²⁾で公開されている平均S波速度(V_s^{30})を用いて算出した。次に、基準地盤におけるPGVの距離減衰式を構築する。得られた距離減衰式をトレンド成分として用い、残差を平均値0の正規確率分布と仮定してSimple Kriging法により補間した。最後に、補間された基準地盤におけるPGVに250mメッシュごとの地盤増幅度を乗じて、地表面におけるPGV推定値とする。

新潟県中越沖地震のPGVの推定には、62観測点の地震記録を使用した。この地震記録と地盤増幅度を使用し、基準地盤における距離減衰式を構築した。長野県芋川観測点は断層最短距離が67kmであるが、同程度の断層距離の他の地震観測点と比べて大きな観測値を示していた。芋川観測点の地震計近くで、常時微動観測を行いH/Vスペクトル比を求めると、卓越周期は0.6秒と推定された。気象庁の面的震度分布などを見ても、芋川観測点は震源から離れているにもかかわらず局地的に揺れやすい地点であると考えられるので、本研究で行うKriging補間には用いないこととした。芋川観測点を除いた基準地盤におけるPGV(PGV_{base})の距離減衰特性を図2-2に示す。構築された距離減衰式は式(1)の通りである。

$$\log_{10} PGV_{base} = 2.97 - 0.0078 - \log_{10}(r + 9.9) \quad (1)$$

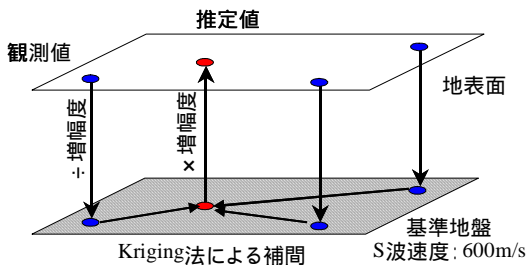


図 2-1 地震動推定法の流れ

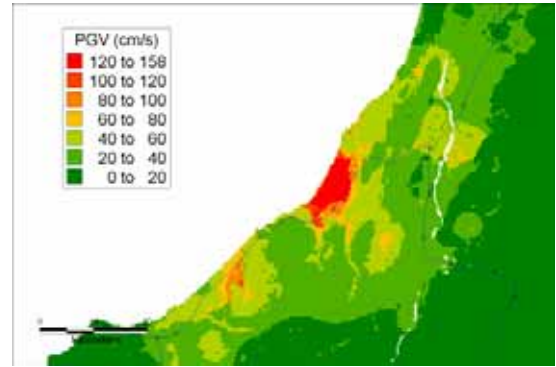


図 2-3 新潟県中越沖地震の推定 PGV

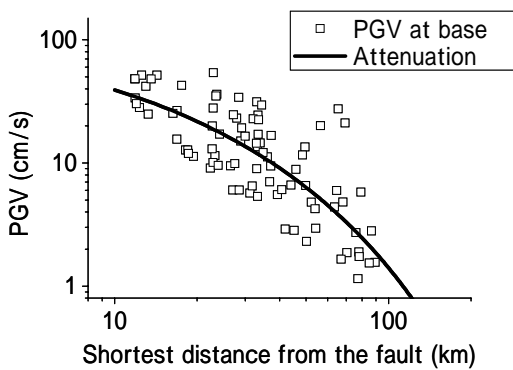


図 2-2 新潟県中越沖地震の距離減衰特性

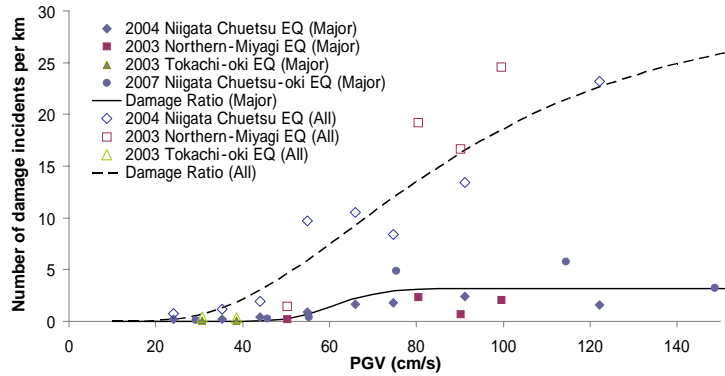


図 2-4 本研究で構築した高速道路盛土の被害関数

断層最短距離 r は、国土地理院が作成した新潟県中越沖地震の断層モデルを用いて算出した。推定された新潟県中越沖地震の 250m メッシュ単位の推定 PGV 分布を図 2-3 に示す。

次に回帰分析により高速道路盛土の被害関数の構築を行う。本研究で算出した高速道路の被害率と、既往の研究¹⁾で用いている被害率を併せて使用する。また、使用する被害率は路面とのり面を合わせたものとし、走行に支障のある被災ランク B 以上の被害と全被害 (D 以上) の 2 種類で回帰分析を行った。被災ランクは高速道路に生じた被害判定区分³⁾により判定される。例えば、盛土の走行に支障のある被災ランク B 以上の被害とは、路面クラックでは 5cm 以上、路面段差では車線部で 2cm 以上の段差、のり面では部分的崩壊以上のことを示す。回帰分析には、式(2)に示す関数形を用いている。標準正規分布の確率分布関数を用いて対数正規分布を仮定し、それに倍率 C を乗じる。

$$P = C\Phi((\ln PGV - \lambda)/\zeta) \quad (2)$$

式(3)で表される目的関数 ε を最小化するように、非線形最小二乗法によって回帰定数を決定した。

$$\varepsilon = \sum (P_R - P)^2 w \quad (3)$$

P_R は実被害データから求められる被害率であり、 w は道路延長 (盛土区間) による重みである。これにより得られた回帰定数を表 2-1、盛土被害関数を図 2-4 に示す。なお、新潟県中越沖地震における被災ランク C, D の被害は、全数が適切に記録できていないので、全被害の被害関数を構築する際には除外している。走行に支障のある被災ランク B 以上の被害は PGV が 40cm/s で被害が発生し始める傾向がみられた。また軽微な被害も含めた全被害は、20cm/s で発生し始めることが分かった。

表 2-1 盛土被害関数の回帰定数

被災ランク	ζ	λ	C
B 以上	0.14	4.12	3.19
全被害 (D 以上)	0.52	4.45	30.0

3 2次元 FEM 解析に基づく高速道路盛土の震動特性

3-1 関越自動車道の震動特性

2004 年新潟県中越地震において被害の発生した関越自動車道で常時微動観測と FEM 解析を行った。対象地点は、関越自動車道の 210.9KP とする。

常時微動は、観測された 5 分間 (300 秒) の微動速度波形を 30 秒ずつ分割し、フーリエスペクトルを算出し、バンド幅 0.4Hz の Parzen ウィンドウで平滑化した。得られたフーリエスペクトルから、 H/V 及び H/H スペクトル比を求め、10 区間の平均値をその地点のスペクトル比とした。 H/H スペクトル比は、地山と盛土上 (本線上) で 2 点同時観測を行い算出した。

関越自動車道沿線の常時微動の H/V スペクトル比は、概して卓越周期が 0.4 秒以下のものや平坦なスペクトル形状を示すものが多かった。このことから、関越自動車道は比較的固い地盤上に位置している推測される。210.9KP における H/H スペクトル比の振幅形状を見ると、周期 0.7-0.9 秒の振幅比が大きな値を示している (図 3-1)。

続いて、2 次元 FEM 解析を行った。関越自動車道の 210.9KP のボーリングデータを図 3-2 に示す。S 波速度 (V_s) を N 値からの変換式⁴⁾により算出し、2 次元地盤モデルを作成した。

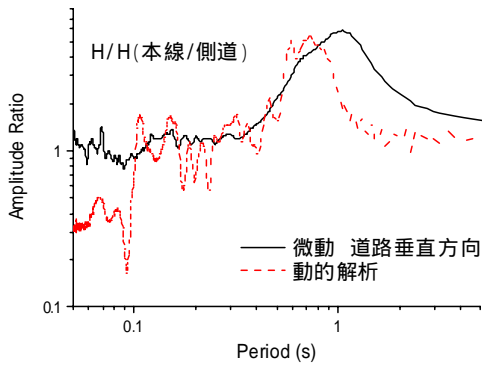


図 3-1 関越道 210.9kp における H/H スペクトル比

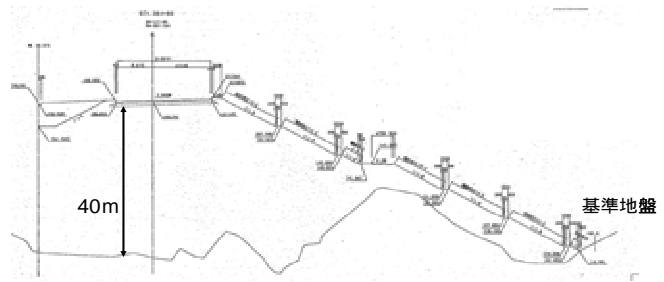


図 3-3 新東名高速道路 38.48kp の断面

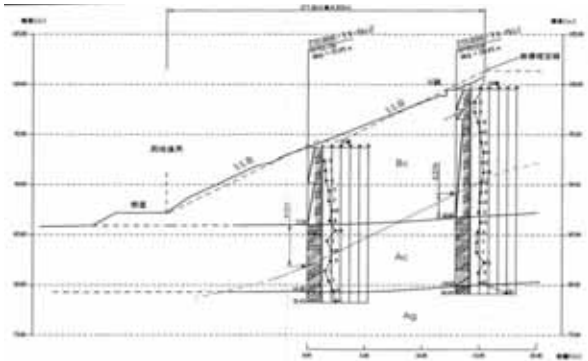


図 3-2 関越道 210.9kp の断面図とボーリングデータ

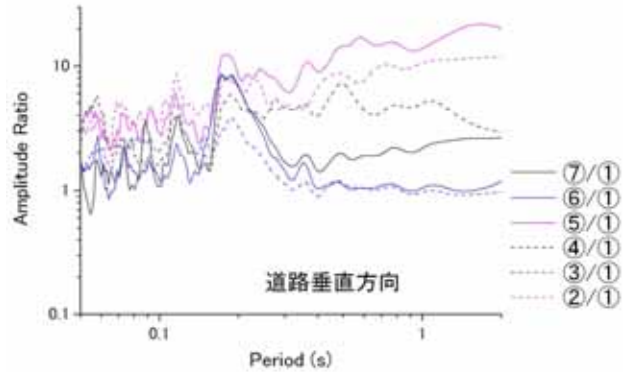


図 3-4 新東名盛土の常時微動による H/H スペクトル

$$\text{砂質土 } V_s = 80N^{1/3} \quad (4)$$

$$\text{粘性土 } V_s = 100N^{1/3} \quad (5)$$

これにより得られた H/H スペクトルを図 3-1 に併せて示す。常時微動の H/H スペクトルとほぼ同様の周期 0.7-0.9 秒における増幅特性が確認された。

3-2 新東名高速道路の震動特性

沖村ら⁵⁾は、高さ約 25m 以上の盛土の震動特性を常時微動と地震観測を行い評価しているが、新東名高速道路の土工部では高さ 50m 以上の高盛土が採用されたりしている。新東名高速道路は、東京 - 名古屋間を結ぶ高速道路で東名自動車道に平行して建設工事が行われている。東名自動車道は海岸線に近い部分が多く、予想される東海地震などによる被災が想定され、新東名はこの代替路及び緊急輸送路としての役割がある。また、主に山間部を通っているため多くの高盛土が存在する。そこで本研究では、新東名の掛川PA周辺を対象地域とした。掛川PA周辺の 38.48KP は、基準地盤面から高速道路本線までの高さは 40m 程度である (図 3-3)。

図 3-3 の を基準地盤とし、常時微動観測を行った。基準地盤における H/V スペクトル比は、卓越周期が 0.1 秒程度と比較的固い地盤だということが推測される。H/H スペクトル比は、 を基準とし、盛土のり面と本線各点 () で算出した。得られた H/H スペクトル比を図 3-4 に示す。卓越周期は、道路垂直方向で ~ / の H/H スペクトル比で 0.1 秒、 ~ / の H/H スペクトル比で 0.2-0.3 秒とわずかに長くなった。また振幅比は、盛土のり面の ~ では徐々に大きくなり、高速道路本線 (,) では、小さくなるという傾向になった。

続いて FEM 解析を行った。解析モデルを図 3-5 に、ボーリングデータ (PS 検層) を表 3-1 に示す。動的解析にお

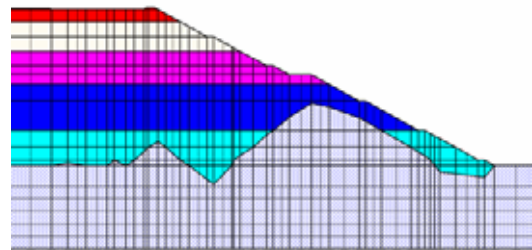


図 3-5 新東名 38.48KP 盛土断面の解析モデル

表 3-1 新東名 38.48KP のボーリングデータ

層厚 (m)	土質区分	密度 (KN/m ³)	水中密度 (KN/m ³)	S波速度 (m/s)	ヤング係数	ポアソン比
1.8	盛土, 砂礫	17.15	17.15	200	1.820E+05	0.3
1.1	盛土, 岩塊混り砂礫	17.15	17.15	200	1.820E+05	0.3
7.1	盛土, 砂礫	18.522	18.522	350	6.019E+05	0.3
2.6	盛土, 砂礫	19.404	19.404	410	8.653E+05	0.3
0.9	盛土, 岩塊混り砂礫	19.404	19.404	410	8.653E+05	0.3
4.5	盛土, 砂礫	19.404	19.404	410	8.653E+05	0.3
11.0	盛土, 砂礫	19.914	19.914	450	1.069E+06	0.3
1.5	盛土, 砂礫	20.678	20.678	520	1.483E+06	0.3
1.0	盛土, 岩塊混り砂礫	20.678	20.678	520	1.483E+06	0.3
2.0	泥岩	20.678	10.878	520	1.700E+06	0.49

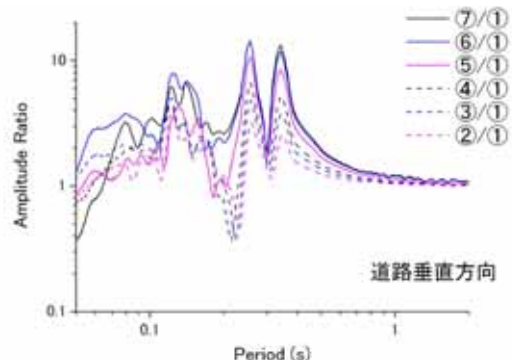


図 3-6 新東名 38.48KP の FEM 解析による H/H スペクトル

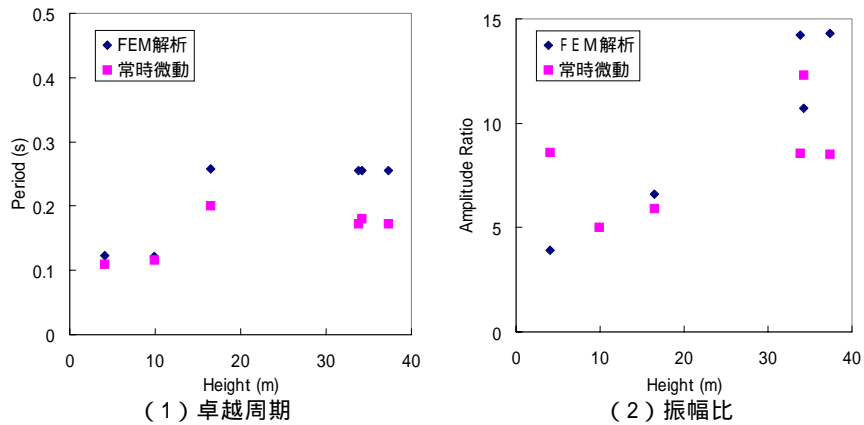


図 3-7 常時微動と 2 次元 FEM 解析の H/H スペクトル比から推定される卓越周期と振幅比の比較 (新東名 38.48KP)

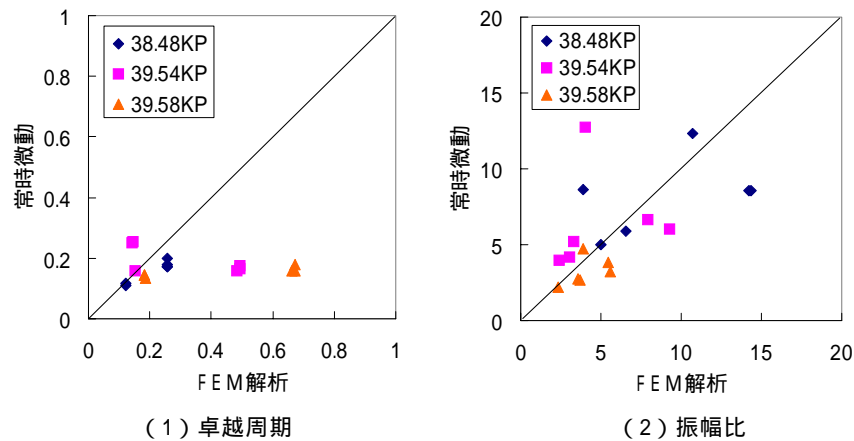


図 3-8 掛川 PA 周辺での常時微動と 2 次元 FEM 解析の H/H スペクトル比から推定される卓越周期と振幅比の比較

ける入力地震動は、2009 年 8 月 11 日に発生した駿河湾地震で K-NET 掛川が観測した記録を 1/10 にスケールした波形を使用した。線形弾性モデルを仮定したときの道路垂直方向の H/H スペクトル比の結果が図 3-6 である。常時微動と同様に を基準地盤とし、のり面と本線の各点を比較した。卓越周期は、 ~ / で 0.1 秒、 ~ / で 0.2 秒程度とわずかに長くなった。また振幅比は、盛土のり面では盛土高さが高くなるにつれて徐々に大きくなる傾向になった。

掛川 PA 周辺の 38.48KP について、2 次元 FEM 解析の精度を検証するために常時微動観測との比較を行った。それぞれから得られた H/H スペクトルから得られる卓越周期や振幅比を図 3-7 にまとめた。卓越周期に関しては、常時微動と FEM 解析でほぼ同等の結果が得られた。振幅比に関しては、のり面の値はほぼ同じ値を示しているが、本線では、FEM 解析の振幅比の値が大きくなる傾向が見られた。

掛川 PA 周辺では、三測線 (38.48KP, 39.54KP, 39.58KP) で常時微動観測を実施し、2 次元 FEM 解析を行っている。38.48KP と同様にそれぞれの測線での H/H スペクトル比の卓越周期と振幅比を図 3-8 にまとめた。FEM 解析の H/H スペクトル比の固有周期は、常時微動観測で得られた周期よりも長くなる傾向がみられた。また、振幅比は大きな違いは見られなかった。FEM 解析における地盤モデルの作成に利用したボーリングデータは 38.48KP における調査結果であり、他の 2 測線から約 1km 離れていることがこの差異に影響していると考えられ、地盤モデルの再考が必要と思われる。

4 まとめ

本研究では、近年発生した複数の地震時の被害データおよび地震動記録をもとに、高速道路盛土の被害程度と地震動強さの関係について統計的な分析を行い、高速道路盛土の被害関数の構築を行った。その結果、走行に支障のある被災ランク B 以上の被害は PGV が 40cm/s で被害が発生し始め、軽微な被害も含めると PGV が 20cm/s で被害が発生し始めた。

また、常時微動観測と 2 次元 FEM 解析を行い、高速道路盛土の振動特性について詳細な検討を行った。常時微動と FEM 解析の H/H スペクトル比は、同等の結果が得られたが、本研究で作成した地盤モデルには再考が必要な地点もある。今後は、FEM 解析によって高速道路盛土の高さと卓越周期、増幅度について定量的な評価を行う必要がある。これらの結果より、高速道路盛土の被害推定法の精度向上を目指したいと考えている。

参考文献

- 丸山喜久, 山崎文雄, 土屋良之, 用害比呂之, 新潟県中越地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 2, pp.208-216, 2008
- 防災科学技術研究所: <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 垂水祐二, 佐藤亜樹男, 地震時通行止め基準値の見直し - NEXCO 東日本 -, EXTEC, No. 79, pp. 8-11, 2006
- 日本道路協会: 道路橋示方書 V 耐震設計編 同解説, 2002.
- 沖村孝, 南部光広, 篠原秀明, 桜井秀憲, 前田修, 高盛土地盤における物性評価と地震動増幅特性, 土木学会論文集 No.707, VI-55, 51-56, pp51-65, 2002