

III-429 過剰間隙水圧を考慮した盛土の地震時信頼性

金沢大学工学部 正会員○池本敏和, 正会員 北浦 勝

1. はじめに

1978年宮城県沖地震では河川堤防をはじめ、道路、鉄道盛土が大きな被害を受けた。また1983年日本海中部地震でも多くの堤防や道路盛土に被害が生じた。盛土の強度に関与する粘着力や内部摩擦角などには大きなばらつきが元来存在するのに加えて、地震時には過剰間隙水圧の上昇による強度の低下が生じる。また盛土に作用する地震動の強さ、言い換えると入力力の強さにもばらつきを考え合わせねばならない。本研究では入力や強度のばらつきおよび過剰間隙水圧の上昇を考慮に入れた盛土の地震時信頼性解析法を確立するとともに、その手法を用いて得られた結果について考察する。

2. 盛土の地震時信頼性

盛土の強度や入力である地震動は統計的性質を有する確率変数である。したがってその確率密度関数を知っておく必要があるが、たとえその形状が正規分布関数であると分かっている、サンプル数が少ないために、関数形を規定する平均値や分散を不確実な変数として取り扱わなければならない場合も生じる。したがって標本中に含まれる不確実性を考慮に入れた信頼性解析を実行する必要がある。この点を考慮するために本解析では、Rosenblueth によって提案されたPoint Estimate Method (PEM 法)を用いる¹⁾。盛土の地震時信頼性解析においてこの方法を用いると演算時間が短くとも工学的には十分な精度が保証される。

震害事例を考える際には盛土の破壊を円弧すべりで近似する場合が多い。このような理由から本文では盛土の破壊を円弧すべりで表すことにする。Fig.1 に示すようにすべり中心をP、すべり半径をrとすると、盛土の安全率 F_s が次式のように求まる。このとき地震力を各帯片の重心に作用させず、簡単のために円弧上に作用させた。

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \{c_i l_i + \gamma_i v_i (\cos \alpha_i - k_h \sin \alpha_i) (1 - U_i) \tan \phi_i\}}{\sum_{i=1}^n \gamma_i v_i (\sin \alpha_i + k_h \cos \alpha_i)}$$

ここに、 c_i : 第i帯片の土の粘着力、 l_i : 帯片の長さ、 γ_i : 土の単位体積重量、 v_i : 土の体積、 α_i : 土の底面が水平面となす角、 k_h : 水平震度、 U_i : 過剰間隙水圧比、 ϕ_i : 土の内部摩擦角、 x_i, y_i : 第i帯片の重心とすべり中心Pとの水平・鉛直距離、ただし $x_i/r = \sin \alpha_i, y_i/r = \cos \alpha_i$ としている。

3. 地震動強さと過剰間隙水圧上昇モデル

入力の地震動強さを統計量として扱えるとともに、地震によって発生する盛土内の過剰間隙水圧の上昇を有効応力の減少モデルに組み込んだ。まず地震動強さをつぎのように考える。後藤・亀田は震度V~VIIの地震を対象に将来の地震動確率分布とそれらの期待値をわが国の全域について求めている²⁾。地震動の確率分布の一例をFig.2 に示す。これは東京における再現期間を75年間とした結果である。地域地震特性を生かすことができることから、この結果を入力地震動として採用した。つぎに地盤液化化指数 P_L を用いて過剰間隙水圧比 U を仮定し、過剰間隙水圧の上昇効果をFig.3 のような簡単なモデルで表した。すなわち P_L が15以上では盛土内が完全液化化に至ると考えた。Fig.3 Pore water pressure build-up model.

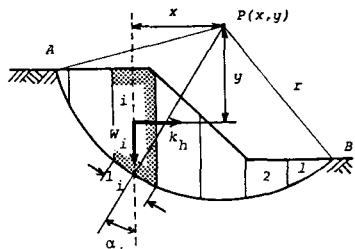


Fig.1 Stability analysis of embankment.

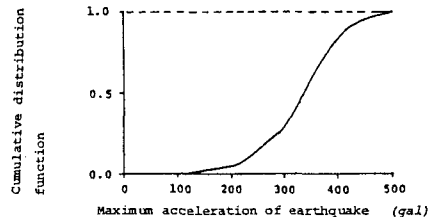


Fig.2 Cumulative distribution function of maximum acceleration of earthquake during 75 years.

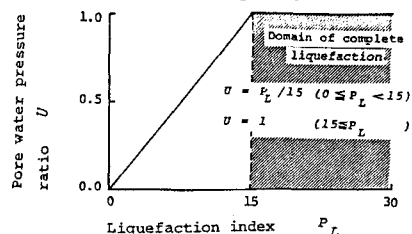


Fig.3 Pore water pressure build-up model.

4. 数値解析例

土の粘着力 c や内部摩擦角 ϕ が正規分布で近似できることは既に松尾ら³⁾によって明らかにされているため、その成果を引用した。ここでは c の標本平均 $\bar{c}$ の平均 $\bar{c}$ として $1.4(\text{kg}/\text{cm}^2)$ と仮定しているが、この値は多くの $\bar{c}$ が得られて初めて求まるものである。また別途の検討により、各標本平均の変動係数としてはTable 1に示す値を用いた。結果の一例をTable 1に示す。表中 Case 1, Case 2はそれぞれシルト質砂、シルト質粘性土の地盤を対象にした結果である。 $\delta_{\bar{c}}$, $\delta_{\bar{\gamma}}$, $\delta_{\tan\phi}$, $\delta_{\bar{k}_h}$ は各標本平均の変動係数であり、 u は過剰間隙水圧比である。 $\bar{P}_f$, σ_{P_f} , δP_f は盛土の破壊確率の平均値、その標準偏差および変動係数である。Case 1に注目してみると、Nos.3~6から土の単位体積重量 γ による影響が小さくなく、No.4では $\bar{P}_f$ は0.12にまで上がっていることがわかる。No.8とNo.4からもわかるように、 $\bar{\gamma}$ 以外のばらつきを0.2とした場合と $\bar{\gamma}$ のみのばらつきを0.2とした場合では、後者の方が $\bar{P}_f$ に及ぼす影響が大きい。しかしながら土の単位体積重量は一般に標本平均の変動係数がほかのパラメータに比べ小さいため、実際にはあまり注目しなくても良いことが予想される。一方、過剰間隙水圧比 u が0.4の場合には、 $\bar{P}_f$ が0.596になり、盛土の破壊する確率が相対的に高い。同様にCase 2の結果からも u の影響が大きく効いていることがうかがえる。つぎに u と $\bar{P}_f$ との関係をFig.4に示す。また P_f の標準偏差 σ_{P_f} の変化をFig.5に示す。Figs.4,5から、 σ_{P_f} が変曲する点は u ではほぼ0.5に対応しており、 u が1.0に近い状態の範囲では、 σ_{P_f} が小さい傾向にあることがわかる。このことは盛土の破壊の確率密度関数が遷移していることを意味している。すなわち、 u の増加に伴って $\bar{P}_f$ が増加し、初期の破壊確率分布が一時的になだらかになり、その後さらに $\bar{P}_f$ が増加するにしたがい $\bar{P}_f$ の分布が鋭いピークを有するようになる。したがって u が上昇することによって P_f はほとんどばらつかずに、確実に大きな値となっていくことがわかる。

最後に、本研究は文部省科学研究費の支援を受けたことを付記する。

Table 1 Analytical results.

	No.	$\delta_{\bar{c}}$	$\delta_{\bar{\gamma}}$	$\delta_{\tan\phi}$	$\delta_{\bar{k}_h}$	u	$\bar{P}_f$	σ_{P_f}	δP_f
Case 1 $\bar{c} = 1.40 (\text{kg}/\text{cm}^2)$ $\delta_{\bar{c}} = 0.19$ $\bar{\gamma} = 1.603 (\text{t}/\text{m}^3)$ $\delta_{\tan\phi} = 0.058$ $\delta_{\bar{\gamma}} = 0.207$ $\bar{k}_h = 0.34$ $\delta_{k_h} = 0.21$	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.045	0.0	0.0
	2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.077	0.083	1.070
	3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.085	0.103	1.203
	4	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.120	0.150	1.250
	5	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.099	0.128	1.296
	6	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.094	0.088	0.946
	7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.596	0.187	0.314
	8	0.2	0.1	0.2	0.2	0.0	0.117	0.142	1.215
	9	0.3	0.1	0.2	0.3	0.0	0.137	0.152	1.111
Case 2 $\bar{c} = 1.20 (\text{kg}/\text{cm}^2)$ $\delta_{\bar{c}} = 0.30$ $\bar{\gamma} = 1.800 (\text{t}/\text{m}^3)$ $\delta_{\tan\phi} = 0.05$ $\bar{k}_h = 0.34$ $\delta_{k_h} = 0.21$	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.155	0.0	0.0
	2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.187	0.101	0.54
	3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.198	0.137	0.69
	4	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.204	0.155	0.76
	5	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.199	0.137	0.69
	6	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.198	0.097	0.49
	7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.623	0.135	0.216

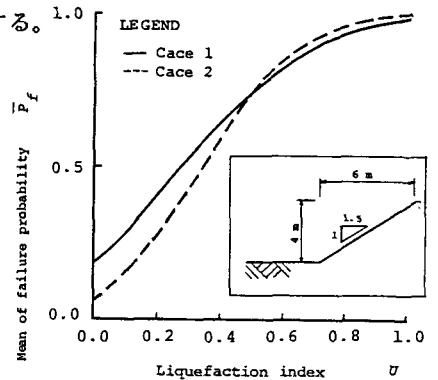


Fig.4 Relationship between $\bar{P}_f$ and u .

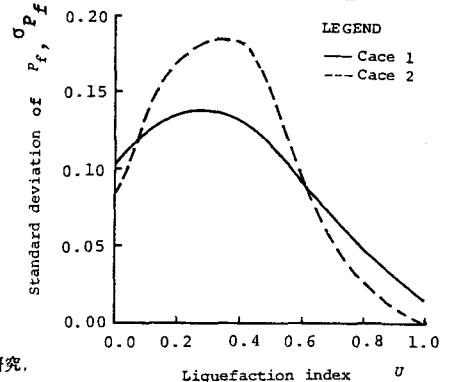


Fig.5 Relationship between σ_{P_f} and u .

参考文献 1) Rosenblueth, E.: Point Estimates for Probability Moment, Proc. of National Science, Vol. 72, 1975. 2) 後藤・亀田: 地震時における最大地動の確率論的研究, 土木学会論文報告集, 第 159号, 1968. 3) 松尾・黒田: 不飽和土の土質諸係数と破壊確率に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第 208号, 1972.