

地震時における盛土被害の統計解析とシミュレーション

京都大学工学部 正会員 後藤尚男  
 京都大学工学部 正会員 亀田弘行  
 京都大学大学院 学生会員 ○浅岡克彦

1. まえがき

鉄道盛土のような連続的土構造物の地震時における被害予測については、力学的な解析とともに統計的な面からの解析も有効な手法であると考えられましたが、統計的手法は、被害の要因分析に用いられているのがおもな用途であった。本研究は、これを一歩進め、地震による盛土被害の統計解析結果から、類似の条件が示された場合の被害予測の確率モデルを設定する方法を検討したものであります。データとしては1968年十勝沖地震における国鉄東北本線八戸-野辺地間の盛土被害資料を用い、数量化理論Ⅱ類による統計解析の結果を用いて被害の予測モデルを誘導した。さらに同区間の地震被害に関して、シミュレーションを行った。

2. 地震時の盛土被害の要因分析

ここで用いた盛土被害のデータは文献(1)によっており、その被害概要を図-7中に示す。そして、八戸-野辺地間(52.5km)について、50mを単位区間として、それぞれの属性と破壊状態を調べた。ただし、駅構内・切土・橋梁など盛土以外の区間は除いた。文献(1)においても、数量化理論による詳細な要因分析が行なわれているが、本研究では、ここで用いられているアイテム・カテゴリから相関性の高いもの、被害にあまり関係ないと思われるものなどを除外し、連続性に関するアイテムを追加して、表-1のアイテムとカテゴリを採用した。なお解析の結果得られたカテゴリ・ウエイトとレンジを表-1に併記した。表-2は各アイテム間の相関係数

表-1 数量化理論による統計解析のためのアイテム・カテゴリおよび計算結果

アイテム	カテゴリ	カテゴリ・ウエイト	レンジ
1 新旧別	新線	-0.51283	1.1455
	旧線	0.63268	
2 盛土高	法高<70m	0.48639	1.4150
	70≦法高<70m	-0.62740	
	70≦法高	-0.92865	
3 地形区分	オホレ谷	-0.16123	0.3307
	谷奥谷	0.11931	
	沖積はら5m厚地帯	0.16950	
	決壊台地	-0.15016	
4 沖積層厚	0m	-0.29720	0.7844
	0~4m未満	-0.02042	
	4~10m	-0.36305	
	10~20m	-0.00103	
5 連続性	28m以上	0.42138	0.5354
	初土から280m以内の区間	0.39011	
	初土から400m以内の区間	0.15858	
	その区間にカルトを穿ち上記以外の区間	-0.02611	
		-0.14526	

(注) カテゴリ・ウエイトが小さいほど破壊しやすい

表-2 各アイテム間の相関係数

	新旧別	盛土高	地形区分	沖積層厚	連続性
新旧別	1.0000				
盛土高	0.1561	1.0000			
地形区分	0.0201	0.0199	1.0000		
沖積層厚	0.1341	0.0511	0.5578	1.0000	
連続性	-0.0606	0.0685	-0.2052	-0.3466	1.0000

であり、地形区分と沖積層厚との間の値が0.56と少し大きい<sup>7)</sup>が、この程度であれば容認できた。ある任意の単位区間について、すべてのアイテムから対応するカテゴリ・ウエイトを1個選び、それらを加えると、その単位区間のケース得点αが得られた。表-1の値をみると、新旧別や盛土高については被害をよく説明できているが、地形区分や沖積層厚については工学的に説明し難い部分もあった。ただし、両アイテムの破壊に及ぼす影響度は比較的小さい。したがって、これらの結果は盛土破壊の一般的な要因とともに地域特性をも強く反映した結果と考えられ、他の線区に適用する場合には、十分な検討が必要であろう。

3. 盛土被害の確率モデル

数量化理論による予測法に従えば、ケース得点αがその限界値α<sub>0</sub>より小さい場合には破壊を予測することになる。しかし、単独のαによって破壊・非破壊を判断する方法ではデータのもつ情報を十分に活用し得ておらず、ケース得点がα<sub>0</sub>から離れている程度によって危険度は異なるはずであった。そこで、長さ50mの各単位区間のケース得点αの分布を示した図-1を用いて破壊確率を算出する。なお同図における破壊の場合のαの平均は、-0.9667、分散は0.5908、全ケースの平均は0、分散は1であった。この場合αは連続的に分布していると考え

、変域に上・下限があることを考慮してベータ分布をあてはめた。このようにして、破壊の場合の $\alpha$ の密度関数 $f_D(\alpha)$ 、および破壊+非破壊の場合の $\alpha$ の密度関数 $f_T(\alpha)$ を求めた。さらに、これら2つの場合のケース数をそれぞれ $N_D$ 、 $N_T$ とすると、ある単位区間のケース得点 $\alpha$ が与えられたときの、 $\alpha$ の単位区間の破壊確率 $P(D|\alpha)$ は

$$P(D|\alpha) = \frac{f_D(\alpha)}{f_T(\alpha)} \cdot \frac{N_D}{N_T} \quad (1)$$

となり、なおベータ分布の一般形は<sup>4)</sup>

$$f(x) = \frac{1}{B(\beta, \gamma)} \cdot \frac{(x-a)^{\beta-1} \cdot (b-x)^{\gamma-1}}{(b-a)^{\beta+\gamma-1}} \quad a \leq x \leq b$$

であったが、この場合 $f_D(\alpha)$ については $a = -2.4$ 、 $b = 1.2$ 、 $\beta = 1.6947$ 、 $\gamma = 2.5618$ 、 $f_T(\alpha)$ については $a = -2.4$ 、 $b = 2.0$ 、 $\beta = 2.0727$ 、 $\gamma = 1.7273$ と得られた。次に盛土破壊が連続する単位区間数を連続破壊長 $n_c$ とし、平均値を $\bar{n}_c$ とすると、ケース得点 $\alpha$ が一様なる区間で、連続して非破壊なる単位区間数の平均 $\bar{n}_c$ は

$$\bar{n}_c = \left\{ \frac{1}{P(D|\alpha)} - 1 \right\} \cdot \bar{n}_c \quad (2)$$

であり、ある単位区間で連続破壊の先頭が発生する確率 $P_c(\alpha)$ は、

$$P_c(\alpha) = 1 - \exp\left\{-\frac{1}{\bar{n}_c}\right\} \quad (3)$$

となった。以上では $\bar{n}_c$ を定数として扱ったが、 $\bar{n}_c$ が $\alpha$ によって変化する可能性を検討しておく必要がある。 $\alpha$ のため、連続破壊長 $n_c$ と $\alpha$ の間でのケース得点の平均値 $\bar{\alpha}$ との関係を示したのが図-2であった。ただし、両端が切り土などのために、連続破壊長が制限を受けるようなケースは除いた。図-2のデータは主観的にA、B、Cで示した特徴的な3つのグループに分けられた。これらのうちCグループは、 $\alpha$ が-1.0より大きければ、区間数6以上の連続破壊は生じないことを示していたと見てよからう。一方、AグループとBグループでは同じ $\alpha$ でありながら、連続破壊長が1~5、および7~22と大きく分かれていた。ここではBグループに属する区間数1~6の連続破壊が隣接して起ると、見かけ上Aグループのような長大な連続破壊を構成すると考え、 $\alpha$ の妥当性を検証した。 $\alpha$ の結果、AグループがB、Cグループの平均的連続破壊がながって起ったと考えた場合の平均的連続破壊の発生確率 $P_1 = 0.57$ 、AとBとは別のグループだと考えた場合の破壊の発生確率 $P_2 = 0.38$ となり、 $P_1$ と $P_2$ は

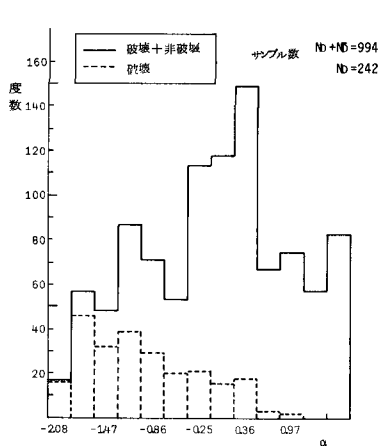


図-1 全サンプルと破壊サンプルについてのヒストグラム

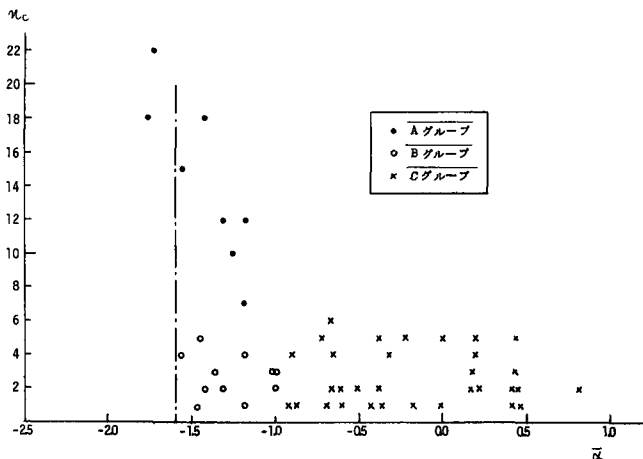


図-2 連続破壊長 $n_c$ とケース得点の平均値 $\bar{\alpha}$

一致しないが定性的傾向としては正しいと考えう。ただし、これらはBグループが属する $\alpha$ の範囲での破壊発生確率である。よって $\pi_c$ の分布は $\alpha$ とは独立と考えてよいものとし、平均破壊長としては、図-2のB,Cグループから得られた $\bar{\pi}_c = 2.6$ を用いる。

以上の所論より、長さとした盛土区間で破壊が発生する確率は、

$$P_c(L, \alpha) = 1 - \exp\left\{-\frac{L}{\bar{\pi}_c(\alpha) \cdot l_0}\right\} \quad (l_0 = 50 \text{ m: 単位区間の長さ}) \quad (4)$$

のように求められた。さらに、 $l_0' = 1000 \text{ m}$ あたりの連続破壊平均発生率 $\nu_0$ は、次の式で示され、これをグラフで表わしたものが図-3である。

$$\nu_0 = \frac{l_0'}{\bar{\pi}_c(\alpha) \cdot l_0} = \frac{f_0(\alpha) \cdot N_0 \cdot l_0'}{\{f_T(\alpha) N_T + f_0(\alpha) N_0\} \cdot \bar{\pi}_c \cdot l_0} \quad (5)$$

式(4)の結果を実際の被害と比較するため、盛土の全区間を $\alpha$ がほぼ一定なる区間に分割し、 $\alpha$ れらに含まれる単位区間のケース得点の平均値 $\bar{\alpha}$ をそれぞれの区間のケース得点とした。こうして定めた区間を、平均ケース得点 $\bar{\alpha}$ と長さとして分類して、各分類での破壊確率を求め、これを式(4)から得られた $P_c(L, \bar{\alpha})$ とともに図-4に示した。ただし図中の理論曲線における $L$ の値は、対応する分類に属するデータの平均値を用いている。

よって、図-3、図-4は盛土の区間が長いほど、またケース得点小さいほど区間のどこかに破壊が生じやすいという当然の結果を示しているが、これらの結果は、こうした点に関する定量的な目安を与えるものと考えられた。

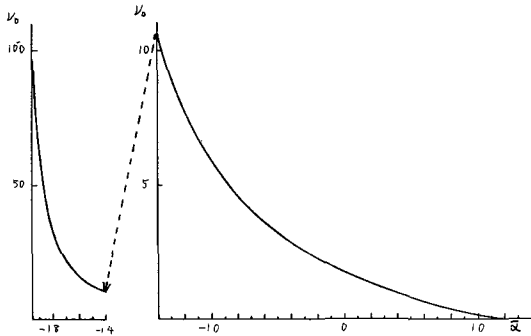


図-3 1kmあたりの連続破壊平均発生率

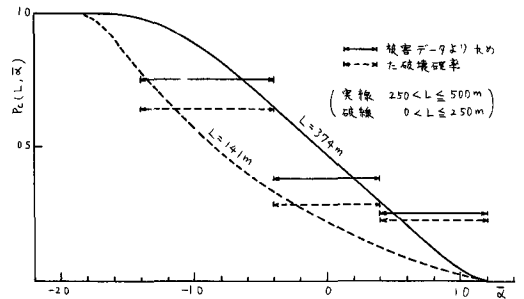


図-4 被害データより求めた破壊確率と $P_c(L, \alpha)$

#### 4. 盛土被害のシミュレーション

表-1のカテゴリ・ウエイトと式(4)をもとにして、解析に用いたデータと同じ区間について、地震時の盛土被害のシミュレーションを行った。連続破壊長 $\pi_c$ の分布は図-5のようになっているが、このヒストグラムをモデル化し、 $\pi_c = 1 \sim 6$ の間で直線状の密度分布を持つものとして、密度関数 $P_{\pi_c}(\pi_c)$ を次のように決定した。

$$\begin{aligned} P_{\pi_c}(1) &= 0.2989 & P_{\pi_c}(2) &= 0.2460 & P_{\pi_c}(3) &= 0.1931 \\ P_{\pi_c}(4) &= 0.1402 & P_{\pi_c}(5) &= 0.0873 & P_{\pi_c}(6) &= 0.0345 \end{aligned}$$

はじめに、ある単位区間において連続破壊の先頭が発生するとして、 $P_{\pi_c}(\pi_c)$ と乱数を用いて連続破壊長を定めた後、連続破壊区間のケース得点 $\alpha$ の平均値 $\bar{\alpha}$ を求めた。式(3)より $P_c(\bar{\alpha})$ を求め、 $(0, 1)$ 一様乱数 $R$ を発生させて、 $R \leq P_c(\bar{\alpha})$ であれば連続破壊が実際に発生するものとし、 $R > P_c(\bar{\alpha})$ であれば破壊が起こらないものとして次へ区間へ進め。

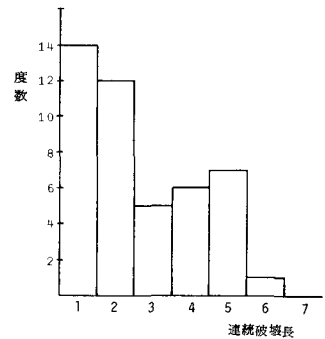


図-5 連続破壊長のヒストグラム

シミュレーションを行った結果と実際の被害との比較を簡略化して示したものが図-7であり、被害が発箇所は、ほぼ一致しているなど良好な結果も示していると思われる。次に多数のシミュレーションを行い、求めた破壊確率と式(4)より得られた理論値を比較したものが図-6である。理論値とシミュレーションより求めた破壊確率は比較的良好に一致していると考えうる。これらの結果から、 $\alpha$ が1.0以上であればしが長くてもほとんど破壊せず、逆に $\alpha$ が-1.4より小さい区間では破壊の生ずる確率が非常に高いといえる。

5. おそび

以上、本研究で扱ったモデルは、特定の地震における被害データのみに基づいており、地震直前の降雨などの特殊な条件も含まれているが、今後データの集積とともに、本研究の方法によって盛土の地震被害予測のための有用な資料が得られるものと期待された。

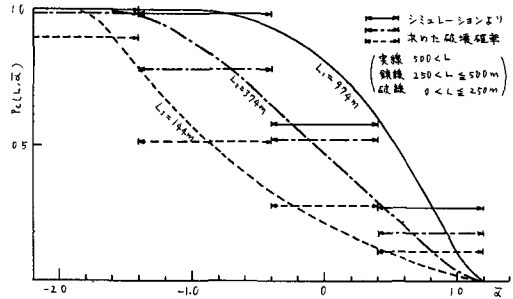


図-6 シミュレーションより求めた破壊確率と  $P_c(L, \alpha)$

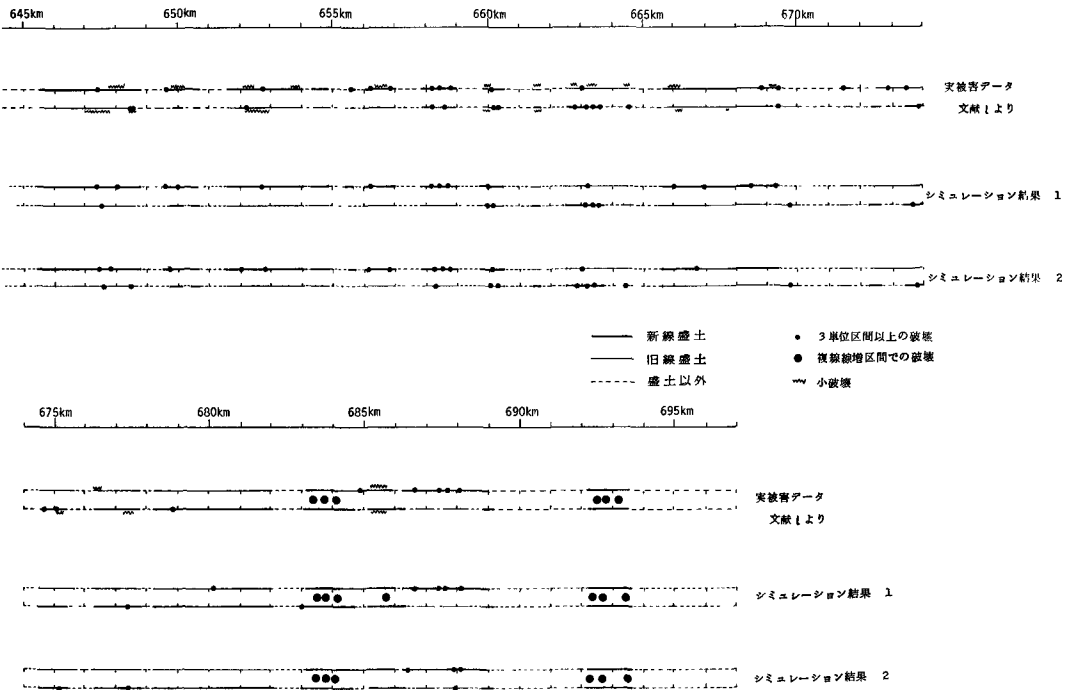


図-7 実被害データとシミュレーション結果

<参考文献>

- 1) 日本鉄道施設協会：軟弱地盤上盛土の耐震設計に関する研究報告書，昭和45.3，参考別添図，
- 2) 星谷・磯山：東北本線青森地区盛土の被害要因分析(1968年十勝沖地震)，第14回地震工学研究発表会，1967.7，
- 3) 南部光広：統計的手法による道路用盛土のり面の安定度解析，土木学会論文報告集，1975.9，
- 4) Ang, Tang 著，伊藤・亀田訳：土木・建築のための確率・統計の基礎，丸善，昭和52.6，
- 5) 林・樋口・駒沢：情報処理と統計数理，産業図書，昭和46.3，