

微動から推定される傾斜地の盛土地盤の振動特性

国井 隆弘*

要 約

傾斜地に造成される盛土地盤の耐震安全性を検査するための手段として、常時微動観測による方法を提案し試みている。建築建物等の施設でおこなわれる微動による動特性の検討とほぼ類似した方法を盛土地盤に対しておこない、最も単純な1質点1自由度系モデルを得て、このモデルが観測波形を満足できる形で再現することを示し、次に盛土上での測線観測によって盛土厚さの変化にともない微動波形がそれに調和する形で特性変化する様子を示している。この結果、微動を用いた盛土地盤の振動性状把握に関し、その可能性が少なくはないことを言及している。

1 序論

都市地域の拡大化にともない、都市周辺の傾斜地が開発され居住地化していく例は多い。この場合、傾斜地の地表面は切り取られたり土盛りされたりして、段々畑の様な形で水平な地面と斜面とに分離される。過去の地震において、この様な斜面が崩落したり盛土部分が沈下したことにより引き起された災害は非常に多い。最近の例では、1978年の伊豆大島近海地震において傾斜地に建設された道路の側面の斜面崩壊が多発し、これにより地震災害が増幅されたことが記憶に新しい(国井、荏本, 1978: 山川, 秋山, 1978)。このため、あらかじめ斜面の実態を把握し、崩壊の予測をおこない対策を試みることもおこなわれている(国井, 1979)。

斜面の崩壊に対する安全性を確める方法として、崩壊に対して斜面が有している危険な諸要因にもとづく解析がよくおこなわれてきた(たとえば、南部・他, 1975: 田治米・他, 1977: 国井, 荏本, 1980)。この方法によれば、崩壊にかかわる諸要因の寄与度が明らかになり崩壊の原因となる背景が示され、崩壊の予測のための手段が提供される。しかしながら、あくまで統計処理を必要とし、精度あるいは適中率がかなり満足できるところに至っているとは思えない。

各種からなる都市施設の多くは、人工的に製造された構造材料を用いた構造体である。この様な施設の地震に対する安全性の検討は、構造体の振動モデルへの置換、

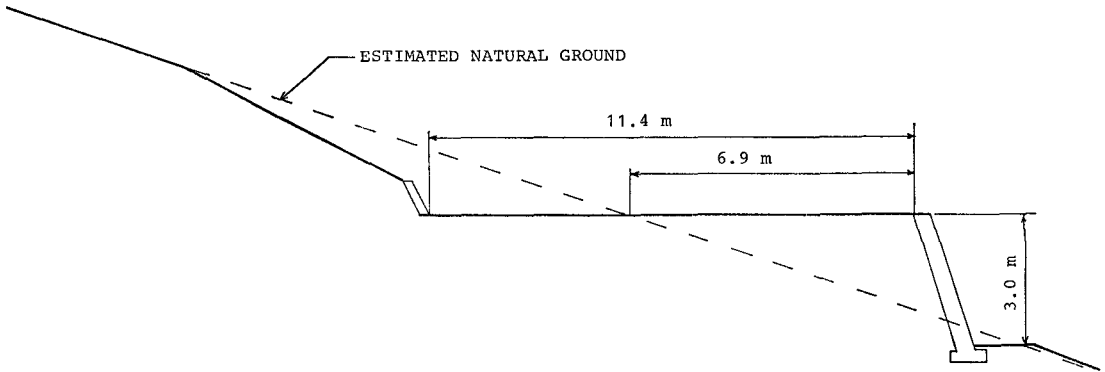
そしてそのモデルの動的応答の計算結果によって力学的におこなわれる場合が多い。この方法と同様なあるいは類似した方法を斜面に対して適用することが可能ではないかと考えられる。

本研究はこの様な観点から、傾斜地において盛土で形成される水平地の盛土地盤の水平方向の振動挙動に着目して、盛土地盤の振動モデルへのモデル化を試みるものである。盛土地盤は傾斜した元の地山を基盤にして水平な地表面を有し、盛土の最深部には地表面から地山までの斜面を形成すると考える。斜面には表面の風化を防ぐ等の目的から一般に擁壁が張られるが、ここでは擁壁の挙動の振動モデルに対する影響は無視できると仮定する。

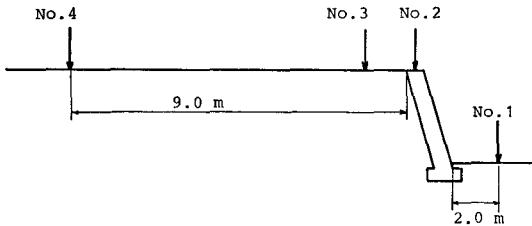
この様な盛土地盤の振動モデル化の試みは、過去にその例を聞かない。形が類似する土構造物として、アースダムあるいは河川堤防が考えられる。これらは二次元弾性体あるいはFEMのモデルに置換されるが、これは斜面の崩壊という弾塑性挙動を取り扱うには十分ではない。そこで本研究では集中質点系モデルを採用する。本報告は最も単純な1質点系について検討したものである。

1質点系モデルが有する振動特性(固有振動数、減衰定数)を得るために、盛土地盤に関する微動の観測をおこなった。本報告では、微動観測によって判明できる盛土地盤の振動特性についても二・三の検討をすすめた。

* 東京都立大学都市研究センター・工学部



図一 対象とした盛土地盤の断面



図二 主として着目した微動観測点

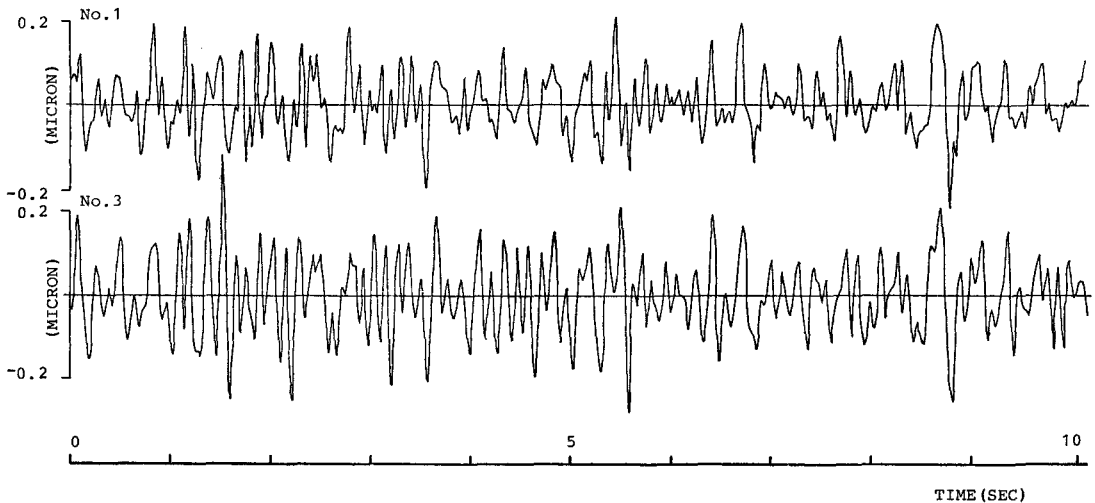
2 対象とした盛土地盤

図1に示した断面を有する盛土地盤を対象とする。これは日野市にある某寺の駐車場であるが、浅川に沿った平地が丘陵にさしかかった付近のやや丘陵よりに位置し

ている。丘陵上の近くには強い発震源はみられないが、約500m浅川寄りに斜面と平行する形で交通量の多い道路がある。微動の中心的な発震源はこの道路ではないかと予想される。

図1に示した断面はほぼ形を変えないまま約40m継続する。図中に示した元の地山の線は、寺の住職の話により、また周囲の地形から推定したものである。駐車場は1973年5月に建設されており、微動の測定は約7年後におこなわれたことになる。

斜面はコンクリートブロック積み擁壁からなり、かなりしっかりとした練り積みである。水平面に対する傾斜角は約70度である。高さは3mであり、この地域では平均的かやや低い類に属すると思われる。盛土の材料は、その上部の切り取られた土であり、関東ロームを主体としている。



図三 微動波形の一例

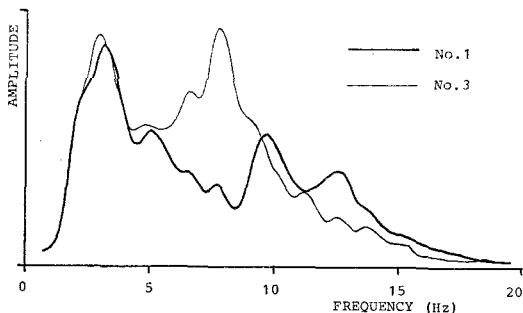
3 微動の特性

図1に示した盛土地盤の断面と平行な水平方向の微動を観測した。換振器は1秒の固有周期を有する動コイル型振子で、電氣的に積分することにより変位波形を得ている。2台の換振器を組み合わせて、盛土地盤および地山、切土上の各所に配置して観測をおこなった。1つの組み合わせにおける測定時間は約2分で、この間に波形が安定している約20秒間を選び出しA-D変換の後、主としてスペクトル解析を実施した。観測当日は晴の天気で風はほとんど感じられなかった。

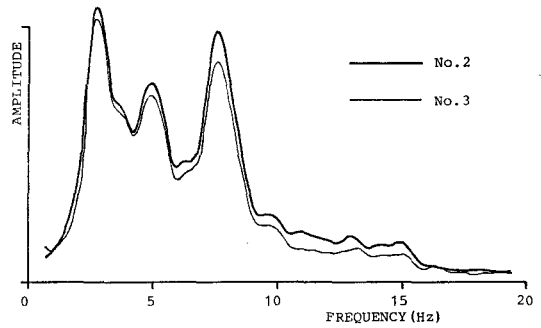
観測に際して主として着目した地点は図2に示した4個所である。No.1は盛土下のほぼ元の地山と思われる所で、擁壁下端から約2m離れた所にある。換振器は柔かい表土を数十cm除いて設置された。No.1の微動は盛土地盤にとって、基盤における入力になると考えられる。No.2,3はともに盛土地盤の先端部であり、盛土地盤の振動特性を代表すると考えられる。No.2は擁壁の天端であり、No.3は擁壁と盛土地盤の境界より50cm離れた盛土地表である。No.4は斜面から約9m離れた切土の地表であり、No.1と類似した微動特性を示すものと予想される。

入力および応答と考えられるNo.1およびNo.3の微動波形の1例を図3に示す位相が一致する類似した。波形がみられると同時に高い振動数の波がNo.3に卓越しており全体としてNo.3の方が大きい振幅を示す。両波形のフーリエ振幅スペクトルを描いたのが図4である。類似した波形が3Hz付近の振動数成分の波であり、No.3の高い振動数の波が8Hz付近の振動数成分の波であることが理解できる

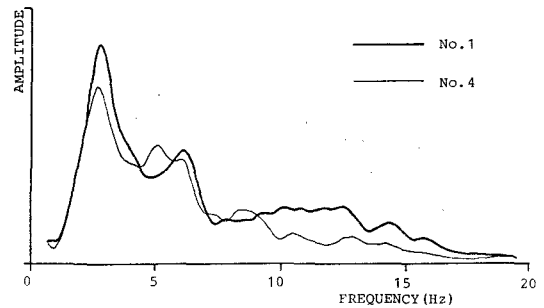
No.2とNo.3の微動の比較は擁壁が独自に振動するか、盛土と一体となって振動するかを知る上で興味深いだが、両者の波形は振幅、位相ともに非常によく類似していた。しかし図5に示した両者のフーリエ振幅スペクトルにはわずかに差がみられ、擁壁上の微動がやや大きい振



図一4 地山と盛土先端での微動の振幅スペクトル



図一5 盛土先端と擁壁天端での微動のスペクトル



図一6 両地山での微動の振幅スペクトル

幅を持つ。これは両者の距離が約50cmあり、擁壁が外側にあることによると考えられ、したがって、微動レベルの小さな振動においては擁壁と盛土地盤は一体となって振動していると判断してもよさそうである。しかしながら、過去の地震被害例には擁壁だけが崩落して背後の地盤が崩れないままむき出す例が少なくないことから、地震時における振動レベルでは必ずしも両者が一体のまま挙動するとは判断できない。

元の地山とその上方にある地山の切り土との微動の比較を試みたのが図6である。No.1が地山でNo.4が切土上である。一般的に地山の方が大きな振幅を有しているがその差は小さい。地表付近のごく浅い地層における違いが現われているのかもしれない。

図4～6においてNo.1が図4と6に、No.3が図4と5に示されるが、同一No.でも図が異なると違った形のスペクトルを示していることが解る。これは観測時間の差異により微動の振幅特性が変動していることを示すが、同時に、卓越する振動数が常に卓越していることを示している。すなわちNo.1と3においては3Hz付近が、No.3においてはさらに8Hz付近の振動数成分が卓越している。したがって盛土地盤は地山とは異なる独自の挙動をおこなっていることが解る。

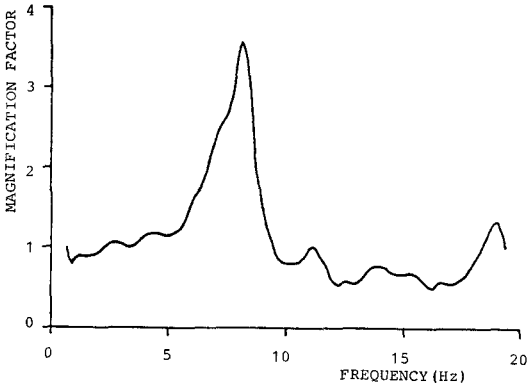


図-7 態答倍率曲線

4 盛土地盤の振動モデル

ここでは最も単純な1質点系(1自由度系)へのモデル化を試みる。図2に示したNo.1の微動を入力と考え、No.3の微動を盛土地盤の代表的な応答と仮定すると、図4の両者のスペクトル比が応答倍率になる。図7はこの様にして求めた応答倍率である8Hz。付近に明快な固有振動数を有するかなりはっきりした応答倍率の曲線であることが解る。この曲線から粘性減衰定数を算出すると14%となる。この値は土構造物として少し小さめと考えられるが、微動から得られた値として妥当なものであろう。

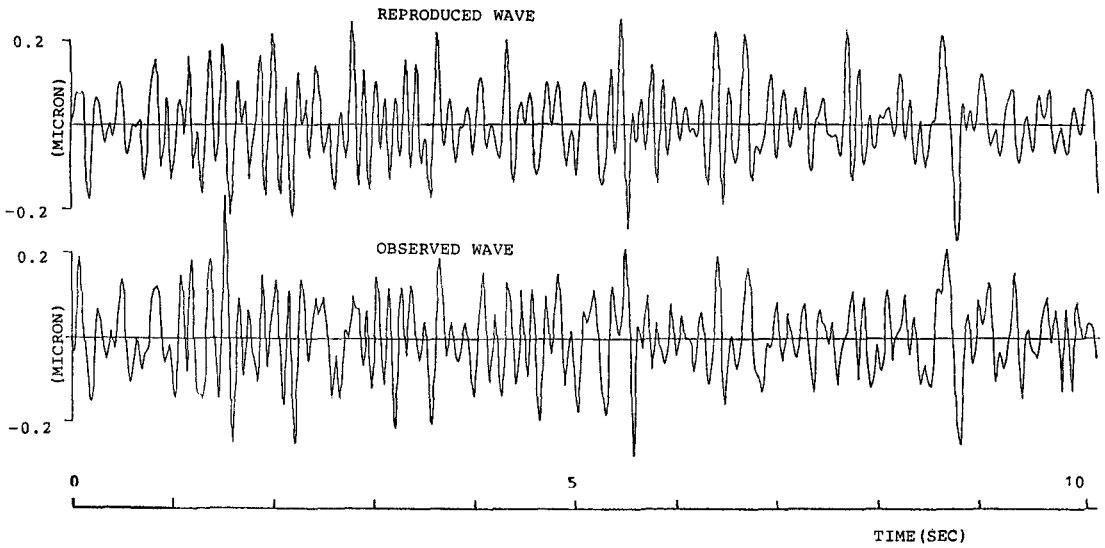


図-8 振動モデルによる再現波と観測波の比較

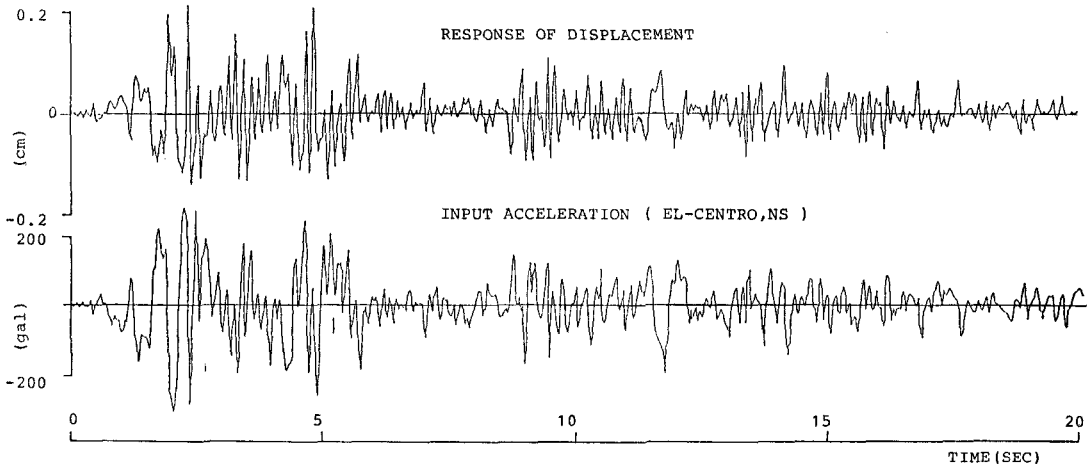
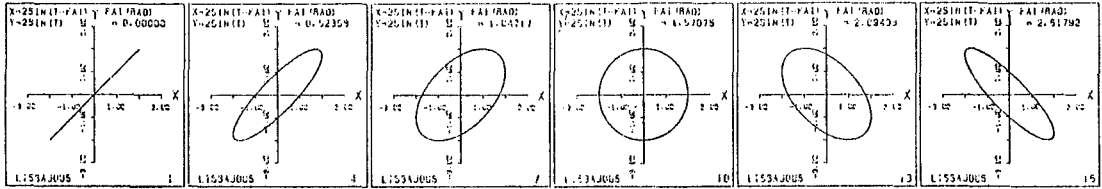


図-9 振動モデルの応答計算の一例



a) $\theta=0$ b) $\theta=\pi/6$ c) $\theta=\pi/3$ d) $\theta=\pi/2$ e) $\theta=2\pi/3$ f) $\theta=3\pi/4$

図—10 単一正弦波のリサーチ図の例 (θ は位相差)

この1質点系モデルにNo.1 (図2)の微動を入力として、線形加速度法を用いて数値積分することにより、No.3 (図2)の微動を応答として再現して比較したのが図8である。全く再現できていない波形も多くみられるが、振幅、位相ともに大体よく再現できていると思われる。

図9は EL-CENTRO 地震波形の NS 成分を入力加速度として、1質点系モデルの応答変位を求めたものである。最大変位は約2mmとなった。盛土地盤のひずみが均一であると仮定して、最大ひずみを求めると概略ではあるが約 7×10^{-4} となる。したがって、地盤の剛性の低下ともなう固有振動数の低下および減衰能力の増大化等を考慮しながら応答を評価する必要がある。このような検討はモデルの自由度を増す問題を含めて今後に残される。

5 盛土地盤の厚さにもなう振動特性

図1に示したように、擁壁斜面の盛土が最も厚く、切土に近づくにしたがいほぼ直線状に盛土の厚さが低下している。このような盛土地盤の厚さの差異が微動にどの様に反映するかを知る目的で以下の検討をおこなった。

図2におけるNo.3の位置は擁壁と盛土の境界から50cm盛土側の点であるが、盛土の影響を強く反映した微動を示すと予想される代表的な位置の1つである。本研究ではこの点を基準点として、ここから切土にむけて擁壁斜面に直交する形で測線を設けた。測点は基準点から50cm離れた第2の点およびそこから1mづつ離れた点にあり、計10点、延長8.5mの測線上にある。

2台の換振器のうち1台を基準点に固定し、他の1台を各測点に移動配置することにより、2地点1組の微動データを10組得た。これら対を成すデータは波形の振幅および位相の両者がともに一致するか否かの判定をおこなうため、リサーチ図で解析される。

リサーチ図は狭いバンドパスフィルターを通過した2~3周期の微動波形について求めた。フィルター中央の振動数は1.78 Hzから17.75 Hzまでの11個である。この結果、1組のデータからいくつものリサーチ図

が得られるが、解析には5個のリサーチ図を用いることにした。

リサーチ図は直交する2軸において与えられるが、振幅、位相ともに同一の波は45度右上りの原点を通る直線となる。位相は同じで振幅が異なる場合には傾きが45度でない直線となり、振幅比が一定で一定の位相ずれがある場合にはだ円となる。単一の周波数からなる正弦波が同一振幅を有する場合、各位相ずれごとのリサーチ図の例を図10に示す。

バンドパスフィルターの中央の振動数と基準点からの距離をパラメーターにして、リサーチ図の1例を示したのが図11である。距離が0mの場合は、基準点に換振器2台をならべて設置している。低い振動数では、盛土上では厚さに関係なく同一の微動波形を示している(距離6.4mまでは盛土で、6.5, 7.5, 8.5mは切土上にある、図2参照)。しかしながら、振動数が増していくにしたがって、同一波形を保つ距離の範囲が狭くなるという傾向が明らかである。図11の図は一例であり、さらに多くの図によりこの傾向を確かめてまとめたのが図12である。低い振動数では盛土全体がほぼ同一の動きであり、高い振動数では盛土先端と1~2m離れた点で異なる動きをしている事が理解できる。そして振動数の増加にもなう同一の微動の範囲の距離の減小は、全く単調にお

f \ L	0.0	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5
1.78	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
2.80	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
4.5	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
7.1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11.2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
17.8	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

L : DISTANCE (m)
f : FREQUENCY (Hz)

図—11 微動のリサーチ図

f \ L	0.0	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5
1.78	O	O	O	O	O	O	O	Q	?	X
2.24	O	O	O	O	O	O	O	Q	?	X
2.80	O	O	O	O	O	O	Q	Q	X	X
3.55	O	O	O	O	O	Q	?	?	X	X
4.5	O	O	O	O	O	?	X	X	X	X
5.6	O	O	O	O	Q	?	X	X	X	X
7.1	O	O	O	O	Q	?	X	X	X	X
8.9	O	O	O	Q	?	X	X	X	X	X
11.2	O	Q	?	X	X	X	X	X	X	X
14.0	O	Q	X	X	X	X	X	X	X	X
17.8	Q	?	X	X	X	X	X	X	X	X

O : SAME
 Q : SLIGHTLY SAME
 ? : UNABLE TO JUDGE
 X : DIFFERENT

L : DISTANCE (m)
 f : FREQUENCY (Hz)

図-12 リサージュ図から判定した波形の類似性

こなわれ、盛土地盤の厚さの変化とよく調和している。

6 むすび

傾斜地に造成された盛土地盤上および周辺地上において微動観測を実施して、微動波形から盛土地盤の振動特性を推定しようと試みた。この結果、1質点からなる1自由度系モデルへのかなり荒いモデル化にもかかわらず、盛土地盤の微動の再現がある程度可能となった。今後は更に複雑なモデルへのモデル化を試みると同時に非線形応答解析を実施して、盛土地盤に対して通常の施設と類似した耐震安全性の検討の可能性の良非を確かめた

ON VIBRATION CHARACTERISTICS OF FILL-UP GROUND ESTIMATED FROM MICROTREMORS

Takahiro Kunii

Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University

Comprehensive Urban Studies, No. 14, 1981, pp.103-108

For studying the aseismicity of a fill-up ground, a method based upon the observation of microtremors is proposed in this paper. Observed waves of microtremors on the face of the fill-up ground and on the natural ground are transformed to Fourier amplitude spectra. Then the curve of a magnification factor of a one mass system (one degree of freedom) is evaluated clearly by the spectrum ratio of these two spectra. The reproduced wave using an idealized one-mass model shows satisfactory agreement with the observed one.

The effect of the depth of a fill-up ground on the wave property of microtremors is examined by an array observation method. The existence of the wave produced by a higher mode is analyzed using this examination.

い。

末筆ながら、波形処理、数値解析を中心的に進めていただいた杉本誠四郎氏（当時卒研学生、現在オリエンタルコンサルタンツ）に感謝するとともに、微動観測に労をとっていただいた塩野計司氏、荏本孝久氏（神奈川県大学）および研究室の諸氏に感謝いたします。またA-D変換の際にお世話になった菊地敏男氏（大林組技研）に感謝いたします。

参 考 文 献

- 南部光広・他
 1975 「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』第241号。
- 田治米辰雄・他
 1977 『地震時の崖・擁壁の崩壊予測に関する調査』東京都防災会議。
- 国井隆弘・荏本孝久
 1978 「1978年伊豆大島近海地震における道路の斜面被害」『総合都市研究』第5号, pp.3~7
- 山川 仁・秋山哲男
 1978 「伊豆大島近海地震による道路被害とその影響」『総合都市研究』第5号, pp.39~70
- 国井隆弘
 1979 「人工斜面の地震被害」『スチールデザイン』No.190, pp.20~22
- 国井隆弘・荏本孝久
 1980 「1978年伊豆大島近海地震における道路斜面の被害に関する二・三の検討」『総合都市研究』第11号, pp.47~65