

(34) 斜面の動的応答特性に関する模型振動実験

建設省土木研究所 正会員○吉見精太郎

建設省土木研究所 正会員 常田 賢一

建設省土木研究所 正会員 福井 次郎

1. まえがき

1978年伊豆大島近海地震、1984年長野県西部地震等のように、山間部における地震災害では、のり面・斜面の崩壊がよく見られるが、これらの変状は斜面の形状等の特性により異なるものの、斜面条件が多様であるため、動的応答特性についてはあまり明らかなのが実情である。そこで、地震時におけるのり面・斜面の合理的な耐震性評価の基本となる地震動特性を明らかにするために、弾性体材料を用いた斜面模型を製作し、振動実験を実施した。本文では、斜面の形状、勾配及び加振方向による動的応答特性の差異に着目して検討した結果を報告する。

2. 実験方法

2. 1 斜面模型

斜面模型は、斜面の標準的な条件として、高さ100m程度の均一な地盤の斜面を想定し、縮尺を1/1000として製作した。斜面高さ(H)を10cmの一定とし、斜面の勾配および斜面の形状を変化パラメーターとして、図-1に示す4体の模型を製作した。モデル1および2は、斜面勾配がそれぞれ30°および45°の2次元モデル、モデル3は直交する斜面前面の平面の勾配が30°および45°の3次元モデル、モデル4は直交する斜面前面の稜線の勾配が30°および45°の3次元モデルである。なお、平坦な地盤の動的応答特性と比較するため、同じ高さの平坦地盤の2次元模型(モデル5)も同時に製作した。模型材料は、弾性体材料であるシリコンゴムを使用した。シリコンゴムは、低弾性率の模型を製作することが可能であり、物性の経時変化が少ないという特徴を有している。模型製作用の型枠には、アクリル板を加工したものを用いた。模型は、型枠に1層目のシリコンゴムを注入し、硬化した後、内部埋設加速度計を固定し、さらに2層目を注入することにより製作した。模型材料の物性は、模型の各層から任意に取り出したシリコンゴムを用いて製作したテストピースの寸法、重量及び一軸圧縮試験により求めた。表-1に、各テストピースの試験結果を平均することにより求めた模型材料の物理特性と実物に換算した場合の物理特性を示す。

2. 2 計測項目、計測方法

型枠から脱型した模型は、基盤上(アクリル板)に設置し、さらに架台を介して振動台に固定した(写真-1参照)。模型の応答加速度は、基盤、模型の頂上、表面および内部に設置した□5mm×10mmの超小型加速度計により計測した。模型内部の加速度計は、全ケースと

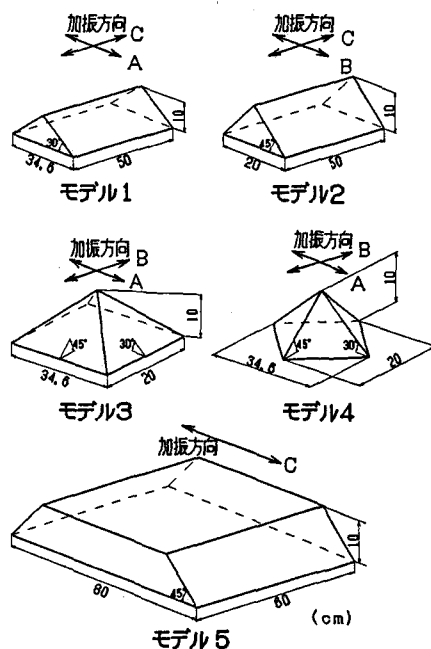


図-1 斜面模型

表-1 模型材料の物理特性と実物への換算値

項目	模型	実物換算	縮尺
単位体積重量 $\gamma_t(\text{g/cm}^3)$	1.00	2.10	1/2.10
せん断弾性係数 $G(\text{kg/cm}^2)$	0.2	5357.2	1/26786
せん断弾性波速度 $V_s(\text{m/s})$	4.42	500	1/113
寸法(斜面高さ) $H(\text{m})$	0.10	100.0	1/1000
時間 $T(\text{s})$	1/8.85	1	1/8.85

も模型の鉛直中心線上の $H/2$ に埋設した。図-2に、モデル1(2)、3および4の表面の加速度計設置位置を示す。モデル1と2は、斜面方向の中央断面に沿って、頂上、 $3/4H$ 、 $1/2H$ および $1/4H$ の4箇所に加速度計を設置した。モデル3は、頂上、勾配 30° および 45° の斜面上の $1/2H$ および同じ高さの稜線上の4箇所に加速度計を設置した。モデル4については、頂上、勾配 30° および 45° の稜線上の $1/2H$ および同じ高さの斜面上の4箇所とした。また、モデル5では、模型中央の鉛直中心線上の頂点(模型表面)と $H/2$ (模型内部)とした。表-2に各モデルの加速度計の設置位置、個数を示す。

2. 3 実験ケース

実験は図-1中に示す方向の加振を実施し、モデルNoと加振面内の斜面の勾配を組み合わせ、実験ケースを表-3のように定義した。入力波形は、共振曲線を得るための正弦波と、伝達関数を得るためのランダム波の2種類とした。基盤への入力レベルは、正弦波が $40\sim 60\text{gal}$ 、ランダム波が $60\sim 80\text{gal}$ 程度とした。正弦波の加振振動数は $2\sim 60\text{Hz}$ とし、またランダム波は、 $3\sim 100\text{Hz}$ の周波数成分が一様に含まれるホワイトノイズである。

3. 実験結果

実験結果の一例として、図-3に、モデル1のA方向のランダム波加振による基盤および模型の斜面頂部の加速度時刻歴波形を示す。全計測点の最大加速度は、基盤の 90.5gal に対して、斜面の $1/4H$ で 61.3gal 、 $1/2H$ で 108.2gal 、 $3/4H$ で 148.9gal 、頂部で 180.5gal 、内部の $1/2H$ で 74.6gal となった。これより、斜面の $1/4H$ および模型内部の $1/2H$ では基盤の最大加速度よりも小さな値を示しているが、斜面上においては、斜面が高くなるほど最大加速度は大きくなっていることがわかる。図-4に、モデル1とモデル3のA方向のランダム波加振により得られた加速度のフーリエスペクトルから求めた、基盤と模型頂部の間の伝達関数曲線と位相差曲線を示す。これによると、伝達関数の形状は、 20Hz 程度までは、ほぼ同じであるが、それ以上の周波数領域では、モデル3がモデル1を大きく上回っている。また、モデル1は比較的滑らかな曲線を示すのに対して、モデル3では多少の変動が見られる。最大応答倍率および共振振動数は、それぞれモデル1が4.2倍、 22Hz 、モデル3が11.8倍、 29Hz となり、ともに2次元モデルより3次元モデルの方が大きな値を示した。それぞれのモデルについて、伝達関数曲線から最大応答加速度と共振振動数を求め、その結果を比較することにより斜面の動的応答特性について検討した。

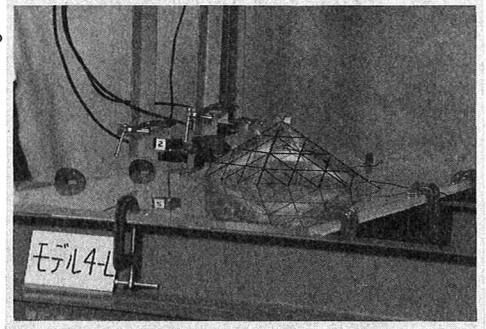


写真-1 模型設置状況 (モデル4)

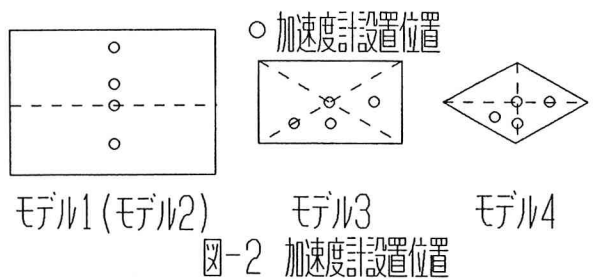


図-2 加速度計設置位置

表-2 加速度計設置位置、個数

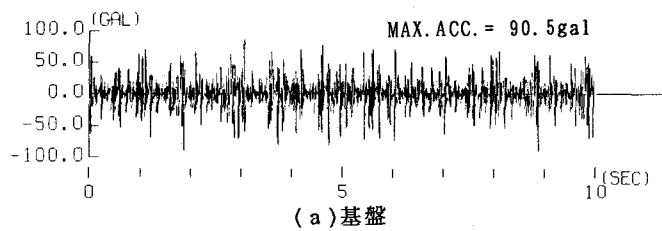
モデル位置	1	2	3	4	5
頂上	1	1	1	1	1
$3/4H$	1	1	0	0	0
$1/2H$	1	1	3	3	0
$1/4H$	1	1	0	0	0
$1/2H$ (内部)	1	1	1	1	1

H:斜面高さ

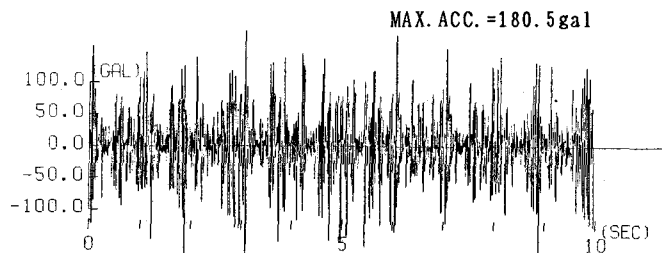
表-3 実験ケース

モデル No.	加振面地形の傾斜角 α	実験ケース M-X
1	30°	1-A
	0°	1-C
2	45°	2-B
	0°	2-C
3	30°	3-A
	45°	3-B
4	30°	4-A
	45°	4-B
5	0°	5-C

M:モデルNo.
X:A($\alpha=30^\circ$), B($\alpha=45^\circ$), C($\alpha=0^\circ$)



(a) 基盤



(b) 斜面頂部

図-3 加速度時刻歴波形 (1-A: ランダム波)

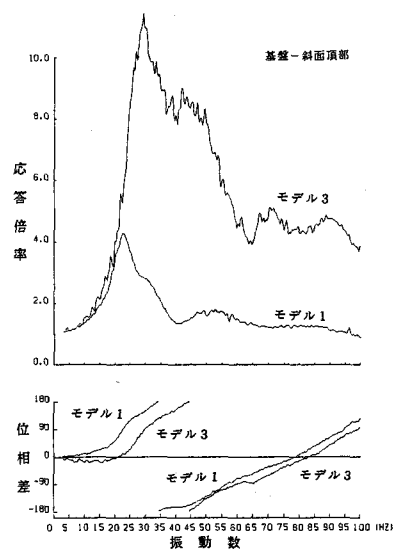


図-4 伝達関数及び位相差 (1-A, 3-A)

4. 斜面の動的応答特性の検討

図-5 は、2次元モデルの実験ケース (1-A, 2-B, 5-C) の加速度応答倍率の高さ方向の分布を示したものである。これによると加速度応答倍率は、 45° 斜面 (2-B) が 30° 斜面 (1-A) よりやや大きい値を示しており、平坦 (5-C) の場合は、頂部で (2-B), (1-A) より小さい応答を示している。

図-6 は加振直角方向の斜面の勾配が 30° と一定で、加振面内の地形の勾配、形状が異なる実験ケース (1-C, 3-B, 4-B) の加速度応答倍率の高さ方向の分布を示したものである。この場合、加振面内の地形が平坦 (1-C) から 45° 斜面 (3-B, 4-B) へと変化することにより、加速度応答倍率は全体的に約 1.5 ~ 1.8 倍に増加している。斜面形状の異なる 3-B と 4-B とを比較すると、頂部で 4-B の方がやや大きい応答を示している。一方、図-7 は加振面内の地形の勾配が 30° と一定で、加振直角方向の斜面勾配、形状が異なる実験ケース (1-A, 3-A, 4-A) の加速度応答倍率の高さ方向の分布を示したものである。この場合、加振直角方向の地形が平坦 (1-A) から 45° 斜面 (3-A, 4-A) へと変化することにより、加速度応答倍率は斜

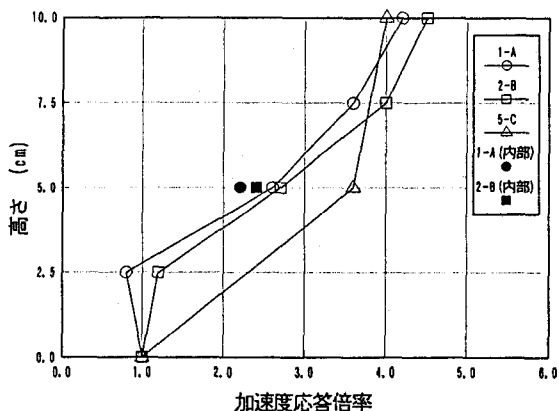


図-5 加速度応答倍率の分布 (1-A, 2-B, 5-C)

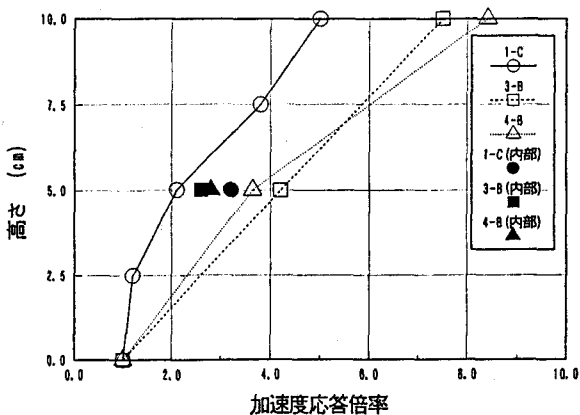


図-6 加速度応答倍率の分布 (1-C, 3-B, 4-B)

面中間高さで約2倍、斜面頂上で約3倍と大幅に増加している。斜面形状の異なる3-Aと4-Aとを比較すると、ほとんど差はみられない。図-8は、同ケースにおける共振振動数の高さ方向の分布を示す。共振振動数は、いずれのケースでも高さ方向に変化せずほぼ一様である。加振直角方向の地形勾配が平坦(1-A)から 45° (3-A, 4-A)へと変化することにより、共振振動数は高くなっている。また、3次元モデルで、斜面形状の異なる3-Aと4-Aとでは、4-Aの共振振動数が若干高くなる傾向が見られた。

以上のことから、斜面の動的応答特性には斜面の勾配の影響が大きく、形状の影響は小さいことがわかる。また、加振方向と加振直角方向の斜面の勾配の影響を比較すると、加振直角方向の斜面勾配の方が斜面の動的応答特性に大きく影響することがわかる。図-9は、4-A、4-B加振時の斜面中間高さの各点における加速度応答倍率を示したものである。図から、加振方向の稜線上が最も応答倍率が大きく、斜面の袖部の応答倍率はそれに比べて小さくなること、また、斜面内部の応答倍率は斜面表面と同じかやや小さくなることが分かる。

5. まとめ

今回の模型振動実験により、把握できた斜面の基本的な動的応答特性は、以下のようにまとめられる。

- 1) 斜面の動的応答特性に対して、斜面の勾配の影響が大きく、地形形状の影響は小さい。
- 2) 斜面の動的応答特性に対する斜面勾配の影響は、加振直角方向の斜面の勾配の方が大きい。

今後は、異なる条件の斜面についてもさらに模型振動実験を継続するとともに、斜面の構造条件を考慮した地震動のゾーニング手法について検討を加えていく予定である。

参考文献

- 1) 佐々木, 栗原, 吉見: 大規模斜面の動的応答特性に関する模型振動実験, 第23回土質工学研究発表会講演集, 昭和63年6月。

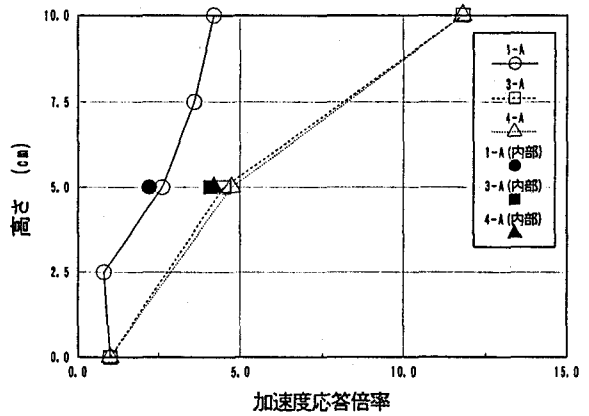


図-7 加速度応答倍率の分布(1-A, 3-A, 4-A)

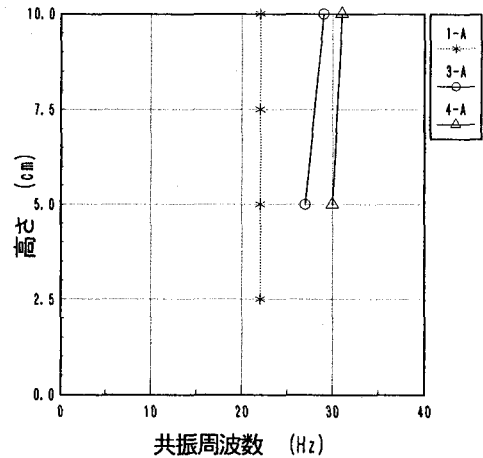


図-8 共振振動数の分布(1-A, 3-A, 4-A)

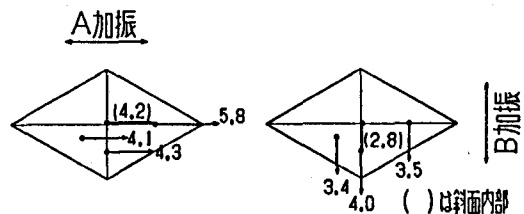


図-9 斜面中間高さにおける加速度応答倍率