

模型実験による軽量盛土の地震時安定性と対策工法

Seismic Stability of a Bank with Light-Weight Fills

ご 藤 けい の すけ* もち した てろ お 雄**
 後 藤 恵 之 輔* 持 下 輝 雄**
 まつ ひら あき ひろ*** むか い いつ べい****
 松 村 明 博*** 向 井 逸 平****

1. 緒言

高度に開発が進んでいる我が国の土地利用の現状から、道路、鉄道、空港、宅地造成などが軟弱地盤あるいは急傾斜地などに施工されることが、不可避となってきている。しかし、このような地盤・地形上に土木構造物を造る場合、構造物の安定性や耐久性に問題のある場合が多い。これを克服するためには、今までの技術を集積し研究していくことは当然であるが、これとは別に新たな技術や発想により対処していくことも必要である。

このような情勢や要望に応じることのできる盛土工法の一つに、盛土材料に軽量材を用いたいわゆる軽量盛土工法がある。この工法は従来からもあったが、最近では特に発泡スチロール (EPS) 材の持つ軽量性と自立性を利用して、死荷重を軽減したり擁壁にかかる土圧を低減する工法が注目を浴びている。しかし、EPS 材を用いた軽量盛土工法は、日本での施工例がまだわずかである。したがって、これを我が国に適用する場合には、我が国の実情を踏まえてその構造特性をよく把握しておくことが肝要である。

その一つが地震時の安定性である。すなわち、EPS 材を用いた軽量盛土は、盛土の上部に舗装などが存在するためトップヘビー状態にあり、地震動に対する安定性に疑問が持たれる。そこで、軽量盛土に地震動が加わったとき、盛土がどのような挙動を示すか解明しておかねばならない。本研究では、その一手段として盛土模型を用いた振動実験を行い、その安定性を検討するとともに、対策工法について言及するものである。

2. 軽量盛土の特徴と問題点

EPS 材は単位体積重量¹⁾が $0.02 \sim 0.04 \text{ tf/m}^3$ であり、砂や礫などの $1/50 \sim 1/100$ 、従来から使用され実績のある軽量材 (炭殻、木材など) の $1/10 \sim 1/20$ でしかない。この軽量さを利用して海外では、軟弱地盤上の道路の路体に用いるなど数多くの実績がある。我が国では、1985年に札幌市で橋台取付け盛土^{2),3)}に採用されたのが最初で、次いで1986年には建設省沼津工事事務所管内で国道1号バイパス

*長崎大学教授 工学部土木工学科

**長崎大学技官 工学部土木工学科

***綿建設技術研究所 (前長崎大学大学院生)

****長崎県土木部 (前長崎大学学部生)

の拡幅工事⁴⁾に EPS 材が用いられている。しかし、最近の数年間での施工例は試験施工も含めて10数例しかなく、まだその実績は少ない。

軽量盛土工法として EPS 材を利用する場合、次の大きな特徴^{5),6)}がある。一つは軽量性であり、他の一つは自立性である。前者の特徴のため、EPS 材を軟弱地盤や地すべり地などに盛土として利用した場合、沈下の抑制、支持力の増加あるいはすべり安定性の向上等が期待できる。また、後者については、EPS 材は規格品であるため、構造物として積み上げたとき、鉛直な自立面ができるとともに土圧が大きく低減できる。このような特徴を生かすことにより、EPS 材を用いた盛土工法は今後大きく発展すると思われる。

我が国において EPS 材を用いた軽量盛土工法を採用する場合、いくつか解決すべき課題がある。例えば、道路構造物として適用する場合の断面構成、洪水時における盛土体の安定性、地震動に対する安定性などである。特に、地震動に対する安定性については、我が国が名にし負う地震国であることから、早急な解決が図られなければならない。

図-1は、EPS 材を用いた種々の盛土工法を示すものである。いずれの図においても、盛土上部には舗装など EPS 材に比べて重量のあるものが存在している。このように軽量材料の上に重量材料が存在する場合、この状態を地震工学ではトップヘビー (top heavy) 状態と呼んでいる。トップヘビー状態にある構造物では、下端を揺すられたとき、重い上部と軽い下部とで揺れが一致せず、地震工

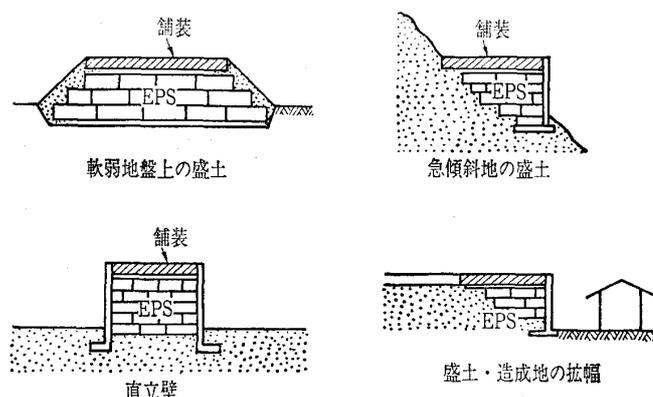


図-1 EPS 材を用いた種々の盛土工法⁷⁾

学上問題のある場合が多い。EPS 材を用いた軽量盛土は、まさにこの典型例と判断されるため、地震動に対する安定性に疑問が持たれるわけである。

3. 地震時挙動の実験

3.1 盛土模型

実験に用いた盛土模型は、図-2に示すように EPS 材を $2 \times 10 \times 30$ cm の大きさに切断し、3枚を1段として6段、10段、15段の高さに重ねたものである。舗装に相当するものとしては、この上に重量それぞれ 4.4 kgf、6.9 kgf、11.3 kgf の鉄板を載せた。

実験モデルには、図-3に示す A、B、C の 3モデルを考えた。これら実験モデルの設定条件は、それぞれ表-1のとおりである。

実際の EPS 材を用いた軽量盛土においては、各層間にジベルを入れ水平方向のすべりを防いでいる。そこで、ジベルの効果を検討するためモデル B を考えた。このモデル B は、各層間にジベルの代わりとして長さ 1 cm の針金を図-4のように配置したものである。これに対して、モデル A では、各層間を連結しないで各層のブロックを単に積み重ねただけである。モデル C は、モデル B でジベルの代わりに配した針金の位置に (図-4参照)、針金を模型の最上部から基礎まで突き通し全層の一体化を図ったもので

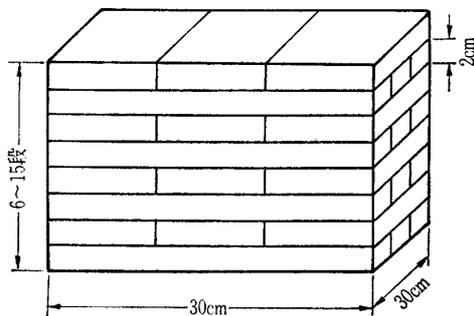


図-2 盛土模型

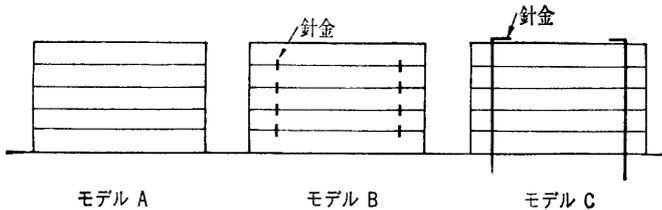


図-3 実験モデル

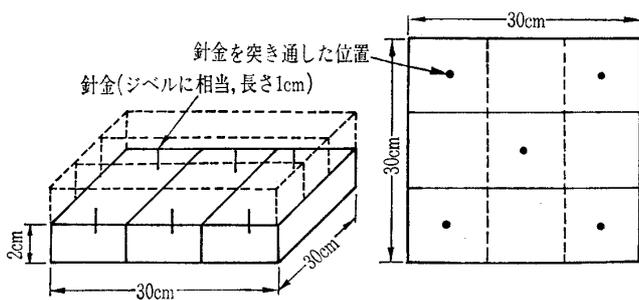


図-4 ジベルと針金の位置

ある。

3.2 実験装置

実験装置の概観を図-5に示す。振動台には最大加振力 300 kgf、最大振幅 25 mm、使用周波数 5~1000 Hz の振動台を使用し、その上に盛土模型を設置するための基礎として、 $10 \times 50 \times 80$ cm の発泡ポリスチレンボードを固定した。実験においては模型を振動させるので、リアルタイムに諸量を測定することが難しい。そこで、採録後繰り返し再生、停止などを行うことができるビデオ録画装置を援用した。

振動台の基礎上に 3.1 の盛土模型を設置し、図-6の加振パターンで正弦波を加え、模型が破壊を始める加速度をビデオカメラによって計測した。ここで言う破壊とは、模型の一部または全部がすべり始めた時点とする。

3.3 実験方法

上記の盛土模型に対して 3~4 種類の周波数 (5 Hz~20 Hz) で振動を与え、模型が破壊を始めたときの加速度、破壊状況などを観測して、軽量盛土の地震時安定性を次のように検討した。

実験(1): トップヘビーの影響の検討

モデル A を用い、模型に鉄板 (載荷重 6.9 kgf) を載せ

表-1 各実験モデルの設定条件

モデル	載荷重 (g)	高さ (段)	層間連結の方法
A	0	6	なし
	4400	10	なし
B	6900	15	ジベル
C	11300	15	あり (突通し)

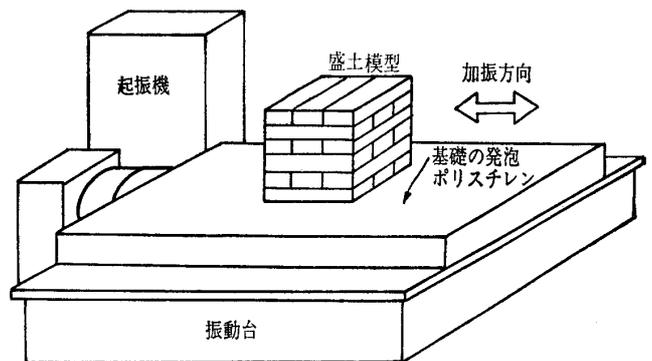


図-5 実験装置の概観

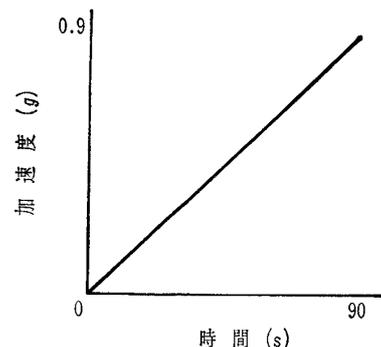


図-6 加振パターン

たものと載せないものとで、トップヘビーの状態となることの影響を調べた。模型の高さは3種類(6段, 10段, 15段)とし、これに4種類の周波数(5Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hz)を加えて実験を行った。

実験(2): ジベルの効果の検討

モデルA(ジベルなし)とモデルB(ジベルあり)を用い、3種類の模型高さ(6段, 10段, 15段)と3種類の周波数(5Hz, 10Hz, 20Hz)の条件下でジベルの効果を検討した。いずれの条件下でも鉄板の載荷重は4.4kgf, 6.9kgf, 11.3kgfの3種類である。

実験(3): 全層一体化による安定性の検討

モデルCを用い、模型の高さを2種類(10段, 15段)、載荷重を3種類(4.4kgf, 6.9kgf, 11.3kgf)として周波数5Hzの振動を与え、針金を貫通させ全層を一体化したことによる安定性の効果について検討した。

実験(4): 大型模型を使用した振動実験

実験(1)~(3)で使用した盛土模型よりやや大型の模型を作製し、モデルA, B, Cについて比較実験を行った。これは、実験(1)~(3)に用いた模型の大きさが、得られる結果に与える影響を調べるため補足的に行ったものである。

4. 実験の結果と考察

4.1 トップヘビーの影響

実験(1)によって得られた結果を図-7(a)~(d)に示す。周波数5Hzで行った実験(図-7(a))では、すべての高さの模型において載荷のあるものが無載荷のものに比べて小さな加速度で破壊している。また、載荷の有無にかかわらず、高さが高い模型ほど小さな加速度で破壊を始めている。一方、周波数20Hzで行った実験(図-7(d))では、載荷のある模型が破壊を起こさなかったのに対し、無載荷のものは高さ15段の模型を除いて破壊を起こしており、模型の高さが低いものほど小さい加速度で破壊を始めている。周波数が10Hzおよび15Hzの実験(図-7(b), (c))からは、これら5Hzと20Hzの周波数の中間的な結果であることが認められる。

次に、破壊状況については、全体的な傾向として載荷のあるものは模型が一体となってすべり出し、載荷のないものは模型の上部と中間部がすべり出す傾向にあった。この差異は、載荷により各層間のすべりに対する抵抗が高まったためと推察される。

以上より、低い周波数においてはトップヘビー状態であ

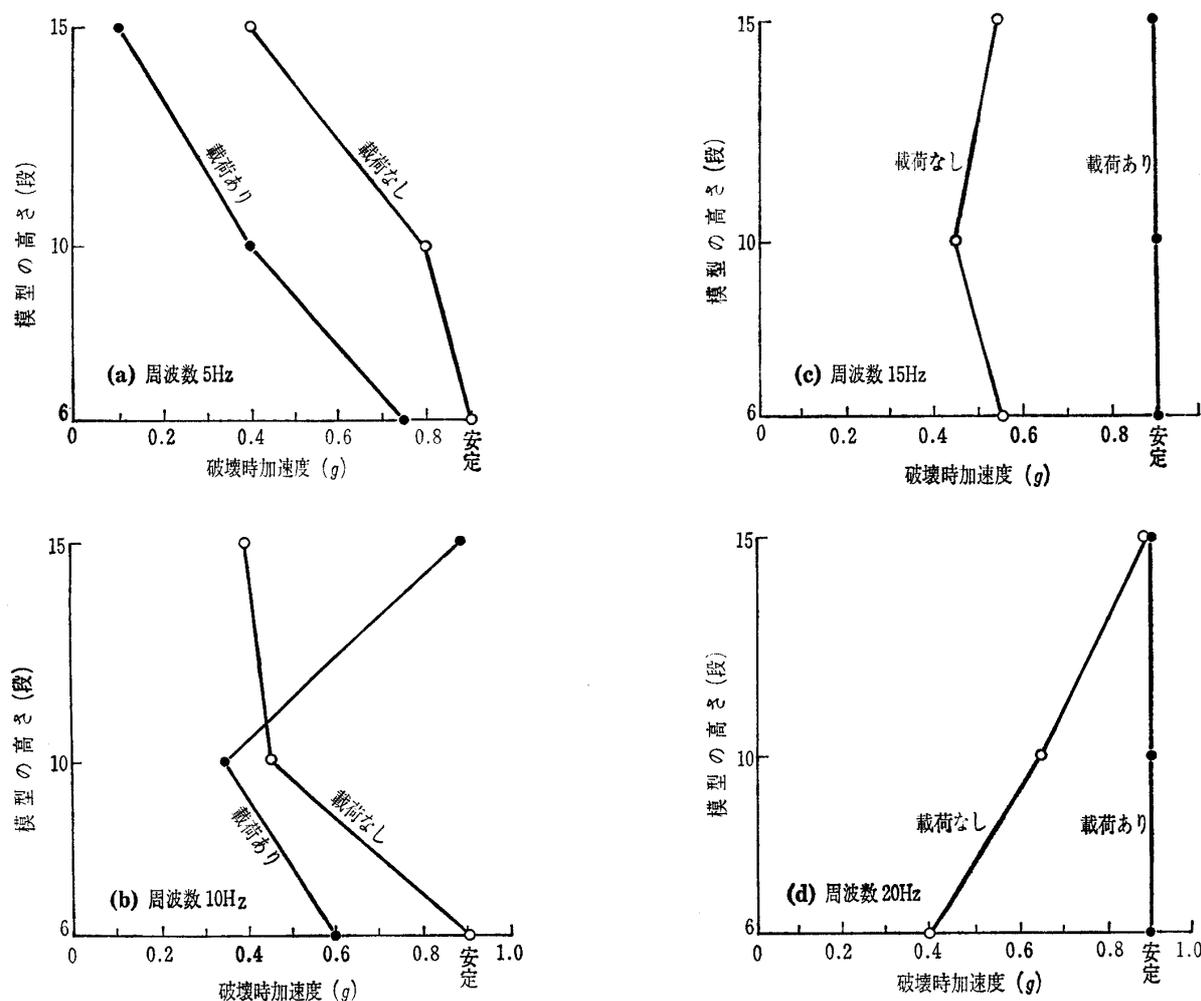


図-7 モデルAの振動特性(トップヘビー状態の影響)

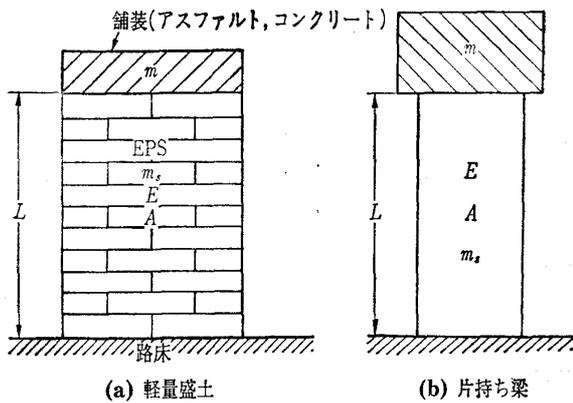


図-8 軽量盛土の片持ち梁としての仮定

ることと模型の高さが高いことが盛土を不安定にする要因であり、高い周波数においては同様のことが逆に盛土を安定化させる要因となっていることが分かる。

このように、トップヘビー状態にある軽量盛土は、低い周波数の地震動に対して盛土高さが高いほど不安定であることが問題である。

4.2 固有振動数の面からの考察

4.1 で得られた結論「トップヘビー状態にある 軽量盛土は、低い周波数で盛土が高くなるほど不安定になる」ということを、固有振動数の面から考察してみる。

図-8 に示すように、トップヘビー状態にある軽量盛土の断面は、先端に集中荷重を持つ片持ち梁と仮定することができる。このような片持ち梁が自由振動する場合の固有振動数⁶⁾は、片持ち梁(すなわち軽量盛土の EPS 材部)の質量を m_s 、集中荷重(すなわちトップヘビーとしての舗装など)のそれを m として、次のように表される。

(1) $m_s \ll m$ のとき

$$f = \frac{1}{2\pi} \omega$$

ただし

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad k = \frac{EA}{L}$$

(2) $m_s < m$ のとき

$$f = \frac{1}{2\pi} \omega_1$$

ただし

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k}{m + m_s/3}}, \quad k = \frac{EA}{L}$$

ここに、 f は固有振動数であり、 E, A, L はそれぞれ片持ち梁(すなわち軽量盛土の EPS 材部)の弾性係数、断面積および高さである。

この式から明らかなように、軽量盛土の EPS 材部の高さ L が増加するほど、固有振動数 f は小さくなる事が分かる。また、実験に用いた盛土模型の固有振動数を上式から計算すれば、いずれの模型も 5 Hz 前後と求められた。

したがって、盛土模型は低い周波数(振動数)の振動に対して、模型高さが高いほど不安定であるという 4.1 の実験結果が、理論的にも裏付けられたことになる。

実際には、軽量盛土の EPS 材部は層状をなし片持ち梁のような連続した構造をなしていないので、上述の仮定が現実と厳密に対応するとは考えにくいですが、大体の傾向としては間違っていないと判断される。

4.3 ジベルの効果

実験(2)によって得られた結果を図-9(a), (b)に示す。この図においても実験(1)と同様に、低い周波数では模型の高いことが盛土を不安定にする要因であり、高い周波数では模型の高いことが逆に盛土を安定化させる要因になるという、盛土の高さと周波数および破壊時加速度との特徴的な関係が表れている。

次に、ジベルの効果について検討を行った。周波数 5 Hz を用いた実験(図-9(a))では、すべての高さの模型でモデル B よりモデル A が小さな加速度で破壊を始めているが、全体にその差は小さい。周波数 10 Hz の実験(図-9(b))によれば、高さ 15 段の模型ではモデル A、モデル B とも破壊を起こしていないが、その他の高さの模型ではモデル A、モデル B の特性が明らかに異なっており、ジベルが効果的に働いていることがうかがえる。

実験(2)によって得た結果を模型の各高さについて、周波数と破壊時加速度の関係によって表したものを図-10(a)~(c)に示す。これにより比較を行えば、高さ 6 段の模型(図-10(a))では、周波数 10 Hz において最も小さい加速度で破壊を始めている。高さ 10 段の模型(図-10(b))においては、5 Hz, 10 Hz の周波数が最も不利なものとなっているが、周波数 10 Hz ではジベルが効果的に働いているのに対して、5 Hz ではその効果は小さい。高さ 15 段の模型(図-10(c))では、5 Hz において更に小さな加速度で破壊しており、ジベルの効果も小さい。

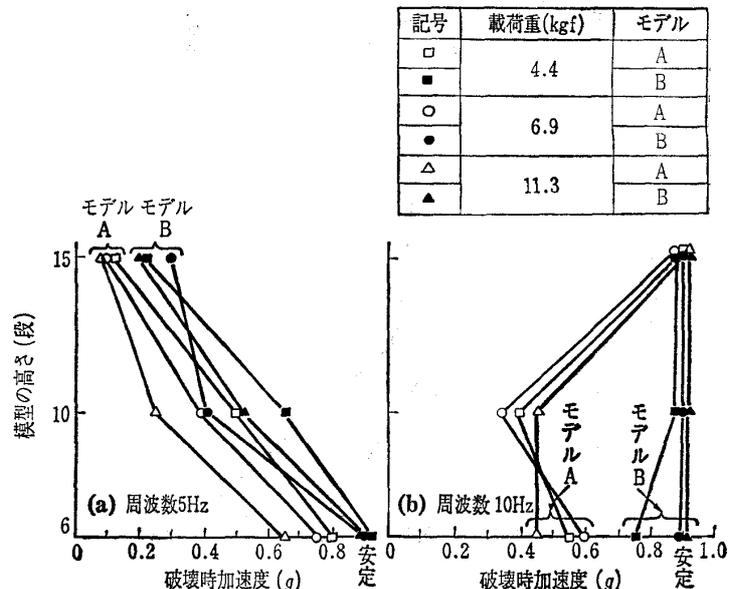


図-9 モデルAとモデルBの震動特性の比較(ジベルの効果)

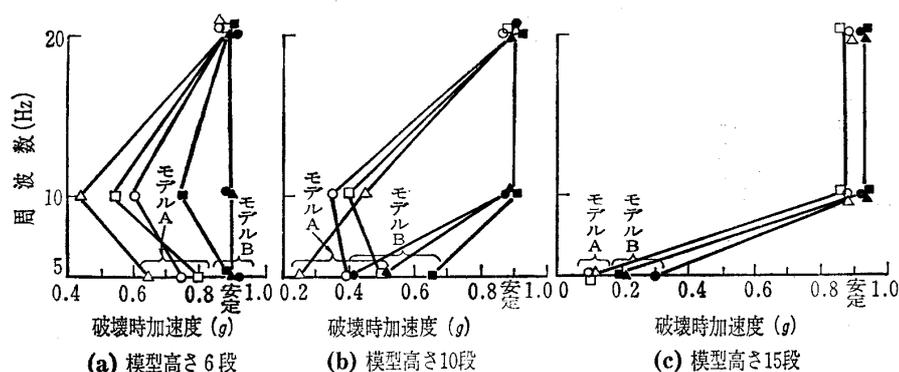


図-10 モデルAとモデルBの振動特性の比較 (記号は図-9と同じ)

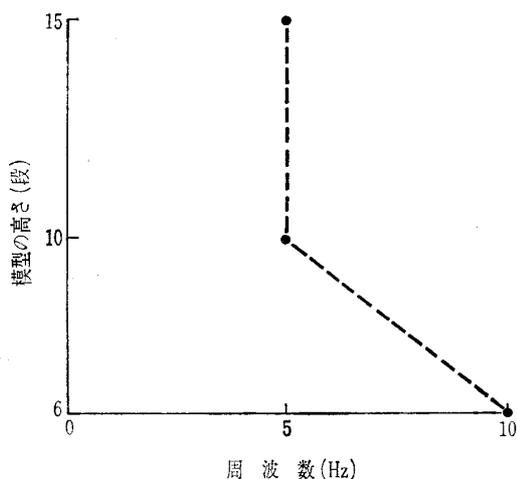


図-11 破壊を起こす模型の高さと周波数の関係

図-9, 図-10において, 載荷重の違いによる差異は明らかな傾向として現れなかった。しかし, 載荷重の変化を大きくすることにより, 何らかの特徴的な傾向が現れるものと推測される。

以上をまとめるために, 破壊が起こりやすい模型の高さと周波数の関係を模式的に図-11に示す。これによれば, 周波数 5 Hz では模型の高さがある程度低くすることにより破壊を防ぐことができ, 周波数 10 Hz の振動に対しては模型の高さを高くすることにより破壊を防ぐことができる。また, 周波数 20 Hz の振動では, 模型の高さが極端に低い場合の破壊が予想される。

ジベルの効果については, 低い周波数でその効果は小さく, また模型の高さが高くなるほど効果は小さい。

4.4 全層一体化の効果

実験(3)の結果, すべての場合について破壊は起こらなかった。実験(1), (2)によって得られた結果をまとめると, 高い周波数ではジベルの効果がかなり期待できそうであるが, 低い周波数の振動に対しては今回ジベルの代わりに用いた長さ 1 cm の針金では効果が薄く, また模型の高さが高くなるほど不安定になるというものである。

これに対して, 実験(3)で用いたモデルCは, 高さの低い模型はもちろん, 高さの高い模型に対し低い周波数の振動

を与えた場合でも安定した挙動を示した。これは, モデルCの模型に貫通させた針金が盛土全層を一体化して, 盛土の側方へのずれ, 上方への跳ね上がりを防ぐためである。また, モデルCの方法を用いた場合, 根入れ部分を長くすることにより盛土下の地盤と盛土本体との一体化が期待でき, 地震動に対する安定性の向上が更に可能であると考えられる。

4.5 大型盛土模型による検討

実験(4)には, 全層の大きさが幅 30 cm, 長さ 90 cm, 高さ 18 cm の盛土模型を用い, トップヘビーの荷重として重量 19 kgf の鉄板を模型上に載荷した。この実験模型は, 札幌市で施工された EPS 材使用盛土³⁾の横断面を参考にして, 約1/10に縮小したものである。

実験の結果を図-12に示す。モデルA (ジベルなし) とモデルB (ジベルあり) との比較から明らかなように, 特に周波数 5 Hz のとき小さな加速度で破壊が起こり, ジベルの効果は小さかった。これに対して, モデルCでは 5 Hz の低い周波数においても破壊は起こらず, 全層一体化の効果が認められた。

これらの結果は小さな模型を用いた実験(1)~(3)のそれと同じで, 4.1~4.4で述べたトップヘビーの影響, ジベルの効果および全層一体化による安定性の効果を確認させるものである。

5. 対策工法の検討

4.1 および 4.3 の結果から, EPS 材を用いた軽量盛土は, 低い周波数の地震動に対して盛土高さが高いほど不安定であり, 水平方向のずれを防ぐためのジベルは, これに対して効果が薄く余り期待できないことが明らかとなった。

この軽量盛土の地震動に対する不安定性を解決するには,

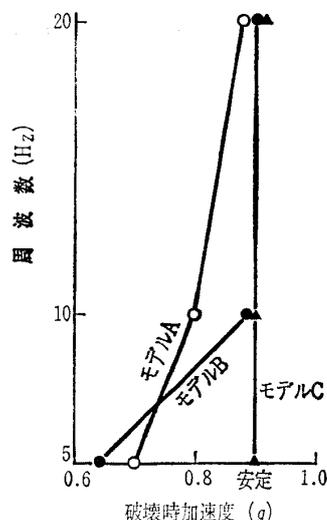


図-12 大型盛土模型における振動特性の比較

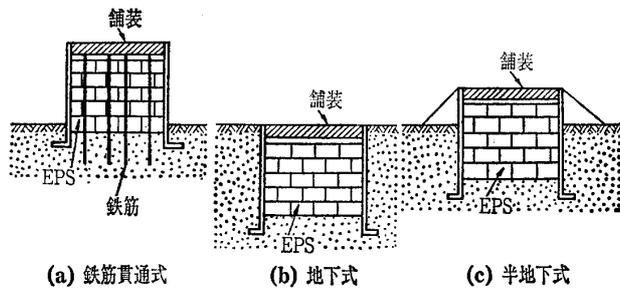


図-13 地震時安定性を向上させるための軽量盛土工法

どのような対策を採ればよいのかについて、4.4の結果は答を与えてくれている。すなわち、全層を一体化させることにより、盛土高さや地震動の周波数に関係なく盛土の安定性を得ることができる。ここでは、全層一体化の方法として針金（実際には鉄筋）を盛土の最上部から基礎の地盤まで突き通す方法を示したが、盛土そのものを地盤中に埋没させるか半没させる方法も考えてよい。

したがって、EPS材を用いた軽量盛土の地震時安定性を向上させる方法として、本論では図-13(a)～(c)に示すとおり、

- ① 鉄筋を盛土最上部から基礎地盤まで貫通させる方法（鉄筋貫通式）
- ② 盛土を地盤中に埋没させる方法（地下式）
- ③ 盛土を地盤中に半没させる方法（半地下式）

の3法を提言するものである。

6. 結論

これまでの結果から、

- (1) EPS材を用いた軽量盛土は、低い周波数を持つ地震動に対して盛土高さが高いほど不安定であること、
- (2) ジベルの効果は高い周波数に対しては期待できそうであるが、低い周波数に対しては効果が薄いことが明らかとなった。

(3) その対策として、本論では

- ① 鉄筋を盛土最上部から基礎地盤まで貫通させる方法（鉄筋貫通式）

- ② 盛土を地盤中に埋没させる方法（地下式）
- ③ 盛土を地盤中に半没させる方法（半地下式）

を提言する。

これらの方法を採用することにより、盛土は全層が一体化され、盛土高さや地震動の周波数に関係なく盛土の地震時安定性が得られることとなる。

以上、EPS材を用いた軽量盛土の地震時安定性という、未知の現象の定性的把握を目的として実験を行ったが、特に実験における相似率について疑問が残る。また、盛土模型の作製のためEPS材を小さく切断した際、正確な加工が難しく1枚ずつの板が微妙に異なってくる。このため板を積み重ねたとき段差ができ、これにより少し不自然な揺れが発生することがあり、改良されなければならない。ほかに、実験に用いたジベル相当の針金は、より実物に近いものを用いる必要があると思われる。

これらの問題点のあることを踏まえて、先の結論が得られていることを断わっておく。

謝辞：本研究を進めるに当たり、激励をいただいた北海道開発局開発土木研究所能登繁幸氏ならびに、EPS材の提供など協力、援助いただいたダウ化工株式会社および同社技術・開発本部佐野修氏に深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 能登繁幸：Lightweight Fill—軽量盛土—工法，北海道開発局土木試験所月報，No.387，pp.41～44，1985.8.
- 2) 能登繁幸：発泡ポリスチレンを用いた盛土工法，土木技術，Vol.41，No.3，pp.30～34，1986.
- 3) 佐野修・佐藤巖・能登繁幸：泥炭地盤におけるLight Fill工法，土質工学会北海道支部30周年記念「泥炭に関する研究会」論文集，pp.179～187，1986.3.
- 4) 宮下幸雄・片山賢一：発泡スチロールを用いた軽量盛土工法の施工例，舗装，Vol.22，No.8，pp.14～19，1987.8.
- 5) 塚本英樹・桃井徹：発泡スチロールを用いた土木工法に関する一考察，同上，pp.4～8.
- 6) 発泡スチロール土木工法開発機構：EPS—発泡スチロール土木工法，14p.，1988.3.
- 7) ダウ化工株式会社札幌営業所：スタイロフォーム®による軽量盛土工法，8p.
- 8) 北郷薫・露木洋二：振動学，森北出版，pp.100～104，1974.

(原稿受理 1988.11.2)