

現場発泡ウレタン盛土の実物大振動台実験

Full Scale Shaking Table Tests
of Pour in Place Rigid Polyurethane Embankments

中村和弘(なかむら かずひろ)

ウレタン土木技術研究会 技術委員長

青木徹彦(あおき てつひこ)

愛知工業大学教授 工学部土木工学科

榎本晃司(えのもと こうじ)

イノアック特材株式会社 技術部長

三田部均(みたべ ひとし)

ウレタン土木技術研究会 技術委員

1. はじめに

現場発泡ウレタン盛土工法は、軽量盛土工法の一つであり、2液の原液を現場で混合、発泡させることにより硬質ウレタンフォーム(以下 R-PUR と呼ぶ)を形成し盛土体とする工法である。

R-PUR の単位体積重量は土の約 1/50 であり軽量盛土の中でも最も軽量の部類である。しかしながらその軽量性は、舗装等の上載荷重を相対的に過大なものとし、いわゆるトップヘビ状態になる。このような特性から、その振動特性、地震時における安定性に対する基礎データの収集を目的として、愛知工業大学耐震実験センターにおいて実物大振動台実験を行った。

2. 実験概要

2.1 加振機

実験に使用する加振装置は、MTS 社製の 250kN 動的加振機 1 基で加振方向は水平一軸方向のみであり、加振軸に対する直交方向の振動が発生しないことを各実験で確認している。加振機に H 型鋼と鋼管で構成された振動台を連結し、振動台下部にはリアレールが敷かれている。

2.2 供試体

振動実験に用いた供試体は盛土体の両直型を想定したもので、支柱、壁面材、アンカ等周辺部材のない状態で地震波入力時の変位、曲げに対し最も不利な形状である。材料は「フォームライト W HM-6300W」を使用し、供試体は底辺が 3m×3m の正方形形状で、高さが 3m の供試体 TYPE-A と 6m の供試体 TYPE-B の 2 ケースである。

2.3 上載荷重

R-PUR には舗装荷重が積載される。その層厚は一般的に 70~150cm 程度であり、これを面圧に換算すると 14.7kN/m²~29.4 kN/m²前後となる。トップヘビ状態にある構造体を実験室内にて加振することからの安全性を

考慮し、一般的な上載実荷重の下限値の 1/3~1/1 までの単位面積当たりの荷重を考え、段階的に 4.9kN/m², 9.8kN/m², 14.7kN/m² の 3 種類をケースごとに載荷することとした。上載荷重は、幅 3.0m×3.0m の鋼板を供試体上面に積載し調整した。実験概略及び計測器の設置状況を図-1 に、荷重ケースごとの重量を表-1 に示す。

計測器は一軸加速度計及びレザ変位計(300mm±100mm)を使用し、加振方向加速度計は 20m/s² 用、加振直交方向加速度計は 10m/s² 用を上載荷重用鋼板上中央及び振動台上に設置し、又レザ変位計を上部拘束用鋼板側面及び振動台上加振方向に設置した。

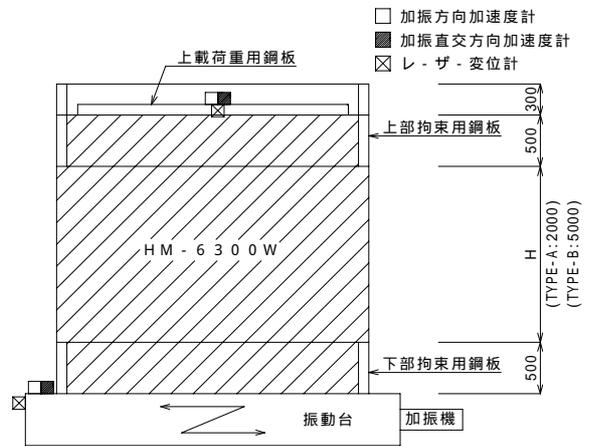


図-1 供試体概略図

表-1 供試体重量 (単位: kN)

試験体記号(上載荷重)	上載荷重	TYPE-A	TYPE-B
W ₀ (拘束用鋼板のみ)	30.7	34.0	37.3
W ₁ (4.9kN/m ²)	44.1	47.4	50.6
W ₂ (9.8kN/m ²)	88.2	91.5	94.7
W ₃ (14.7kN/m ²)	132.3	135.6	138.8

3. 実験内容及び実験結果

3.1 材料特性試験

振動台実験に先立ち、R-PUR の材料特性を調べるため、材料特性試験用供試体 3 体を用いて一軸圧縮試験を実施した。供試体は、振動台実験用供試体と同時に作成した R-PUR を直径 200mm、高さ 200mm の円柱形に切り出し使用した。試験は 2000kN 圧縮試験機を使用し、変位計は 100mm 変位計を使用した。実験から得られた応力 - ひずみ関係を図 - 2 に示す。3 体の供試体の平均値はヤング係数 $E=3.98\text{N/mm}^2$ 、降伏強度は 0.166N/mm^2 であった。

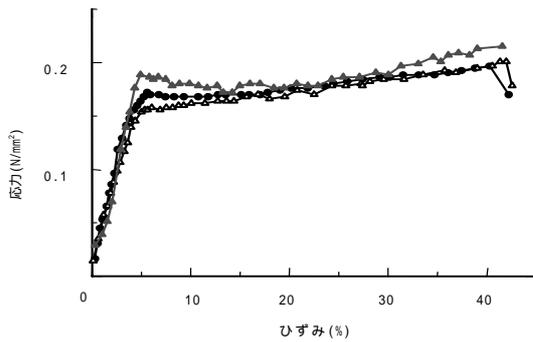


図 - 2 応力 - ひずみ曲線

3.2 共振実験

供試体の振動特性と減衰性能を調査するため、加振機により供試体に正弦波を与えその応答を計測し、共振曲線を求めた。

加振波形である正弦波は最大加速度 10gal とし、加振振動数が 0.3 ~ 5.0Hz のスイープ加振を入力した。振動台と供試体応答は、それぞれ加振方向の加速度と変位を計測し、加振直交方向は加速度計にて計測した。

実験結果から作成した各供試体の共振曲線を図 - 3 に示す。これらの共振曲線から算出した固有振動数と式(1) ~ (4)に示す計算法により得られた結果を表 - 2、表 - 3 に示す。表 - 2、表 - 3 に示されている計算固有振動数は、振動論¹⁾に示されている式(1)により算出したものである。片持ち梁の曲げ変形を考慮したもので式(2)から、せん断と曲げを考慮したもので式(3)からそれぞれ K を算出したものである。なお、このとき供試体の高さ H は R-PUR の拘束してない部分のみの高さで TYPE-A が 2m、TYPE-B では 5m である。計算固有振動数は、軽量盛土として代表的な工法で、R-PUR と同様樹脂材料である EPS 盛土の簡易固有振動数算出法²⁾によるもので、式(4)、(5)に示す。

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

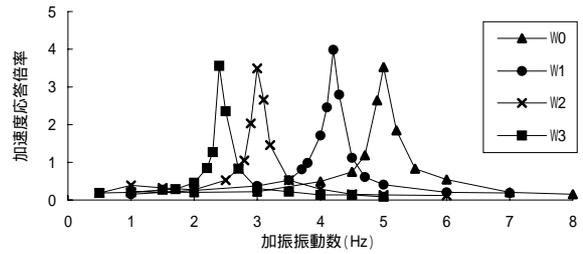
$$\frac{1}{K} = \frac{H^3}{3EI} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{H^3}{3EI} + 1.2 \frac{H}{GA} \quad \dots \dots \dots (3)$$

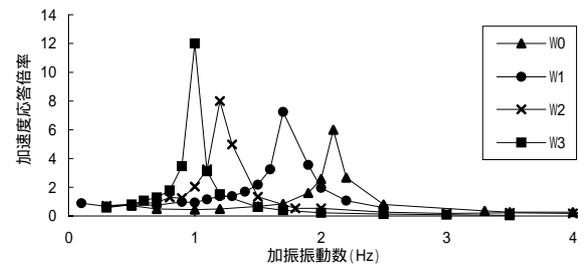
$$\frac{1}{K} = \frac{H^3}{3EI} + \left\{ 1.2 + \frac{1}{2(1+\nu)} \right\} \frac{H}{GA} \quad \dots \dots (4)$$

$$\text{式(1)と(4)から } f = \frac{1}{2 \sqrt{\frac{WH}{Eabg} \left\{ 4 \left(\frac{H}{a} \right)^2 + 1 + \frac{12}{5} (1+\nu) \right\}}} \quad \dots (5)$$

ここに、 f ：固有振動数、 K ：剛性、 m ：質量、 E ：ヤング係数、 I ：断面 2 次モーメント、 H ：高さ、 A ：全断面積(= $a \times b$)、 ν ：ポアソン比 (= 0.05)、 a 、 b ：幅、奥行き(= 3 m)、 g ：重力加速度、 $G = E / 2 (1 + \nu)$



a) TYPE-A



b) TYPE-B

図 - 3 共振曲線

表 - 2 固有振動数と減衰定数 (TYPE-A)

	W ₀	W ₁	W ₂	W ₃
固有振動数(Hz)	5.0	4.2	3.0	2.4
計算固有振動数	8.57	7.26	5.23	4.29
計算固有振動数	5.51	4.67	3.36	2.76
計算固有振動数	4.97	4.21	3.03	2.49
減衰定数 h	0.024	0.021	0.031	0.027

表 - 3 固有振動数と減衰定数 (TYPE-B)

	W ₀	W ₁	W ₂	W ₃
固有振動数(Hz)	2.2	1.7	1.2	1.0
計算固有振動数	2.07	1.78	1.30	1.07
計算固有振動数	1.87	1.60	1.17	0.97
計算固有振動数	1.81	1.55	1.13	0.94
減衰定数 h	0.024	0.049	0.053	0.040

式(2)は梁の曲げ変形のみ、式(3)は曲げにせん断変形を考慮した場合、式(4)はEPSのように柔らかい物体のせん断変形を更に補正した式を示している。

TYPE-A(表-2)では3つの計算式の結果に差が現れ、計算値がどの上載荷重に対してもよく一致している。TYPE-B(表-3)では計算式が最も精度がよいが大差はなく、一般的な上載荷重の場合どの計算値もほぼ実験値を再現しているといえる。TYPE-Aで計算値に差がでた理由は、供試体の高さ幅比が約0.67と小さく、弾性片持ち梁の自由端の変位は梁長さが短くなるほどせん断変形の影響が大きく現れることから、せん断変形を考慮した計算値のほうが計算値より精度がよく、柔らかくて変形しやすい物体のせん断変形を補正した計算値が最も精度がよい。高さが底辺の約2倍のTYPE-Bではせん断の影響は殆ど無くなっている。

減衰定数は共振曲線から算出したもので、共振曲線上で共振点 f の両側に応答値 X_{max} の $1/\sqrt{2} X_{max}$ の点を取り、この2点の幅を f とすれば減衰定数 h は $h=2f/f$ となる。

3.3 地震波入力実験

供試体に地震波形を与え、その応答から供試体の加速度応答スペクトルを求めることにより振動特性を調査し、目視により損傷の確認を行った。加振波形はレベル2地震動として兵庫県南部地震、神戸海洋気象台観測波形のNS成分をTYPE-Aでは25kine、TYPE-Bでは50kineに振幅調整して加振した。実験の安全性を考慮し、TYPE-Aでは13kine、18kine、25kineの順に、又TYPE-Bでは15kine、25kine、35kine、50kineの順に各1回加振した。図-4には応答波形から求めた加速度応答スペクトル曲線を示す。

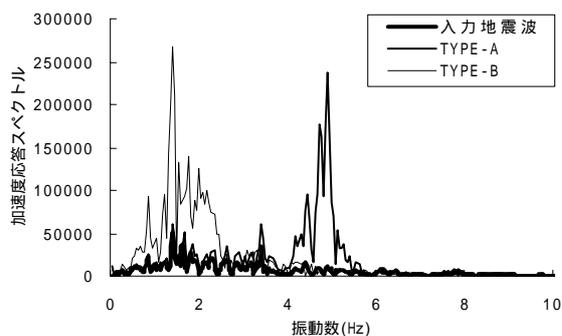


図-4 加速度応答スペクトル

供試体の地震応答スペクトルから求めた固有振動数と共振実験結果の固有振動数はほぼ一致しており、計算結果とも一致している。これは本供試体が入力地震波に対しほぼ弾性体として挙動していることを示している。もし損傷が大きく生じれば剛性は低くなるから、明らかに振動数は低い側に移行する。したがって、これは共振実験の結果と同様の手法でR-PURの固有振動数が算定できることを示している。また、加速度スペクトルに2次の固有振動数が発見できないことから、供試体は1次モードで振動する1質点系の振動モデルとして扱えることが

判明した。

3.4 耐震性能の評価

R-PURは道路等に用いられた場合、一般には側面が傾斜のある、またはほぼ垂直な地山、他の側面が杭等により支えられた垂直な人工壁の間に設置されることが多い。又、一般に水平変位、水平力はアンカ等により抑止されている。

しかし軽量盛土体の主要資材であるR-PURの耐震安全性を評価し、これを修正震度法等の耐震設計に反映させるためには固有周期、減衰定数等の適切な評価が必要となる。本研究でははじめに大型供試体2体を用いて共振実験を行い固有振動数、減衰定数を求めた。さらに2、3の計算法により固有周期の値を求め、簡易計算法により精度のよい推定値が得られることを示した。

つぎに地震波入力実験を行って地震時の実際的な挙動を確認した。具体的には計測結果から加速度応答スペクトルを描いて卓越周期を求め、弾性理論挙動の再現を確認するとともに、振動モードが1次であることを明らかにした。損傷の観察ではTYPE-A、TYPE-Bともに破壊は生じなかったが、レベル2、最大速度50kineの加振を行った最後のTYPE-Bの実験では、下部の拘束鋼板とR-PURにわずかな剥離が見られた。これは同一供試体に対していくつもの共振実験、実地震波加振実験を繰り返して行ったためとも考えられる。接合部以外の部位については亀裂等の損傷は見られず、レベル2振動に対しても十分な耐力を有することが確認できた。

4. まとめ

R-PURのTYPE-AとTYPE-Bの供試体に対し共振実験と地震波入力実験を行い、R-PURに関する振動特性および地震波入力時の影響を確認した。その結果以下の知見が得られた。

R-PURは振動時に亀裂等の損傷はなく、実験後供試体を切断したが内部の損傷は見られなかった。共振実験結果と地震波入力実験で得られたR-PURの固有振動数は、柔らかくて変形しやすい物体のせん断変形を補正した計算値により算定できる。共振曲線から算出した減衰定数は、供試体が大きくなるほど減衰定数は向上していることから、高盛土となるに従って減衰性能が向上すると予想される。レベル1(最大速度25kine)、レベル2(最大速度50kine)の神戸海洋気象台観測波形NS成分を用いた加振実験では、TYPE-AとTYPE-Bともに破壊は起こらずレベル2地震動に対し十分な耐力があるといえる。

参考文献

- 1) 柴田明徳：最新耐震構造解析，森北出版，p.6,1981
- 2) 発泡スチロール土工法開発機構編，EPS工法，理工図書，p.137,1994

(原稿受理)