

III-4 環境に配慮した山岳道路の土工計画・設計手法に関する調査

研究予算：運営費交付金（道路勘定）
 研究機関：平9～平14
 担当チーム：土質チーム
 研究担当者：森 啓年、桑野玲子
 恒岡伸幸、大野真希

【要旨】

本研究では、①山岳道路に軽量盛土工法の適用により生じる利点を定量的に把握するためのフィージビリティスタディ、②気泡混合土盛土の耐震性に関する検討の2点に関する検討を行ってきた。その結果、以下のことが明らかになった。

- ①斜面上に山岳道路を建設する場合には、軽量盛土工法を採用し盛土主体工法となるよう道路計画を行うことにより、既存の工法を採用した計画と比べて自然環境に与える影響を効果的に改善することが出来ると同時にコスト縮減を図ることが可能。
- ②適切な気泡混合土の強度と対策工を設定することにより、十分な耐震性を気泡混合土盛土に持たせることが可能。

キーワード：自然環境の保全、発生土リサイクル、軽量盛土工法、気泡混合土、耐震設計

1. はじめに

自然環境への関心の高まりとともに道路建設においても国民の環境保全への厳しい目が注がれることになった。そんな声に応えるため、エコロードの設置や環境アセスメントなどの環境保全を目的とした技術が実用化されている。このような技術の一つとして、従来のような切土を主体とした道路づくりから、盛土主体の道路づくり(盛土主体工法)へと発想を転換することにより、切土による地形の改変を最小限にとどめるものがある。

軽量材を用いた軽量盛土工法は盛土に伴う斜面の安定度の低下を最小限にとどめ、従来工法では難しい急峻な斜面上にも道路の新設および拡幅を行うことを可能にすることから、上記の盛土主体の道路づくりには有利な工法であると考えられる(図-1)。これまでに地すべり地帯の土圧軽減やのり面処理の低減を目的として軽量盛土工法を適用するケースがあり、過去の事例を整理するとこの工法には以下のような利点があると考えられる。

①自然環境の保全

地形の改変を低減することにより自然環境を保全することが可能である。

②のり面防災管理の簡素化

切土面の発生を低減することにより道路のり面防災管理の簡素化が可能である。

③建設発生土のリサイクル

気泡混合土や発泡ビーズ混合軽量土などの軽量材は現場発生土の利用が可能であり、建設発

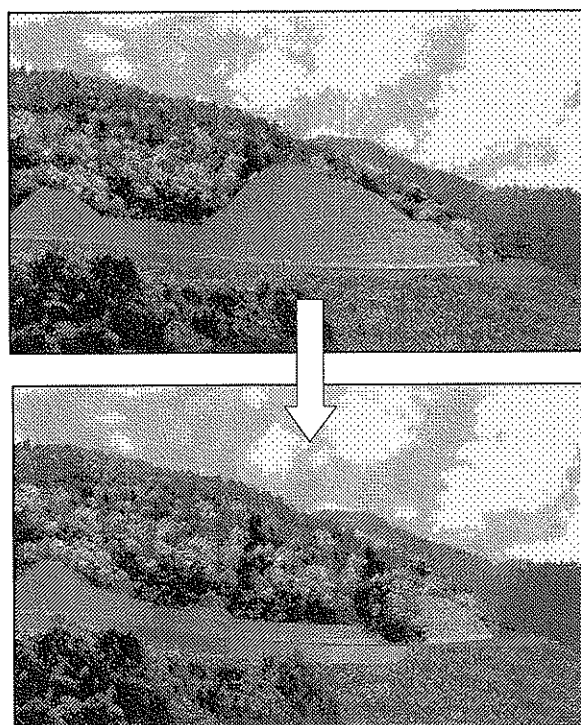


図-1 軽量盛土工法の適用イメージ

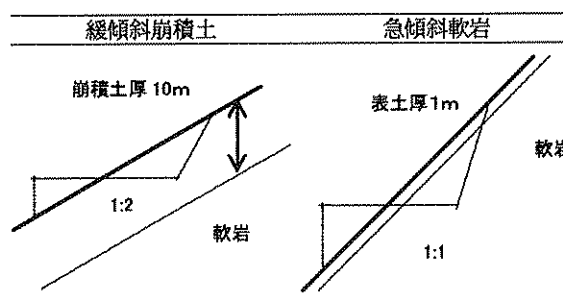


図-2 試設計ケース

生土のリサイクルが可能である。

④建設コストの低減

緑化などののり面処理に関わる工費を削減でき、道路建設の総コストを縮減することが可能である。

現在、軽量盛土工法に用いられる軽量材としては発泡スチロールブロックを用いたEPS工法のほか、現地発生土の有効利用が可能な気泡混合土や発泡ビーズ混合軽量土などが実用化されている。本研究では、現場発生土に固化材、水、発泡剤を混合して作製する気泡混合土を主な対象として、①山岳道路に軽量盛土工法の適用により生じる利点を定量的に把握するためのフィージビリティスタディ、②気泡混合土盛土の耐震性に関する検討の2点に関する研究成果について報告を行う。

2. 軽量盛土工法のフィージビリティスタディ

2.1 概要

軽量盛土工法の環境面、経済面について定量的に把握することを目的に一定の条件で断面設計を行い比較し、軽量盛土工法の適用性を検証した。

2.2 断面設計

2.2.1 手法

(1) 地形条件

緩傾斜崩積土、急傾斜軟岩(図-2)の二種を設定した。

(2) 土質定数

土質定数としては表-1のように設定した。

(3) 土工種類

土工種類としては、①切土主体の従来工法として安定勾配による切盛土、②盛土主体の従来工法として逆T擁壁・補強土、③盛土主体の軽量盛土工法としてEPS・気泡混合土、④その他の工法として棧道橋を設定した。

(4) 土工パターン

山岳道路新設のケースについて、道路中心線を谷側に設定し、盛土幅が切土幅に対して3:1の割合になるような盛土主体工法を用いた。それに対して、安定勾配による切盛土は切土のみの切土主体工法を用いた。なお、土工の結果発生したのり面には緑化を行った。緩斜面崩積土のケースには厚層基材吹付け+低木、急斜面軟岩のケースには緑化ブロックを用いた。

(5) 比較項目

地形改変量(図-3)、施工コスト(表-2)に

表-1 土質定数一覧表

種別	特性	気泡混合土	EPS	購入土
盛土材	飽和重量 (tf/m ³)	0.6	0.01~0.03	1.9
	湿潤重量 (tf/m ³)	0.6	0.01~0.03	1.9
	内部摩擦角 (度)	0.0	-	25.0
表土	粘着力 (tf/m ²)	5.0	-	0.0
	飽和重量 (tf/m ³)		1.8	
	湿潤重量 (tf/m ³)		1.8	
	内部摩擦角 (度)		20.0	
崩積土	粘着力 (tf/m ²)		0.0	
	飽和重量 (tf/m ³)		1.8	
	湿潤重量 (tf/m ³)		1.8	
	内部摩擦角 (度)		25.0	
軟岩 (花崗岩)	粘着力 (tf/m ²)		0.0	
	飽和重量 (tf/m ³)		2.4	
	湿潤重量 (tf/m ³)		2.4	
	内部摩擦角 (度)		30.0	
	粘着力 (tf/m ²)		5.0	

表-2 設計単価

工種 (単位)	単価(千円)	
	緩傾斜	急傾斜
斜面掘削工 (m ³)	1.0	1.0
発生土処理 (m ³)	3.0	3.0
埋め戻し(購入材) (m ³)	3.0	3.0
舗装工 (m ²)	8.0	8.0
盛土のり面処理工 (m ²)	8.2	1.3
切土のり面処理工 (m ²)	8.2	30.0
気泡混合土 (m ³)	19.6	19.6
EPS (m ³)	15.0	15.0

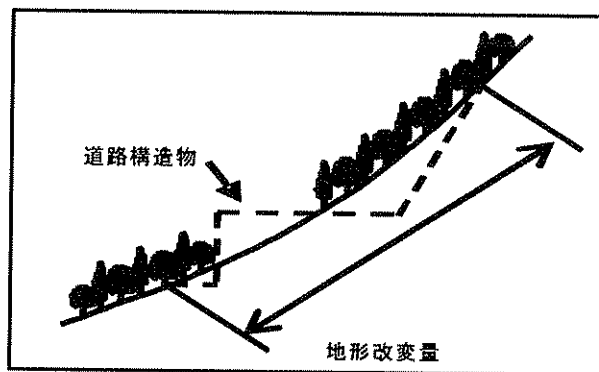


図-3 地形改変量

ついて定量的に把握し、各工法の比較を行った。

2.2.2 結果

(1) 環境面

図-4に各工法の地形改変面積を示す。

1) 緩傾斜崩積土のケース

盛土主体工法を採用することにより、切土主体の安定勾配による切盛土に比べて地形改変面積は減少する場合もあれば、補強土を用いる場合のように逆に地形改変面積が大きくなる場合がある。また、軽量盛土工法を用いることによって、補強土のように大がかりな土工にはならず、一般的に地形改変面積はわずかではあるが低減した。したがって、地形改変面積は工法に

大きく依存することが明らかになった。

2) 急傾斜軟岩のケース

盛土主体工法を採用することによって、切土主体の安定勾配による切盛土に比べて地形改変面積は約 50%以上減少した。また、軽量盛土工法を用いることによって、地形改変面積は 60%以上とさらに低減した。

(2) 経済性

図-5 に施工コストの比較結果を示す。

1) 緩傾斜崩積土のケース

安定勾配による切盛土工法に比べ、他の工法はいずれも施工コストが高くなった。しかし、切盛土は実際の施工時に別途対策工が必要となる可能性があるため、その対策工費を考えた上で判断すべきである。盛土主体工法の中で比較すると、軽量盛土工法は、従来工法である逆 T 擁壁や補強土に比べ施工コストが半分以下になっている。これは、軽量盛土工法は基礎地盤上の安定対策工が不要であり、発生土の処理量が少なく、本土工（埋め戻し材を含む）に係わる工事費が安価であることが理由であると考えられる。

2) 急傾斜軟岩のケース

盛土主体工法を採用することで、切土主体の安定勾配による切盛土に比べて施工コストは 20%以上減少した。また、軽量盛土工法を用いた工法では、現場発生土の処理量と切土法面の緑化面積が少なくなるため、施工コストは 40%以上減少した。

(3) まとめ

これらの結果から、急傾斜軟岩の場合、盛土主体の工法、特に軽量盛土工法を採用することにより地形改変面積を効果的に低減し、自然環境を保全するとともに、切土主体の工法と比較して施工コストを低減することが可能であることが明らかになった。したがって、軽量盛土工法は急斜面に適用性が高いといえる。なお、棧道橋工法は、施工コストを除き優秀な結果を取めた。

3. 気泡混合土の耐震性について

3.1 概要

気泡混合土などの軽量盛土材は新材料であるため、それを用いた構造物の耐震性についてはいまだ確認されていないのが現状である。ここでは気泡混合土が 8m を越える高盛土となった場合に必要となる耐震性の検討に対応するため実験を行い、動的遠心力模型実験における気泡混合土盛土の地震時挙動を①応答加速度、②残留

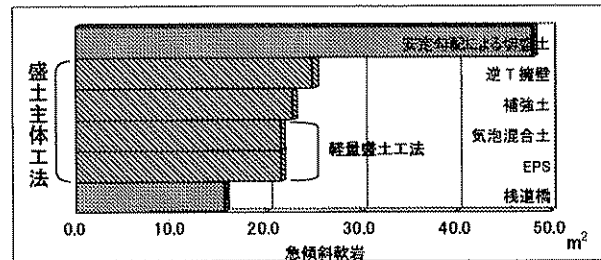
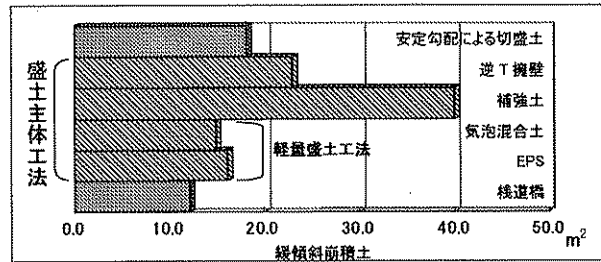


図-4 地形改変面積(1m 当たり)

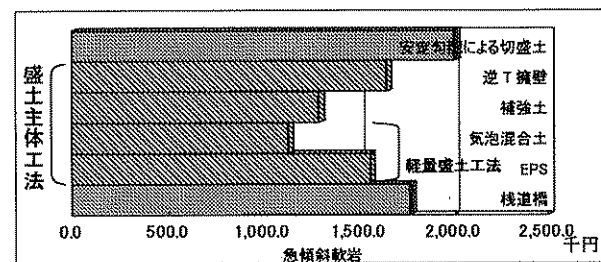
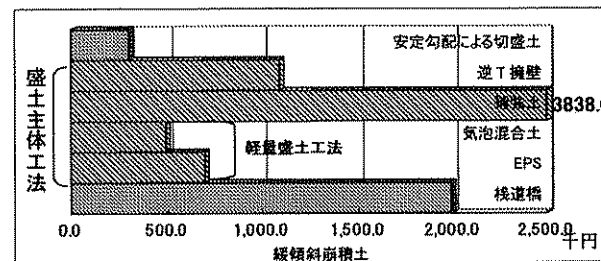


図-5 施工コスト(1m 当たり)

変位の面から観察し、気泡混合土盛土の耐震性と対策工の効果について考察した。

3.2 方法

実験は動的遠心力載荷装置を用い通常の n 倍の重力をかけることで、 $1/n$ の模型の自重応力を実物と一致させて行った。具体的な方法は以下の通りである。急斜面を模した鉄製のフレームに気泡混合土(表-3)を打設し 28 日間養生することにより高さ 12.5m の急傾斜斜面上盛土の $1/50$ 模型(図-6)を作製した。路盤及び舗装部を再現するため上載荷重として 50G 場換算 14kPa 相当になる砂鉄入り袋を盛土体上部に設置し、対策工としては小段を模型に設けたケースや抵抗杭を 1G 場換算 $\phi 50\text{mm}$ 、長さ 1m、1 本/ 4m^2 になるように釘を斜面上に設置したケースについても実験を行った。

表-3 配合及び強度特性

設計強度	試料土量 (kg)	配合(1m ³ 当たり)			一軸強度 (28日) (kN/m ²)	湿潤密度 (g/cm ³)	備考
		水 (kg)	固化材量 (kg)	気泡量 (l)			
100kN/m ²	93	326	135	582	84	0.582	
150kN/m ²	96	382	100	550	156	0.577	関東ローム
250kN/m ²	87	350	140	573	290	0.578	一般軟弱土用
500kN/m ²	75	301	200	606	474	0.595	固化材

表-4 実験ケース

実験ケース	設計強度	対策工	入力波形
1-1 正	100kN/m ²	なし	正弦波
1-2 正	〃	小段	〃
2-1 正	150kN/m ²	なし	〃
2-2 正	〃	抵抗杭	〃
2-3 正	〃	小段+抵抗杭	〃
3-1 正	250kN/m ²	なし	〃
3-2 正	〃	抵抗杭	〃
3-3 正	〃	小段+抵抗杭	〃
4-1 正	500kN/m ²	なし	〃
4-2 正	〃	抵抗杭	〃
1-1 地	100kN/m ²	なし	地震波
1-2 地	〃	小段	〃
2-1 地	150kN/m ²	なし	〃
2-2 地	〃	抵抗杭	〃
3-1 地	250kN/m ²	なし	〃
3-2 時	〃	抵抗杭	〃

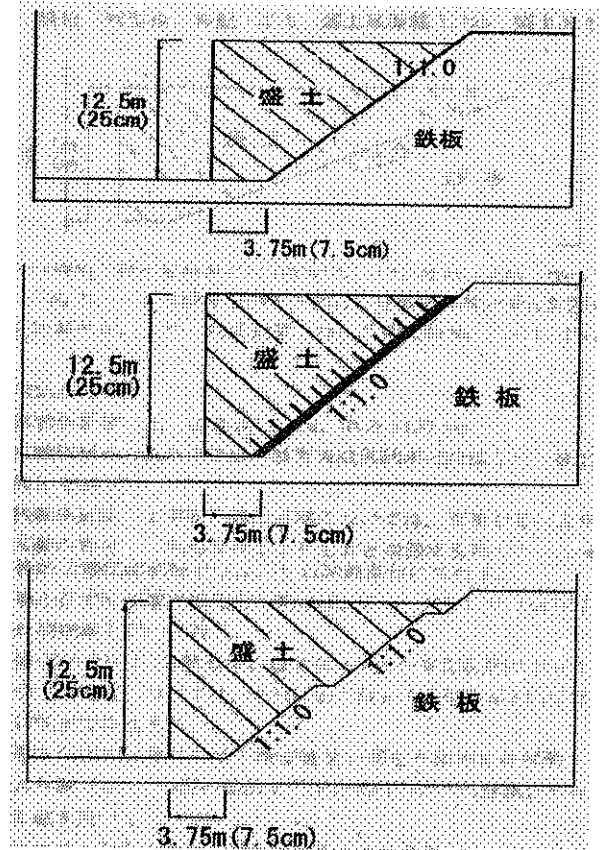


図-6 実験模型

実験は 50G で遠心载荷の後、段階的に加振し、加速度変換器、レーザ式変位計を用いて盛土体の応答加速度・変位について計測を行った。加震入力波形としては 1G 場に換算すると卓越周波数が 1.5Hz となる正弦波 75Hz20 波、地震波（神戸波 N-S 成分、卓越周波数 75Hz に調整）の二種類を用い、加震強度として正弦波は 100、200、300、400、600gal に、地震波は 200、400、500、600、800gal に基準化した波の順に加震を行った。

実験ケースは気泡混合土の設計強度、対策工、入力波が異なる 14 ケース（表-4）を行った。

3. 2 実験結果及び考察

3. 2. 1 外観

加震後の供試体の例を図-7 に示す。気泡混合土の強度を上げると、特に対策を行わない場合においても阪神・淡路大震災レベルの地震動にも十分耐えられることが確認された。強度が十分でないケースは供試体の底面から斜め上方向にクラックが入るとともに、斜面と底面の接続部に

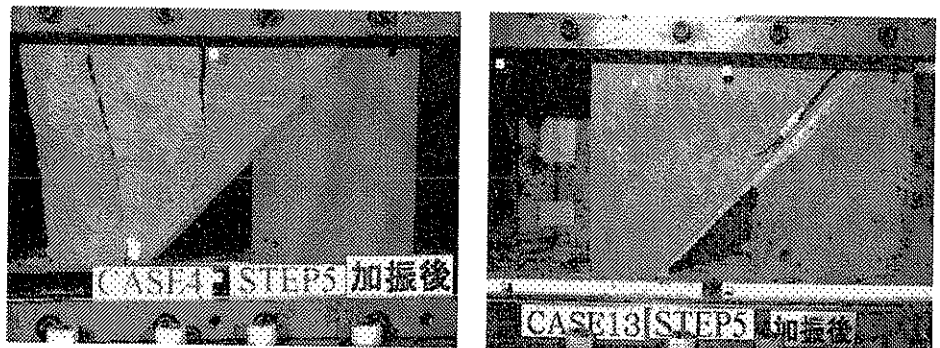


図-7 加振後の気泡混合土(800gal 地震波、左 100kN/m²、右 250kN/m²)

応力が集中し、破壊が生じた。また、小段のあるケースについては、斜面と底面の接続部とともに、小段からクラックが入ったケースが観測された。

応力が集中し、破壊が生じた。また、小段のあるケースについては、斜面と底面の接続部とともに、小段からクラックが入ったケースが観測された。

3. 2. 2 応答加速度

最も大きな応答加速度が観測された盛土肩部(図-6 盛土模型左上隅部分)の応答加速度を水平・垂直の両方向から検討した。

(1) 水平方向応答加速度

まず、水平方向の最大加速度(図-8)に着目すると、入力加速度の2.0倍程度に収まることが観測された。この傾向に関して、入力波形(正弦波と地震波)の違いによる影響はほとんど認められなかった。また、気泡混合土強度の違いによる影響についても認められない結果となった。

また、入力加速度が大きくなると水平方向の応答倍率は小さくなる傾向が見られた。これは、今回用いた気泡混合土は軸ひずみが大きくなるにつれて減衰定数が増加していることと、入力加速度が大きくなるにつれて盛土と地山の間の摩擦により失われる振動エネルギーが大きくなるためと考えられる。また、小段や抵抗杭といった対策工法を設置したことによる水平方向の応答倍率への影響はみられなかった。

(2) 鉛直方向応答加速度

次に盛土肩部の鉛直方向の加速度(図-9)に注目すると、入力波形(正弦波と地震波)の違いによる影響はあるものの、水平入力加速度が大きくなるにつれて、鉛直応答加速度が大きくなる傾向が観測された。特に地震波では水平方向の入力加速度とほぼ同じ鉛直応答加速度が観

測された。これは路盤及び舗装部を含む盛土体がトップヘビーな構造のため、加震中に盛土体と地山が分離した際に生じるロッキング的な応答に起因するためである。

また、鉛直方向の応答倍率に関しては、正弦波入力の場合では、水平方向と同様に入力加速度の増加に伴い応答倍率が低下する傾向が認められた。一方、地震波入力の場合では、明確な傾向は認められなかった。これは、正弦波入力の場合では、盛土底面部の軸ひずみが大きくなり減衰定数が増加したが、地震波入力の場合では地震波の不規則性が影響し、減衰定数が増加しなかったことが原因と考えられる。また、小段や抵抗杭といった対策工法の設置により、400~600gal付近で対策を行っていない場合と比較してやや鉛直応答加速度が大きくなる傾向がみられた。これは対策工の設置により振動のモードが変化していることを示唆している。

3. 2. 3 残留変位

盛土肩部の鉛直方向の累積残留変位は実験の結果、図-10のようになった。

まず強度の影響であるが、強度を上げると内部破壊が防止されるため同じ入力加速度であっても累積残留変位は小さくなる傾向が観測された。次に小段を設置することにより、累積残留変位を1/3から1/2程度減少させる効果があることが確認された。また、抵抗杭を設置することにより10cm以上の大きな累積残留変位が観測

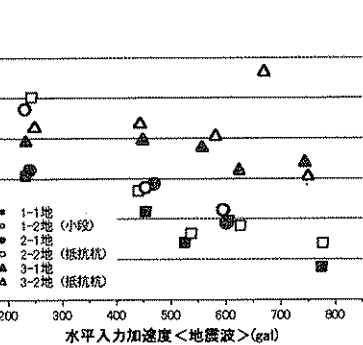
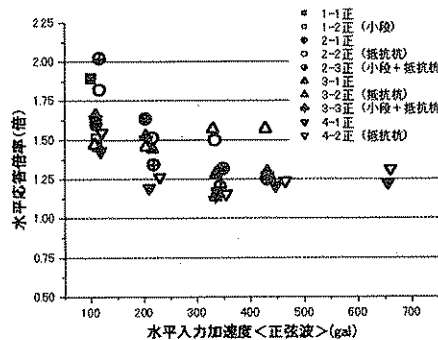


図-8 実験結果(水平応答倍率)

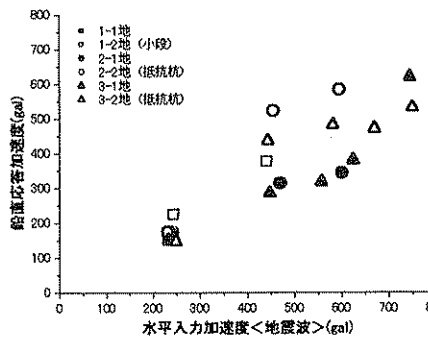
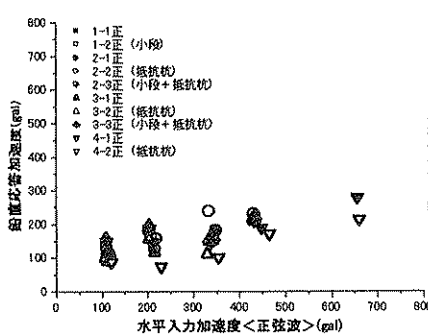


図-9 実験結果(鉛直応答加速度)

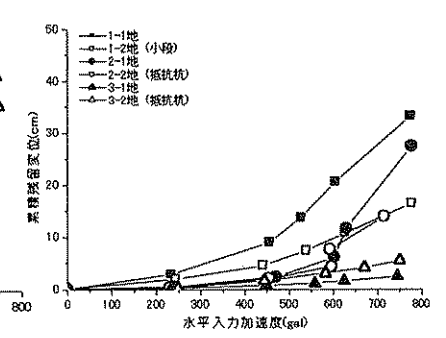
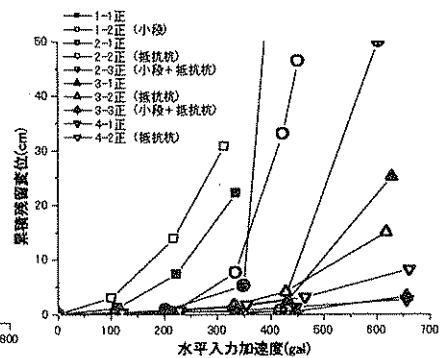


図-10 実験結果(残留変位)

されるとき最大で 1/3 程度減少させる効果があることが観測された。さらに、小段と抵抗杭を組み合わせることにより、対策がない場合と比較して 1/5 程度まで累積残留変位を抑制することが可能であり、顕著に対策工の効果が認められた。ただ、前述のように小段自体が盛土体の弱部となり得るため、適用の際には金網などの補強材などと併用することが望ましいだろう。

今回実験に使用した気泡混合土に一軸圧縮試験を行った結果ひずみ率 $\varepsilon=0.3\%$ 程度で一軸強さのピークを示し、その後ピーク強度の 100~90% で推移する。そこで盛土体の内部で破壊が進行し始める累積残留変位を 5cm (盛土高さの 0.375%) と仮定すると、強度 250kN/m² の正弦波では入力加速度 450gal、地震波では入力加速度 600gal において内部破壊は生じていないことから、気泡混合土盛土は十分な耐震性を持つと考えられる。なお地震波に対する累積残留変位が正弦波のものと同じ入力加速度においても小さくなる傾向を示す理由としては、地震波の不規則性が影響していることが考えられる。

3.3 まとめ

動的遠心模型実験により気泡混合土盛土の耐震性を強度・対策工の効果の面から検討し、以下のような結果を得た。

- ① トップヘビーなため水平方向の応答だけでなく、鉛直方向の応答が生じる。そこで盛土の内部破壊を防止するため、水平方向だけでなく鉛直方向の応答も加味して強度設定を行う必要がある。
- ② 小段や抵抗杭の設置により、変形の累積残留変位が小さくなる。地震時の変形を抑制するためには対策工の設置が有効である。

以上から、適切な気泡混合土の強度と対策工を設定することにより、十分な耐震性を気泡混合土盛土に持たせることが可能である。

4. 結論

本研究では①山岳道路に軽量盛土工法の適用により生じる利点を定量的に把握するためのフィジビリティスタディ、②気泡混合土盛土の耐震性に関する検討の 2 点に関する検討を行ってきた。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① 急斜面上に山岳道路を建設する場合には、軽量盛土工法を採用し盛土主体工法となるよう道路計画を行うことにより、既存の工法を採用した計画と比べて自然環境に与える影響を

効果的に改善することが出来ると同時にコスト縮減を図ることが可能。

- ② 適切な気泡混合土の強度と対策工を設定することにより、十分な耐震性を気泡混合土盛土に持たせることが可能。

参考文献

- 1) 中野穰治、小橋秀俊、三木博史「環境にやさしい山岳道路づくりについて～地形改変を低減させる軽量盛土工法～」月間建設、pp.12-14, 1999.6
- 2) 西村明、三輪雅夫、千田祐司「気泡混合土を用いた組立自立外壁パネル工法の開発」ダム技術、pp.47-50, 2000.4
- 3) 三木博史「法面保護と緑化技術の最新動向」日経コンストラクション、pp.97-100, 1999.7.23
- 4) 中野穰治、三木博史、小橋秀俊「急斜面上の軽量盛土の耐震性に関する実験的考察」第 35 回地盤工学研究発表会、pp2169-2170, 2000.6
- 5) 森啓年、中野穰治、恒岡伸幸「急斜面上の気泡混合土盛土の耐震性に関する実験」第 36 回地盤工学研究発表会、pp2043-2044, 2001.6
- 6) 恒岡伸幸、中野穰治、森啓年、三木博史「地形改変を低減する軽量盛土工法の適用」土木技術資料 43-10, pp62-67, 2001.10