

低品質発生土と減容廃棄 EPS を用いた 軽量地盤材料の開発とその擁壁裏込め材への利用

棚橋 由彦*・蔣 宇静*
伊藤 智則**・日高 公大***

Study on reuse of construction waste soil and de-aired EPS as the lightweight backfill material

by

Yoshihiko TANABASHI*, Yujing JIANG*, Tomonori ITOU** and Koudai HIDAKA***

Processing of the waste that increases every year has been an important issue in Japan. Industrial waste including EPS waste runs short of disposing space, the development of its reuse technique as a new resource is needed. Moreover, a lot of construction waste soil is produced by urban development or underground use while the disposing space is limited. Accordingly, it is thought that development of lightweight backfill material that used EPS waste, and construction waste soil is useful approach not only on economical but also environmental points.

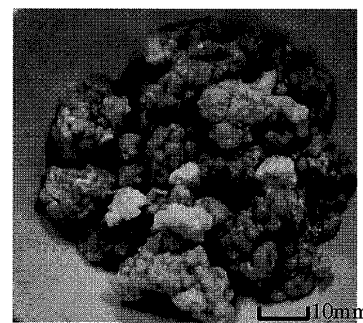
This paper aims at developing a recycling technique for effectively use EPS waste and construction waste soil. The method of reducing the volume of EPS waste is described. The possibility of recycling EPS waste and construction waste soil as the lightweight backfill material is discussed based on the experimental and numerical examinations.

1. 序論

生活・産業廃棄物の代表格である廃棄発泡スチロール(廃棄 EPS)は、近年増加の一途をたどっている廃棄物である。しかし、廃棄 EPS を焼却処分する場合には、多くの資源・エネルギーを必要とするばかりか、周辺にダイオキシン等の有害物質を発生させる可能性も高い。また、現在廃棄物処分場の確保の制約や、処分場の埋立て量に限界があることから、新たな資源として再利用する技術の開発が急務となっている。一方、近年、都市開発の活発化や地下利用の増大に伴い、建設現場から発生する建設発生土の増加も問題となっている。特に土工や浚渫工事等の建設現場から発生する軟弱土や粘性土は増加の一途を辿っている。その結果、現在では建設発生土の処分地の確保が困難な状況にあ

り、処分費用も急騰していることから有効利用促進が求められている。

本研究では、減容化した廃棄 EPS (以下、ペレットと呼称)の軽量性や強度に着目し、建設発生土とペレットを互層積層および混合した材料を擁壁裏込め材として使用することで再資源化を図ることを目的とする。



Picture.1 The de-aired EPS (pellet).

平成15年4月18日受理

*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

**北九州市役所 (Kitakyusyu City Hall)

***生産科学研究科博士前期課程 (Graduate Student, Graduate School of Science and Technology)

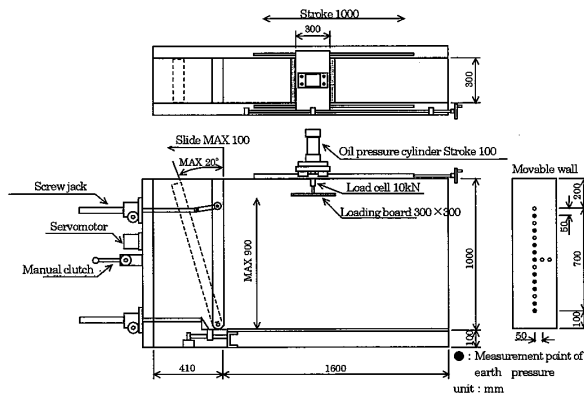


Figure.1 Experiment equipment of retaining wall.

Table.1 Physical properties of materials on this research.

Item	soil	pellet	mixture
Density γ_t (kN/m ³)	13.4	3.7	9.5
Water content w (%)	7.67	—	—
Cohesion c' (kPa)	0.35	64.2	24.5
Friction ϕ' (°)	16.0	39.7	24.1
Poisson's ratio ν	0.27	0.26	0.265
Young's modulus E (MPa)	2.9	0.47	1.275
Bulk modulus K (MPa)	2.1	0.326	0.78
Shear modulus G (MPa)	1.14	0.186	0.435

提案する工法は、擁壁に作用する土圧の低減が可能となり、擁壁の躯体削減につながると考えられるため、コスト削減に効果がある。また、本工法は施工的にも簡便であることから、土木構造物の工事費の低減に様々な場面で寄与できるものと考えられる。本研究で用いたペレットを Picture.1 に示す。また、建設発生土とペレットを互層積層・混合した裏込め材を構築した擁壁模型実験を実施するとともに、擁壁に作用する応力・変形解析、擁壁の主働回転移動に伴う裏込め土の挙動の把握および擁壁の安定計算を行い、擁壁裏込め材としての再利用の実現可能性を検討した。

2 擁壁模型実験による評価

2.1 模型実験装置

擁壁模型実験装置の概要を Figure.1 に示す。本実験装置は、前面が透明強化ガラスとなっており、裏込め材の挙動を観察することができ、可動壁は手動クラッチの切替えにより平行移動および下端ヒンジ回転移動が可能である。载荷装置は、電気-油圧サーボシステムであり、任意の荷重条件による静的・動的载荷が行え、それ以外の操作・データ収録に関しては全て専用制御装置・スキャナを用いて自動的に行える。

2.2 実験材料・実験条件

本研究で使用する建設発生土は、長崎県西彼杵郡長与町の工事現場より採取されたものであり、ペレット

Table.2 Triaxial compression test cases.

Case	Cohesion (kPa)	Friction (°)
4 layer laminating	28.7	26.6
6 layer laminating	52.5	24.5
Mixture (s : p = 3 : 1)	0.65	22.4
Mixture (s : p = 1 : 1)	24.5	24.1
Mixture (s : p = 1 : 3)	54.2	25.8

s : soil, p : pellet

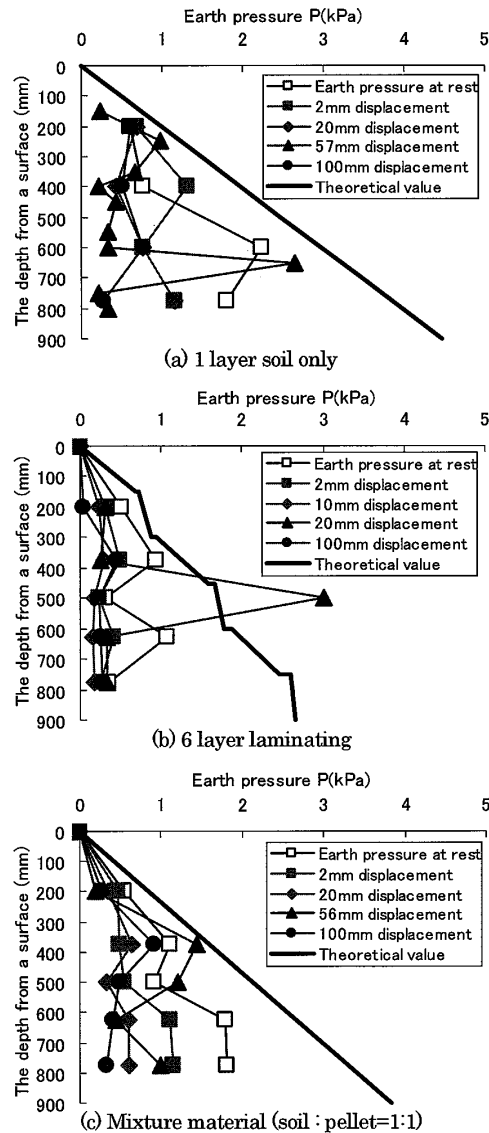


Figure.2 The earth pressure distribution in the depth direction with the rotation of retaining wall movement.

は長崎魚市場協会にて減容化装置を用い生成されたものである。その物性値を Table.1 に示す。減容化前の EPS の耐熱温度は70°C程度である。減容化を行うことで限界耐熱温度が上がり、約100°Cであることが本研究により確認されている。発生土の粘着力は極めて小さく、ペレットと比較すると約 1 / 180 となる。ペレットの粘着力は、表面形状の凹凸によるインターロッキング効果により見かけ粘着力が発揮される。両材料を混合(体

積比 1:1) することで発生土単体での粘着力の約 70 倍となる。本実験の裏込め材としては、発生土単層、表層を発生土とした互層積層、混合土を用い、最大粒径を 19mm と規定した。本来、発生土・ペレット共に最大粒径を細かに規定し、裏込め材中に間隙を作らないよう実験することが望ましいが、本実験では実地盤を想定しているためこのような材料を用いる。土圧計は、粒径の大きな材料が作用すると、受圧面内の土圧分布が一様でなくなるため、土圧測定精度が低下する。そのため、受圧面に接する裏込め材には細かにした材料を用い、正確な土圧を計測できるように工夫した。実験機の土槽は鋼製で前面観測部全面を強化ガラスとなっているため、裏込め材との摩擦は殆ど無いと考えられる。可動壁の移動法としては、擁壁または盛土材が破壊する際の変形挙動を想定し、回転移動を採用し、擁壁天端移動速度は 14mm/min とする。荷重法については無荷重、定圧荷重(部分, 全面)および動的荷重(部分)を行うこととする。模型実験では、可動壁と土層中に小型土圧計を設置し、静止土圧と回転移動時の土圧を測定する。実験ケースは、積層数および混合土における体積比を変化させた数ケースの実験を行い、荷重においても上述した 4 パターンを行ったが、ここでは無荷重時における発生土単層、6 層積層、両材料が等体積比の混合土の結果について詳述する。また、本研究では積層および混合材の力学的特性の把握として 4 層積層、6 層積層、発生土とペレットの体積比が 3:1, 1:1, 1:3 の 5 ケースについて三軸圧縮試験を行った。その結果を Table.2 に示す。この結果より積層数増加およびペレットの体積比が大きい材料での強度増加が明らかとなった。

2.3 実験結果と考察

擁壁変位に伴う深度方向の土圧分布を Figure.2 に示す。目視破壊が確認された擁壁天端変位は、発生土単層では 57mm, 6 層積層では 10mm, 等体積混合土では 56mm であった。静止土圧の理論値においては裏込め材を等方弾性体と仮定し、フックの法則を用いた静止土圧係数を使用する。静止土圧係数 K_0 を次式によって求める。

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (1)$$

ここに、 ν はポアソン比である。

各実験の静止土圧について理論とは多少差異を示した。この要因として、裏込め材料構築中に上層の自重による沈下等により、受圧面に作用する土圧が一様でなくなったのではないかと考えられる。しかし、層深

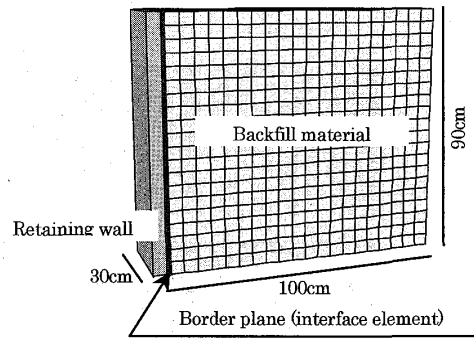


Figure.3 Analytical model.

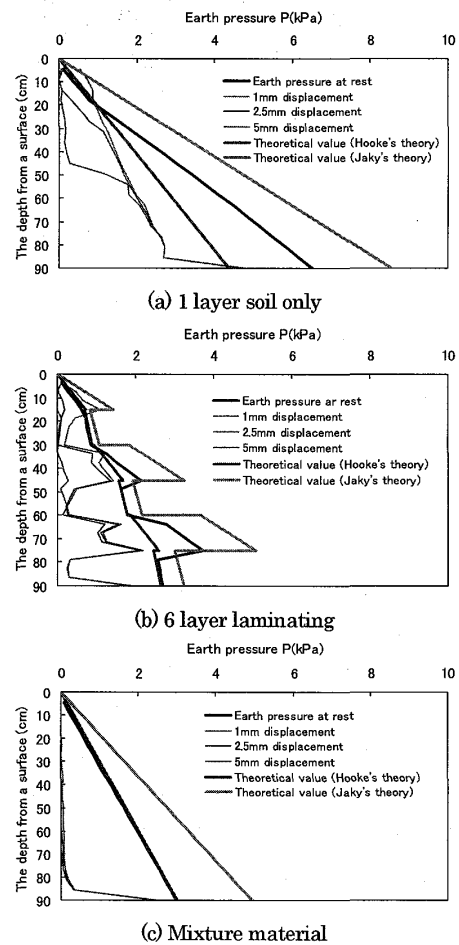


Figure.4 Earth pressure acting on wall with the rotation of retaining wall.

部になるに従い土圧が増加していることや、積層構造のペレット層で土圧の軽減が図られていることから、理論と近似的な傾向を示していると考えられる。また各ケース共に擁壁移動直後に土圧低下がみられ、静止土圧から主動土圧へ移行する際の土圧挙動が確認された。積層および混合することで土圧の軽減が図れ、ペレットを使用することは軽量裏込め材構築に効果が現

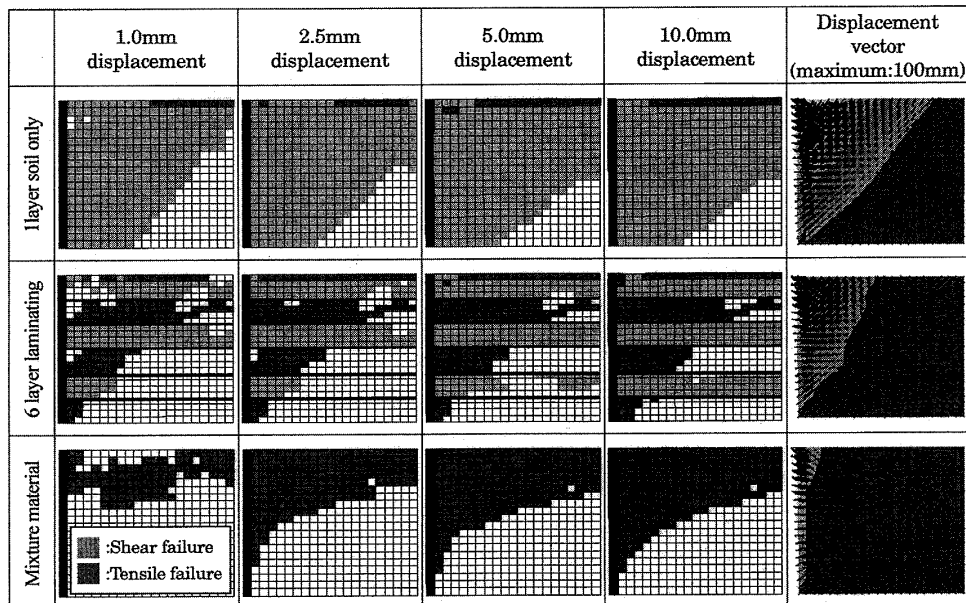


Figure.5 Progress of failure zones and displacement vectors with the rotation of retaining wall.

れた。裏込め材の破壊挙動においては、まず発生土層に破壊が生じ、その破壊影響がペレット層に及ぶという結果が得られた。そのため、互層積層しても目視破壊が早く生じる可能性がある。しかし、混合材はペレットが一様に分布されているため、それ特有のインターロッキング効果が広範囲に及び目視破壊が生じる変位が増大したと考えられる。

3. 数値解析による評価

3.1 解析手法および条件

本研究の解析手法として、材料の大変形挙動を取扱える有限差分解析法を用いる。発生土およびペレットを裏込め材として使用する場合での擁壁の挙動を調べるために、模型実験の条件を考慮して解析を実施した。解析モデルを Figure.3 に示す。擁壁と裏込め材間には interface 要素を設置し、境界面を作成した。解析ケースは実験と同様のものを用いる。

3.2 解析結果の考察

Figure.4 には、擁壁天端変位に伴う土圧の深度方向の土圧分布を示す。図示している静止土圧理論は擁壁模型実験の際に述べたフックの法則と次式で示す Jaky の理論を示している。

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (2)$$

ここに、 ϕ は内部摩擦角(°)である。

静止土圧において、解析結果と理論値が異なる要因として、それぞれの計算法において、使用する物性値の違いが考えられる。しかし、解析値は両理論値間に

存在することとなり、整合性が確かめられた結果となった。裏込め材にペレットを用いた材料の層深部は両ケース共に約 60% の土圧低下が明らかとなった。また、実験同様擁壁変位直後での土圧低下がみられた。特にペレット層および混合材に至っては、土圧低下が顕著に現れている。

Figure.5 には、各解析ケースにおける擁壁の主働回転に伴う塑性領域の進展と変位ベクトルを示す。発生土単層時では擁壁回転移動直後に裏込め材の広範囲にせん断破壊領域が広がり、変位を続けるに従い破壊領域が裏込め土全体に及ぶ。これは、強度の低い低品質な発生土を利用した結果であった。積層材については、上層に構築している発生土層上部とペレット層に引張破壊が生じ、その他の発生土層にはせん断破壊が生じた。ペレット自体に引張強度が皆無な状態なため、このような結果が得られた。発生土層とペレット層を比較してみると、擁壁変位が小さい時はせん断破壊領域の伝播が速いため発生土層における破壊が目立つが擁壁変位が進むにつれペレット層における引張り破壊が増加している。しかしペレットには軽量性と見かけ粘着力に頼った強度が見込まれるため破壊領域の拡大を抑制することが明らかとなった。混合材においては、せん断破壊が生じず引張り破壊のみとなった。これは発生土とペレットを混合することで引張強度が僅かとなった結果である。

各解析ケースでの変位ベクトルをみると破壊領域と変位している材料の領域に差異が観られるが、変位が 0 ~ 1mm のものは同色で示しているため、実際は破壊領域と同様な部分で変位が生じている。例えば、混合

材での擁壁付近の層深部では約 0.5mm 程度変位している。ペレットを使用することで裏込め材の変位抑制が期待出来る結果となった。混合材では、発生土単層時と比較すると、物性値でも示したように強度増加が生じるため変位が抑制されている。擁壁付近のみの変位となる。裏込め変位による結果において、ペレットを用いた材料の自立性が明らかとなった。

4. 擁壁の安定計算

4.1 安定計算の概要

高さ 5m の擁壁を想定し、擁壁に作用する土圧合力等の数値解析を行う。擁壁と裏込め材の概要図を Figure.6 に示す。比較のため、擁壁に作用するクーロン主働土圧も求める。次に擁壁の自重等を考慮し、①転倒に対する安定、②すべりに対する安定、③地盤支持力に対する安定の 3 つの安定条件を満足するように、擁壁の形状・寸法を決定する。

4.2 設計条件

水平地盤上に重力式コンクリート擁壁を設置し、裏込めの積層数、混同材の体積比の違いによる擁壁の構造について安定計算を行った。設計条件を Table.3 に示す。擁壁の高さは $H = 5m$ 、擁壁の天端幅 A 、底面幅 B としており、発生土単層および、互層積層(2,3,4,5,6,8層)と混合材(体積比、発生土:ペレット = 3:1, 1:1, 1:3)について計算を行った。また既往研究¹⁾において、表層を発生土もしくはペレットとした場合と比較を行ったが積層数が増加するに従い土圧合力およびその作用点の違いは無くなるという結果を得ている。しかし、実現場では表層をペレットにするとその軽量性から飛散することやアスファルト直下に敷設すると溶出する等の問題を有するため、施工性の面から表層を発生土と規定した。互層積層の両材料層厚は同一値

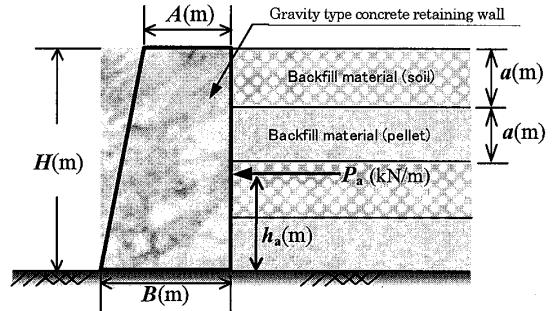


Figure.6 Structure of gravity concrete retaining wall.

Table.3 The design conditions of retaining wall.

Retaining wall (concrete)		
Density γ_c (kN/m ³)	23.0	
Foundation ground		
Permission support power of the foundation ground σ_a (kPa)	300.0	
Backfill material		
soil	pellet	mixture
The rate of design safety		
The design safety factor to a rotation f_s	1.5	
The design safety factor to a slide f_t	1.2	
The design safety factor to the bearing capacity of ground f_b	1.2	

とする。

4.3 計算結果と考察

擁壁の安定計算結果を Table.4 に示す。なお、表中 W_0 は発生土単層時の擁壁の重量である。Figure.7 にはクーロンおよび解析結果から得られた土圧合力とその作用点および擁壁の躯体削減率を示している。

解析から求めた主働土圧合力を比較する。積層数の増加で土圧合力の減少が明らかとなったが、ある程度の積層数で土圧合力値が収束すると考えられる。また発生土がペレットの体積比を上回る奇数層では土圧合

Table.4 Stability calculation and the acting point of the active earth pressure.

Case	Earth pressure by analysis					Active earth pressure by coulomb's theory				
	A (m)	B (m)	The weight ratio of retaining wall W/W_0	Active earth pressure P_a (kN/m)	An acting point h_a (m)	A (m)	B (m)	The weight ratio of retaining wall W/W_0	Active earth pressure P_a (kN/m)	An acting point h_a (m)
1 layer of only soil	1.7	2.2	1.00	84.48	1.55	1.6	2.2	1.00	82.22	1.67
2 layer laminating	0.5	1.6	0.54	48.48	1.93	0.3	1.7	0.53	42.63	2.23
3 layer laminating	0.9	1.7	0.67	55.27	1.60	0.3	1.8	0.55	48.12	2.3
4 layer laminating	0.6	1.5	0.54	48.11	1.74	0.3	1.5	0.47	40.67	1.95
5 layer laminating	0.7	1.5	0.56	49.98	1.60	0.4	1.9	0.61	46.16	2.65
6 layer laminating	0.5	1.5	0.51	46.65	1.68	0.3	1.5	0.47	39.98	1.86
8 layer laminating	0.5	1.5	0.51	46.06	1.66	0.3	1.5	0.46	39.1	1.938
Mixture (soil : pellet=3:1)	0.8	1.6	0.62	50.86	1.62	1.3	2.0	0.87	71.54	1.67
Mixture (soil : pellet=1:1)	0.5	1.4	0.49	40.38	1.63	0.8	1.7	0.66	55.47	1.67
Mixture (soil : pellet=1:3)	0.4	1.1	0.38	26.36	1.63	0.2	1.4	0.42	35.38	1.67

力増加が確認された。クーロン土圧理論により算出した土圧合力においては、無載荷時では積層数の増加はあまり影響を及ぼさない結果が得られた。

ここで注目すべきことは、積層構造では、解析結果の方が土圧合力が大きいのに対し、混合構造ではクーロン土圧理論の方が大きい。この要因としてクーロン土圧理論では主働土圧を採用しているのに対し、解析では静止土圧の合力を求めていることや解析の考察でも述べたが計算で使用する物性値の相違が考えられる。作用点では、単層および層数が多い積層構造で1.6m前後と安定している。Figure.7(c)には擁壁の重量比を示すが重量比とは各ケースの擁壁重量を発生土単層時の擁壁重量で除したものである。擁壁の躯体削減率 $[(1 - \text{擁壁の重量比}) \times 100\%]$ において、積層構造では全体的に40～50%程度、混合土では当然の事ながら混合土のケースは、発生土とペレットの体積比が影響

を及ぼす事となり10% (s3p1)から57% (s1p3)の削減が可能との結果が得られた。

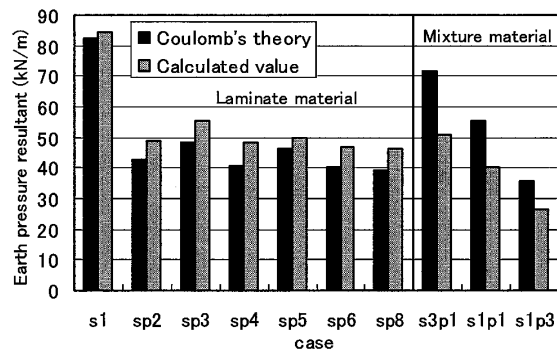
5. 結論

擁壁模型実験および解析結果よりペレットを裏込め材として使用することは土圧低減に効果があり、層深部に至るにつれその効果が顕著に現れることが明らかとなった。自立性に関しては、ペレット層の上部に自重のある層の構築および応力を作用させることでインターロッキング効果が現れることとなった。解析では、発生土単層時に擁壁の主働回転に伴いせん断破壊が生じ、裏込め全体にその影響があるが、ペレット使用材では、擁壁移動の影響が少なくなることが破壊状況より明らかとなった。擁壁の安定計算においては、発生土単層時より擁壁の躯体を約50%削減出来ることを明らかとした。

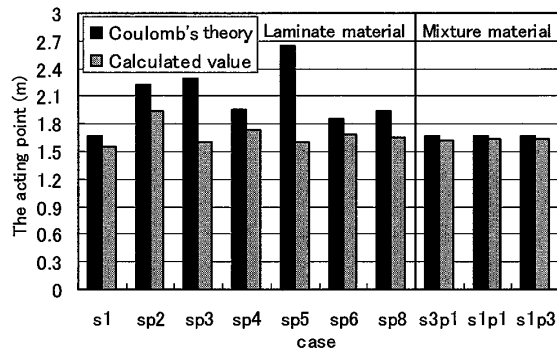
ペレットと建設発生土は廃棄物および建設副産物であることから安価で容易に入手できる。擁壁の躯体削減からも、施工時のコスト削減が期待できる。積層材と混合材を比較すると、土圧の低減効果に差はみられなかったが、実現場で両材料を大量にしかも均一に混合する等の施工性を考慮すると積層材を用いる方が有用であると考えられる。廃棄物を処理する際、環境に与える多大な悪影響をペレットと低品質な発生土とを積層し擁壁裏込め材などとして再利用することで最小限に抑えることが望める。以上のことから、これらの廃棄物は地盤材料として再利用することが十分に期待できる。

【参考文献】

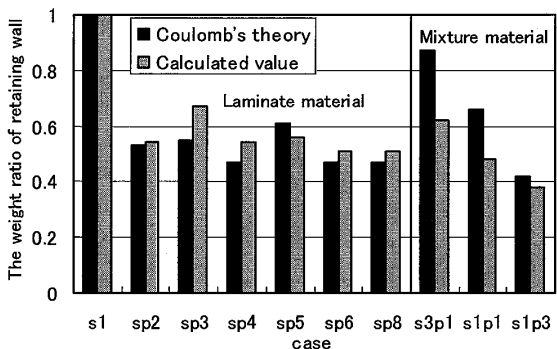
- 1) 棚橋由彦, 陣野 晃, 茂山史憲, 黒瀬正行, 杉山和一, 平岡教子: 廃棄発泡スチロールと低品質建設発生土の軽量積層擁壁裏込め材としての再利用に関する基礎的研究, 軽量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム論文・報告集, 地盤工学会, pp.231-236 (2000.5)
- 2) 清水裕介, 伊藤智則, 棚橋由彦, 蔣 宇静: 建設発生土と廃棄 EPS の擁壁裏込め材としての再資源化に関する研究, 第56回土木学会年次学術講演概要集, 熊本, III -A214, CD-ROM (2001.9)
- 3) 棚橋由彦, 蔣 宇静, 持下輝雄, 伊藤智則, 日高公大: 建設発生土と廃棄 EPS の積層・混合軽量裏込め材としての再資源化に関する研究, 第38回地盤工学会研究発表会講演概要集, 秋田 (2003.7)



(a) Earth pressure



(b) The acting point



(c) The weight ratio of retaining wall

Figure.7 Stability calculation result.