

鉄鋼スラグを用いた環境にやさしく地震に強い盛土工の研究開発

研究代表者

神戸大学大学院

教授

澁谷 啓

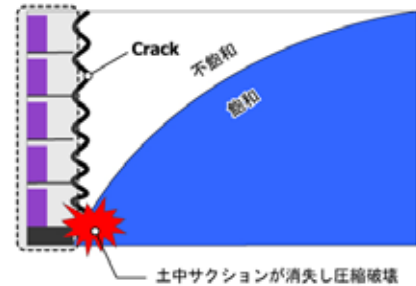
1. はじめに

近年、雨水浸透に起因して補強土壁が被災する事例が増えている。平成 16 年台風 23 号の豪雨災害では、兵庫県内で建設中の補強土壁が、背面部での急激な水位上昇に伴い崩壊した。背部の斜面や地山からの雨水浸透により盛土内の飽和領域が拡大し、サクシヨンの低下による盛土材の剛性および強度低下を引き起こしたことが主たる原因である。一般にシルト質土や砂質土など細粒土を使用した土構造物は透水性が低いことから、一旦盛土内に雨水浸透が生じると排水に時間を要し、飽和状態が長時間継続する傾向が見られる。長期にわたる飽和状態の形成は、図-1(a)に示す様な盛土内部での圧縮破壊を招き、補強材による補強効果を消失させることとなる。したがって補強土壁の被害軽減のためには、盛土内への雨水等の侵入および盛土背部での帯水を許さないことが重要となる。この種の盛土崩壊を防ぐために澁谷ら(2008)^{1), 2) 3)}は、従来の排水工の弱点を改善した L 型排水盛土防水工を提案している。この工

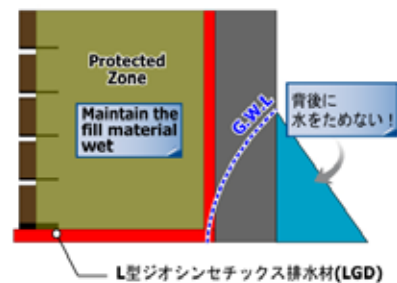
法は従来の盛土内に設置した排水工とは異なり、盛土内に鉛直に設置したジオシンセティック排水材によって盛土背面からの浸透水を下方に落とし、盛土底部に設置している排水層から速やかに浸透水を盛土外へ排水させる方法である。これは、盛土自体を防水領域と考え、単に遮水するのではなく、十分な排水によって盛土背面からの浸透水を断固として許さず、盛土背面からの浸透水の蓄積を防ぐことに特徴がある(図-1(b))。この特徴から、L 型排水盛土防水工は「沢部の腹付け盛土」「大規模盛土」「谷埋め盛土または既設盛土対策」等の用途への適用が提案されている⁴⁾。

一方、細粒土に分類される現地発生土を盛土材として適用しなければならない場合、セメント系改良材による安定処理が行われることが往々にしてある。安定処理により透水性が低下することで、補強土壁背面での滞水が懸念される。

本研究では、強度特性が優れる製鋼スラグの盛土材料としての活用性および不良盛土材(例えば、細粒分の多い自然土など)に対する改良効果検討を含め、ジオシンセティックを用いた L 型排水工をテールアルメ壁に適用し、その防水効果を検証するため、実物大盛土実験を実施した。実物大盛土実験は、大型土槽を用いた給水実験とし、L 型排水材の設置の有無、盛土材料の違いによるテールアルメ壁の挙動差を把握した。挙動把握のため、変位観測(壁面の変位計、パイプひずみ計)、盛土内部の水位観測などの様々な動態観測を実施している。なお、実物大盛土実験に先立ち、盛土材として使用した自然土、製鋼スラグ、製鋼スラグと自然土を混合した混合土について、一連の室内試験



(a) 補強土壁内部の飽和による圧縮破壊



(b) LGD 設置による盛土の飽和化防止
図-1 飽和による破壊と LGD 防水工の概念図

を通して物理的特性、透水・pH特性、締固め特性およびせん断強度特性を調査している。

表-1 用いた試料の基本的な物理特性

| 材料名 | | 製鋼スラグ | 混合土 ^{*1)} | 自然土 | |
|----------------------|-------------------------------|-----------------------|--------------------|-------|-------|
| 含水比 | w (%) | 8 | 15 | 23 | |
| 土粒子の密度 | ρ_s (g/cm ³) | 3.480 | 2.908 | 2.609 | |
| 吸水率 | (%) | 2.7 | — | — | |
| 間隙比 ^{*2)} | e | 0.468 | 0.474 | 0.655 | |
| 飽和度 ^{*3)} | S _r (%) | 67.8 | 92.7 | 88.0 | |
| 空気間隙率 ^{*4)} | n _a (%) | 10.3 | 2.4 | 4.8 | |
| 粒度特性 | 石分 礫分 砂分 細粒分 | (%) | 75 mm以上 | 0 | 0 |
| | | | 2~75 mm | 69.0 | 47.9 |
| | | | 0.075~2 mm | 27.8 | 43.8 |
| | | | 0.075 mm以下 | 3.2 | 8.3 |
| | 平均粒径 | D ₅₀ (mm) | 8.7 | 1.61 | 0.23 |
| | 最大粒径 | D _{max} (mm) | 37.5 | 37.5 | 26.5 |
| | 均等係数 | U _c | 54.0 | 43.9 | 126.7 |
| | 曲率係数 | U _c ' | 0.939 | 0.361 | 2.46 |

* 1) 製鋼スラグ：自然土=4：6(容積比) * 2) $e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$
 * 3) $S_r = \frac{w\rho_s}{e\rho_w}$ * 4) $n_a = 100 - \rho_d/\rho_w(100/\rho_s + w)$

2. 実験に用いた盛土材料の特性

2.1 物理的特性

表-1 に製鋼スラグおよびスラグ混合土の基本的な物理特性をまとめる。製鋼スラグの土粒子密度は $\rho_s=3.480\text{g/cm}^3$ であり、この値は一般土(通常 $2.6\sim 2.8\text{g/cm}^3$)と比べて重質である。また、吸水率は2.7%程度で比較的到低い値である。自然土は建設現場から発生した建設残土であり、土粒子密度 $\rho_s=2.609\text{g/cm}^3$ 、三角座標による分類では細粒分質礫質砂(SFG)に分類される。この自然土と製鋼スラグを容積比(自然土6：4製鋼スラグ、重量比5：5)で混合した混合土の土粒子密度は $\rho_s=2.908\text{g/cm}^3$ となる。

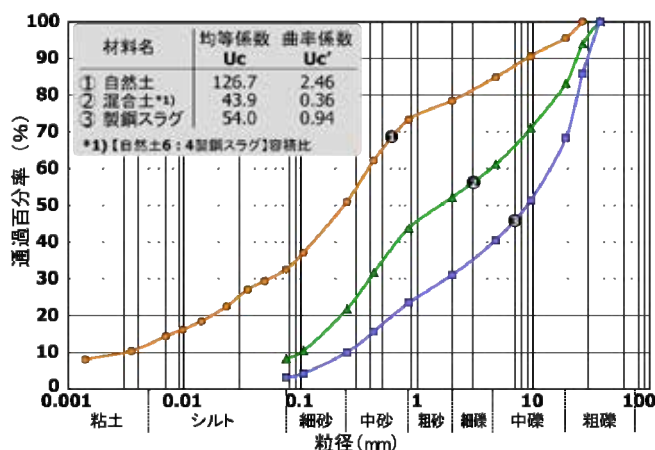


図-2 粒径加積曲線

表-2 pH測定値

| 区分 | 容積比(%) | | pH |
|-----------|--------|-----|------|
| | 鉄鋼スラグ | 自然土 | |
| 製鋼スラグの混合土 | 100 | 0 | 12.9 |
| | 40 | 60 | 12.7 |
| | 0 | 100 | 10.0 |

表-3 透水係数

| 区分 | 材料 | D _c | 85% | 90% |
|-------------|-------|--------------------------|----------------------|-----------------------|
| 定水位 透水試験 | 製鋼スラグ | k ₁₅ (m/s) | 4.0×10 ⁻⁶ | — |
| | 混合土 | | 2.4×10 ⁻⁶ | — |
| 変水位 透水試験 | 自然土 | | — | 6.84×10 ⁻⁸ |

図-2 に各試料土の粒径加積曲線を示すが、自然土の平均粒径が最も小さく、製鋼スラグが最も大きいことが分かる。また、各試料土の均等係数 U_c 、曲率係数 U_c' より、粒度のわるい自然土に製鋼スラグを混合することにより、粒度特性が大幅に改善されている。なお、自然土の細粒分含有率は $F_c=32.6\%$ であり、テールアルメの設計基準⁵⁾によれば、[B]材料にあたり、無対策では盛土材として用いることができない材料である。

2.2 土壌環境特性および透水特性

製鋼スラグおよびスラグ混合土を盛土材料として利用する場合、アルカリ性の特徴から周辺土壌に環境的な影響をおよぼす懸念がある。pH 値の測定結果を表-2 に示すが、製鋼スラグは pH=12.9 程度のアルカリ性を示す。一方、環境的な影響は盛土内部への浸透と排水によるところが大きく、透水特性についても着目する必要がある。表-3 は各試料を 10cm×12.73cm のモールドを用いて所定の締固め度で締固めた後、定水位および変水位透水試験を実施した結果である。製鋼スラグおよびスラグ混合土の場合は粒度調整(19 mmふるい通過分)した試料を用いた。試験結果より、製鋼スラグおよびスラグ混合土は $10^{-6}m/s$ 程度と「低い」透水性となる。ここで、関連法律(水質汚濁防止法)の排水基準である pH の許容値は 5.8~8.6(海域 5.0~9.0)と規定⁶⁾されており、製鋼スラグを単体あるいは混合して盛土材料として利用する際のアルカリ対策としては、盛土内部への水の浸透を防ぐことが有意であり、L 型排水材による対策効果を pH の変動に着目して検証することとした。なお、今回使用した自然土は透水係数 $10^{-8}m/s$ 程度と「非常に低い」の透水性を示し、pH=10 と弱アルカリ性を示す。混合土としての pH 値は若干小さくなるものの pH>12 程度のアルカリ性となった。

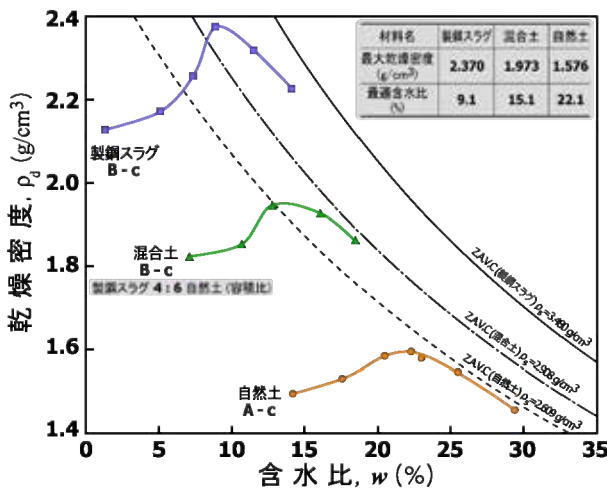


図-3 締固め曲線

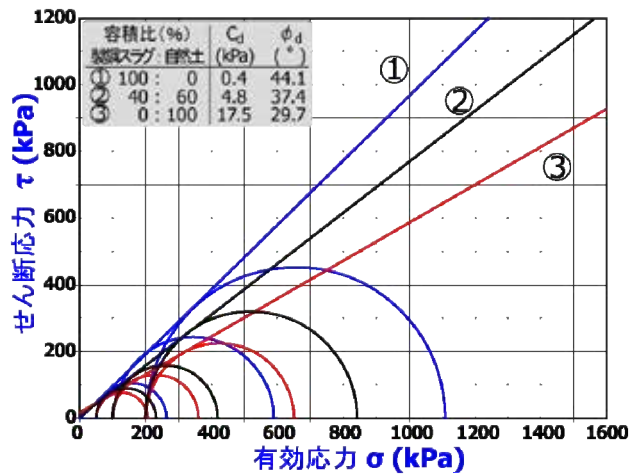


図-4 せん断応力と有効応力の関係

2.3 締固め特性および強度特性

図-3 は JIS A 1210 「突固めによる土の締固め試験」に従って実施した各試料の締固め曲線を示している。製鋼スラグおよびスラグ混合土は、B-c 法【(モールド：直径 15cm, 高さ 12.50cm), (湿潤法, 非繰り返し)】、自然土は A-c 法【(モールド：直径 10cm, 高さ 12.73cm), (湿潤法, 非繰り返し)】に準じて行った。その結果、自然土に製鋼スラグを混合することにより、最大乾燥密度が増加し最適含水比は低くなり、砂質土、礫質土等の一般土の締固め特性に近似する。言い換えれば、製鋼スラグが有している重量性による締固め特性の改善効果が発揮されたものと考えられる。

強度特性は三軸圧縮試験によるが、最大粒径に適合するように直径10cm、高さ20cmの供試体とし、中型三軸圧縮試験装置を用いて試験を実施した。その他の試験条件を表-4

表-4 三軸圧縮試験の条件

| 区分 | 容積比(%) 製鋼スラグ：自然土 | | 締固め度 D _c (%) | 拘束圧力 σ'(kPa) | ひずみ拘束 (%/min) |
|-----------|---------------------|-------|----------------------------|-----------------|------------------|
| 製鋼スラグの混合土 | 100：0 | CD 試験 | 85 | 50 | 0.1 |
| | 40：60 | | | 100 | |
| | 0：100 | | 200 | | |

に示す。図-4に各試料の破壊時のせん断応力を示すが、製鋼スラグの内部摩擦角φ_a=44.1°、自然土の内部摩擦角φ_a=29.7°に対し、スラグ混合土の内部摩擦角φ_aは=37.4°とほぼ中間的な強度特性を示した。一般的な設計値 $\psi(c_a=0, \phi_a=30\sim 35^\circ)$ を満足することから、通常の応力レベルにおいて盛土材料として十分な強度を有していると考えられる。

3. 実物大盛土実験

3.1 実験モデルおよび設計方法

本研究に用いた実物大盛土実験の土槽は、高さ3.0m、幅2.0m、奥行き4.0mの内空断面で、周囲を防水シートで被覆しており、背面部には、等間隔で多数の小孔を設け、小孔からの土の流入を防ぐため不織布を巻いた塩化ビニル管(VP管)である給水管(直径200mm、ストレナ加工)を建て込んでいる。実験ケースは、L型排水材の排水効果を確認するため、無対策モデル(ケース1)とL型排水対策モデル(ケース2)とし、これらのテールアルメ盛土材として自然土を用いた。また、鉄鋼スラグの盛土への適用性を確認するために、L型排水対策モデルについては、鉄鋼スラグ(ケース3)と混合土(ケース4)を盛土材とし、背面土には自然土を用いている。(図-5)。

実験モデルには、実施工に使用されている部材を用い、テールアルメの設計基準⁵⁾に沿って設計した。使用した部材は、壁面材として高さ500mm×幅2,000mmのメッシュパネルを用い、裏面には透水防砂材を配して盛土材のこぼれ出しを防止している。補強材としては、厚さ3mm×幅50mmのリブ付きストリップ(材質SS400)を用い、接続金具を介してメッシュパネルに連結させる(図-6)。

表-5に実験ケースごとの実験条件および設計時の土質定数をまとめている。盛土材の自然土は[B]材料に該当することから、ストリップとの摩擦係数は、 $f^* = \tan \phi$ の関係において $\psi=25^\circ$ とされる⁵⁾が、本実験ではリブ付きストリップを用いた一面せん断試験結果(表-6)に基づき、ストリップと盛土材との摩擦係数を検討した。ストリップに作用する鉛直応力と最大せん断応力 τ_{max} の関係は次式で表すことができる。

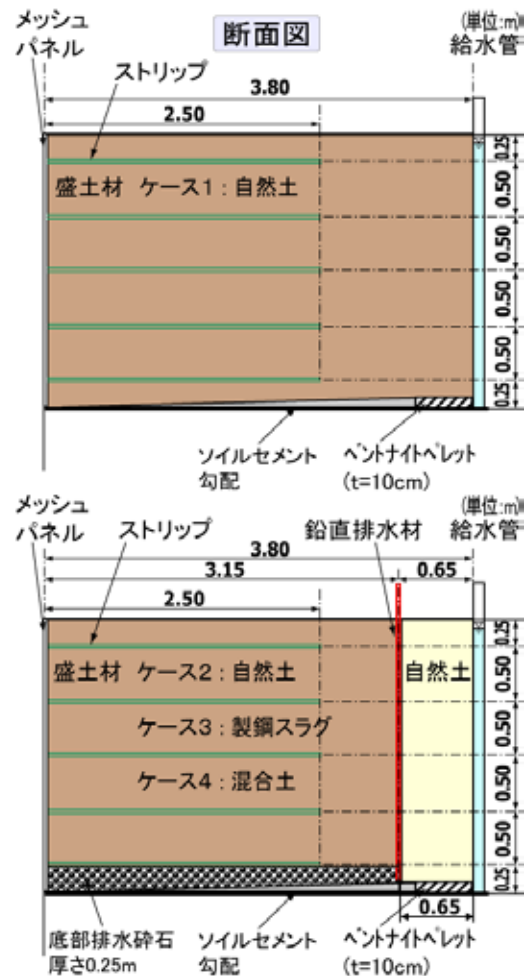


図-5 実物大盛土断面概略図(各ケース)

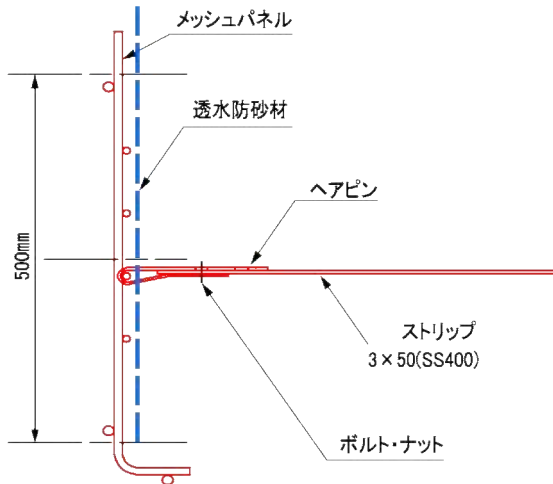


図-6 補強土壁の形状および構造

$$f^* = \frac{\tau_{\max}}{\sigma} \quad (1)$$

ここに、 f^* ：見かけの摩擦係数、 σ ：土被り圧で本実験モデルでは $\sigma = \gamma \cdot H$ 、 γ ：単位体積重量=17.06 (kN/m³)、 H ：土被り厚=2.5 (m)とした。計算結果としては不飽和状態では $\phi = 37.3(^{\circ})$ 、飽和状態で $\phi = 36.8(^{\circ})$ となり、[A]材料における最低値である $\phi = 36(^{\circ})$ を満足する。設計計算においては、この値を用い補強材の引抜きに対する計画安全率 $F_s = 1.0$ としてストリップの配置仕様を決定した。ストリップの引抜きに対する安全率は、通常 $F_s = 2.0$ として設計されるが、本実験においては、真の安全率を確認するため $F_s = 1.0$ として設計している。引抜きに対する安全率は次式による。

$$F_s = \frac{2 \cdot f^*_i \cdot \sigma_{vi} \cdot b \cdot L_e}{T_i} \quad (2)$$

ここに、 f^*_i ： i 段目における見かけの摩擦係数、 σ_{vi} ： i 段目における鉛直応力(kN/m²)、 b ：ストリップ幅(m)、 L_e ：抵抗領域内長さ(m)、 T_i ： i 段目ストリップに作用する引張り力(kN)、算定された各段の安全率を表-7に示す。

3.2 実物大盛土の築造

実験モデルの施工は、センサー類を設置しながら各層を所定厚さ 25cm になるように撒き出し後、60kg のプレートを用いて転圧した。締固め度の管理は、層毎にポータブル支持力測定機であるキャスポルの I_a 値による推定締固め度によった他、2層・4層・6層・8層目において砂置換による現場密度試験により確認した。表-8に各ケースの管理基準値を示し、表-9に各実験ケースの施工実績を整理した。ここで、製鋼スラグおよび混合土を用いたケースでの締固め度は $D_c = 85\%$ となり、自然土を用いたケースでの締固め度 90%より相当低い値となっているが、意図的に緩い締固め度となる

表-5 初期設計時の土質定数

| 区分 | 湿潤密度 ρ_t (g/cm ³) | 粘着力 c_d (kN/m ²) | せん断 抵抗角 ϕ_d (°) | ストリップ との摩擦角 ϕ_d (°) |
|-----------------------|--|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| ケース 1 自然土 (無対策) | 1.74 | 0 | 30 | 36.0 |
| ケース 2 自然土 | | | | |
| ケース 3 製鋼スラグ | 2.18 | 44.0 | | |
| ケース 4 混合土 | 1.93 | 37.0 | | |

表-6 リブ付きストリップを用いた一面せん断試験結果

| 供試体 D×H(cm) | 6.00×2.50 | |
|-------------------------------------|-----------|------|
| 土粒子密度 ρ_s (g/cm ³) | 2.610 | |
| $\rho_{d\max}$ (g/cm ²) | 1.560 | |
| $\rho_d = \rho_{d\max} \times 0.90$ | 1.404 | |
| 含水比 w (%) | 24.0 | |
| 試料の状態 | 不飽和 | 飽和 |
| 粘着力 c (kPa) | 2.6 | 4.3 |
| せん断抵抗角 ϕ (°) | 35.1 | 33.0 |

表-7 各段における引抜き安全率

| 段数 (i) | ΔH (m) | ΔB (m) | L (m) | F_s |
|-----------|-------------------|-------------------|----------|-------|
| 1 | 0.50 | 1.00 | 2.50 | 1.042 |
| 2 | | | | 1.025 |
| 3 | | | | 1.007 |
| 4 | | | | 1.158 |
| 5 | | | | 1.300 |

表-8 盛土材料の主な物理特性

| 区分 | | 湿潤密度 ρ_t (g/cm ³) | 自然含水比 w (%) | 粘着力 c_d (kPa) | せん断抵抗角 ϕ_d (°) | 実験締固め度 D _c (%) | 最大乾燥密度 ρ_d (g/cm ³) | 最適含水比 w _{opt} (%) |
|------|-----------------|---------------------------------------|----------------|--------------------|------------------------|------------------------------|---|-------------------------------|
| ケース1 | 自然土 (L排水材なし) | 1.85 | 24.4 | 17.5 | 29.7 | 90 | 1.576 | 22.1 |
| ケース2 | 自然土 | 1.78 | 22.3 | | | | | |
| ケース3 | 製鋼スラグ | 2.17 | 7.1 | 0.4 | 44.1 | 85 | 2.370 | 9.1 |
| ケース4 | 混合土 | 1.92 | 15.1 | 4.8 | 37.4 | 85 | 1.973 | 15.1 |

表-9 実験ケースごとの施工実績

| 区分 | 含水比 w (%) | 締固め度 D _c (%) | | 最大乾燥密度 ρ_d (g/cm ³) | 最適含水比 (%) |
|----------------------|--------------|-------------------------|-----|---|--------------|
| | | キヤスポル | 砂置換 | | |
| ケース1 自然土 (無対策) | 24.4 | 90 | 93 | 1.576 | 22.1 |
| ケース2 自然土 | 22.3 | 91 | 91 | | |
| ケース3 製鋼スラグ | 7.1 | 81 | 85 | 2.37 | 9.1 |
| ケース4 混合土 | 15.1 | 83 | 85 | 1.973 | 15.1 |

よう管理したものである。これは製鋼スラグの基本的な強度特性が高いこと、比較のために自然土と同様の補強材仕様としたことに起因して、安定度が高いことが予測されたためである。具体的な締固め方法としては、製鋼スラグ(もしくは混合土)を敷きならして転圧プレートにて表面を均した程度とした。通常、振動ローラー等の大型締固め施工機械を用いて入念に締固めしなければ所定の強度が得られないことを考慮すると、撒き出し程度の無転圧でも所用の強度を発揮できると言える。なお、鉄鋼スラグは平均含水比 7.1%の気乾状態の試料を用いた。鉛直排水材は通水断面を確保するためのコア材を不織布で挟んだ構造になっている。コア材の材質は高密度ポリエチレン(HDPE)、不織布はポリプロピレン(PP)不織布である。コア材の断面形状は溝幅 12.5 mm、溝深さ 10.0 mmで遮水用の穴(φ6 mm)が 75 mm間隔で空けられている。また、鉛直排水材は 5 段に分けて建て込み、それぞれの排水材の結合部分はコア材を専用の金具で結合し、上段の不織布の裾をスカート状にして下段の不織布に両面テープで接着することにより容易に施工できた。

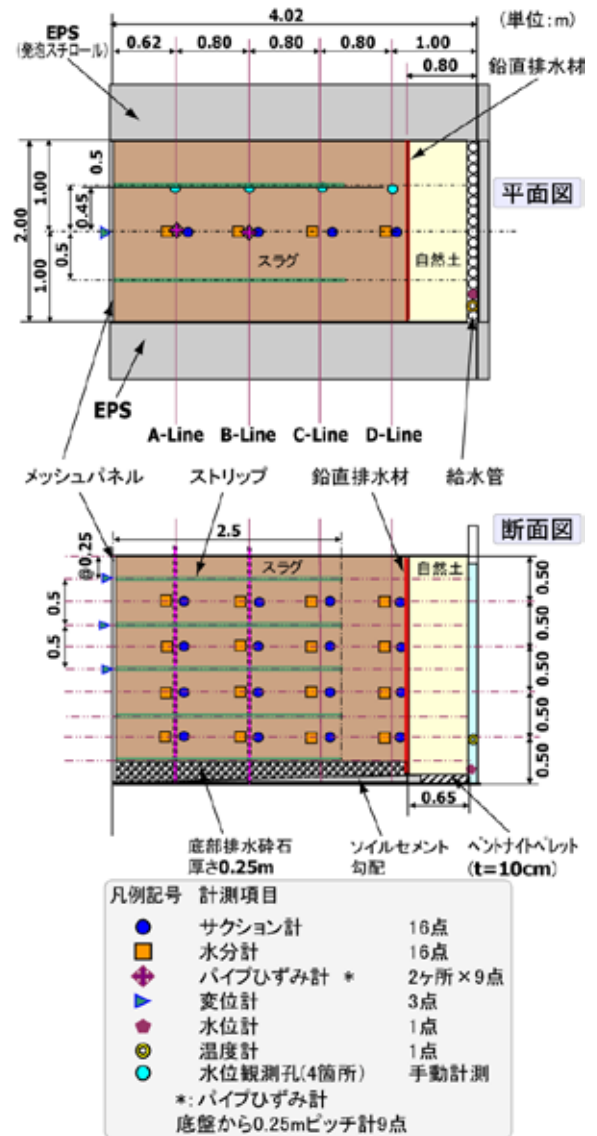


図-7 実物大盛土実験の概要図

3.3 実験手順および計測計画

盛土実験は各ケースとも一次給水と一次給水が終了してから一日経過したのちに行う二次給水を行

った。給水方法は背面給水パイプの初期水位を 2.5m まで急激に上昇させた後、水位テスターを用いて一定となるように給水量を調整した。L 型排水材からの排水量を一定時間毎に計測し、排水量が一定となった状態を定常状態とした。定常状態を確認してから各試験ケースの経時変化観察を行い、その後自然排水により脱水した。図-7 に実物大盛土実験の計器配置図を示す。土槽盛土の挙動を把握するため、実験盛土の地盤造成時にセンサー類を埋設した。補強土壁の動態観測のため、壁面完成後に足場を基準点として変位計を取り付けた。また、パイプひずみ計を設置して地盤内の変形挙動を観測した。一方、サクシオン計と水分計は各層地盤造成後表面に埋設し、地盤内の水位は観測孔(塩ビパイプ)を埋設して水位テスターで手動測定した。また、背面浸透パイプ内に水位計と温度計を設置して経時変化を記録した。これらの計測は、各センサーからスイッチボックスおよびデータロガーを介し PC で 1 分間毎に記録した。さらに、鉄鋼スラグを盛土材に用いたケース 3、ケース 4 に関しては、鉄鋼スラグと水が接することにより高い pH の値を示す排水を生じる可能性があるため、排水中の pH の値を一定時間毎に測定した。また、ケース 3、ケース 4 の場合、一次給水での盛土の変形はほとんど見られず安定していたため、二次給水時に約 2.3t の荷重(図-8)を載荷し二次給水試験を行った。

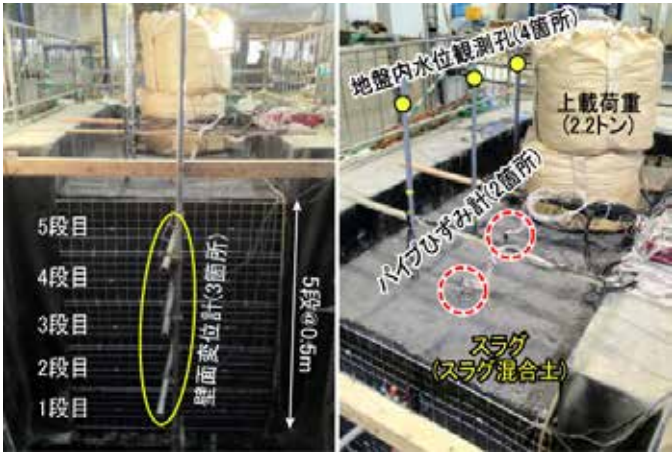


図-8 製鋼スラグ補強土壁の実験全景



図-9 表層部の状態および実験後の全景(ケース1,2)

4. 実物大盛土実験の結果

4.1 変形挙動

無対策実験であるケース 1 は、背面からの給水に伴い盛土内の水位は上昇、前面への排水は給水後約 25 分経過した時点で認められた。このとき、ストリップ先端部に亀裂が発生、壁面は 80~100 mm の変位量を示した。継続した給水によりさらに盛土内水位が上昇、補強土背面部中心に亀裂拡大した(図-9(a))。52 分後に給水停止したが水位低下は鈍く、壁は補強材と一体で大きく前方へ挙動し、最終的には崩壊に至った(図-9(b))。ケース 1 での地中ひずみの分布状況(図-10)より、A,B-Line 共に 0.5~1.0m 付近での挙動が認められ、上位では壁面側の A-Line でのひずみが卓越する。これらに基づき崩壊形態を推定し、すべりによる安全率評価を行うと、最大水位を考慮時に安全率 $F_s=0.97$ 、水位の無い状態では $F_s=1.04$ となり、各ケースでの事象に整合した。これらより、L 型排水防水工にて、テールアルメの外的安定性が確保できたものと判断する。一方、L 型排水防水工実験であるケース 2 は、給水開始直後より水平排水層前面から排水し、背面水位が盛土高さの 2.5m に達するに 2h を要する。この過程でケース 1 同様ストリップ先端付近にヘアクラック(図-9(c))が生じたが、

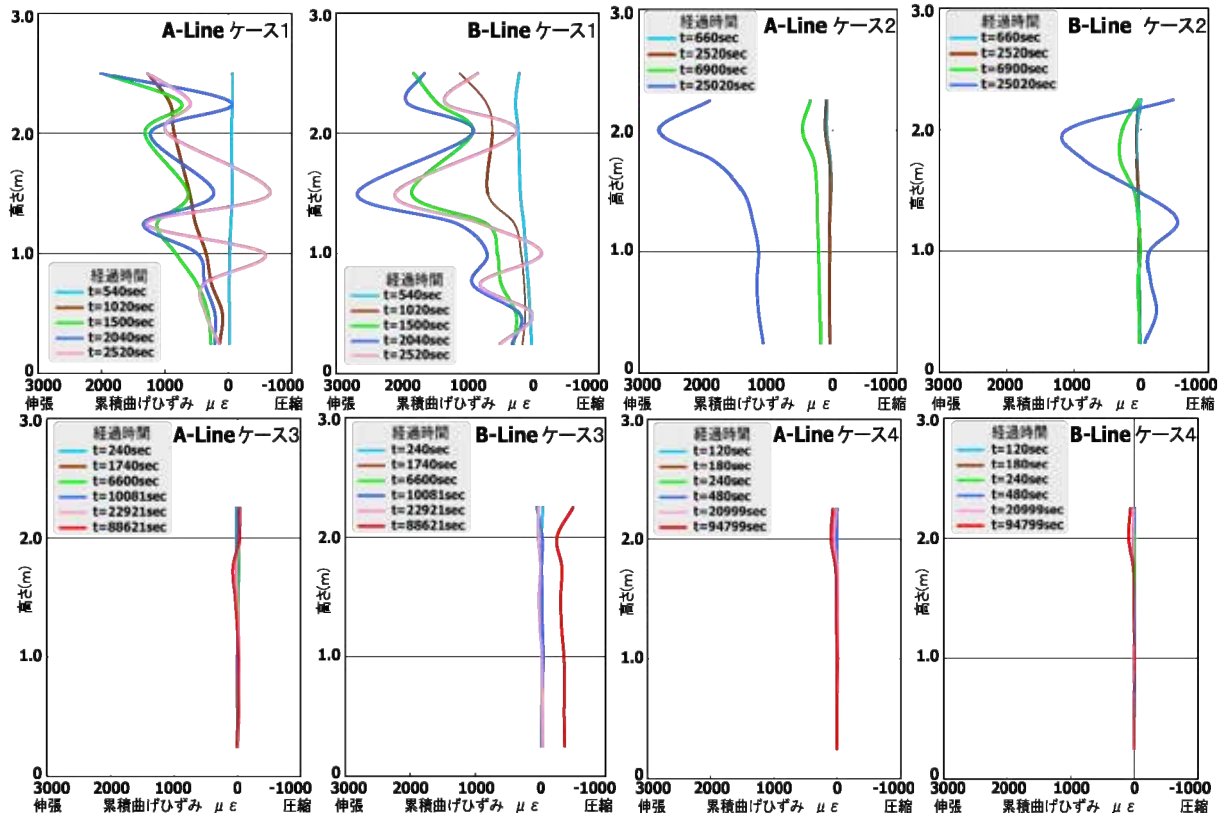


図-10 地中パイプひずみ分布図(累積曲げひずみ)

範囲が拡大することは無かった。その後、定常水位状態にて 5h 維持したが、盛土内への水位上昇は認められず、補強土壁面の水平変位も最大 4.7 mm と微小変形に留まり、安定した状態にあった。一方、背面土では地表面が 5cm 沈下するなど、経時変化に伴い乱れが生じた。図-10 と 図-11 は、それぞれ盛土造成後の背面給水開始から観測された地中パイプひずみ分布(累積曲げひずみ)と壁面の水平変位であるが、製鋼スラグを用いた場合(ケース 3 とケース 4)のはらみだし量がケース 2 (自然土盛土)と比べ、極端に小さい値(0.5 mm 以下)を示している。また、補強土壁の上部に発生したクラックも数mm程度で、沈下もほとんど発生しなかった。この現象は、表-10 に示すように自然土より製鋼スラグや混合土の方が弾性係数が大きく、ポアソン比が小さいことに起因したと考えられる。

4.2 浸潤線の変化および pH 値

図-12 はケース 1 とケース 2 の給水実験におけ

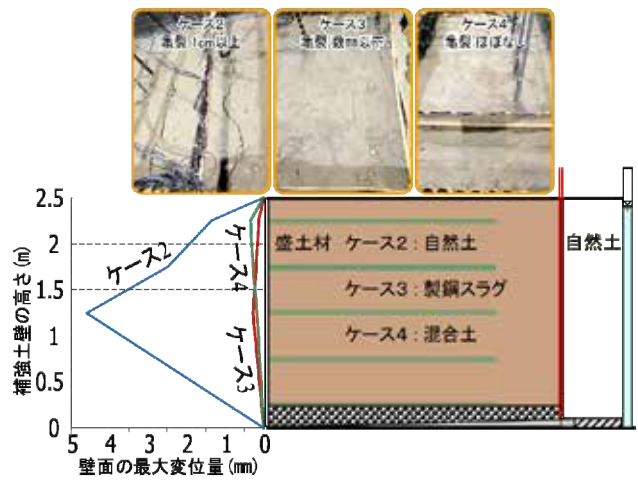
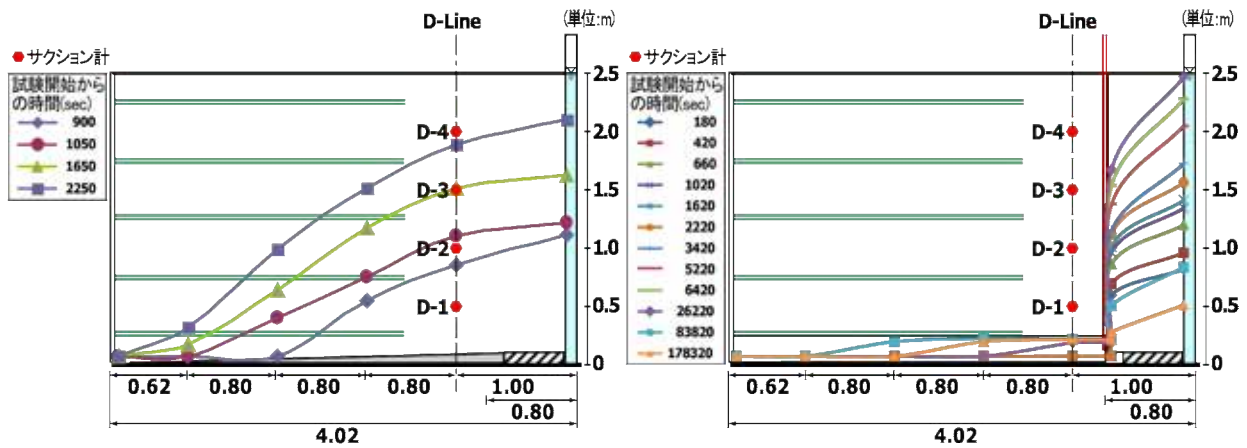


図-11 壁面の水平変位(はらみ出し)

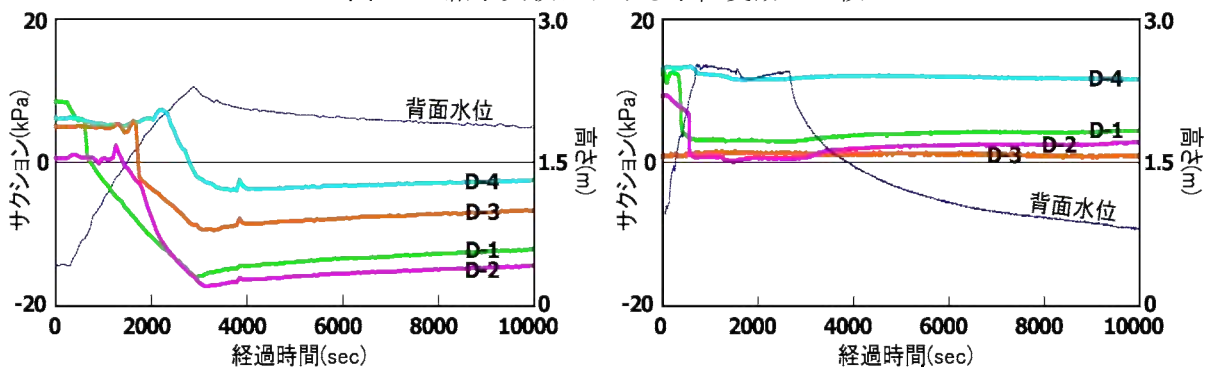
表-10 用いた試料の変形・強度特性(室内試験結果)

| 区分 | 弾性係数 E_{50} (kPa) | ポアソン比 ν | 粘着力 c_d (kN/m^2) | せん断抵抗角 ϕ_d ($^\circ$) |
|-----------------------|------------------------|----------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| ケース 1 自然土 (無対策) | 7,500 | 0.32 | 17.5 | 29.7 |
| ケース 2 自然土 | | | | |
| ケース 3 製鋼スラグ | 19,000 | 0.25 | 0.2 | 44.1 |
| ケース 4 混合土 | 10,000 | 0.28 | 4.8 | 37.4 |



(a) 無対策実験(ケース 1) (b) L型排水防水工実験(ケース 2)

図-12 給水実験における水位変動の比較



(a) 無対策実験(ケース 1) (b) L型排水防水工実験(ケース 2)

図-13 D-Lineにおけるサクシヨン圧の比較

る浸潤線の変化を示す。L型排水材が設置されているケース2の浸潤線を見ると盛土内部への水の浸透は無いことが確認できる。この結果は、L型排水防水工の排水及び防水効果が発揮されたものと考えられる。また、図-13は補強土背面(D-Line)におけるサクシヨン圧の経時変化である。ケース2はケース1に比して排水効果が明瞭であり長時間持続している。一方、L型排水材の設置後に排出される浸透水のpH測定においては、製鋼スラグを用いた実験では11~11.6であった。L型排水材を設置にかかわらずpHが11以上検出された原因として、撒き出し時に製鋼スラグの微粉が下部の水平排水層(単粒碎石)に拡散した可能性が考えられる。混合土の場合には、初期排出水は11.4であったが24時間後は自然土のpHである10まで低下する結果(図-14)が得られていることから推察される。なお、自然土との混合により微粉末が吸着されたとも考えられ、適切な防水工を採用する他、土質材料との混合により製鋼スラグのアルカリ性の問題を解決できると考えられる。

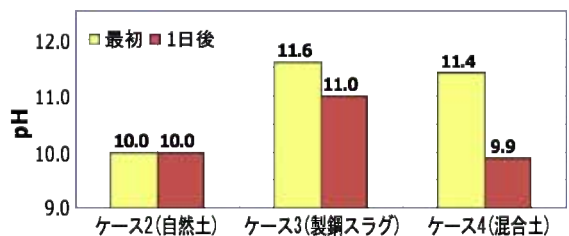


図-14 地盤材料によるpHの経時変化

表-11 補強土壁の設計安全率

| 区分 | 上載荷重なし | 上載荷重(20kPa) |
|------------------|--------|-------------|
| ケース1 自然土(無対策) | 0.973 | — |
| ケース2 自然土 | 1.042* | — |
| ケース3 製鋼スラグ | 1.652* | 1.419 |
| ケース4 混合土 | 1.289* | 1.089 |

ただし、「*」の最小安全率は、水位無の場合の設計安全率である

4.3 テールアルメ擁壁の外的安全率

製鋼スラグおよび混合土を用いた場合の変位量が、自然土を用いた場合より遙かに小さいことに加え、製鋼スラグ補強土壁(ケース3)の盛土造成時の締固め度80~85%程度で安全率が $F_s=1.6$ 以上(表-11)確保できた事実より、製鋼スラグを用いた補強土壁の適用性が検証できたものと考えられる。製鋼スラグを混合した混合土も同様の効果を得られ、細粒分の多い不良土の改良にも十分な効果を発揮しつつ、L型排水材と組合せることで環境問題に対しても配慮出来る可能性を見いだすことが出来た。

5. まとめ

製鋼スラグの有効利用促進の一環として、盛土材料としての適用性を一連の室内試験を通して検討した。その結果、製鋼スラグは一般の盛土材料に比べて重質であり、内部摩擦角が通常の盛土材料よりも大きく、盛土材料として十分な強度を有していることが分かった。更に、製鋼スラグを用いた補強土壁は、低い締固め度で管理されても自然土を用いた場合より変位量がかなり小さく、安全率で評価しても $F_s=1.6$ 以上の高い安定性を示した。自然土と混合した場合でも、粒度特性、透水特性、締固め特性、強度特性が大きく改善され、優れた改良効果を発揮する。今回の実験では、物理・力学特性が自然土と製鋼スラグとの間で、ほぼ中間的な値を示したが、これは重量比5:5であったことに起因するものと考えられ、土質材料の物性値をコントロールしやすい傾向も確認できた。一連の室内試験の結果から、製造工程によってユニークな特性を持つ製鋼スラグは、現場の適切な締固め管理および粒度調整によって、低コストかつ環境負荷低減を見込める盛土材として有望であることが分かった。一方、すなわち、製鋼スラグを用いた盛土であるケース3とケース4の補強土壁が施工性に優れ、安全である。ちなみに、pHの影響もない。

一方、大型土槽実験によるL型排水材の検証実験のケース1およびケース2からは、ジオシンセティックスを用いたL型排水盛土防水工を補強土(テールアルメ)壁工法に適用し優れた効果を確認した。谷埋め盛土など背面側からの浸透水が懸念される箇所でも有効に機能するものと思われる。また、東北地方太平洋沖地震では補強土壁面の一部が大変形した事例が報告⁸⁾されており、補強土壁盛土内への雨水浸透や排水不良が誘因として挙げられている。排水機能が健全な状態では震度6強~7の強震動観測地区であっても被災を免れており、防水効果の高いL型排水材の適用は耐震性の面でも有意と考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、公益財団法人 JFE21 世紀財団より助成を受けた。付記して、深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 澁谷啓, 齋藤雅彦, 原健二, 三井仁哉: ジオシンセティックスを用いた「L型排水盛土防水工」の提案, 第43回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1539-1540, 2008. 7
- 2) 原健二, 齋藤雅彦, 三井仁哉, 澁谷啓: ジオシンセティックスを用いたL型排水盛土防水工の

模型実験と数値シミュレーション，第 43 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1541-1542，
2008. 7

- 3) 原健二，澁谷啓，齋藤雅彦，鳥居宣之，蔡鍾吉，梶尾孝之：ジオシンセティックスを用いた L 型排水盛土防水工，ジオシンセティックス論文集，Vol. 23，pp. 147-154，2008
- 4) 澁谷啓：盛土崩壊のメカニズムと対策工，ジオシンセティックス論文集，Vol. 23，pp. 1-4，2008
- 5) (財)土木研究センター：補強土(テールアルメ)壁工法設計・施工マニュアル第 3 回改訂版，2003.11
- 6) 国土交通省：<http://www.mlit.go.jp/>，pH および悪臭に関する留意事項，資料 1-6-9.
- 7) 東中西日本高速道路(株)：設計要領第一集，平成 21 年 7 月
- 8) 日本テールアルメ協会：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震 被災調査 報告書<第二報>，
2011.10