

ジオセルと地山補強材を併用したのり面工に用いる遮水シートの遮水性に関する検討

川崎佑斗^{1*}・原田道幸²・鈴木聡³・小島謙一⁴

石垣竜一²・川俣さくら²・矢崎澄雄¹・近藤政弘⁵

盛土等の土構造物の耐震・耐降雨補強を目的に開発したRRS工法は、ジオセルと地山補強材を一体化させることにより、のり面工抵抗と引抜き抵抗で耐降雨性も含めた盛土構造物の安定を確保するものである。これに対して、現在開発を進めている遮水版RRS工法（RRS-s工法）は、ジオセルとのり面の間に遮水シートを敷設して、盛土への雨水の浸透を抑える効果（遮水性能）を付加するもので、従来のRRS工法よりも地山補強材量を少なくでき、より経済的な耐降雨対策工法とすることを目的としている。開発に際し、施工時に遮水シートに生じる不連続部（接続部、損傷部）の遮水性について検討するために、室内降雨実験およびその有限要素解析を行った。

キーワード：RRS工法、遮水シート、浸透流解析、盛土の安定

1. はじめに

既設盛土・切土のり面・自然斜面等の耐震・耐降雨補強を目的に開発した RRS 工法¹⁾は、ハニカム状のジオセルと地山補強材を一体化させた新しいのり面工²⁾である。要求性能によっては、本工法を用いることで従来ののり面工よりも経済的となる。本工法は降雨時に盛土内水位が上昇し、せん断抵抗が低下した場合でも、のり面工による抵抗と地山補強材による抵抗で盛土の安定を確保するものである。近年の甚大化および頻発する降雨災害に対し、経済性と耐降雨性の向上を両立させることは喫緊の課題である。そのため、経済性を保ちつつ耐降雨性を向上させることを目的に、遮水性を向上させた RRS 工法(RRS-s 工法(以下、本工法))³⁾の開発に取り組んでいる。本工法は、ジオセルの下に遮水シートを敷設し、のり面への雨水浸透を抑制する効果を付加するもので、従来の RRS 工法よりも経済的な耐降雨対策工法とすることを目的としている。

本工法の開発における課題を以下に示す。①本工法は幅 2m の遮水シートを法肩部から法尻まで一枚で敷設するため、水平方向(線路方向)についてはシートを互いに 10cm 以上ラップさせる必要がある。②遮水シートには、地山補強材やジオセル固定用のアンカー鉄筋による損傷部が生じる。①の接続部お

よび②の損傷部から雨水が盛土内に浸透した場合、盛土内水位および盛土の飽和度が上昇し盛土の安定性が低下することが懸念されるため、①および②の条件下で遮水性能を確認することが必要となる⁴⁾。

本研究では、図-1 に示す開発フローのうちの室内降雨実験およびその有限要素解析について述べる。室内降雨実験では、シートの接続方法やラップ幅による接続部の遮水率、アンカーピンや地山補強材頭部によるシート損傷部の遮水率について評価した。有限要素解析では、室内降雨実験の透水量を再現できるシート不連続部のモデル化について示した。

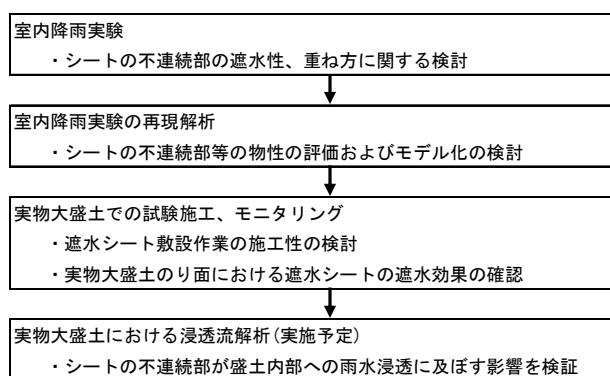


図-1 遮水版RRS工法の開発フロー

¹正会員，株式会社複合技術研究所(〒160-0004 東京都新宿区四谷1-23-6 協立四谷ビル5F)

²正会員，東京インキ株式会社，加工品営業本部生産技術部(〒114-0002 東京都北区王子1-12-4 TIC王子ビル)

³非会員，株式会社複合技術研究所(〒160-0004 東京都新宿区四谷1-23-6 協立四谷ビル5F)

⁴正会員，公益財団法人鉄道総合技術研究所，鉄道地震工学研究センター(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

⁵非会員，ジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社(〒532-0011 大阪府大阪市淀川西中島5-4-20 中央ビル8F)

*責任著者，y.kawasaki@igi.co.jp

2. 室内降雨実験

(1) 実験概要

室内降雨実験は、シートの不連続部(接続部、損傷部)の遮水性を検討するために、シートの不連続部を取り出し単純化して実施した。

実験装置を図-2に示す。本装置は木枠(長辺 1500 mm×短辺 1000 mm×高さ 80 mm)に計測対象となる遮水シートを図-3のように、実施工同様のラップ幅 100mmで敷設し、木枠の勾配を盛土の標準勾配と同じ1:1.5にして散水した。このとき、シートに弛みが生じてシート表面を流れる水を阻害しないよう木枠内に角材とネットを設置した。加えて、散水された水が直接容器に入らないようにカバーを設けた。今回用いた遮水シートは、遮水性能を満足する厚さ 1.5mmのEVAシートが不織布(PET)に挟まれた3層重ね構造となっている。

室内降雨実験の概要図を図-4に示す。遮水シート表面を流れた水は容器に回収される。回収された水量を遮水量 Q_2 とし、3分毎にその水量を計測した。シートの不連続部を浸透した水はそのまま木枠底面より排水されるため計測できない。そのため、各実験ケースを行う前に基準降雨量 Q_1 を確認し、 Q_1 を基に遮水率($=Q_2/Q_1$)を算出している。

室内降雨実験における実験ケースを表-1に示す。Case0では実験装置の降雨強度の確認を行った。木枠表面を板で覆い木枠内に散水された水が全て回収される状態(遮水率100%)となるケースである。

Case1およびCase2は、シートの接続方法の違いによる接続部の遮水性について検討した。Case1でのシートの接続方法は、3層構造の1枚1枚をめぐって重ねる方法である(表-1の接続部A)。敷設には多少の手間を要するが、遮水性が期待できるこの接続方法を標準仕様とする予定である。Case2においては、3層構造のシートを重ねるだけの接続方法である(表-1の接続部B)。接続部Bは接続部Aと比較して、遮水性は多少低くなると考えられるが、その施工性は良いと考えられる。遮水性に問題がないことを前提に、曲線区間等の接続部Aの適用が難しい箇所に接続部Bの適用を考えている。

Case3およびCase4では、シートの施工時の損傷部の遮水性について検討した。Case3はジオセルの仮止めに用いるアンカーピン($\phi 19$)により生じる損傷部の影響について、Case4は地山補強材($\phi=40$ mm)の打設により生じた損傷部の影響について検討する。

(2) 降雨強度の確認試験 (Case0)

降雨実験では、大小2通りの降雨強度を想定した。降雨強度大のケースでは土構造標準⁵⁾に示される短期型降雨モデルの最大時雨量に相当する降雨強度を想定した。降雨強度小のケースは、降雨強度の違いによる遮水率の影響を確認するため、本実験装置で安定して散水できる最小の降雨強度とした。以後、実験ケース名をCase0-1やCase0-2と表記する。末端の数字○-1は降雨強度が大のケースを、○-2は降雨

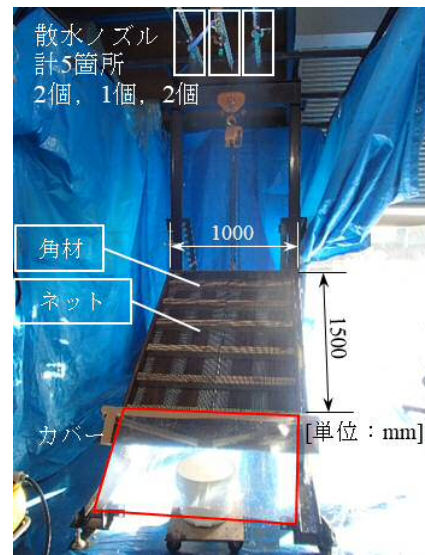


図-2 実験装置

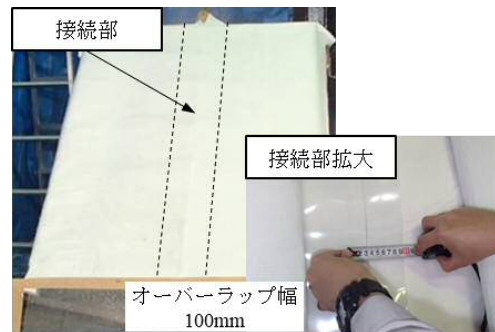


図-3 遮水シート敷設状況

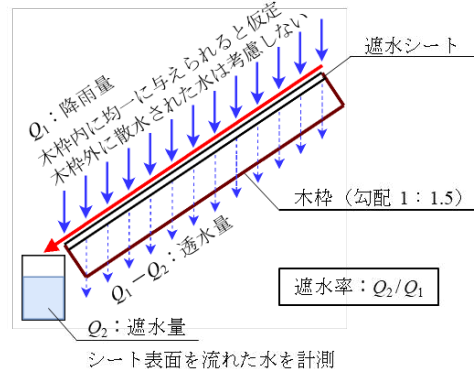


図-4 室内降雨実験の概要図

表-1 実験ケース

ケース	実験内容・目的等	
Case0	降雨強度の確認	
Case1	接続部	接続部 A 不織布(PET) 100mm EVAシート
Case2		接続部 B 不織布(PET) 100mm EVAシート
Case3	損傷部	アンカーピンによる損傷部の確認
Case4	損傷部	地山補強材による損傷部の確認

強度が小のケースを指す。時間雨量は、木枠外に散水された水を考慮せず、木枠内に降雨が均一に与えられると仮定し、遮水率100%の条件での水量をシート上の投影面積(1.3m²)で除して算出することとした。

図-5に降雨強度の確認を目的に行ったCase0-1とCase0-2の結果を示す。Case0-1において、計測開始から3分~9分の降雨量はばらつきが大きいためデータとして使用していない。12分以降のデータについては若干ばらつくものの、概ね安定した降雨量であった。しかし、降雨量(図中の■, □プロット)はCase0-1で0.3L/3分程度、Case0-2で0.2L/3分程度のばらつき幅がある。Case1~Case4(詳細は後述)においても、散水装置による降雨量のばらつきには同様な傾向が見られた。したがって、本実験では降雨量のばらつきを考慮する必要がある。各ケースにおけるばらつきの程度は概ね同様であること、降雨量のばらつきは無作為に生じることから、各々のケース毎ではなく、全ケースのばらつきを整理した上で降雨強度の誤差幅を決定し、各ケースに同じ誤差幅を適用することとした。

Case0~Case4における誤差幅の平均は0.2L/3分程度であった。また、計測に使用したはかりの最小目盛りが0.1Lであったことから、この半分の0.05L/(1計測)の読み取り誤差を加えた合計0.25L/3分の誤差を考慮し、実測値の平均に対して±0.125L/3分の誤差幅を想定して評価することとした。本誤差幅の適用にあたり、降雨強度の確認試験であるCase0の実験結果のばらつきと比較して妥当性を確認した。

Case0-1の降雨強度は124.6mm/h~120.8mm/h(8.10L/3分~7.85L/3分)、平均122.7mm/h(7.97L/3分)である。また、Case0-2の降雨強度は52.9mm/h~49.0mm/h(3.44L/3分~3.19L/3分)、平均51.0mm/h(3.31L/3分)である。図-5に前述した全ケースから定めた誤差を赤線で示す。Case0-1, 0-2とも概ね誤差内に入っており、想定した誤差幅が妥当であることが確認できた。

遮水量 Q_2 においても誤差が考えられる。 Q_2 については、0.05L/(1計測)の読み取り誤差を考慮することとした。結果の評価にあたって、実測値の平均に±0.025L/3分を考慮して実施した。実験上想定される大きな誤差については検討の際に考慮したが、本実験で対象とする工法の遮水率は非常に高いため、微小なばらつきが生じたケース(例えば、わずかながら遮水率が100%を超える場合)もあった。このとき、遮水率の上限値を100%に補正して、下限値に対しても同率の補正を行い低減することとした。

また、実験にあたっては、散水直後の降雨量のばらつきの影響を除外するため、20分程度散水した後計測を開始(Case 0以外)することとした。

(3) シート接続部の遮水性 (Case1, Case2)

Case1およびCase2は、シートの接続方法の違いによる遮水性について検討した。実際のシート接続部の圧力状態を再現するため、ジオセルと中詰材(土のうに詰めた碎石)をシート上に載せた(図-6参照)。

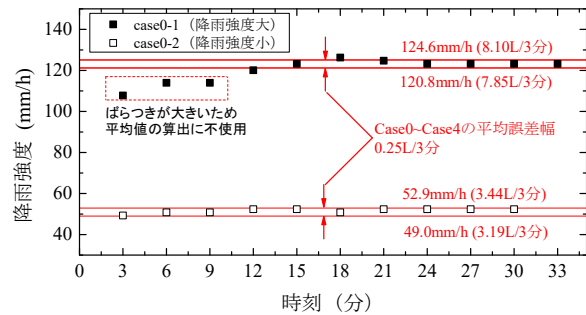


図-5 Case0における降雨強度



図-6 ジオセル設置の様子

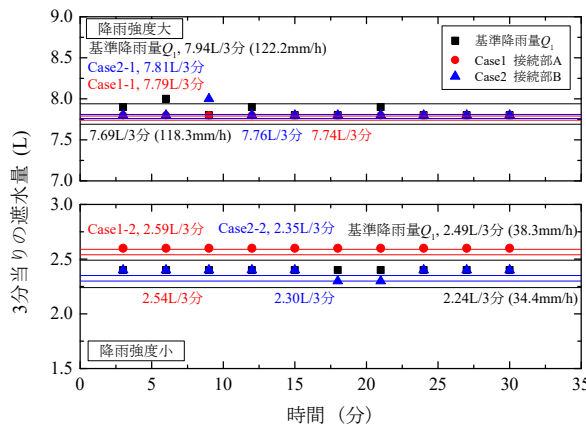


図-7 Case1およびCase2における遮水量

表-2 Case1およびCase2の実験結果

実験ケース	接続部	降雨強度	遮水率(平均)[%]
Case1-1	A	大	100~96(98.0)
Case1-2		小	100~88(94.0)
Case2-1	B	大	100~98(99.0)
Case2-2		小	100~93(96.5)

本試験に先立ち、接続部分に止水用のテープを貼り完全遮水の状態で30分散水し、本実験ケースの基準降雨量 Q_1 を求めた。その後、テープを取り除きCase1およびCase2の降雨実験を実施した。

Case1およびCase2の遮水量 Q_2 を図-7に、遮水率(= Q_2 / Q_1)を表-2に示す。Case1-1, Case2-1における基準降雨量 Q_1 は平均7.81L/3分(120.2mm/h)で、前述の誤差を考慮すると7.94L/3分~7.69L/3分(122.2mm/h~118.3mm/h)となる。また、Case1-2, Case2-2における基準降雨量 Q_1 は平均2.36L/3分(36.3mm/h)で、同様に誤差を考慮すると2.49L/3分~2.24L/3分(38.3mm/h~34.4mm/h)であった。Case1-1の遮水量 Q_2 は誤差を考慮すると平均7.76L/3分に対

して、7.79L/3分~7.74L/3分であり、遮水率は100%~96%となった。Case1-2も同様に遮水量 Q_2 の平均2.56L/3分に対して2.59L/3分~2.54L/3分で、遮水率が100%~88%であった。Case2-1における遮水量 Q_2 は平均7.78L/3分に対し7.81L/3分~7.76L/3分で、遮水率は100%~98%であった。Case2-2での遮水量 Q_2 は平均2.32L/3分に対して2.35L/3分~2.30L/3分となり、遮水率は100%~93%となった。

したがって、今回の降雨条件(120mm/h程度および40mm/h程度)において、通常用いるラップ幅(100mm程度)の場合、どちらの接続方法においても降雨強度が小さいケースでは遮水率が低くなることを確認した。降雨装置のばらつきを加味した平均値で評価すると、降雨強度大で98~99%、降雨強度小では94~96.5%の遮水率であった。

(4) シートの損傷部における遮水率の評価

Case3では、シートを固定するアンカーピンによる損傷がシートの遮水性にどの程度影響を与えるか確認した。シート設置状況およびアンカーピンにより生じた損傷部を図-8に示す。遮水シートに設ける孔は、実施工でのアンカーピンの配置間隔を基に、今回のシートの面積(1.5m²)に合わせ3か所とした。実験に用いたアンカーピンは丸鋼φ19mmとした。

まず、アンカーピンによる損傷がない遮水シートを敷設した状態で30分散水し、基準降雨量 Q_1 を求めた後、アンカーピンによる損傷部を再現してCase3を実施した。まず、アンカーピンを差した状態(図-8)で30分の降雨実験を行い、次に3本のアンカーピンを抜き、孔を露出した状態で30分の計測を行った。

Case3の遮水量を図-9に、Case3およびCase4の遮水率を表-3に示す。Case3-1における基準降雨量 Q_1 は、平均7.76L/3分(119.5mm/h)で誤差を考慮すると7.89L/3分~7.64L/3分(121.4mm/h~117.6mm/h)であった。また、Case3-2における基準降雨量 Q_1 は、平均2.34L/3分(36.0mm/h)で誤差の幅は2.47L/3分~2.22L/3分(38.0mm/h~34.1mm/h)であった。

Case3-1(ピン残置)の Q_2 は平均7.76L/3分に対し7.79L/3分~7.74L/3分で遮水率は100%、Case3-1(ピン撤去)の Q_2 は平均7.58L/3分に対し7.61L/3分~7.56L/3分で遮水率100%~98%であった。また、Case3-2(ピン残置)の Q_2 の平均は2.34L/3分に対し2.37L/3分~2.32L/3分で遮水率100%~93%、Case3-2(ピン撤去)の Q_2 の平均は2.16L/3分に対し2.19L/3分~2.14L/3分で遮水率は99%~91%であった。

アンカーピンを残した状態と撤去した状態で比較すると、後者の遮水率が若干低い。アンカーピンによる孔が露出している場合は遮水性に影響を与えるが、実際にはアンカーピンを残置するため、前者により損傷部を評価する。アンカーピンの耐用年数は70年で、孔が露出する状態は考えにくい。

Case4は、棒状補強材を打設した際に生じる損傷部での遮水性の確認を目的としており、基準降雨量 Q_1 はCase0の値を用いた。補強材模型設置状況と補強材打設により生じたシートの損傷部を図-10に示

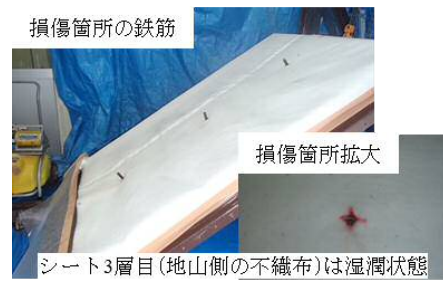


図-8 アンカーピンによる損傷

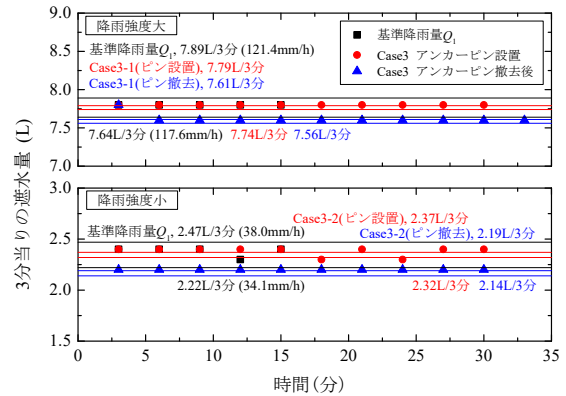


図-9 Case3における遮水量

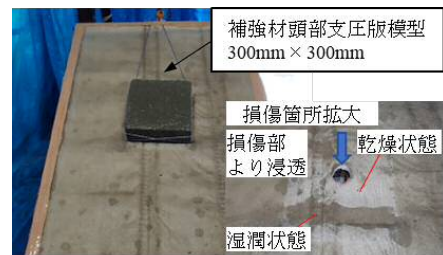


図-10 地山補強材による損傷

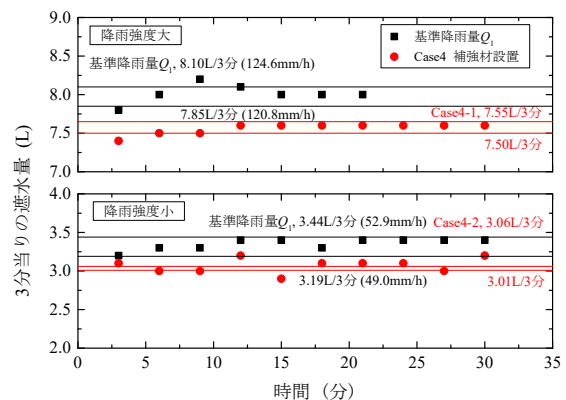


図-11 Case4における遮水量

表-3 Case3およびCase4の実験結果

実験ケース	損傷部	降雨強度	遮水率[%]
Case3-1	ピン残置	大	100~98
	ピン撤去		100~98
Case3-2	ピン残置	小	100~93
	ピン撤去		99~91
Case4-1	φ=30mm×1	大	96~94
Case4-2	支圧版模型	小	96~91

す。無筋コンクリートブロック(0.3m×0.3m×0.1m)中心部に、棒状補強材を模擬したφ40mmの塩ビパイプを埋め込んだ支圧版模型をシート中央に設置した。

Case4における遮水量を図-11に、遮水率を表-3に示す。Case4-1の基準降雨量 Q_1 は、平均7.97L/3分(122.7mm/h)で誤差幅は8.10L/3分~7.85L/3分(124.6mm/h~120.8mm/h)であった。また、Case4-2の Q_1 は平均3.31L/3分(51.0mm/h)に対し3.44L/3分~3.19L/3分(52.9mm/h~49.0mm/h)であった。

Case4-1における Q_2 の平均は7.52L/3分に対し7.55L/3分~7.50L/3分で遮水率は96%~94%、Case4-2における Q_2 の平均は3.03L/3分で、3.06L/3分~3.01L/3分で遮水率は96%~91%であった。

実験終了後に支圧版模型を取り外して観察すると、損傷部周辺上部が湿潤状態で下側は乾燥状態だったため、シートと支圧版の隙間から水が入り、棒状補強材をつたって地山方向に流れたと考えられる。

本実験のようにシートと支圧版の密着が十分でない場合、補強材の打設により生じた損傷部が遮水性に影響を及ぼす。ただし、シートと支圧版との良好な密着が期待できる場合、この結果よりも遮水性は良好になる。実施工では、補強材を配置するセル内にモルタルを打設して支圧版を作製し、補強材と一体化させるため、シートとの密着性は高くなる。

以上から、アンカーピンおよび補強材打設による損傷部の遮水率は降雨強度が小さい方が若干大きい結果であったが、最小の遮水率は91%であり、遮水性能は保持できていると考えられる。

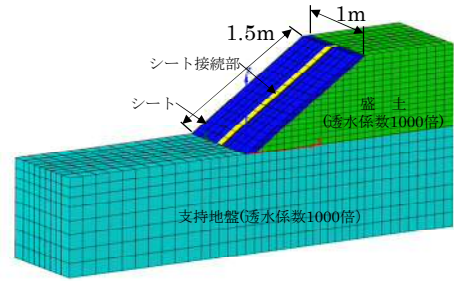


図-12 室内降雨実験の有限要素解析に用いたモデル

表-4 有限要素解析におけるモデル材料の設定

	透水係数 (cm/s)	有効 間隙率	比貯留係数 (1/m)
盛土, 支持地盤	1.0	0.20	1.0×10^{-4}
シート	1.0×10^{-10}	0.10	1.0×10^{-3}
シート接続部	7.5×10^{-5}		
損傷したシート	1.7×10^{-5}		

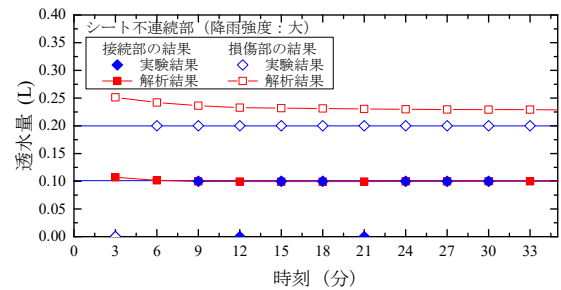


図-13 シート不連続部における透水量の算定結果

3. シート不連続部のモデル化の検討

遮水シートを用いたRRS-s工法的设计法について検討するには、シート不連続部の影響を考慮した浸透流解析で盛土の飽和状態を把握する必要がある。鉄道盛土の設計では、降雨強度とその降り方⁶⁾、盛土材の土質分類、のり面被覆率⁷⁾を考慮した上で、降雨の影響が厳しい状態での含水状況を考慮する。シート不連続部の遮水率は100%より低い値となる可能性が考えられるため、室内降雨実験より得られた透水量を再現できるようなシート不連続部の解析モデルについて飽和・不飽和浸透流解析(解析ソフトSoilPlus Flow 2021)を行い検討した。

本解析に用いたモデルを図-12に示す。今後の検討を考慮して、盛土および支持地盤もモデル化しているが、本研究ではシート部のみに着目している。

のり面の寸法は室内降雨実験に用いた木枠の寸法と同じ、幅1.0m、のり面長さ1.5m、勾配1:1.5で、地盤の底面と側面は不透水境界としている。降雨作用は、盛土のり面(1.0m×1.5m)に実験で得られた降雨強度大の平均値(120mm/h)を60分間一定で考慮した。

モデル材料は表-4に示す値を設定した。盛土層の不飽和浸透特性は土構造標準を参考にvan Genuchtenモデル($n=4.49$, $a=0.0227$)を使用し、遮水シートは河川堤防の手引き⁸⁾を参考に難透水層の不飽和浸透

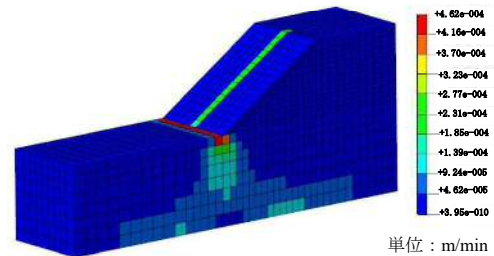


図-14 接統部における流速のコンター図

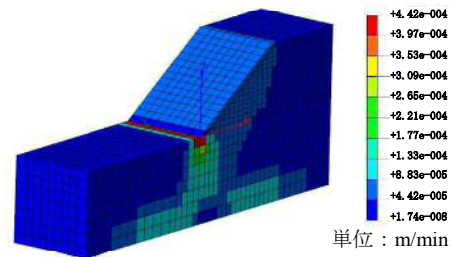


図-15 損傷部における流速のコンター図

特性を設定した。このとき、盛土および支持地盤モデルの物性は室内降雨実験の再現を目的としていることから、大きな透水係数を与えている。

本解析では、解析上の制約からシートの厚さを100mmとしてモデル化している。実際のシートの厚さは1.5mmで、実際の透水係数を求めるには換算が必要となる。ここでは、式(1)のような関係が成り

立つと仮定し、シート不連続部の表面から裏面へ通過する水の速度(不連続部を通過する流量)が換算前後で変化しないようにした。

$$k_1 : k_2 = D_1 : D_2 \quad (1)$$

k_1 は実際のシート不連続部の透水係数、 k_2 は解析上のシート不連続部の透水係数、 D_1 は実際のシートの厚さ(=1.5mm)、 D_2 は解析上のシートの厚さである。

本解析では、接続部の透水係数を変化させ、接続部を通過する流量が実験結果に近づく値を検討した。

図-13に降雨強度が120mm/hのときの結果を示し、図-14にこのときの流速のコンター図を示す。図-13に示した青色のプロットが室内降雨実験の透水量の平均値で、赤色のプロットが本解析における透水量である。目標とする透水量は室内降雨実験(Case1-1)の平均値である0.10L/3分で、シート接続部の透水係数は $k_1=1.2 \times 10^{-6}$ cm/s($k_2=7.5 \times 10^{-5}$ cm/s)であった。

次に、アンカーピンによる損傷部が露出した状態での透水係数について検討する。設計における円弧すべり安定計算を二次元の設計断面で行うことから、特定の要素から浸透が生じるのではなく、シート全体の透水係数を変化させて損傷部の影響を表現することとした。図-15にこのときの流速のコンター図を示す。図-13の中抜きのプロットが損傷部の結果で、 $k_1=2.6 \times 10^{-6}$ cm/s($k_2=1.7 \times 10^{-5}$ cm/s)のとき、目標とする透水量0.20L/3分(Case3-1(ピン撤去))に対し、解析結果は0.23L/3分と概ね整合する結果であった。

室内降雨実験におけるCase1-1およびCase3-1(ピン撤去)を対象に解析を行い、シート不連続部をモデル化することができた。今後は、他のケースに対する検証をした上で、実物大盛土の浸透流解析に必要なシート不連続部の透水係数を評価したい。

5. おわりに

本論文では、RRS-s工法の遮水シートの不連続部の遮水性に関して、室内降雨実験を行った。また、今後、本工法による降雨時の設計法を検討するため

に必要な、室内降雨実験から得られた透水量が再現できるシート不連続部の解析モデルを浸透流解析により検討した。

- 1) シート端部の接続部について、接続方法によらずラップ幅100mm程度とすれば平均遮水率94%以上となり、高い遮水効果があることを確認した。
- 2) アンカーピンおよび地山補強材による損傷部での遮水率は91%以上の結果であった。しかし、実現現場ではアンカーピンは抜かれずに残置されること、支圧版とシートは密着させることから、本損傷部での浸透の影響はわずかであると考えられる。
- 3) 室内降雨実験より得られた透水量を再現できるシート不連続部をモデル化することができた。

参考文献

- 1) 原田道幸, 矢崎澄雄, 小島謙一, 横田弘一, 清川伸夫, 佐藤武斗, 伊藤正博: ジオセルと地山補強材による地山安定化工法の開発, ジオシンセティックス論文集第31巻, pp.23-30, 2016.
- 2) 公益財団法人地盤工学会: 地山補強土工法設計・施工マニュアル, pp.114-121, 2011.
- 3) 東京インキ株式会社: TOKYOINK NEWS, No.71, pp.2, 2022.
- 4) 例えば, 土田孝, 小笹博昭, 山田耕一: 遮水シートの重ね合わせ接合部における透水量に関する実験と考察, 土木学会第56回年次学術講演会, pp.54-55, 2001.
- 5) 公益財団法人鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, pp.50-53, 2007.
- 6) 例えば, 小島謙一, 館山勝, 橋本和佳, 西原聡: 土構造物の設計に用いる設計降雨に関する検討, 土木学会第58回年次学術講演会, pp.837-838, 2003.
- 7) 例えば, 岡田勝也, 土屋博幸, 小野勇, 杉山友康, 布川修, 太田直之: 鉄道盛土の崩壊限界雨量に及ぼすのり面工の被覆率と遮水率の影響, 土木学会第60回年次学術講演会, pp.363-364, 2005.
- 8) 財団法人国土技術研究センター: 河川堤防の構造検討の手引き(改訂版), pp.42-70, 2012.

STUDY ON THE IMPERVIOUSNESS OF SHEET USED IN THE CONSTRUCTION OF SLOPE WORK WITH GEOCELLS AND SOIL NAILS

Yuto KAWASAKI, Michiyuki HARATA, Akira SUZUKI, Kenichi KOJIMA, Ryuichi ISHIGAKI, Sakura KAWAMATA, Sumio YAZAKI and Masahiro KONDOH

RRS method has been developed for improving cost-effectively the stability of existing embankments against large earthquakes and rainfalls by combining geocells and soil nails. In the aim to improving further the stability of RRS embankments against rainfalls along with their cost-effectiveness, it is proposed to use additionally an impervious sheet. By effectively restraining the infiltration of rainwater into the embankment, the number of soils nails can also be reduced in comparison to conventional RRS embankments. During the sheet installation, some heterogeneities inevitably appear (junction parts, damaged parts by anchor pin fixation) so that a series of rainfall laboratory tests and numerical analyses have been conducted to investigate their permeability properties.

KEYWORDS: RRS method, Impermeable sheet, Flow analysis, Stability of embankment