

鉄道トンネル用透水性スラグ路盤の 実物大模型試験

松本雄二¹・須長 誠²・大島洋志³・八百山 孝⁴

- ¹正会員 日本鉄道建設公団 東京支社 計画部 (〒171-0021 東京都豊島区西池袋1-11-1)
²正会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所 企画室 (〒185-8540 東京都分寺市光町2-8-38)
³正会員 理博 国際航業(株) 技術センター (〒102-0085 東京都千代田区六番町2番地)
⁴基礎地盤コンサルタンツ株式会社 九州支社 鹿児島事務所 (〒890-0055 鹿児島市上荒田町30-20)

現在建設中の九州新幹線では、地下水面下のしらすトンネルにおいて、水砕スラグを用いた透水性路盤を採用している。このような地山のトンネルでは、従来は水圧対抗型のインバート構造を用いることが多かったが、しらすは水に対する抵抗力が非常に低く、この構造では地山の噴泥等を防止できるとは限らないことが判った。そこで、路盤に水砕スラグ材料を用い、トンネル周辺水位を路盤コンクリート下面以下に安定させる構造を考案した。ただし、本構造は、新設トンネルでの適用例がなかったため、透水性や列車走行荷重に対する長期耐久性を検討することを目的として載荷試験等を実施した。本論文は、上記の水砕スラグを用いた新しい路盤構造を検討するために実施した各種試験の結果について述べたものである。

Key Words : slag, shirasu, roadbed, tunnel

1. まえがき

九州新幹線では、地下水面下のしらす地山のトンネルにおいて新しい路盤構造を採用し、建設を行っている。この種の地山におけるトンネルの場合、従来は鉄筋コンクリートのインバート構造とすることが多かった。しかし、既往文献^{1), 2), 3)}の噴泥事例調査などにに基づく事前検討結果によれば、しらすは水に対する抵抗力が非常に低いと、たとえトンネル構造を水圧対抗型にしたとしても繰返し列車荷重によるインバート下の地山の噴泥等を十分に防止できるとは限らないことが判った。そこで本トンネル構造ではインバートを採用せず、図-1に示すように、路盤に透水性の高い水砕スラグ材料を用い、トンネル周辺の水位を路盤コンクリート下面以下に安定させることを基本とした。

本論文では、九州新幹線の地下水面下のしらすトンネルにおいて、水砕スラグを用いた透水性路盤を採用するために実施したしらすおよびスラグに関する各種室内試験と、実物大模型を構築し列車の繰返し荷重に対するスラグ路盤の耐久性や透水性を検討した結果について述べる。

2. 試験概要

本試験の主な目的は、スラグ路盤の透水性と列車

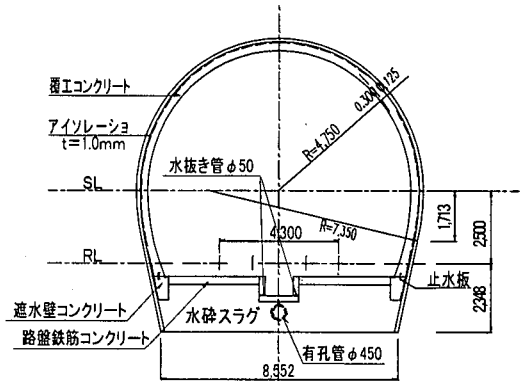


図-1 水砕スラグを用いた透水性路盤模式図

の繰返し荷重による路盤の耐久性の確認である。

本論文で述べるスラグ路盤の耐久性とは“列車荷重が長期間作用しても新幹線の運行に支障を及ぼすような変状が生じない”ことである。そこで、本研究では、路盤および基礎地盤の繰返し荷重に対する強度低下や沈下の有無と、路盤コンクリートの変状の有無の確認を耐久性確認の指標とみなして試験を実施した。また、路盤内地下水位の上昇に伴う路盤コンクリート上への水位上昇も結果的に列車運行上の大きな支障となるため、路盤の透水性に関する試験も合わせて実施することとした。

模型路盤は、実際のトンネル工事の近傍の野外に

実物大規模のものを作製したが、2箇所試験ヤードに分けて作製した。

なお、しらす地盤は地下水面でN値 ≥ 20 の類似地盤を選定したため、実物大模型路盤作成後の確認試験より2箇所ともほぼ同等とみなせることが判ったが、スラグ路盤については、添加材の種類・量、締固め・養生方法等を各々変えたため同一ではない。

最初に作製した1箇所目のヤードでは、インバート型のトンネル路盤と比較するためにスラグ路盤の形状をインバート型と同じにして作製し、同時に隣接してインバート型のコンクリート路盤も作製した。

次に作製した2箇所目のヤードでは、1箇所目の実物大模型路盤の試験結果を踏まえてスラグ路盤のみとし、路盤形状は施工性等を考慮して矩形とした。

なお本論文では、上記のコンクリート路盤と比較した試験を第1回目の実物大模型試験とし、スラグ路盤のみの試験を第2回目の実物大模型試験とする。

3. しらす・スラグの室内試験

実物大模型作成時に、各模型構築箇所において地盤のしらすと路盤材料のスラグの試料を採取し、これらを用いて(1)物理試験と(2)三軸圧縮試験を行った。また、第2回目の実物大模型作成時に、試験ヤードにて採取したしらすの不攪乱試料と、第2回目の模型と同等の締固め・養生を室内で行ったスラグ試料を用いて、(3)室内繰返し載荷試験を実施した(スラグ路盤の作成方法・作成条件等は、後述の4章参照)。これらの試験結果を以下に述べる。

(1)物理試験

各実物大模型路盤作成箇所の物理試験結果を表-1に示す。また、粒度試験結果を図-2に示す。

この試験結果によれば、しらすは材料として第1回目と第2回目の差が少なく、ほぼ同じものと考えられる。これに対し、スラグは粒度に違いが見られ、第2回目の方が粒度分布が広く、しかも粗粒になっている。これら実物大模型路盤のスラグの粒度の相違は、締固め方法(第1回目;小型振動ローラ・仕上り層厚30cm, 第2回目;11振動ローラ・15cm仕上り層厚)の違いが大きく影響していると考えられるが、第2回目の方が粒度分布がよかったためか密度も大きく、間隙比も小さくなった。

(2)三軸圧縮試験

実物大模型作成後の不攪乱試料を採取し、これを用いた三軸圧縮試験(CD)結果を表-2に示す。なお、表-2中のスラグ供試体は、実物大模型路盤を基本的

表-1 しらす・スラグの物理試験結果

試験箇所		①	②	
しらす	湿润密度 g/cm ³	1.59	1.57	
	乾燥密度 g/cm ³	1.15	1.12	
	土粒子の密度 g/cm ³	2.40	2.46	
	自然含水比 %	39	39	
	間隙比	1.09	1.20	
	粒度	礫分 %	8	14
		砂分 %	74	67
		シルト分 %	16	14
		粘土分 %	2	5
		均等係数 U _c	8.1	30.2
曲率係数 U _{c'}		0.85	3.02	
スラグ	湿润密度 g/cm ³	1.43	1.70	
	乾燥密度 g/cm ³	1.17	1.42	
	土粒子の密度 g/cm ³	2.70	2.71	
	自然含水比 %	22	19	
	間隙比	1.30	0.91	
	粒度	礫分 %	12	48
		砂分 %	85	50
		シルト分 %	3	2
		粘土分 %	—	—
		均等係数 U _c	3.2	5.3
曲率係数 U _{c'}		1.17	0.87	

①第1回目の実物大模型試験(安生田トンネル坑口)

②第2回目の実物大模型試験(第4神殿トンネル坑口)

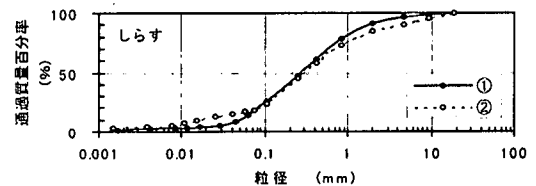
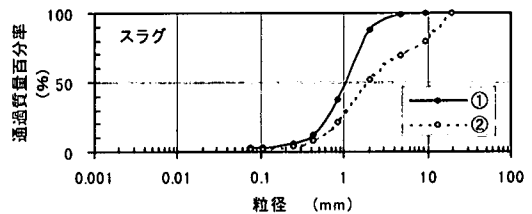


図-2 しらす・スラグの粒度分布曲線

表-2 三軸圧縮試験結果

試験箇所		①	②
しらす	粘着力 MN/m ²	0.00	0.01
	せん断抵抗角 (°)	43	40
スラグ	粘着力 MN/m ²	0.03	0.12
	せん断抵抗角 (°)	35	43

①第1回目の実物大模型試験(安生田トンネル坑口)

②第2回目の実物大模型試験(第4神殿トンネル坑口)

には気中養生したものであり、採取した各模型路盤の作成条件は、後述の表-3を参照されたい。

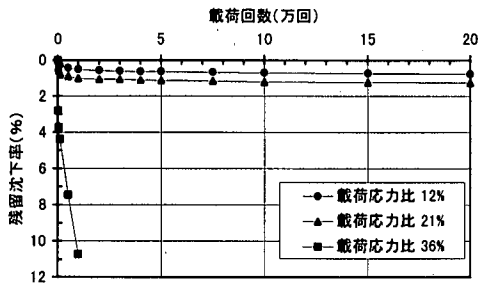


図-3 載荷回数と残留沈下率の関係(しらす)

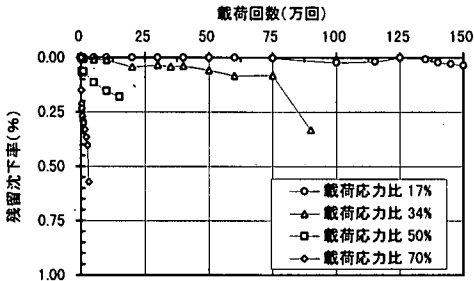


図-4 載荷回数と残留沈下率の関係(スラグ)

この結果によると、しらすは、第1回目、第2回目ともにほぼ同等のせん断強度を示した。しかし、スラグは、第2回目の模型路盤の方がせん断強度がかなり大きくなっていることが判った。

(3) 室内繰返し載荷試験

第2回目の実物大模型作製ヤードで採取したしらすの不攪乱試料と、第2回目の実物大模型と同等の締固め・養生を行って別途室内で作成したスラグの試料を用いて、室内繰返し載荷試験を実施し、繰返し載荷応力と強度の関係について検討した。スラグには重量比で8%のセメントを添加し、養生は気中14日、水中14日の計28日とした。これは、ウェルポイントで水位を下げてから路盤部を掘削し、路盤施工後14日間程度(気中養生14日)でウェルポイントを解除する(解除後は水中養生)という地下水面下のしらす地盤におけるトンネルでのスラグ路盤構築条件を考慮したためである。

図-3、図-4によれば、しらす・スラグともに載荷応力比(一軸圧縮強度に対する繰返し載荷応力の比)が20~30%以上になると沈下が進行している。また、沈下が進行した供試体は最終的には破壊している。ここで、しらすの平均一軸圧縮強度は256kN/m²、スラグの平均一軸圧縮強度は1,117kN/m²である。例えば、関根らの報告⁴⁾によれば、安定処理土ではあるが、繰返し載荷試験において沈下が進行するのは載荷応力比が20%以上となっていることから、本試験結果の沈下の閾値は、20%程度と推定される。

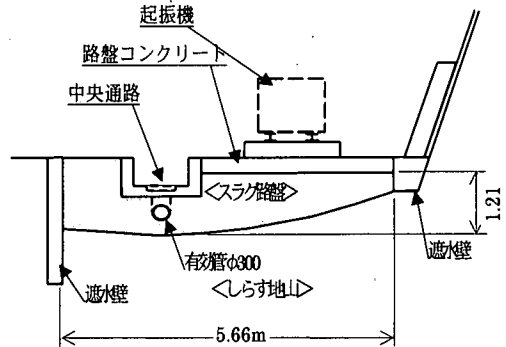


図-5 第1回目のスラグ路盤模型断面図

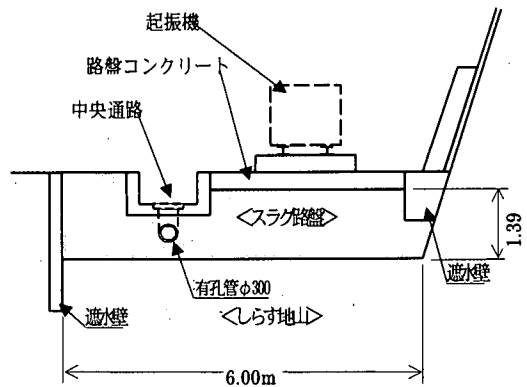


図-6 第2回目のスラグ路盤模型断面図

表-3 スラグ実物大模型路盤の作成条件

作成条件	第1回目模型路盤	第2回目模型路盤
作成地盤	地下水面下でN値 ≥ 20 のしらす地山	
掘削方法	ウェルポイントにて地下水位低下後、地山掘削	
路盤材料	水砕スラグ+石灰・石膏5%	水砕スラグ+セメント10%
転圧機種	小型(0.5t)振動ローラ	1t振動ローラ+ランマー
転圧回数	5回転圧	
仕上がり層厚	30cm/層	15cm/層
養生期間	気中1週+流水中1週間	気中2週間
備考	路盤底面が曲面であり、転圧が不十分	路盤底面が平坦なため、転圧が十分

よって、繰返し載荷応力の5倍以上の強度を有する路盤および地山であれば、長期的に列車荷重が作用しても沈下が進行しないものと考えられる。

4. 実物大模型の作製

本試験では、図-5、図-6に示すような実物大のスラグ路盤模型を表-3に示す作成方法にて構築した。なお、第1回目の実物大模型作成の際には、スラグ路盤に併設して、これとほぼ同形状のコンクリート路盤を構築した。

第1回目、第2回目の模型路盤は何れも、地下水面下のしらす地山に設ける必要があったため、ウェル

表-4 第1回目の模型の構築目標値と仕上り値

管理項目	目標値	仕上り値 (平均値)
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	—	1.17
圧縮強度 σ_{14} (MN/m ²)	—	—
透水係数 k (cm/s)	5×10^{-3}	2×10^{-2}
平板載荷試験値 k_{30} (MN/m ³)	110	198

表-5 第2回目の模型の構築目標値と仕上り値

管理項目	目標値	仕上り値 (平均値)
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.40	1.42
圧縮強度 σ_{14} (MN/m ²)	2.0	3.0
透水係数 k (cm/s)	5×10^{-3}	9.3×10^{-3}
平板載荷試験値 k_{30} (MN/m ³)	110	1336

表-6 平板載荷試験結果 (K_{30} 値)

試験箇所	①	②
しらす	78 MN/m ³	136 MN/m ³
スラグ	198 MN/m ³	1336 MN/m ³

表-7 現場透水試験結果

試験箇所	①	②
しらす	1.7×10^{-3} cm/s	4.3×10^{-4} cm/s
スラグ	7.7×10^{-2} cm/s	2.4×10^{-3} cm/s

ポイントで水位を下げてから地山を掘削して構築した。路盤材に使用するスラグは、北九州産のものを、第1回目の模型路盤では、強度発現を促進するために石灰+石膏を重量比で5%添加した。これに対し、第2回目の模型路盤では、早期強度と硬化向上を期待して添加材をセメントに変更した。また、この路盤では、現場混合による添加効果の減少を見込んで、3章の(3)に示す室内繰返し載荷試験時よりも20%割増して、セメント添加量を10%とした。

スラグ路盤の構築基準は、第1回目では表-4に示すように2週養生透水係数を $k=5 \times 10^{-3}$ cm/s程度、路盤表面の平板載荷試験値を $K_{30}=110$ MN/m³とした。また、第2回目の模型路盤では表-5に示すように乾燥密度を $\rho_d \geq 1.4$ g/cm³、2週圧縮強度を $\sigma_{14} \geq 2$ MN/m²、2週養生透水係数を $k=5 \times 10^{-3}$ cm/s程度とした。表-4と表-5には構築した模型路盤のスラグの密度や圧縮強度等の試験結果も合わせて示す。

スラグを用いた模型路盤の形状は、第1回目は図-5に示すように、トンネルのインバート型コンクリート路盤形状の部分のスラグを用いた路盤とした。これに対し、第2回目は図-6に示すように、スラグの十分な締固めが可能なように、施工性を考慮して矩形の形状とした。また締固めでは、第1回目は小型振動ローラ(仕上り層厚30cm)としたが、第2回目は11振動ローラ(仕上り層厚15cm)を用い5回転圧

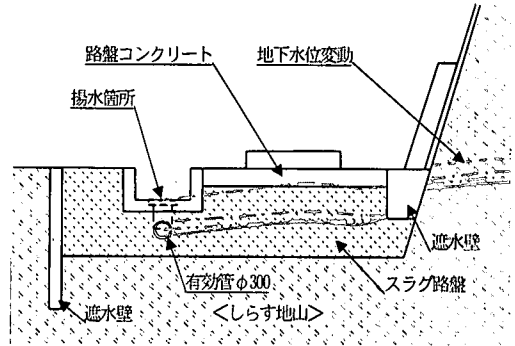


図-7 水位変動試験結果

しさらに隅角部を小型のランマーにて転圧した。

5. 原位置試験

(1) 平板載荷試験

実物大模型のスラグ路盤表面と近傍のしらす地山にて実施した平板載荷試験結果を表-6に示す。

この結果によると、透水性路盤のスラグは、第1回目、第2回目とも当初の目標値 ($K_{30}=110$ MN/m³) を上回る値が得られているものの、第2回目の方が第1回目の7倍近くの地盤反力係数 (K_{30} 値) となった。

(2) 現場透水試験

実物大模型のスラグ路盤、しらす地山でのボーリング時に実施した現場透水試験結果を表-7に示す。

この結果によると、透水性路盤のスラグは、第1回目の実物大模型では、当初の目標値 ($k=5 \times 10^{-3}$ cm/s) を上回る値が得られた。これに対し、第2回目の実物大模型は、締め密度やセメント添加量を増加させたため目標値以下の値となったが、しらす地山の透水係数より透水性がかなり良く、透水性路盤としての機能は十分に期待できると考えられる。

6. 水位変動試験⁵⁾

水位変動試験は、対象地盤(水砕スラグ路盤+しらす地山)にて、水位が路盤コンクリート下まで低下するか否かを調べる目的で実施したものである。

第2回目の実物大模型において、中央通路内に設けた集水柵より水中ポンプを用いて揚水し、実施した水位変動試験結果を図-7に示す。

この図に示すように路盤内の地下水水位は、揚水箇所の水位とともにほぼ直線的に変化した。また、有効管(中央排水管)内に地下水水位を固定することにより、地下水面が路盤コンクリートにつかない(スラグ路盤の上半分近くは気中にある)ことが判った。

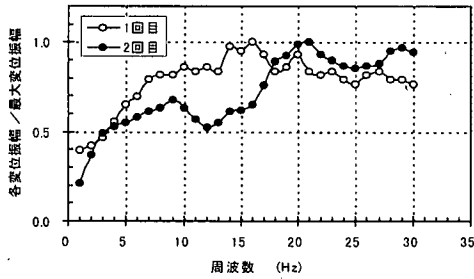


図-8 共振試験結果

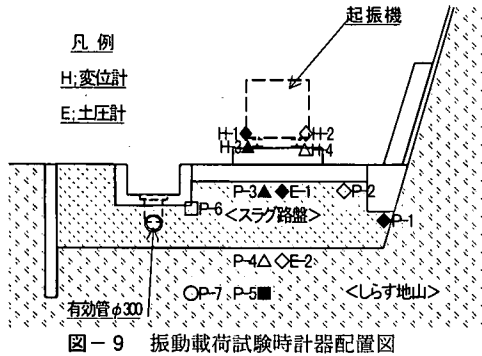


図-9 振動荷重試験時計器配置図

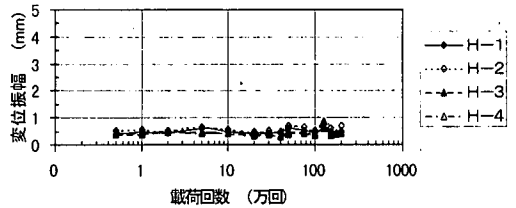


図-10 荷重回数と変位振幅(全振幅)の関係

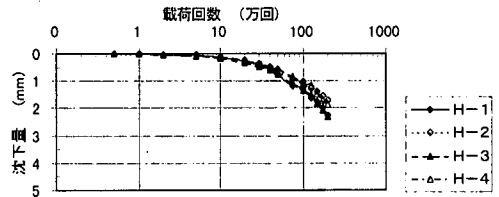


図-11 荷重回数と沈下量(除荷時)

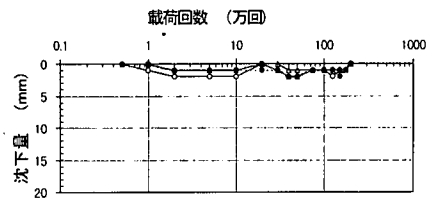


図-12 荷重回数と路盤コンクリート表面の沈下量

7. 実物大模型での繰返し荷重試験

第1回目の実物大模型での荷重試験の結論を先に言えば、スラグ路盤をインバート型と同じ形状(図-5)にした場合は、路盤コンクリートの目地の段差や路盤自体の圧縮沈下等がかなり大きくなり、結果的に、列車の繰返し荷重に対する耐久性に問題があることが判った。その原因としては、路盤の底面形状が曲面であったためにスラグの締固めが非常にやりにくく十分な締固めが出来なかったことや、早めにウェルポイントを解除したため流水中養生となり強度発現が十分でなかったことなどが考えられた。

そこで、路盤形状やスラグの締固め管理方法や養生方法等に関して再度検討を加えて、図-6に示す実物大模型路盤で第2回目の荷重試験を実施した。

以下の実物大模型での繰返し荷重試験結果については、第2回目の結果を中心に述べる。

(1) 共振試験

共振試験は、繰返し荷重試験に先立ち、スラグ路盤(しらす地盤を含む)の共振振動数を把握するために、4章に示した模型路盤にて実施したものである。

図-8に、起振機を用いて±10kN(全振幅20kN)程度で周波数1~30Hzの範囲で1Hzずつ段階的に振動させて実施した共振試験の結果を示す。

この結果によれば、第1回目の実物大模型では、

周波数14~16(新幹線速度130~150km/hに相当)Hz付近と20Hz(新幹線速度190km/hに相当)付近で起振機の変位振幅が卓越する傾向を示した。また、第2回目の実物大模型では、周波数20~21Hz(新幹線速度187~197km/hに相当)付近と28~30Hz(新幹線速度260~280km/hに相当)付近で起振機による変位振幅が大きくなる傾向を示した。

(2) 繰返し荷重試験⁵⁾

a) 荷重条件

実物大模型での荷重試験における繰返し荷重は70kN±60kNで最大荷重130kN、最小荷重10kN(全振幅120kN)とした。これは、実際の列車荷重の1台車分がスラグ路盤に加わる際の圧力を実物大模型と同一にした場合の荷重である。

繰返し荷重回数は200万回とし、年間の列車通過トン数を600万トン程度とすれば、供用約10年間分の繰返し回数に相当する。

荷重周波数は、新幹線の速度(300km/h)と軸距を考慮すれば、30Hz程度となるが、起振機の能力の都合と共振点付近の厳しい条件とした方が設計上安全側になることより、20Hzとした。

起振機は路盤コンクリートに固定させ、路盤コンクリートを介して繰返し荷重が作用するようにした。また第1回目も基本的に同じであるが、第2回目の

載荷試験での変位計等の各種測定機器の設置位置を図-9に示す。

b) 試験結果(第2回目の実物大模型での結果)

主な試験結果を図-10~17に示す。

図-10、図-11の測定は起振機の4隅に設置したひずみゲージ式(H-1~4)の変位計で行った。図-10の変位振幅は載荷中の起振機による路盤コンクリート表面の全振幅に相当する。図-10によれば、載荷回数の増加による変位振幅の増加はほとんど見られない。図-11の沈下量は除荷時の沈下量であり、起振機の塑性沈下量すなわち路盤コンクリート表面の塑性沈下量に相当する。沈下量は10万回を過ぎた頃より徐々に増加し、200万回で2mm前後となっている。また、上記変位計の値を補完し路盤コンクリートの全体的な変形傾向を見るために行った路盤表面4隅のレベル測量による除荷時の塑性沈下量を図-12に示す。これによると、路盤コンクリートは全体的に鉛直下向きに沈下しており、オーダー的には図-11とほぼ同等な値が得られている。

図-13、図-14に土圧計の値を示す。この土圧計は、繰返し荷重(載荷応力度)が実際のスラグ路盤と見做す地山内にどの程度伝播するかを把握するために設置したものである。起振中の土圧の変動振幅は、起振機直下(E-1)では4~6 kN/m²程度の範囲の値を示すが、水砕スラグ直下(E-2; しらす地山上面)では7~11kN/m²程度の範囲の値を示し、何れの箇所も、繰返し載荷の進捗に伴う大幅な土圧の増減は認められなかった。スラグ路盤に作用する圧力は起振機の繰返し荷重の振幅120kNを路盤コンクリートの面積(2.5m×3.1m)で除せば、15kN/m²となり、均一に作用した場合は、スラグ路盤表面の圧力は15kN/m²となるが、計測値はほぼ半分程度である。しかし、別途実施したFEM解析結果では、作用土圧の分散は一様ではなく、端部で大きく中央部で小さく(端部の1/2~1/3の応力度)なることから、繰返し載荷試験時にも解析時と同様な応力分散が路盤内で起こった可能性が考えられる。

除荷時(載荷停止時)の起振機下の水砕スラグ路盤上面の土圧は、繰返し載荷 20 万回までは変化がわずかである。その後、増加する傾向を示し、E-1では10kN/m²程度まで、E-2では6kN/m²程度まで次第に増加した。これは、スラグ路盤の沈下とともに土圧計の受圧面がコンクリート路盤あるいはスラグ路盤と密着したことも影響しているものと推定される。

図-15、図-16に間隙水圧計の値を示す。

図-15によれば載荷中の間隙水圧の全振幅は、概

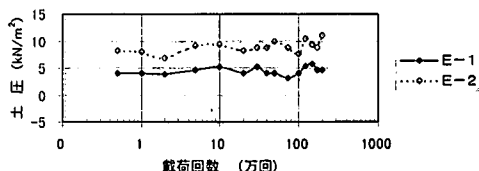


図-13 載荷回数と土圧の関係(載荷時)

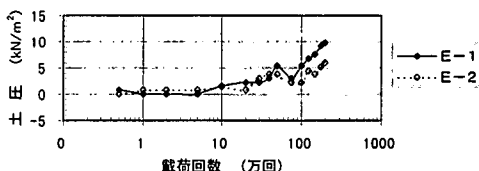


図-14 載荷回数と土圧の関係(除荷時)

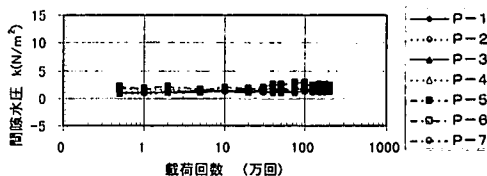


図-15 載荷回数と間隙水圧の関係(載荷時)

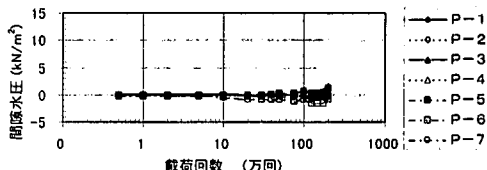


図-16 載荷回数と間隙水圧の関係(除荷時)

ね1~2 kN/m²程度でほとんど変化しない。なお、しらす地山中の一部の間隙水圧のみが、繰返し載荷30万回以降、2.8kN/m²程度まで上昇したが、土圧に比べかなり小さい値(1/4以下)であった。また図-16の除荷時のスラグ路盤内および地山内の間隙水圧は、繰返し載荷 10万回までは-0.4~+0.1kN/m²程度でほとんど変化せず、その後-0.14~+0.15kN/m²の範囲で次第に増・減する傾向を示したが極めて小さい値であった。

(3) 繰返し載荷試験後の各種確認試験

第2回目の実物大模型での繰返し載荷試験後に、コアボーリングによりスラグの不攪乱試料を採取し、一軸圧縮強度 q_u 等を求めた。試験結果を載荷試験前に実施した結果と合わせて表-8と図-17に示す。

この結果によると、載荷試験後は載荷試験前に比べ、乾燥密度は大きめ、圧縮強度(平均値)や透水係数はやや小さめの値を示すが、何れの物性値も全体的に見てほとんど変化しないことが判った。

表-8 繰返し載荷試験前後のスラグ物性値

試験時期	載荷試験前	載荷試験後
湿润密度 g/cm ³	1.70	1.72
乾燥密度 g/cm ³	1.42	1.48
土粒子の密度 g/cm ³	2.71	2.69
自然含水比 %	19	17
間隙比	0.91	0.78
圧縮強度 MN/m ²	3.0	2.6
透水係数 cm/s	現場	2.4×10^{-3}
	室内	9.3×10^{-3}
		7.9×10^{-3}

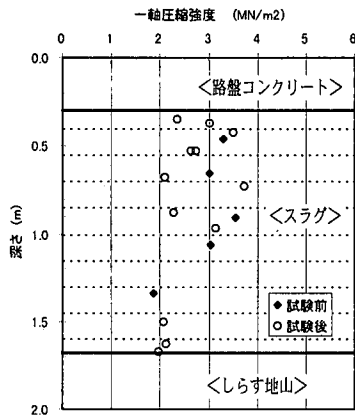


図-17 振動載荷試験前後の圧縮強度の深度分布

また、繰返し載荷によって、路盤に沈下がわずかに生じたものの、路盤コンクリートには亀裂や目地のずれ等の変状は全く見られず健全であった。

8. 考察

ここでは、路盤耐久性の主要な指標と考えられるスラグ路盤の沈下を中心に考察する。

第1回目の実物大模型(図-5)での試験は、7章の冒頭で述べたように、繰返し載荷に伴う沈下が大きかった(図-18 参照)。同図の沈下量は、起振機を停止した後、路盤コンクリートの4隅においてレベル測量したものである。この図によると、繰返し載荷5~10万回までは極端に大きな沈下量とはならなかったが、その後急増し、繰返し載荷200万回時点では最大で49mmも沈下した。また、最大沈下量と最小沈下量の差が約20mmもあり、路盤コンクリートが傾斜して沈下したことが判る。この第1回目の模型路盤での最終沈下量は、第2回目の試験結果の2mmに比べると25倍程度もあり、かなりの沈下量である。

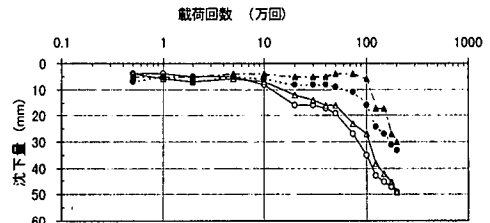


図-18 載荷回数と沈下の関係(第1回目試験)

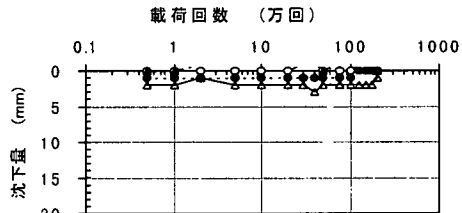


図-19 コンクリート路盤における載荷回数と沈下の関係(測量結果)

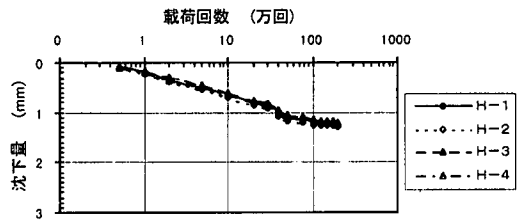


図-20 コンクリート路盤における載荷回数と沈下の関係(変位計データ)

一方、第1回目の実物大模型で構築したコンクリート路盤の場合は、図-19に示すように200万回の繰返し載荷でも1~2mmであり、レベル測量の精度を考慮すれば、ほとんど沈下がないといえる。さらに詳細に見てみると、図-20の変位計計測結果に示すように、路盤接地面付近のしらす地山の強度低下に伴う継続的な沈下が見られるが、沈下の累積はかなり少ないことが判る。

第1回目のスラグ路盤の沈下量が大きくなった原因は、第1回目と第2回目の実物大模型の設置箇所、しらす地山、スラグ材料が異なった影響よりも、路盤仕上がり時の乾燥密度がかなり小さかった(表-4、表-5 参照)ためと考えられた。そこで、第2回目のスラグ路盤における締固めでは、隅各部の転圧に小型のランマーを使用するとともに、締固めの際の施工性を考慮し路盤形状を図-6に示す矩形に変更して締固め密度の増大に努めた。その結果、第2回目の実物大模型(スラグ路盤)では圧縮強度や平板載荷試験値がかなり大きくなったが、その原因は、締固め密度の増大だけではなく、添加材を石灰+石膏から、より早期硬化を期待できるセメントに変更し、かつ添加量を5%から2倍の10%にした影響もあると考えられる。さらに無視できない原因として、スラ

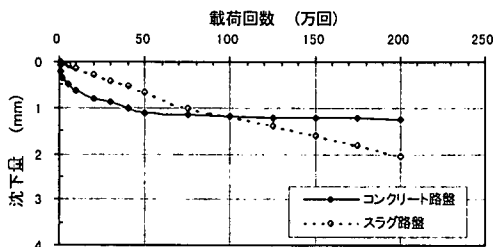


図-21 コンクリート路盤・スラグ路盤における載荷回数と沈下の関係比較

グ養生において第1回目の実物大模型試験の際にはウェルポイントの解除が早く、スラグ路盤内に流水がある状態で養生したため、流水面以下のスラグ水硬成分が流出し強度発現が遅れたのに対し、第2回目の試験では上記の反省をもとにスラグ施工後14日経過した後にウェルポイントを解除するなどの配慮を払ったため、これも圧縮強度等の増加に影響したものと考えられる。

しかし、締固め密度やセメント添加量の増大は、圧縮強度が増加する反面、透水性が減少する可能性がある。これに関しては、表-7に示すように第1回目と比べて透水性は減少しているものの、 10^{-3} cm/s レベルは確保しているので問題ないと考えられる。

したがって、実際のスラグ路盤は、透水性と強度を確保し列車の繰返し荷重による沈下を最小限に抑制して耐久性を高めるためには、第2回目の模型路盤と同様な条件で構築する必要があると考えられる。

なお、起振機設置台4隅の変位計による沈下量を平均してコンクリート路盤と第2回目のスラグ路盤とを比較した結果(図-21)によれば、両者は同じオーダーの沈下量になった。しかし、沈下傾向は異なり、スラグ路盤の場合は沈下が収束せず、200万回以上の繰返し荷重によりさらに沈下量が増加する傾向を示した。ただし、コンクリート路盤の場合も、路盤直下のしらす地山に作用土圧の急激な減少や指標硬度の低下等、噴泥の兆候が認められており、必ずしもコンクリート路盤の方が良いというわけではない。

水砕スラグ路盤の沈下を抑えるためには、さらにセメント添加量を増加し、コンクリート並の強度を確保するという考えもある。しかし、透水性の確保を第一とし、また路盤部だけではなく、しらす地山の沈下も考えられることから、路盤部あるいはしらす地山の沈下に対しては、対処療法的に軌道部分で対応するのが現実的と思われる。現在、土構造物上のスラブ軌道の沈下に対する対処方法としては、レールと締結装置の間に高さ調整のバッキングを挿

入する方法があり、最大30mmの沈下に対応したレール締結装置が開発されている。供用10年間に相当する200万回の繰返しで2mmの沈下は、直線近似で外挿した場合でも30mmになるのに150年間かかることになる。このことより、たとえ沈下が収束しなくても現実的にはレール締結装置で対処していくので、列車運行の障害となることはないと考えられる。

9. 結論

本試験結果のまとめを以下に示す。

- ① 室内繰返し載荷試験結果より、載荷応力の5倍以上の強度を有する路盤を作成すれば、長期的な繰返し荷重による沈下を防止できることが判った。なお、別途実施した室内配合試験結果等では、水砕スラグにセメントを8~10%添加することにより、十分な圧縮強度($q_u \geq 2\text{MN/m}^2$)と透水性($k \geq 5 \times 10^{-3}\text{cm/s}$)が確保できることが判っている。
- ② 水位変動試験より、ウェルポイントを停止しても、中央排水管をスラグ路盤内に設置して水位を低下させることにより、路盤コンクリート上に地下水位が上昇しない程度の十分な透水性が確保できた。
- ③ 200万回の繰返し載荷によって生じたスラグ路盤の沈下は2mm程度であり、将来的に沈下が更に進行しても十分にレール締結装置で対処できる。
- ④ 繰返し載荷終了後の路盤コンクリートには亀裂等の変状は見られず、またスラグの強度特性にも変化が見られなかった。
- ⑤ ①~④の結果を受け、スラグ路盤の透水性と列車荷重に対する十分な強度の確保が可能であることが判ったことより、結果的に、長期的な繰返し荷重に対するスラグ路盤の耐久性を確認できた。

10. 今後の展開

本試験に基づき実際のスラグ路盤を構築するためには、スラグ路盤の詳細な設計・施工仕様等の設定等を行う必要がある。そこで、施工中のトンネル内において試験施工等を実施し、実施工でのスラグ路盤の品質や施工性を確認した^{6)~7)}。さらに、「しらす地盤トンネル用透水性路盤設計・施工マニュアル」を作成して、トンネル全体・路盤施工手順、掘削方法、掘削面地盤強度確認方法、材料規定・試験方法、材料品質管理方法、敷き均し転圧方法、施工

後養生方法、仕上がり状態・強度・透水性確認方法等を設定して本施工を進めている。現在のところ、スラグ路盤の施工は順調であり、その強度や透水性等の品質も問題ないことが確認されている。

九州新幹線の地下水面下のしらすトンネルで採用したスラグ路盤は、新設の新幹線トンネルとしては初めての試みである。このため、供用後も継続的に路盤等の状態を監視する方が望ましく、今後は、供用時における機能確認方法などについて検討を進めたいと考えている。

謝辞：本報告は九州大学の榎木武教授を委員長とする「しらす地盤トンネル・路盤特別委員会」で検討した内容を取りまとめたものであり、委員会の委員ならびに実物大模型試験での現場の関係者の方々に大変お世話になった。ここに深謝する次第である。

参考文献

- 1) (財)日本トンネル技術協会：シラス地盤トンネルの施工法に関する調査研究報告書，pp.90～139，1988.3.
- 2) 露木利貞，吉田三郎，羽田忠彦，松雪清人：しらす

地盤地帯における地下水下のトンネル工事，土と基礎，pp.43～48，1988.3.

- 3) 平井三吉：第二高尾山トンネルりょう盤コンクリートの変状と対策，日本鉄道施設協会誌，pp.223～225，1992.3.
- 4) 関根悦夫，鬼頭誠，垂水尚志，米澤豊司：安定処理した鉄道路盤の繰返し荷重に対する耐久性の検討，土木学会論文集，No.546/VI-32，pp.181～188，1996.9.
- 5) 須長誠，森本持男，西山智夫，八百山孝：水砕スラグを用いた鉄道路盤の繰返し載荷試験，土木学会第54回年次講演会，pp.8401～841，1999.9.
- 6) 斉藤芳徳，松本雄二，西山智夫，藤本孝晴，須長誠，八百山孝：水砕スラグを用いた鉄道路盤の締固め・強度特性，土木学会第54回年次講演会，pp.842～843，1999.9.
- 7) 井川順司，佐藤宏，松本雄二，松田康治，八百山孝，村上利喜：水砕スラグを用いた鉄道路盤の強度・透水特性，土木学会第54回年次講演会，pp.838～839，1999.9.

(2000. 8 . 28 受付)

FULL-SCALE MODEL TEST OF PERMEABLE SLAG ROADBED ON RAILWAY TUNNEL

Yuji MATSUMOTO, Makoto SUNAGA, Hiroshi OHSHIMA and Takashi YAOYAMA

The new type roadbed using the slug materials is adopted in the tunnel under the Shirasu ground water level on Kyushu Shincansen under the construction. The water-resistant structure is generally selected under the high water pressure on Shirasu ground. But it is found that the water-resistant structure can not completely prevent against the mud-pumping by trainload because the resistant of water erosion on Shirasu ground is weak. The new type roadbed using the slug materials is designed in order to decrease the ground water pressure.

This paper describes the examination results of permeability and durability under cyclic load of the new type roadbed. The coefficient of roadbed permeability is the grade of 10^{-3} cm/s in case of addition the 10% cement to the slag materials. The roadbed settlement is very small under the 2×10^6 times cyclic load.