

移動輪荷重作用下の粒状路盤の 力学挙動に及ぼす含水状態の影響評価

石川達也¹・細田充²・三浦清一³・関根悦夫⁴

¹正会員 博(工) 北海道大学准教授 大学院工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8)

E-mail : t-ishika@eng.hokudai.ac.jp

²正会員 (財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

³正会員 工博 北海道大学教授 大学院工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8)

⁴正会員 博(工)(財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

本研究では、湿潤状態にある粒状路盤の移動体通過時の繰返し塑性変形挙動を把握するとともに、主応力軸回転を受ける飽和・不飽和粒状路盤材の力学特性の評価方法を検討する。このため、浸水・気乾状態の模型粒状路盤や粒状路盤材に対して、繰返し載荷試験（移動載荷・定点載荷）および単調載荷試験（支持力・クリープ等）を行い、含水状態の違いが粒状路盤や粒状路盤材の繰返し変形特性・支持力特性に及ぼす影響を検討した。この結果、粒状路盤の塑性沈下は含水状態の変化に強く影響され、その傾向は移動載荷方式の繰返し載荷試験時に一層顕著になること、および移動輪荷重を繰返し受ける飽和・不飽和粒状路盤材の力学特性の評価試験方法として、多重リングせん断試験が有効であることを明らかにした。

Key Words : granular base, cyclic deformation, wheel load, water content, principal stress axis rotation

1. はじめに

公共事業への投資余力の減退や労働人口の減少が深刻な近年では、メンテナンス・フリーな交通関連社会基盤施設の開発や、交通施設網の効率的な維持管理方法の構築が急務である。このため、交通荷重を繰返し受ける道路や線路のような多層系走行路構造の変形・沈下特性の解明および挙動予測手法の構築を目的とした研究開発は、その重要性を増している。著者らは、その研究開発の一環として、一定荷重を保持した載荷車輪を往復移動できる移動輪荷重載荷試験装置や移動体の走行による主応力軸回転の影響を評価可能な室内要素試験機を開発し、特に粒状路盤を研究対象とした移動輪荷重繰返し作用下にある多層系走行路構造の変形・沈下特性の解明および挙動予測手法の構築を検討している¹⁾²⁾。その結果、気乾状態の粒状路盤に対して行った移動載荷試験では、線状構造物のある断面に繰返し集中荷重を加える定点載荷方式に比べ、2倍程度粒状路盤構造部分の塑性沈下が促進されるなど、移動輪荷重が粒状路盤（気乾状態）の繰返し塑性変形特性に多大な影響を及ぼすことを明らかにした。しかしながら、これらの研究は、気乾燥状態にある粒状路盤という限られた条件の下で成立するものであり、供用されている道路の下層路盤や線路の道床を想定した際

に問題となる、降水や凍結融解、地下水位上昇等の含水状態の変化が交通荷重繰返し作用時の粒状路盤の挙動にどの程度影響するかについて検討したものではない。

土の含水状態の違いが路床・路盤の支持力特性にどのような影響を及ぼすかについては従来検討が進められてきた³⁾⁶⁾。例えば、鉄道線路では、バラスト軌道の不同沈下が散水時に進行するという報告がなされており、含水比が道床バラストで構成される粒状路盤の支持力特性に強く影響を及ぼすことが確認されている⁷⁾。バラスト軌道の沈下速度に対する粒状路盤の含水状態の影響を明らかにできれば、線路の敷設・使用条件に応じた粒状路盤材の材料要求性能の明示や粒状路盤の長期劣化予測を組み入れた軌道構造の供用性曲線の最適化が検討できる。しかし、これらの研究では、粒状路盤の繰返し塑性変形挙動を検討するための模型実験・要素試験を、主応力軸方向が載荷中回転しない定点載荷方式で一般に行っている。このため、前述のように主応力軸回転の影響を考慮した場合、従来の研究成果と定量的に大きく異なる可能性もあり、湿潤状態にある粒状路盤に移動輪荷重が繰返し作用する際の力学挙動は十分解明されていないといえる。

本研究では、このような状況を踏まえ、気乾状態の粒状路盤に対して行った既往の研究をより実現象に近づけるために、移動体の走行による主応力軸回転の影響と降

表-1 模型粒状路盤の試験条件一覧

含水状態	載荷方法	試験方法	初期乾燥密度
気乾	車輪	繰返し移動載荷試験	1.84 g/cm ³
		繰返し定点載荷試験	1.84 g/cm ³
	フーチング	クリープ試験	1.84 g/cm ³
		支持力試験	1.84 g/cm ³
浸水	車輪	繰返し移動載荷試験	1.88 g/cm ³
		繰返し定点載荷試験	1.88 g/cm ³
	フーチング	クリープ試験	1.87 g/cm ³
		支持力試験	1.87 g/cm ³

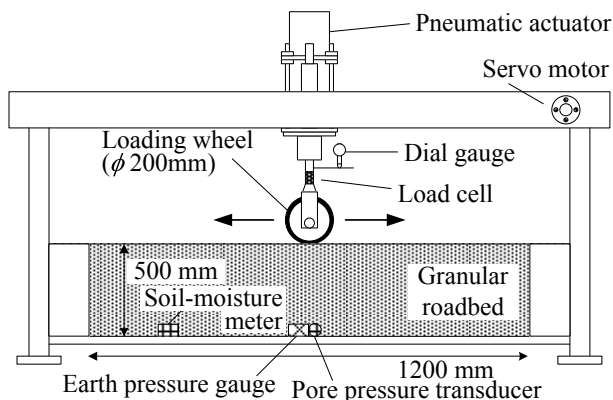


図-1 移動輪荷重載荷試験装置の概要

水等による含水比変化の影響との相乗効果を考慮して、湿潤状態にある粒状路盤の移動体通過時の繰返し塑性変形挙動を把握するとともに、主応力軸回転を受ける飽和・不飽和粒状路盤の力学特性（繰返し塑性変形・支持力特性）の評価試験方法を検討する。

2. 模型粒状路盤の載荷試験

本章では、粒状路盤材で作製した浸水・気乾という2種類の含水状態の模型路盤に対して、2種類の繰返し載荷試験（移動載荷・定点載荷）および支持力試験を行い（表-1）、含水状態の違いが粒状路盤の力学特性に及ぼす影響について検討する。

(1) 試験方法

a) 試験装置

試験に用いた移動輪荷重載荷試験装置の概要を図-1に示す。本研究で用いる移動輪荷重載荷試験装置とは、空圧により所定の鉛直荷重を作用させた載荷輪を往復走行可能な試験装置である。本試験装置では、載荷軸が載荷フレームに取り付けたサーボモーターの回転により左右に移動するため、サーボモーターの回転数を制御することで載荷輪の移動速度を変更できる。載荷輪の直径は200mm、奥行き270mmであり、荷重制御のため厚さ5mmのゴム板が巻き付けてある。なお、載荷軸には、載荷輪の代わりにフーチング（幅72.3mm、奥行き270mm、後述する載荷輪による載荷試験の設定荷重2.23kN載荷時の接地面積と同等）を設置することも可能である。付属す

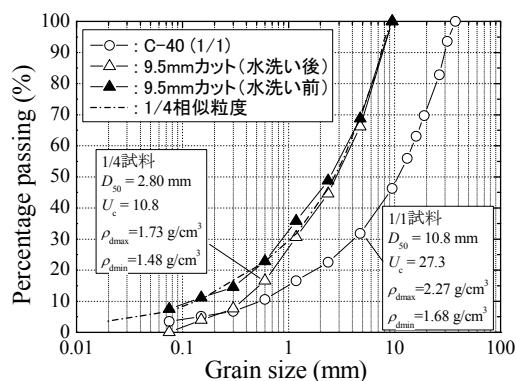


図-2 試料の粒径加積曲線

る土槽は、幅1870mm、奥行き300mmであり、高さ500mmまでの模型地盤を設置することができる。土槽底面には分割ポーラスストーンを設置し、底面の給排水孔から、模型地盤に通水を行うことができる。また、土槽前面に透明なアクリル板が設置されているため、模型地盤の変形を目視等により観察することができる。計測装置は、変位変換器、二方向ロードセル、土圧変換器、小型間隙水圧計、土壌水分センサーの5つであり（図-1）、載荷点において、鉛直変位・鉛直荷重・走行方向のせん断荷重を、土槽底部の中央において路盤圧力・間隙水圧を、端部において土壌水分をそれぞれ測定している。

b) 供試体作製方法

試験に用いた試料は、道路で路盤材として使用されている自然砕石クラッシュラン（C-40）である。図-2に試料（図中「1/1」と記載）の粒径加積曲線と物理的性質を示す。なお、最大・最小密度については「礫の最大・最小密度試験方法」（地盤工学会基準JGS0612-2006）に準拠して決定した。気乾状態の試験に用いる模型路盤（高さ500mm、幅1200mm、奥行き300mm）は、土槽内に気乾乾燥状態の試料を投入し、締固め度90%（ $\rho_d=1.86\text{g/cm}^3$, $D_f=37.4\%$ ）を目標に突固めて作製した。その後、供試体上面には端面整形のため9.5mm以上をカットした試料を撒き、鉛直輪荷重 $P=1\text{kN}$ で転圧を行った。浸水状態の試験では、気乾状態の模型路盤を作製後、パイピング等により供試体に局所的な乱れが生じないように速度で土槽底面から通水を行い、底面より水位400mmとした状態で96時間以上水浸させた後に載荷試験を行った。なお、模型路盤が走行路横断方向を同一断面と仮定した2次元平面ひずみ状態を確保するために、土槽前面背面方向に対して変形を拘束するとともに、土槽前面（アクリル板）と模型路盤の間にはシリコングリースを塗った塩化ビニール板を挟んで側面摩擦を軽減している。この場合、土槽の奥行きに対し載荷輪幅が若干小さいことにより生じる可能性のある、土槽前面背面方向への砕石の側方流動の影響については、目視等により殆ど無いことを事前に確認しており、周面摩擦は十分に軽減されているものと

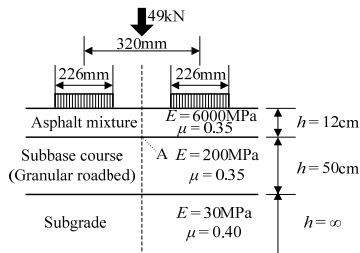


図-3 多層弾性解析モデルの解析条件

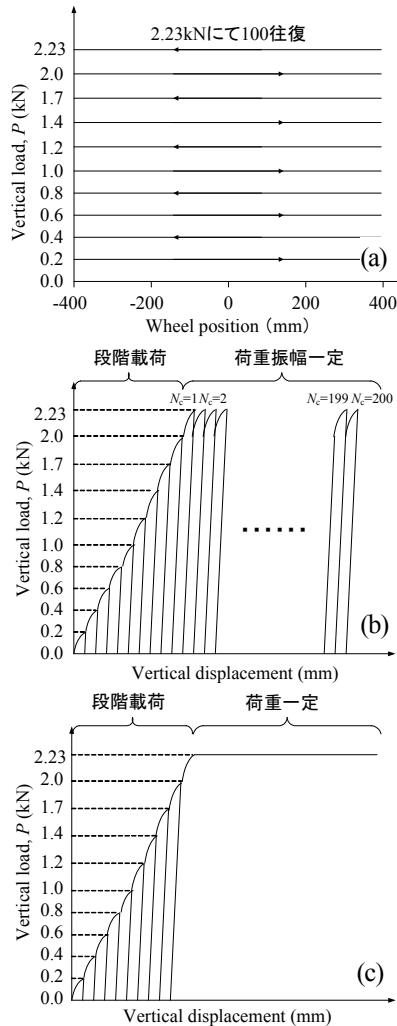


図-4 模型試験の荷重荷重方法：

(a) 移動荷重, (b) 定荷重, (c) クリープ

考えられる。

c) 荷重輪による繰返し荷重試験とクリープ試験

移動荷重方式（車輪走行方式）と定荷重方式（鉛直荷重の定荷重方式）の2種類の繰返し荷重試験とクリープ試験を行った。荷重輪の鉛直荷重は、実道路を想定したモデル（図-3）を用いて、多層弾性解析（GAMES）⁸⁾を行い、車輪直下の路盤表面で生じる鉛直応力の大きさ（114.2kPa）を求め、その値に対し荷重輪の接地面積を乗ずることで荷重する鉛直荷重を $P=2.23\text{kN}$ に設定した。ただし、本研究のように、表層・基層で分散した荷重を荷重輪の接地面積範囲内に作用させて粒状路盤の累積沈下特性を評価する方法の妥当性については、今後さら

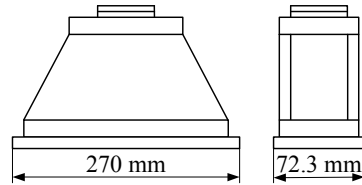


図-5 支持力試験用荷重フーチング

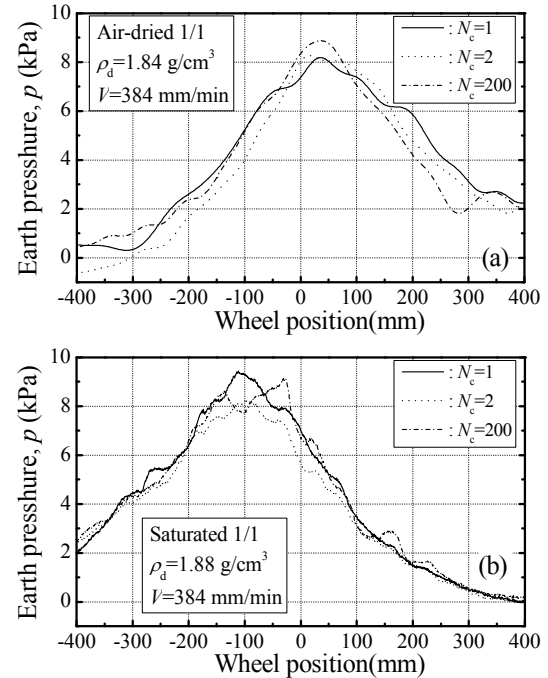


図-6 土圧～車輪位置関係（移動荷重）：(a) 気乾, (b) 浸水

に検討していく必要がある。

各荷重試験は以下のように実施した。移動荷重方式の試験（以下、「移動荷重試験」と称す）では、所定の鉛直輪荷重を作用させた荷重輪を定速度 384mm/min で、模型路盤中央を中心とした 800mm の範囲の模型路盤上を100往復（繰返し荷重回数 $N_c=200$ 回）走行させた。なお、急激な荷重荷重に伴う模型路盤の不同沈下を抑制するために、鉛直輪荷重が $P=2.23\text{kN}$ に達するまでは、図-4に示すように、鉛直輪荷重を車輪走行に伴い徐々に増加させた。一方、定荷重方式の試験（以下、「定荷重試験」と称す）では模型路盤の中央に正弦波の鉛直輪荷重（ $P_{\max}=2.23\text{kN}$ ）を荷重周波数 $f=0.017\text{Hz}$ で繰返し荷重（ $N_c=200$ 回）した。また、クリープ試験では、鉛直荷重 $P=2.23\text{kN}$ まで段階的に荷重した後、 $P=2.23\text{kN}$ 一定で移動荷重試験の荷重時間と同じ 25000 秒荷重した。なお、定荷重試験・クリープ荷重試験とも、移動荷重試験の荷重方法と対応させるため、段階荷重を採用した（図-4）。
d) フーチングによる支持力試験

荷重軸にフーチング（図-5）を取り付けて、模型路盤の支持力試験を行った。支持力試験では、フーチングに鉛直荷重 P を荷重し、 $P=0.1\text{kN}$ から最大 5.58kN まで段階的に増加した。具体的には荷重速度 0.074kN/s で所定の鉛直荷重（ $P=1.12, 2.23, 3.35, 4.46, 5.58\text{kN}$ の5段階）ま

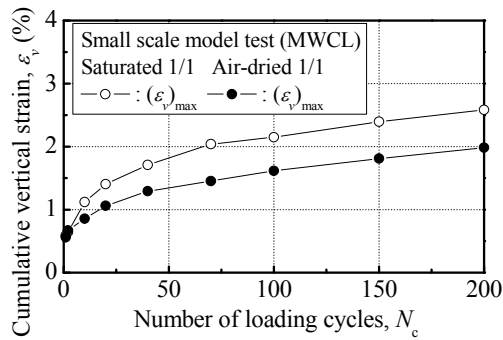


図-7 累積鉛直ひずみ～繰返し载荷回数関係（移動载荷）

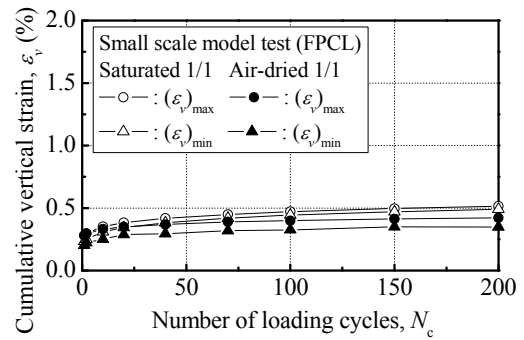


図-9 累積鉛直ひずみ～繰返し载荷回数関係（定点载荷）

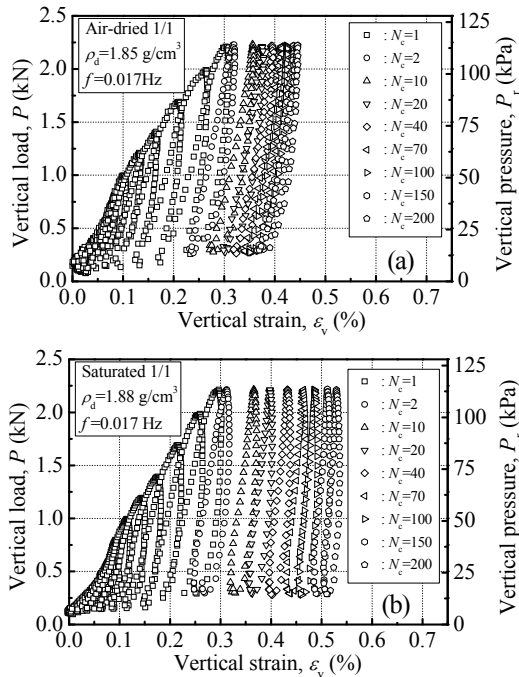


図-8 鉛直荷重～鉛直ひずみ関係（定点载荷）：(a) 気乾, (b) 浸水

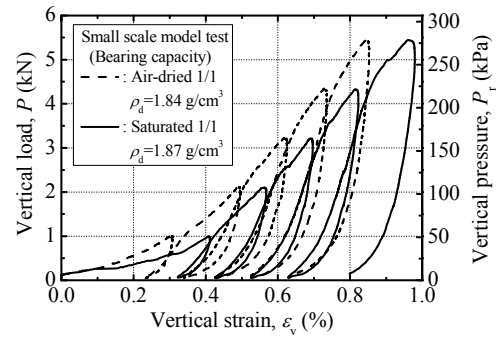


図-10 鉛直荷重～鉛直ひずみ関係（支持力試験）

まず、試験開始前に鉛直輪荷重 $P=0.1\text{kN}$ を作用させた载荷輪を走行させ、その際に载荷輪位置で得られた供試体高さを初期高さに、また計測された鉛直変位量を初期値 ($u=0$) に設定した。その上で、鉛直荷重が作用した载荷輪位置における鉛直変位量を载荷輪走行範囲内で平均した値を u と定義し、 u を平均初期高さで除して ε_v を求めた。ただし、载荷輪に巻き付けたゴムの変形分は補正により除去している。図から、同一繰返し载荷回数の累積鉛直ひずみを比較した場合、気乾状態と比較して、浸水状態の方が大きくなるのがわかる。

b) 定点载荷試験

図-8 に、気乾・浸水状態の定点载荷試験における鉛直輪荷重 P と鉛直ひずみ ε_v の関係を示す。図から、鉛直荷重の载荷により模型路盤には塑性沈下が生じるが、繰返し载荷回数の増加に伴って履歴ループの面積は減少し、変形挙動は徐々に弾性化することがわかる。また、同一繰返し载荷回数の同一荷重レベルで鉛直ひずみを比較した場合、荷重レベルによらず、浸水状態の方が気乾状態より大きくなるのがわかる。図-9 に、気乾・浸水状態の定点载荷試験の累積鉛直ひずみ $(\varepsilon_v)_{\max}$ ・ $(\varepsilon_v)_{\min}$ と繰返し载荷回数 N_c の関係を示す。ここで、累積鉛直ひずみ $(\varepsilon_v)_{\max}$ は、それぞれ繰返し载荷中に鉛直輪荷重が最大・最小となった時の鉛直ひずみとした。図から、移動载荷試験と同様、同一繰返し载荷回数の累積鉛直ひずみは気乾状態より浸水状態の方が大きくなるのがわかる。

c) 支持力試験

図-10 に、気乾・浸水状態の支持力試験における鉛直荷重 P と鉛直ひずみ ε_v の関係を示す。図から、鉛直荷重の

で载荷し、その後 $P=0.1\text{kN}$ まで除荷し、次の所定荷重まで再载荷を行う段階载荷を実施した。段階载荷を採用したのは、急激な荷重载荷に伴う不同沈下を抑制するためである。

(2) 試験結果および考察

a) 移動载荷試験

図-6 は、気乾・浸水状態の移動载荷試験で载荷輪の移動により模型路盤底部に設置された土圧計が受ける鉛直応力波形を、繰返し载荷回数 $N_c=1, 2, 200$ 回について示したものである。同図では、車輪が端部にある時、土圧は最小となり、载荷輪が土圧計の直上に来た時、最大となるなど、载荷輪の移動に伴って底盤の鉛直応力は変動している。また、図を見る限り、含水状態や繰返し载荷回数の違いが模型路盤底部の鉛直応力に及ぼす影響は小さいと考えられる。図-7 に、気乾・浸水状態の移動载荷試験における繰返し载荷中の累積鉛直ひずみ $(\varepsilon_v)_{\max}$ と繰返し载荷回数 N_c の関係を示す。ここで、移動载荷試験中の鉛直変位量 u と鉛直ひずみ ε_v は次のように定義した。

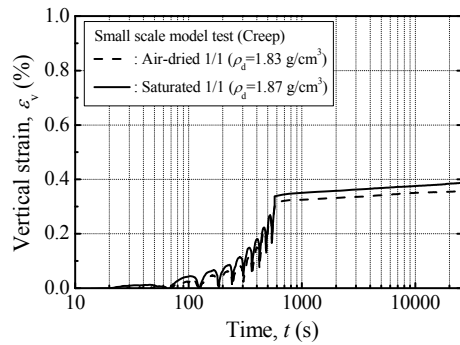


図-11 鉛直ひずみ～荷重時間関係（クリープ試験）

表-2 多重リングせん断試験の試験条件一覧

含水状態	荷重方法	試験方法	初期乾燥密度
気乾	単調荷重	ねじりせん断試験	1.56 g/cm³
		支持力試験	1.56 g/cm³
		クリープ試験	1.56 g/cm³
	繰返し荷重	鉛直応力荷重試験	1.57 g/cm³
		鉛直・せん断応力荷重	1.57 g/cm³
浸水	単調荷重	ねじりせん断試験	1.56 g/cm³
		支持力試験	1.56 g/cm³
		クリープ試験	1.56 g/cm³
	繰返し荷重	鉛直応力荷重試験	1.56 g/cm³
		鉛直・せん断応力荷重	1.57 g/cm³

増加により荷重時の鉛直ひずみや除荷時の残留ひずみは増加すること、および同一荷重レベルで鉛直ひずみを比較した場合、定点荷重試験と同様、荷重レベルによらず浸水状態の方が気乾状態より大きくなることがわかる。

d) クリープ試験

図-11 に、気乾・浸水状態のクリープ試験における鉛直ひずみ ϵ_v ～荷重時間 t 関係を示す。ここで、荷重時間 t は、試験開始時を荷重時間 $t=0s$ とした。図から、鉛直ひずみは、段階荷重中は鉛直荷重の増加により増加するが、 $P=2.23kN$ 一定となった後は、クリープ試験開始初期に若干増加するものの、時間が経過すると一定値に収束する傾向にあることがわかる。また、同一荷重時間で比較した場合、浸水状態の方が気乾状態に比べ鉛直ひずみは大きくなったが、その経時変化に含水状態の違いによる影響は見られなかった。さらに、定点荷重試験との比較から、荷重時間よりも荷重の増減・除荷が鉛直ひずみの増加に強く影響することがわかる。

3. 粒状路盤材の室内要素試験

本章では、浸水・気乾という2種類の含水状態の粒状路盤材に対し、前章の模型試験や実道路の粒状路盤の応力状態を想定した荷重試験（単調荷重・繰返し荷重）を行い（表-2）、含水状態の違いが粒状路盤材の繰返し変形特性・支持力特性に及ぼす影響を検討する。

(1) 試験方法

a) 試験試料

図-2 に試料の粒径加積曲線と物理的性質を示す。なお、

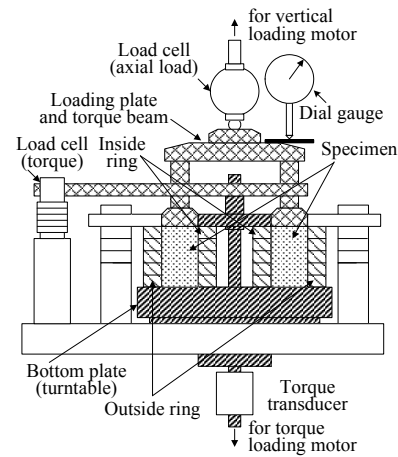


図-12 多重リングせん断試験機

最大・最小密度については、多重リングせん断試験機の供試体寸法を考慮し、「砂の最小密度・最大密度試験方法」（地盤工学会基準 JGS0161-2000）に準拠して決定した。

多重リングせん断試験に用いる試料は、道路で路盤材として使用されている自然砕石クラッシュラン（C-40）を粒径 9.5mm でカットし、その後水洗いをしたもの（以下、「1/4」と称す）である。図に示すように、粒径 9.5mm でカットした水洗い前の試料は、1/1 試料の 1/4 相似粒度に相当する。多重リングせん断試験では 9.5mm カット（水洗い後）試料を用いた理由は、多重リングせん断試験機の機構上、リング間の隙間（0.2mm）から細粒分が流出し供試体の密度調整が困難になること、およびリング間の隙間に細粒分が入り込みリングの動きに悪影響を及ぼすためである。なお、1/1 試料と 1/4 試料の材料特性については、相対密度を合わせた CBR 試験を気乾状態で行って、両者の強度がほぼ同一となることを事前に確認している。また、試験前後に実施したふるい分析による粒度試験結果では、試料のせん断に伴う細粒分の増加はほとんど認められなかった。

b) 供試体作製方法

主応力軸の連続的な回転を考慮したねじり単純せん断試験を礫材に対して実施可能な多重リングせん断試験機（Multi-ring shear apparatus）⁹⁾の概略を図-12 に示す。多重リングせん断試験の供試体寸法は、内径 120mm、外径 240mm、高さ 60mm の中空円筒供試体（幅・高さ共 60mm）である。気乾状態の供試体は、内外リング間に気乾燥試料を 30mm の層に分けて投入し、前章の模型路盤の相対密度（ $D_r=37.4\%$ ）に近づくように各層毎に突き固めて作製した。浸水状態の試験では、気乾状態の供試体を作製後、供試体に局所的な乱れが生じないような速度で供試体側面から通水を行い、模型試験と同様に 96 時間以上水浸させた後に荷重試験を行った。なお、供試体寸法に対して試料の最大粒径が比較的大きいことから、本研究では、試験結果のばらつきを考慮して 3 回程度同一条件で

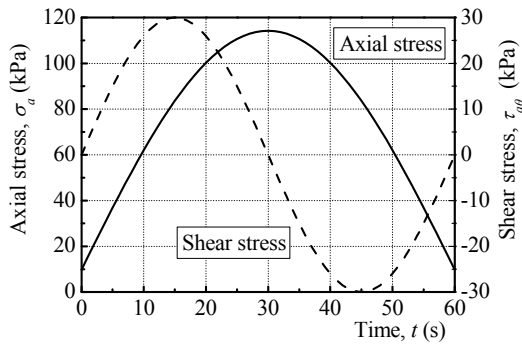


図-13 繰返し载荷1周期分の载荷パターン

試験を実施し、平均的な試験結果を採用している。

b) 単調载荷試験

圧密排気（排水）条件で、単調せん断試験・支持力試験・クリープ試験の3種類の単調载荷試験を行った。単調せん断試験では、含水状態がせん断強度に及ぼす影響を評価するため、供試体を鉛直応力 $\sigma_a=114.2\text{kPa}$ で1時間程度圧縮した上で、 $\sigma_a=114.2\text{kPa}$ 一定の定圧条件下で、せん断ひずみ速度 $0.1\%/min$ の単調ねじりせん断を行った。一方、支持力試験では、含水状態が支持力特性に及ぼす影響を評価するため、鉛直応力 σ_a を载荷速度 3.8kPa/s で所定の鉛直応力（ $\sigma_a=57.1, 114.2, 171.3, 228.4, 285.5\text{kPa}$ の5段階）まで载荷・除荷し、その後次の所定応力まで再载荷を行う段階载荷を実施した。また、クリープ試験では、含水状態がクリープ特性に及ぼす影響を評価するため、支持力試験と同様、鉛直応力 $\sigma_a=114.2\text{kPa}$ まで段階的に载荷した後、 $\sigma_a=114.2\text{kPa}$ 一定で前章の移動载荷試験の载荷時間と同じ25000秒载荷した。

c) 繰返し载荷試験

前章の模型路盤の定点载荷試験と移動载荷試験を模擬して、圧密排気（排水）条件で、鉛直応力载荷試験と鉛直・せん断応力载荷試験の2種類の繰返し载荷試験を行った。まず、鉛直応力载荷試験では、含水状態が定点荷重载荷時の繰返し変形特性に及ぼす影響を評価するため、鉛直応力 σ_a を繰返し载荷することにより、主応力軸回転の無い応力状態で試験を行った。具体的には、鉛直応力 σ_a を 114.2kPa まで段階的に増加させた後、 $\sigma_a=0\sim 114.2\text{kPa}$ の繰返し载荷を行った。なお、鉛直応力 σ_a の载荷波形は、模型路盤底面に設置した土圧計が载荷輪の移動により受けた鉛直応力波形（図-6）に近く、制御し易い正弦波形に設定した。また、前章の移動载荷試験における载荷輪の走行速度と走行回数を考慮して、载荷周波数 $f=0.017\text{Hz}$ 、繰返し载荷回数 $N_c=200$ 回とした。他方、鉛直・せん断応力载荷試験では、含水状態が移動輪荷重载荷時の繰返し変形特性に及ぼす影響を評価するため、鉛直応力 σ_a とせん断応力 $\tau_{a\theta}$ を繰返し载荷することにより、主応力軸回転が生じる応力状態で試験を行った。具体的には、所定の応力条件（ $\sigma_a=114.2\text{kPa}$ 、 $\tau_{a\theta}=30\sim 30\text{kPa}$ ）まで段階的に載

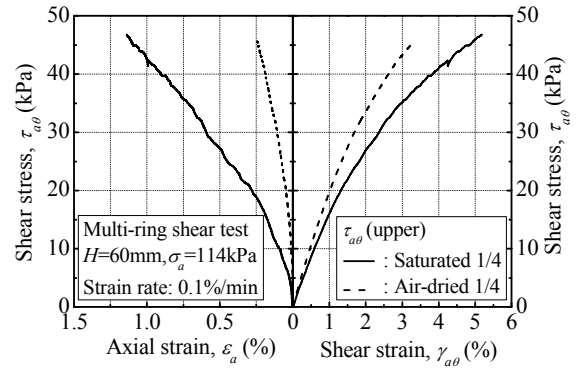


図-14 せん断応力・軸ひずみ～せん断ひずみ関係（ねじりせん断）

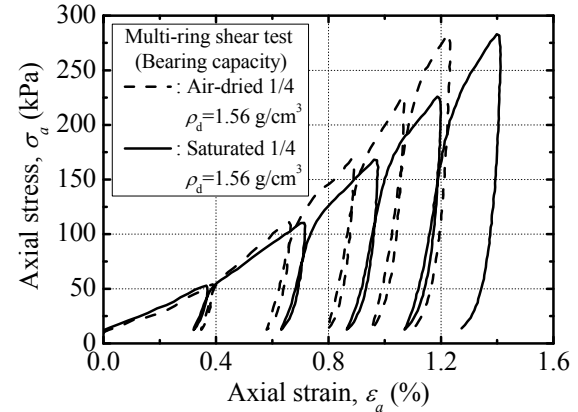


図-15 鉛直応力～軸ひずみ関係（支持力試験）

荷応力を増加させた後、 $\sigma_a=0\sim 114.2\text{kPa}$ 、 $\tau_{a\theta}=30\sim 30\text{kPa}$ の繰返し载荷を行った。図-13に、1回の繰返し载荷中の σ_a と $\tau_{a\theta}$ の载荷パターンを示す。この際、本研究では、载荷輪が無限遠の距離から観測点に接近し、観測点を通り過ぎてまた無限遠に離れるまでに受ける荷重履歴を1回の繰返し载荷と定義する。なお、上記2種類の繰返し载荷試験で段階载荷を採用したのは、前章の模型路盤の定点载荷試験と移動载荷試験をそれぞれ模擬するためである。

(2) 試験結果および考察

a) 単調せん断試験

図-14は、上盤で計測されたせん断応力 $\tau_{a\theta}$ ・軸ひずみ ϵ_a ～せん断ひずみ $\gamma_{a\theta}$ 関係を試料の含水状態別に比較したものである。図から、同一ひずみレベルで両状態のせん断応力を比較した場合、浸水状態では気乾状態よりもせん断強度が低くなることがわかる。また、浸水状態の場合、気乾状態と比較して負のダイレイタンス挙動に伴う、軸ひずみの増加が激しく、 $\tau_{a\theta}=30\text{kPa}$ 载荷時の比較では、気乾状態の約3.8倍の軸ひずみが浸水状態で生じた。したがって、含水状態の違いは、せん断時の強度・変形特性に影響を及ぼすと考えられる。

b) 支持力試験

図-15に、気乾・浸水状態の支持力試験における鉛直応力 σ_a ～軸ひずみ ϵ_a 関係を示す。図から、鉛直応力の増加

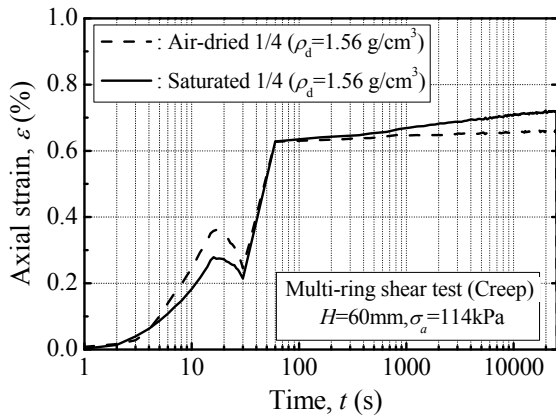


図-16 軸ひずみ～載荷時間関係 (クリープ試験)

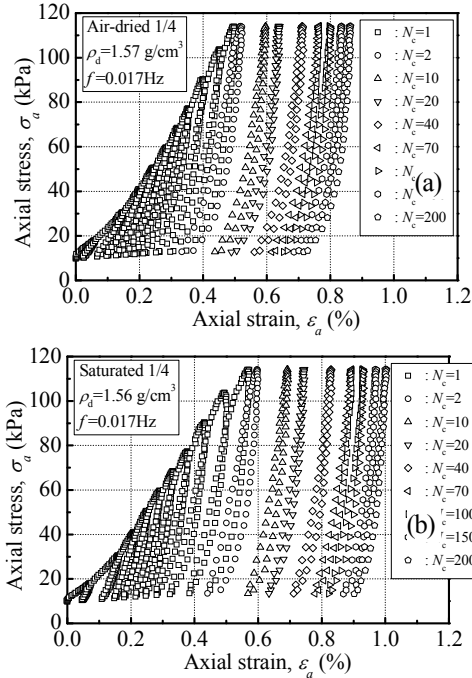


図-17 鉛直応力～軸ひずみ関係 (定点載荷): (a) 気乾, (b) 浸水

により負荷時の軸ひずみや除荷時の残留軸ひずみは増加すること、および同一鉛直応力で軸ひずみを比較した場合、荷重レベルによらず浸水状態の方が気乾状態より大きくなることがわかる。

c) クリープ試験

図-16に、気乾・浸水状態のクリープ試験の軸ひずみ ε_a ～載荷時間 t 関係を示す。図から、軸ひずみは、段階載荷中は鉛直応力の増加により増加傾向にあるが、 $\sigma_a=114.2\text{kPa}$ 一定となった後は、クリープ試験開始初期に若干増加するものの、時間が経過すると一定値に収束する傾向にあることがわかる。また、同一載荷時間で比較した場合、浸水状態の方が気乾状態に比べ軸ひずみは大きくなったが、その経時変化に含水状態の違いによる影響はあまり見られなかった。

d) 鉛直応力載荷試験

図-17は、鉛直応力振幅一定の繰返し載荷試験から得られた気乾状態と浸水状態の $\sigma_a \sim \varepsilon_a$ 関係である。図から、

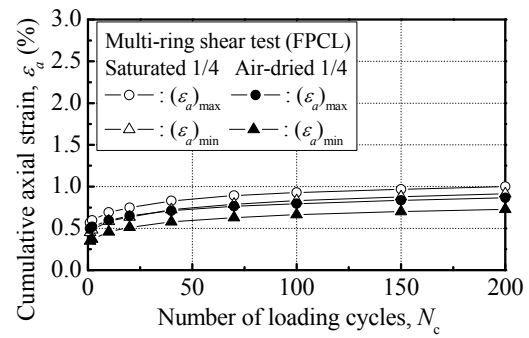


図-18 累積軸ひずみ～繰返し載荷回数関係 (定点載荷)

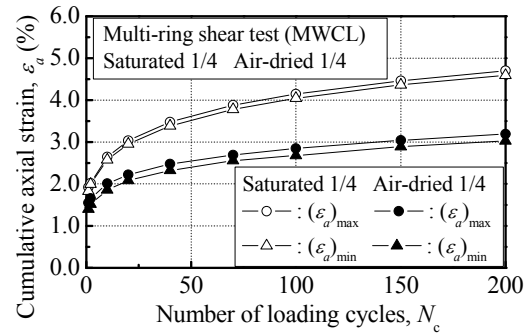


図-19 累積軸ひずみ～繰返し載荷回数関係 (移動載荷)

両試験とも繰返し載荷初期には残留軸ひずみの増加は大きく塑性の卓越する傾向を示すが、繰返し載荷回数の増加に伴い、残留軸ひずみの増加量は減少し弾性化が進行することがわかる。図-18は、同じ試験における累積軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{\max} \cdot (\varepsilon_a)_{\min}$ ～繰返し載荷回数 N_c の関係である。ただし、 $(\varepsilon_a)_{\max}$ は1回の繰返し載荷中に σ_a が最大となった時の ε_a を、同じく $(\varepsilon_a)_{\min}$ は1回の繰返し載荷終了時の ε_a をそれぞれ表している。図から、気乾状態と比較して浸水状態の方が累積軸ひずみは大きくなるという模型試験 (定点載荷試験) 結果と同様の傾向が多重リングせん断試験でも確認できる。

e) 鉛直・せん断応力載荷試験

図-19は、鉛直・せん断応力載荷試験における $(\varepsilon_a)_{\max} \cdot (\varepsilon_a)_{\min} \sim N_c$ 関係である。図から、気乾状態と比較して浸水状態の累積軸ひずみが大きくなるという模型試験 (移動載荷試験) 結果と同様の傾向が、鉛直・せん断応力載荷試験でも見られる。また、鉛直応力載荷試験結果と比較すると、鉛直・せん断応力載荷試験の方が、 ε_a は大きく含水状態が繰返し塑性変形特性に及ぼす影響は強く現れる傾向にある。

f) 模型試験結果と要素試験結果の定量的比較

模型試験結果 (図-15～図-19) と多重リングせん断試験結果 (図-7～図-11) を同一載荷条件で比較すると、前述のように定性的な傾向はほぼ一致するものの、多重リングせん断試験の軸ひずみは全体的に模型試験の鉛直ひずみよりも大きい。これは、模型粒状路盤の深さ方向の応力分布の不均一性に起因すると考えられる。例えば、模型試験では、路盤表面から深くなるにつれて次第に応

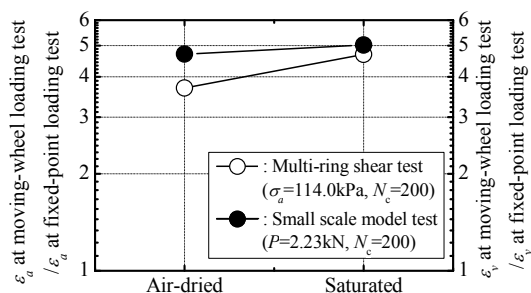


図-20 移動荷重による沈下特性への影響

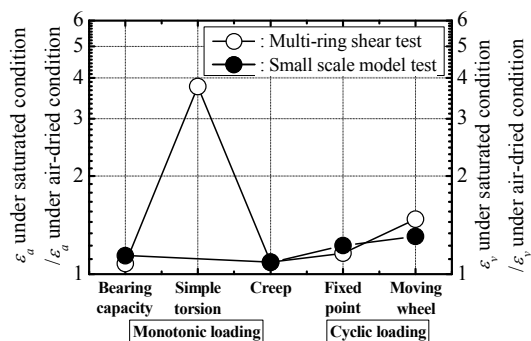


図-21 含水状態の違いによる沈下特性への影響

力が分散されるため、土槽底部付近の応力は、多重リングせん断試験で載荷される載荷輪の接地圧を想定した応力よりも小さくなる。このように、両者の応力状態に差が生じる結果、模型粒状路盤全体の平均的な鉛直ひずみは、多重リングせん断試験の軸ひずみよりも小さくなったと推定される。

4. 累積沈下特性への影響評価

本章では、模型試験で得られた粒状路盤の力学特性と多重リングせん断試験から得られた粒状路盤材の材料特性を比較して、要素レベルで含水状態の違いが粒状路盤の力学挙動に及ぼす影響を検討する。

初めに、移動輪荷重による沈下特性への影響を検討する。図-20は、模型試験における気乾・浸水状態の移動載荷試験の $N_c=200$ 回の累積鉛直ひずみ $(\varepsilon_v)_{max}$ を、同じ含水状態の定点載荷試験の $N_c=200$ 回の $(\varepsilon_v)_{max}$ でそれぞれ正規化し、比較したものである。同図には、多重リングせん断試験における気乾・浸水状態の鉛直・せん断応力載荷試験の $N_c=200$ 回の累積軸ひずみ $(\varepsilon_u)_{max}$ を、同じ含水状態の鉛直応力載荷試験の $N_c=200$ 回の $(\varepsilon_u)_{max}$ でそれぞれ正規化し、比較したのも併せて示した。移動載荷方式と定点載荷方式の累積ひずみの比は、模型試験で 4.7~5.0 程度、多重リングせん断試験で 3.6~4.6 程度の値を示していることから、移動輪荷重が累積ひずみ特性に強く影響することがわかる。また、同一含水状態で異なる載荷方式の繰返し載荷試験結果を比較した場合、両者の累積沈下量の比は、浸水状態の方が気乾状態に比べて若干大きい。

次に、含水状態の違いによる沈下特性への影響を評価する。図-21は、模型試験の繰返し載荷試験における $N_c=200$ 回の累積鉛直ひずみ $(\varepsilon_v)_{max}$ 、同じく支持力試験における $P=2.23kN$ 載荷時の鉛直ひずみ ε_v 、同じくクリープ試験における 25000 秒載荷時の鉛直ひずみ ε_v について、それぞれ浸水状態の試験結果を気乾状態の試験結果で正規化して比較したものである。同図には、多重リングせん断試験の繰返し載荷試験における $N_c=200$ 回の累積軸ひずみ $(\varepsilon_u)_{max}$ 、同じく単調せん断試験における $\tau_{at}=30kPa$ 載荷時の軸ひずみ ε_u 、同じく支持力試験における $\sigma_a=114.2kPa$ 載荷時の軸ひずみ ε_u について、それぞれ浸水状態の試験結果を気乾状態の試験結果で正規化して比較したのも併せて示した。図から、模型試験では、含水状態の違いによる沈下特性への影響は、クリープ、支持力、定点載荷、移動載荷の順で大きくなるのがわかる。また、多重リングせん断試験では、含水状態の違いによる影響は、単調せん断試験を除いて支持力、定点載荷、移動載荷の順で大きくなるのがわかる。

以上まとめると、まず、模型試験・多重リングせん断試験とも、単調載荷試験より繰返し載荷試験の方が含水状態の違いによる影響は大きくなる傾向にある。これは、既往の研究⁹⁾と良く似た結果である。この原因として、例えば繰返し載荷に伴う間隙水圧変動の影響が考えられるが、本研究では、底盤または水深 50mm 付近で計測した間隙水圧に試験中顕著な変動は認められなかった。この問題に関しては今後さらに検討していく必要がある。一方、軸ひずみの増加に対する含水状態の影響は、繰返し載荷・単調載荷に関わらず、模型試験・多重リングせん断試験とも、鉛直応力・せん断応力が作用する移動載荷方式の試験で明確に現れ、鉛直応力のみを載荷する定点載荷方式の試験では表面化し難くなる。したがって、今回の試験結果を見る限り、粒状路盤は浸水により繰返し載荷時の沈下量が増加し、その傾向はせん断応力が作用する移動輪荷重載荷時にさらに顕著になると考えられる。

5. まとめ

本研究では、移動体通過による荷重の増減と主応力軸方向の変化を考慮した、実現に近い車輪走行方式の荷重制御方法と従来の定点載荷方式の荷重制御方法を用いて模型試験・多重リングせん断試験を行い、粒状路盤の力学挙動に及ぼす移動輪荷重の影響を検討するとともに、気乾・浸水状態の 2 種類の含水状態で試験を行い、含水状態の違いによる粒状路盤の力学挙動の差異について検討した。本研究で得られた主な知見は次のとおりである。

- 多重リングせん断試験の単調載荷試験結果によると、浸水状態では気乾状態よりも粒状路盤材のせん断強度は低くなる。また、浸水状態の場合、気乾状態と

比較して負のダイレイタンス挙動が顕著になり、沈下量は著しく増加する。

- (b) 含水状態あるいは載荷方式の違いに関わらず、多重リングせん断試験結果は模型試験結果と定性的に一致し、定量的にもほぼ一致する。このため、移動輪荷重を繰り返し受ける飽和・不飽和粒状路盤材の力学特性の評価試験方法として、多重リングせん断試験は有効である。
- (c) 模型試験・多重リングせん断試験とも、載荷方法の違いに関わらず、気乾状態に比べ浸水状態の方が繰返し載荷試験で発生する累積鉛直ひずみは大きくなった。このため、含水状態の違いが粒状路盤の繰返し塑性変形特性や支持力特性に及ぼす影響は大きい。
- (d) 供試体の飽和化が鉛直ひずみに及ぼす影響は、繰返し載荷・単調載荷に関わらず、模型試験・多重リングせん断試験とも、土要素に鉛直応力のみを載荷する定点載荷方式より鉛直応力・せん断応力が作用する移動載荷方式の載荷試験において顕著に現れる。
- (e) 供試体の浸水が沈下量の増加に及ぼす影響は、模型試験・多重リングせん断試験とも明確に見られたが、特に単調載荷試験より繰返し載荷試験で顕著に認められた。

以上の結果から、移動輪荷重を繰返し受ける粒状路盤の長期劣化予測や粒状路盤材の力学特性評価を実現に即して実施するには、移動体の走行による主応力軸回転の影響と降水等による含水状態変化の影響との相乗効果を考慮することが重要であると結論できる。しかしながら、本研究の知見は、限られた試験条件の下で得られたものであり、実務への試験結果の応用に際しては、今後、妥当性や適用限界等に関する十分な検討が必要である。

謝辞：本研究の一部は平成 18 年度～平成 19 年度科学研究

費補助金（基盤研究(C)，課題番号：18560479，研究代表者：石川達也）の交付を受けて実施されたものである。

参考文献

- 1) 石川達也，関根悦夫，三浦清一：粒状材料の繰返し変形挙動に及ぼす移動輪荷重の影響評価，土木学会舗装工学論文集，第 11 巻，pp.23-31，2006。
- 2) 関根悦夫，石川達也，三浦清一：移動輪荷重を受ける粒状材料の累積損傷度理論による塑性変形解析，土木学会舗装工学論文集第 12 巻，pp.47-55，2007。
- 3) 鎌田修，清水忠昭，伊藤正秀：車道透水性舗装の耐久性に関する研究，土木学会舗装工学論文集，第 10 巻，pp.91-98，2005。
- 4) 森石一志，大西有三，西山哲，矢野隆夫，小関裕二：雨水浸透による車道透水舗装の諸性状変化に関する一考察，土木学会舗装工学論文集第 12 巻，pp.107-114，2007。
- 5) 八谷好高，秋元恵一：高地下水水位下における空港アスファルト舗装の構造設計，土木学会論文集，No.613/V42，pp.19-30，1999。
- 6) 大下武志，中島伸一郎，堤祥一：路床の浸水が支持力に及ぼす影響に関する実験，土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集，pp.595-596，2005。
- 7) 長藤敬晴・野口達雄：ガイドウェイ試験装置による土路盤上有道床軌道の特性試験（第 1 次），鉄研速報，Vol.77，No.137，1977。
- 8) 土木学会 舗装工学委員会編：舗装工学ライブラリ 3 多層弾性理論による舗装構造解析入門－GAMES（General Analysis of Multi-layered Elastic Systems）を利用して－，土木学会，2005。
- 9) 石川達也，堀田大介，柏谷匡胤，三浦清一：粗粒材料を対象とした単純せん断試験機の試作と性能評価，第 39 回地盤工学研究発表会講演集，pp.863-864，2004。

EFFECTS OF WATER CONTENT ON MECHANICAL BEHAVIOR OF GRANULAR BASE SUBJECTED TO CYCLIC MOVING WHEEL LOADS

Tatsuya ISHIKAWA, Mitsuru HOSODA, Seiichi MIURA and Etsuo SEKINE

This paper presents an experimental study to evaluate the effects of water content on the mechanical behavior of granular base subjected to cyclic moving wheel loads. Two types of small scale model tests and multi-ring shear tests which adopted a fixed-place loading method and a moving loading method were performed with a base course material under air-dried condition and saturated condition. Based on test results, the relationships between the water content of test samples and the deformation-strength characteristics were examined. As the results, it was revealed that the shear strength of base course materials decreased and the cumulative residual strain increased due to the saturation in both tests, regardless of loading methods. This indicates that the water content of gravel influences the mechanical behavior of granular base strongly.