粒状路盤材料の構造異方性に関する 基礎的研究

竹内 康1・小梁川雅2・乾 達雄3・西澤辰男4

1正会員 農修 東京農業大学助手 農学部農業工学科 (〒156 東京都世田谷区桜丘1-1-1)
 2正会員 工博 東京農業大学講師 農学部農業工学科 (〒156 東京都世田谷区桜丘1-1-1)
 3 東京農業大学 大学院農学研究科 (〒156 東京都世田谷区桜丘1-1-1)
 4正会員 工博 石川工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒929-03 河北郡津幡町北中条)

本研究では、粒状路盤材料の構造異方性と力学特性との関係を調べるために、粒度調整砕石とアルミナ ボールを用いた圧縮試験と異方性要素の測定を行った.力学特性は、圧縮試験での応力比-ひずみ関係か ら評価した. よた、構造異方性の評価は、構成粒子の配列と接触方向の分布からファブリックテンソルを 算出して行った.その結果、接触方向のファブリックテンソルの成分比は粒状体の異方性の強さの指標で あること、路盤材の粒子の配列は水平方向に卓越する傾向があることがわかった.

Key Words : concrete pavement, granular base course material, fabric anisotropy, fabric tensor

1. 緒 言

コンクリート舗装を設計する場合,コンクリート 版の設計耐用期間中のたわみ量や応力度の算定は Westergaardの式や有限要素法などによって行われて いる.このときのコンクリート版に対する路床や路 盤の支持力特性値として,弾性係数やK値が用いら れている.ところが路床および路盤材料は供用中に 塑性変形を起こす可能性があることから,コンク リート標準示方書舗装編ではコンクリート版の設計 時の弾性たわみ量に限界値を設け,設計耐用期間中 に要求される機能(サービス性能)を保持させるこ とを条件としている¹⁾.これは,経年変形量の推定 ができないことによる簡便法であり,路盤の変形強 度特性を把握することはコンクリート舗装設計に対 して大きな影響を与えると考えられる.

現在, コンクリート舗装の路盤材として粒調砕石 やクラッシャランが多く用いられている.これらは 粒状材料と呼ばれ, それ自身では自立しにくい拘束 圧依存性の材料であり, クラッシャランは骨材同士 のインターロック効果, 粒調砕石はインターロック 効果と細粒分による粘性抵抗によって荷重を支持し ていると考えられている²⁾.また,路盤材の最大粒 径は30~50mm程度であるにもかかわらず, セメン トコンクリート舗装要綱の設計断面例³⁾からもわか るように最大粒径に対して層厚が薄く、粒子の形状 や粒子配列が荷重支持特性に及ぼす影響を無視でき ない.

路盤を粒状体として捉えた場合, 路盤の構造特性 は間隙の形状や方向性、構成粒子の方向性や接触状 態などのベクトル成分を用いて表現できる.構造特 性における異方性は、構造異方性と呼ばれ、変形前 後の状態により、固有異方性と誘導異方性に区別さ れる^{4),5)}.砂などの微小径の粒状体については、間 隙や構成粒子のベクトル成分で表現される構造異方 性をテンソルとして解析し、 力学的特性との関係を 調べた例は多く5,6,更に連続体力学体系への組み 込み^{4),7),8)}も試みられている.しかし、路盤のよう に粒径が大きい材料についての検討例は少なく⁹, 路盤の構造異方性が力学特性に及ぼす影響を調べる ことは変形強度特性を検討する上で重要であると考 えられる. また、路盤の変形は比較的小さいため、 構築時の固有異方性が荷重支持特性に及ぼす影響は 大きいと考えられる. そこで、本研究では粒状路盤 材料の固有異方性と圧縮応力下での力学的特性との 関係を調べることを目的とし、路盤材を単純にモデ ル化した粒子形状が異なる2種類の粒状体と粒度調 整砕石(M-25)について固有異方性と圧縮試験と

の比較を行った.なお、測定可能な固有異方性要素 として構成粒子の長軸方向と粒子同士の接触方向に 着目した. また固有異方性の解析は、方向性の構造 指標として一般性の高いファブリックテンソル^{4),5)} を用いて行った.

2. 圧縮試験

(1) 使用材料

圧縮試験には、直径25~10mmのアルミナボール (比重3.8) とアルミナボールの粒度に合うようふ るい分けた路盤材(以下路盤材Aと称す)、粒度調 整砕石(M-25,以下路盤材Bと称す)を用いた.なお, 路盤材Aは路盤材Bをふるい分けたものである.

各々の材料の粒度分布を図-1に、路盤材Bの修正 CBR試験結果を図-2に示す.

(2) 圧縮試驗方法

圧縮試験は、図-3に示すアルミ円筒内に試料が偏 析しないよう留意してパッキングし、1mm/minの載 荷速度で行った.パッキングに際して、路盤材Aと アルミナボールでは、ランマによる突き固めが有効 ではなかったため、約300kPaで2~3回の初期圧密を 行った. このときの圧密荷重は、載荷初期におい て大きな体積ひずみが生じないように決定した. また、路盤材Bに関しては、突固めによる締固め試 験より得られた最大乾燥密度の95%以内になるよう に、3層に分け各層を38回ずつ4.5kgランマで突き固 めた.

図-3に示すように円筒側部にはひずみゲージを貼 り付けて円周方向ひずみを測定した、測定したひ ずみは、内圧を受ける肉厚円筒シェル問題として 外径の伸びより解析し、側圧を算出した¹⁰⁾.この とき,計算条件としてアルミの弾性係数は7.1× $10^{10}(N/m^2)$ とした.

また、アルミナボールと路盤材Aについては、初 期圧密終了時の間隙比を測定した. その結果, 路



図-1 使用材料の粒度分布

盤材Aとアルミナボールでの平均値はそれぞれ0.45, 0.43と同等の値を示した.

(3) 試験結果

各材料での試験結果について,応力比(σ,/σ,)-ひずみ(ε)関係を解析した.これを図-4~6に示す.

図-4,5より、単純化モデルの粒状材料では、応力 比は載荷軸方向のひずみが0.1%程度以降で安定し ていることがわかる.これは、載荷に伴う粒子の大 きな移動が無く構造的に安定していることを示して いる. また, 路盤材Aでは応力比が1.6~1.7, アル ミナボールでは1.1~1.2程度であり、アルミナボー ルは路盤材に比べ等方的性質を示していた.

式(1)にField⁵⁾によって示された、粒度配合、形状 の違いに左右されない間隙比(e)と粒子の平均配位数 (1粒子当たりの接点数の平均,N)との関係を示す。

$$\overline{N} = \frac{12}{1+e} \tag{1}$$

粒状体の荷重伝達は接触点(面)を通して行われる. そのため、平均配位数は粒状体の微視的な構造を考 える上で重要な要素である.式(1)に路盤材Aとアル ミナボールでそれぞれ測定された間隙比を代入する





図-4 路盤材Aでの圧縮試験結果

図-5 アルミナボールでの圧縮試験結果

図-6 路盤材Bでの圧縮試験結果

と、8.28、8.39となる.このことより、粒子同士の 接触状態に影響を及ぼすと考えられる接触点数に大 きな差は認められず、圧縮試験結果の差は粒子形状 によるものと考えられる.

図-6を見ると,路盤材Bでの載荷軸方向ひずみは, 路盤材Aおよびアルミナボールでの試験結果に比べ 大きいことがわかる.これは,細粒骨材の影響であ ると考えられる.また,応力比はひずみが0.5%程度 以降で安定していることから,載荷に伴う粒子の移 動は少なく,構造的に安定していると考えられる. また,応力比は1.4~1.5に分布しており,路盤材Aよ りも多少小さいがほぼ同程度の値を示した.これは, 路盤材Aとは粒度が異なるが同じ材料を用いている ことによるものと考えられる.

3. 異方性要素の測定

(1) 測定方法

異方性要素の測定は、圧縮試験で使用した材料を 用いて行った.また、路盤材の粒子形状は極端に偏 平であったり細長いものは不良であるといわれてい るが、形状を示す指標は特に設けられていない.そ のため、路盤材Aの粒子形状もあわせて測定した.

a)粒子形状

粒子形状は、図-7に示すように、平面上に粒子を



b) 路盤材A, Bでの異方性要素の測定

Oda⁶によると、粒子の構造的異方性は粒子長軸の 方向と接触面に対する法線(接触法線)の分布の2 種類に分けられる.

路盤材では,異方性要素測定用に供試体を作製し, 測定を行った.路盤材Aでは,ホッパーから長方形 モールド内に路盤材を投下し,鉄板の上からランマ で締固めた状態で空隙内にセメントペーストを流し 込み固結させた後,ダイヤモンドカッターで切り出 して供試体を作製した.また,路盤材Bの供試体は, 数%のセメントを混合させ φ 10 × 20の円筒形モール ド内で突き固め,固化後にダイヤモンドカッターで 切出して作製した.何れの場合も,供試体の画像解 析はデジタルカメラで画像をコンピュータに取り込 んで行った.画像解析例を図-8に示す.

粒子の方向は、図-9に示すように、粒子が内接す る長方形を考え、長軸に対する平行線a-aと水平軸 との傾きを測定した.また、粒子同士の接触方向は、 図-9に示すように、接触面b-bに直行する線c-cを 引き、水平軸との傾きを測定した.なお、傾斜角の



図-7 粒子形状の測定

		単位	粒子粒子	粒子-壁	
法線方向剛性係数	k _n , k _n '	(N/m/m)	0.9×10^{6}	0.9×10^{6}	
接戦方向剛性係数	k _s , k '	(N/m/m)	0.9×10^{6}	0.9×10^{6}	
法線方向減衰係数	η_n, η_n'	(N s/m/m)	$(\mathbf{k}_{n} \times \mathbf{m})^{0.5}$	$(k_{n}' \times m)^{0.5}$	
接戦方向減衰係数	η _s , η _s ,	(N s/m/m)	$(k_{s} \times m)^{0.5}$	$(k_{s}' \times m)^{0.5}$	
摩擦角 φ _μ ,φ _μ		(deg)	30	• 15	
粒子密度 ρ		(kg/m^3)	3600		



測定は水平軸を0°とし、反時計回りを正として 正として行った. 行った.

c)アルミナボールでの異方性要素の測定

アルミナボールでは,路盤材のように画像解析用 供試体の作成が難しかったため,図-10に示す円形 要素を用いた個別要素法により接触法線の解析を 行った.解析時の要素粒度は,圧縮実験で用いたア ルミナボールと同じになるようにし,図-11に示す3 パターンのランダムパッキング状態で,圧縮時の接 触法線の分布を測定した.このときのパラメータの 決定は松岡ら¹¹⁾の方法に従い,表-1に示す条件で解 析した.なお,要素間の摩擦係数は、φ2mmのアル ミナボールで定容積法による一面せん断試験から得 られた結果を用いた.また,傾斜角の測定は路盤材 の場合と同様に,水平軸からの角度を反時計回りを

(2) 測定結果

a)粒子形状

路盤材の形状は、伸長率が0.7~0.8、偏平率が0.4 ~0.5を中心に分布していた. これを図-12,13に示す. このことより、今回使用した材料は比較的良好なも のであると判断された.

b) 路盤材A, Bでの異方性要素

路盤材A,Bでの粒子の長軸方向は、図-14に示すように水平方向に卓越しており、路盤材Bでは、路盤材Aに比べ長軸が90°方向に分布するものが多いが、ほぼ同じ分布を示していた.路盤材BではAに比べ細粒骨材が多く、突き固め時の粒子の配列に影響を及ぼすと予想されたが、粒子の長軸は突き固めエネルギーに対して最も安定した方向、すなわち水平方



図-16 アルミナボールでの接触法線方向の分布 向に配列する傾向があることがわかった.

接触法線の測定結果を図-15に示す.何れの路盤 材も、圧縮方向の接触分布が他の方向の分布に比べ 大きく、荷重に抵抗する粒子構造を有していた.し かし、路盤材Bでの載荷方向の接触法線分布は、路 盤材Aに比べ極端に大きい値を示していた.これは 図-8に示す画像解析例からもわかるように、解析時 に粒子として認識できたもののうち、互いに接触し ている粒子数が少なかったため、一方向に突出した



図-15 路盤材A,Bでの接触法線方向の分布 結果が得られたものと考えられる.

c)アルミナボールでの異方性要素

アルミナボールでの測定結果を図-16に示す.これによると、アルミナボールでは圧縮方向、斜め45°方向での接触分布は、これらの方向以外での接触分布よりも突出していることがわかる.

球形もしくは円形要素を用いたときの最密充填配 列はSimple staggerと呼ばれる配列である. 個別要素 法による圧縮シミュレーションでは圧縮が進むにつ れ、Simple stagger的に配列する粒子が多いためこの 様な結果が得られたものと考えられる. アルミナ ボールでは、接触状態は3次元に分布するが、圧縮 下での粒子の配列は最密充填に移行しようとするた め、粒子の相対位置はシミュレーションと同様の傾 向を示すものと考えられる.

4. ファブリックテンソルによる解析

(1) ファブリックテンソル^{4), 5), 12)}

互いに接触する粒子には、接触平面に対して鉛直 方向の反力が生じる.反力方向の単位ベクトルをn,nとすると、M個の接触点に対し2M個の法線ベクト ルが存在することになる.いま、t番目の単位法線 ベクトルを $n^{(t)}$ とし、座標軸 X_{i}, X_{j} への投影成分を各々 $n_{i}^{(t)}, n_{j}^{(t)}$ とすると、ファブリックテンソル(F_{ij})は次式 に示すように、 $n_{i}^{(t)} \ge n_{j}^{(t)}$ のダイアッドの平均された 累計値として示される.

$$F_{ij} = \frac{1}{2M} \sum_{t=1}^{2M} n_i^{(t)} n_j^{(t)}$$
(2)

このとき、 $n_i^{(t)}, n_j^{(t)} lan^{(t)} > X_i, X_j がなす角の余弦に等$ しい.これを幾何学的に表現すると式(3)になる.こ $れは、図-17に示す条件で、単位ベクトルnが<math>X_1, X_2$ 軸 に対し($\cos \theta^{(t)}, \sin \theta^{(t)}$)の成分を持つことから導 かれる.

$$(\mathbf{F})_{ij} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_{11} & \mathbf{F}_{12} \\ \mathbf{F}_{21} & \mathbf{F}_{22} \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{2\mathbf{M}} \begin{pmatrix} \sum \sin^2 \theta^{(t)} & \sum \cos \theta^{(t)} \sin \theta^{(t)} \\ \sum \sin \theta^{(t)} \cos \theta^{(t)} & \sum \cos^2 \theta^{(t)} \end{pmatrix}$$
(3)

また,式(3)からファブリックテンソルの軸の傾斜 角度を容易に算出できる.

土のような粒状体において、応力は内部接触力の 平均化と考えられる. 粒状体内のある円領域上で推 定される応力テンソル (σ_{ik}) は、粒状体に作用す るマクロな応力テンソル(σ_{jk}) とファブリックテン ソルを用いて表わすことができる. これを式(4)に示 す.



図-17 単位法線ベクトルと傾斜角

本研究では、ファブリックテンソルと粒状体に作 用する応力との関係を、それぞれの成分と軸方向か ら考察した.また、式(4)に示すファブリックテンソ ルと応力テンソルの関係から、粒状体内部に生じる 応力テンソルについて考察を行った.

ファブリックテンソルは,接触点の方向で決定されるテンソルであるが,本研究では粒子の長軸方向についても同様にファブリックテンソルを算出した.

(2) 圧縮試験との比較

異方性要素の解析結果を表-2に示す.

各材料における接触法線方向でのテンソル軸の傾 斜角度は、鉛直軸に対して7~-8°の範囲に分布し ており、圧縮試験の載荷方向とほぼ一致していた. また、路盤材Aとアルミナボールでのファブリック テンソルの比(F_{11}/F_{22})を比較すると、圧縮試験での 応力比(σ_1/σ_2)とほぼ一致していた.これらのこと から、接触法線方向における F_{11}/F_{22} は粒状体の異方 性の強さの指標であることがわかる.ところが、路 盤材A,Bでの σ_1/σ_2 は同程度であったにもかかわら ず、路盤材Bでの接触法線における F_{11}/F_{22} は大きな 値を示した.これは、図-8からもわかるように接触 している粒子数が少なく、鉛直方向に偏った結果が 得られたためだと言える.

路盤材A,Bにおける粒子長軸方向でのテンソル軸の傾斜角度は、水平軸に対して1~4°の範囲に分布しており、圧縮試験の拘束方向と一致していた.また、粒子長軸方向における路盤材A,BのF₁₁/F₂₂はほぼ等しく、構成粒子数には大きな差があるが、同様の構造を有していると考えられる.これらのことより、粒子長軸方向は、接触法線のように荷重伝達に直接関係するわけではないが、粒状体の構造を特徴づける重要な要素であると言える.

路盤に関連する各種圧縮試験での載荷方向は, 舗 装構造を想定したときに実際に作用する荷重方向と 一致している.今回の試験条件も同様である.これ に対し,砂などの粒状体では比較的大きな変形を解 析するために,想定されるすべり面もしくはせん断

	路盤材A		路盤材B		アルミナボール						
	粒子方向	接触法線	粒子方向	接触法線	Case-1	Case-2	Case-3				
F11	0.322	0.591	0.345	0.659	0.553	0.533	0.537				
F12 = F21	0.024	-0.019	-0.003	-0.033	-0.002	0.027	0.011				
F22	0.678	0.409	0.655	0.341	0.447	0.467	0.463				
F11/F22	0.475	1.445	0.527	1.933	1.237	1.141	1.160				
σ1/σ2	1.7	1.7	1.5	1.5	1.2	1.2	1.2				
θ (deg)	3.912	7.059	0.641	-5.871	1.013	-5.348	-7.942				

表-2 異方性要素解析結果

面にあわせて供試体を作製し、三軸圧縮試験を行う ことが多い.また、路盤は層厚が薄く、変形が比較 的小さいため、固有異方性の影響が大きく残ると予 想される.したがって従来の供試体作製法で三軸圧 縮試験や動的三軸圧縮試験などにより路盤の変形特 性を検討できると考えられる.

(3) 粒状体内部の応力テンソル

式(4)について σ₁/σ₂とした場合を考えると,粒 状体に作用するマクロな応力テンソル比は,粒状体 内のある円領域上で推定される応力テンソル比に表 -2に示したファブリックテンソルの成分比の逆数を 乗じて求めることができる.この逆数は1よりも小 さいことから,内部のある部分において生じる応力 比は,外部に作用する応力比よりも大きくなる可能 性がある.すなわち,粒状体内における粒子の回転 や移動が生じ易くなるものと考えられる.

5. まとめ

本研究では、上層路盤材として多く用いられてい る粒度調整砕石と路盤材を単純にモデル化したアル ミナボールとその粒度に合うようにふるい分けた路 盤材について、固有異方性と圧縮応力下での異方性 との関係を調べた.得られた主な結果をまとめると 以下の通りである.

- (1) 粒子同士の接触法線に関するファブリックテン ソルの比は、粒状体の異方性の強さの指標であり、 粒子の形状によって変化する粒状体の力学性状を ファブリックテンソルによって評価できることが わかった.
- (2) 路盤材において、粒子の長軸は突き固めエネル ギーに対して最も安定した方向、すなわち水平方 向に卓越して配列する傾向があることがわかった.
- (3) 粒状体に作用するマクロな応力テンソル比と粒 状体内におけるある円領域上で推定される応力テ ンソル比との比較より、粒状体内部のある部分に おいて生じる応力比は、外部に作用する応力比よ りも大きくなる可能性があることがわかった.
- (4)細粒骨材を多く含む路盤材において接触法線の 測定は難しく、これは算出される接触法線のファ ブリックテンソルに影響を及ぼす.これに対し粒 子の長軸方向は、分布形状およびファブリックテ ンソルの値ともに安定していた.このことより、

今後路盤の変形特性の検討において、粒子の長軸 方向の測定が重要になると考えられる.また、そ の評価方法としては、フーリエ級数による分布形 状の解析があげられる.

謝辞:卓越方向と接触法線分布測定用供試体作製に あたり,鹿島道路(株)技術研究所第2研究室 海老澤 秀治室長,佐々木雅之研究員には御協力頂いた.ま た,アルミナボールの摩擦係数の測定に際しては東 京農業大学 坂口栄一郎助教授,農業工学科4年生 能重忠政君,路盤材の形状測定に関しては東京農業 大学 農業工学科 農業造構学研究室3年生諸君の御 協力を得た.記して感謝の意を表するものである.

参考文献

- コンクリート標準示方書「舗装編」,土木学会,1996.
 福田正,松野三朗:道路工学,朝倉書店,pp.81,1995.
 セメントコンクリート舗装要綱,日本道路協会,
- pp. 12–13, 1984.

4) 佐竹正雄: 地盤と土の異方性, 土と基礎, Vol.32, No.11, pp.5-12, 1984.

5) 粒状体の力学, 土質工学会, pp. 56-91, 1993.

6) Oda, M.: Fabrics and their effects on the deformation behaviours of sand, Depart. Found. Engrg., Saitama University, Special Issue, pp.1-59, 1976.

7) 松岡元, 平尾淳一, 福竹毅芳: 異方性を考慮した砂の変 形・強度論, 土と基礎, Vol.32, No.11, pp.31-36, 1984.

8) Oda, M. and Ohnishi, A.: Plasticity theory for granular soils with induced anisotropy, Advances in Micromechanics of Granular Materials(Shen at al. eds.), Elsevier Science Pub., pp. 263-270, 1988.

9) 董軍,中村和之: 大型平面ひずみと三軸圧縮試験による粗粒材の変形・強度特性の異方性,東急建設技術研究 所報, No.20, pp.71-76, 1994.

10) 構造力学公式集, 土木学会, pp. 385-403, 1974.

11) 松岡元,山元修一: 個別要素法による粒状体のせん断機構の微視的考察, 土木学会論文集, No.487/Ⅲ-26, pp.167-175, 1994.

12) Tobita, T. and Yanagisawa, E.: Contact tensor in constitutive model for granular materials, Micromechanics of Granular Materials(eds. Satake, M. and Jenkins, J.T.), Elsevier Science Pub., pp.263-270, 1988.

A BASIC STUDY ON FABRIC ANISOTROPY OF GRANULAR BASE COURSE MATERIAL

Yasushi TAKEUCHI, Masashi KOYANAGAWA, Tatsuo INUI and Tatsuo NISHIZAWA

In this paper, the compression test and fabric anisotropy measurement of crushed stone for mechanical stabilization(M-25) was carried out, to estimate the influence of anisotropy on mechanical property of granular base course material. The mechanical property was evaluated from stress ratio – strain relationship from the compression test. And the fabric anisotropy was analyzed by fabric tensor from orientation fabric and two-dimensional distribution of normals as factor of fabric anisotropy. As a result, the ratio of fabric tensor components by distribution of normals presented anisotropy strength of assembly, and orientation fabric of granular base course material was superior in horizontal direction.