建設用原材料　Vol.28　No.1　pp.31-36,　2021

砕石のアスペクト比が透水性舗装内部の流れに及ぼす影響

EFFECT OF ASPECT RATIO OF CRUSHED STONE ON FLOW IN PERMEABLE PAVEMENT

麓隆行*・冨迫健太**
by Takayuki FUMOTO and Kenta TOMISAKO

１．はじめに

透水性舗装では、点で接着された粗骨材の間隙を利用することで透水性を付与している。透水性舗装に関する材料や構造の設計法は、多くの治験から確立されており、舗装施工便覧[1]やポーラスコンクリートの設計指針（試案）[2]などが提示されている。しかし、いずれも既存の規格化された材料を使用し、粒径のみに着目した材料設計を想定しており、ほとんどの場合、その空隙特性は空隙量のみで把握している。すなわち、最大の特徴である空隙の形状と流れの視点に立脚した検討はほとんどされていない。

例えば、水は粗骨材の間隙を利用した空間を流れることから、粗骨材の形状が丸いと間隙の蛇行が小さく、水は下方向に流れやすいと考えられる。一方、それが扁平であれば、転圧により粒子が横倒しになり、間隙の蛇行が大きく下方向に流れにくいと考えられる。すなわち、同じ空隙量であっても間隙形状が流路に及ぼす影響は大きく，粒子の形状は流下時間の制御に役立つと考えられる。これは防災の観点からも、巨視的な流れの制御や多量の降雨を流すことができる限界を知るうえで重要だと考えられる。しかし、間隙形状と流下メカニズムとの関係を詳細に検討した研究は少ない。

そこで、本研究では、砕石の扁平度合いを示す一つの指標であるアスペクト比に着目し、アスペクト比がアスファルト試験板の見かけの流れやすさに及ぼす影響について基礎的検討を行った。実験では、実験室内で小型破砕機を用いて、異なるアスペクト比の砕石を製造するための条件について検討した。その後、アスペクト比 2.03, 2.32, 2.82の砕石で作製した空隙率20%のアスファルト試験板について、上面からの現場透水試験器を用い、その流れの違いを検討した。その後、試験板からコアボーリング装置にて採取したコア試験体を用いた定水位透水試験や取得したX線CT画像を用いた画像計測により、試験板の流れに違いが生じた機構を考察した。

２．実験概要

２．１　アスペクト比が異なる砕石の製造

硬質砂岩砕石をふるい分けてから、粒径5～19mmをボールミルで、粒径19～31.6mmをジョークラッシャで破砕して3種類のアスペクト比の砕石を作製した。

図1および図2に使用した装置の外観と破砕機構を示す。ボールミルは、円筒の中に鉄球と破砕したい原料を入れ、円筒を回転させ、衝突と摩砕により粉砕を行う装置である。そのため、衝突による破砕に加えて摩砕により角を取ることが出来る。回転時間が増加すると、角張りを取る効果が強くなる。一方、ジョークラッシャは、固定した鋼板と揺動する鋼板で圧壊する装置である。そのため、圧壊により、扁平な粒子になる傾向がある。

アスペクト比は、X線CT[3]により得られた砕石の3次元画像に対して市販のソフトウェアを用いて各粒子を同定し、楕円体に近似した際の短軸と長軸の比から求めた[4]。図3にその主な流れを示す。X線CT装

図1　ボールミルとジョークラッシャの外観

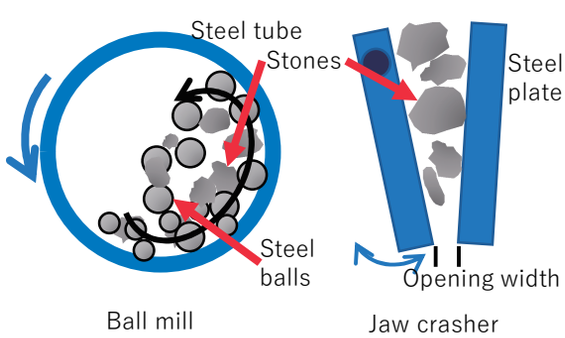
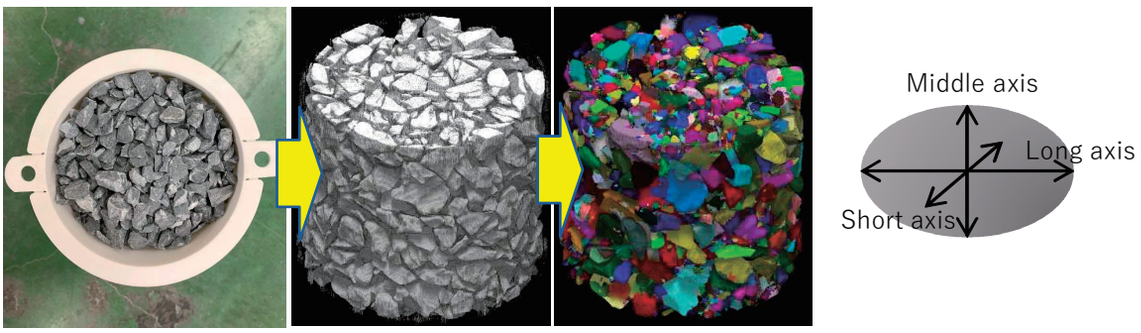


図２　ボールミルとジョークラッシャの破砕の機構



Crushed stone sample　X ray CT Image　Particle separation image

図 3　砕石の粒子分離による形状計測過程

表1　砕石の撮影条件

Tube voltage (kV)	113
Tube current (μA)	100
Resolution (mm)	0.123051
Cupper plate thickness (mm)	0
Frame rate (f/s)	10
Binning mode	2×2
Projection number	2000

表 2　砕石の粒子分離条件

Condition	Particle size (mm)	
	4.75 - 9.50	9.50 - 16.0
Threshold	44000	
Erosion times	1	
Distance considered as one particle (x Radius)	1.3	
Dilation times	1	
Removed small particle diameter (mm)	2.375	
Combined small particle diameter (mm)	2.375	4.75

置で撮影した3次元画像では、砕石は白色で間隙は黒色で表現される。そこで市販のソフトウェアを用いて以下の作業を行った。まず、砕石とそれ以外を分ける輝度の閾値を目視で決定し、砕石部分とそれ以外の部分に分け、二値化処理を行った。その後、粒子同士の接触点がくびれていることを利用し、独立した粒子として分離していく粒子分離処理を行った。ただし、粒子配列は複雑であるため、様々な近傍の砕石同士が面で接触していると、隣り合う2つの粒子が1つの粒子と判断されることがある。また、1つの粒子でもくびれが大きいと、2つの粒子として分離されることがある。それらの判断誤差を減らすため、各画素と隣り合う画素を調べ、そのどれか1つでも空隙であれば、その画素を計測対象外に置き換えるエロージョン処理を数回行った後に近傍処理条件を付けて粒子分離を行った。その後、同じ回数のダイレーション処理（エロージョン処理の逆の処理）によって、元の状態に近似した。また、エロージョン処理によってわずかな凹凸がより顕著な差になること

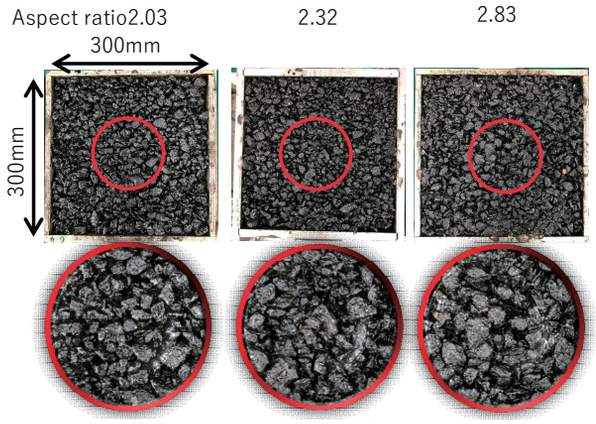


図4　試験板の様子

により、1つの粒子にも関わらず複数に分割されることが起こる。それらを結合するために、近傍粒子の同一視および微小粒子の統合を行った。　表1にX線CT装置での砕石の撮影条件を、表2に得られたX線CT画像を用いた粒子形状計測時の粒子分離条件を示す。

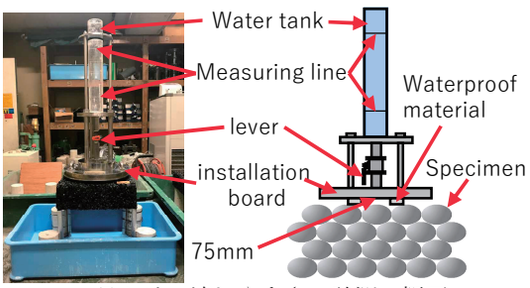
最終的に、アスペクト比2.03、2.32および2.82に調整できる破砕条件を求め、その3種類を粗骨材として使用することとした。

２．２　アスファルト試験板の作製

作製した砕石、粗砂、石粉、食物繊維およびポーラス改質アスファルトH型を用いてアスファルト混合物を作製した。図4に完成した試験板の様子を、また表3に材料の質量混合比率を示す。なお、使用時の砕石の粒度は、アスペクト比によらずほぼ一定とした。185℃に加熱した硬質砂岩砕石、粗砂、石粉と常温の食物繊維を175℃のミキサを用いて全量を一度に30秒間混合した。次に、175℃のポーラスアスファルトH型をミキサに入れ90秒かき混ぜた。300×300×100mmの平板型枠に，空隙率20%となる質量の試料を2層に分けてバイブレーターである程度締め固めた。その後、ローラコンパクタで0.25MPaの圧力をかけて5回転圧した後、0.46MPaの圧力をかけて35回転圧して厚さ10cmに仕上げた。これは、急に大きい圧力で転圧すると、型枠外へ材料がはみ出るからである。締固め時の温度は155～160℃

表 3　アスファルト混合物板の質量混合比率

Aspect ratio	2.03	2.32	2.82
Material	Mixture rate (%)		
Crushed stone (4.75~9.50mm)	51	51.5	50
Crushed stone (9.50~16.0mm)	34.5	34.5	33.5
Coarse sand	9.5	9	11.5
Stone powder	5	5	5
Dietary fiber	0.1	0.1	0.1
Asphalt	5	5	5
Void ratio (%)	20		



見かけの流れやすさの計測の概要

防水材の設置状況　試験板下部からの流出状況

図 5　見かけの流れやすさの計測の概要、防水材の設置状況、および試験板下部からの流出状況

であった。各混合比で2体ずつ試験体を作製した。

２．３　現場透水試験器を使用した試験板の見かけの流れやすさの計測

試験板の見かけの流れやすさを調べた。図5上に示すように試験板上に現場透水試験器を載せ、舗装調査・試験法便覧[5]の現場透水試験法を参考に透水試験を行った。なお、試験法では試験板上面で水が流入する直径が150mmであるが、試験板が小さく試験板側面から水が流失し、測定には適さなかった。そこで、図5左下のように水が試験板に流入する直径を75mmと小さくなるように防水材を試験器の底面に取り付けた。そして、測定は水頭600mmから400ml流下させた時間を15秒間に換算した透水量と、図5右下に示すように試験板側面から撮影した動画から、試験板の上面に水が流入し始めてから、底面から排出し始めるまでの時間を初期透過時間として計測した。

２．４　X線CT画像を用いた試験板内の砕石の方向性計測

次に、コア試験体内部の骨材の配向性を検討するため、X線CT画像を取得し、砕石と同様に骨材粒子を同定した。その後、楕円体に近似した際の球相等径が4.75mm以上の粒子の長軸の鉛直方向の角度を求めた。

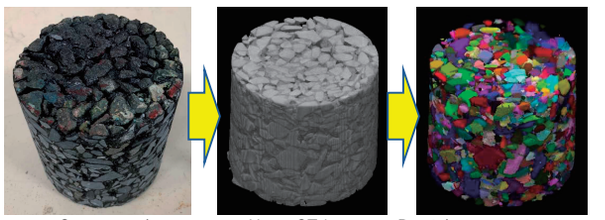


図6　コア試験体の粒子分離過程

表 4　コア試験体の撮影条件

Tube voltage (kV)	145
Tube current (μA)	100
Resolution (mm)	0.123051
Cupper plate thickness (mm)	2
Frame rate (f/s)	3
Binning mode	2×2
Projection number	2000

表 5　コア試験体の粒子分離条件

Threshold	26000
Erosion times	3
Distance considered as one particle (x Radius)	1.3
Dilation times	3
Removed small particle diameter (mm)	4.75
Combined small particle diameter (mm)	4.75

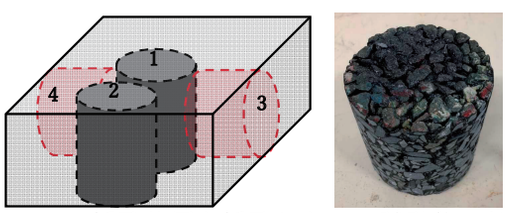


図7　コア採取位置と採取したコア試験体の例

まず、図6に示すように，2.1節と同じソフトウェアでコア試験体のX線CT画像を空隙率20%となるように2値化後、楕円体に近似して粒子分離を行い、長軸と短軸の長さを推定した。表4および表5にコア試験体の撮影条件と粒子分離条件を示した。

２．５　試験板内部の空隙構造を考察するための透水試験

最後に試験板の鉛直と水平方向の透水性を検討するため、図7に示す1～4の位置からコア試験体を採取し、定水位透水試験を行った。コア試験体は、試験板の鉛直方向の透水特性と、水平方向の透水特性を調べるため、上面から2カ所、側面から2カ所採取した。供試体は，ローラコンパクタにより図7の左右方向に締め固めていたため、上面から採取する場合、型枠中央と左右方向で異なる可能性を考慮して、締固め程度が同じとなる中央と手前からコア試験体1、2を採取した。その後，側面から採取する場合、締固め程度が同じとなるローラコンパクタ稼動方向の中央にあたる箇所からコ

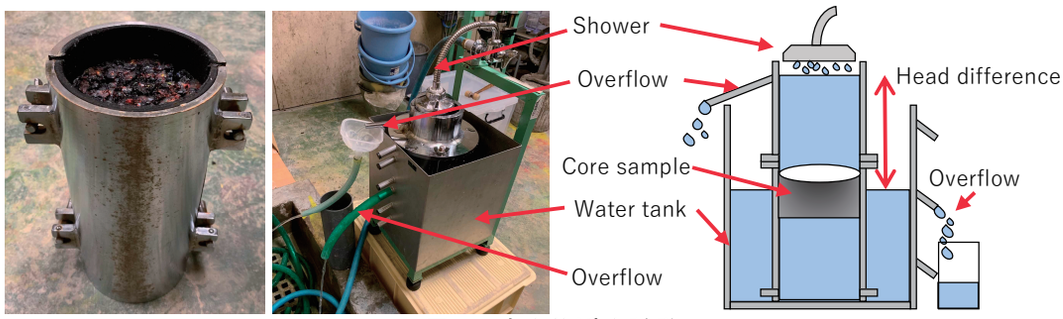
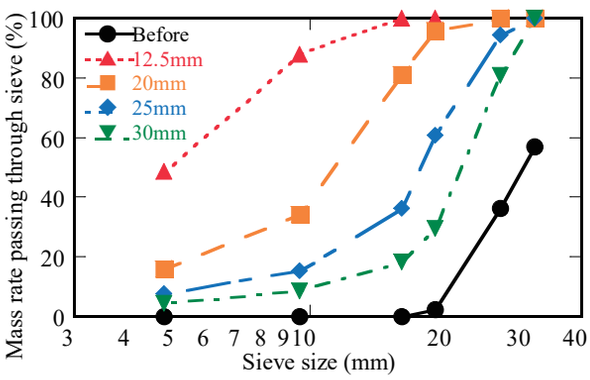
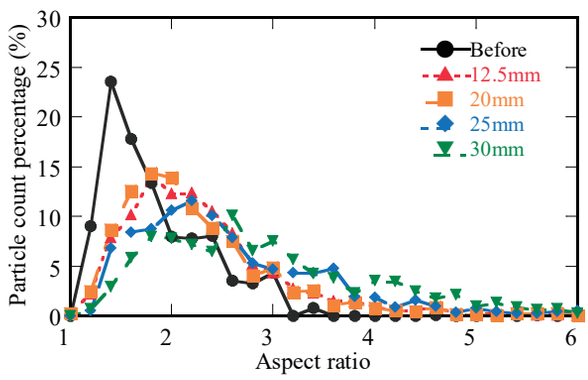


図 8　定水位透水試験

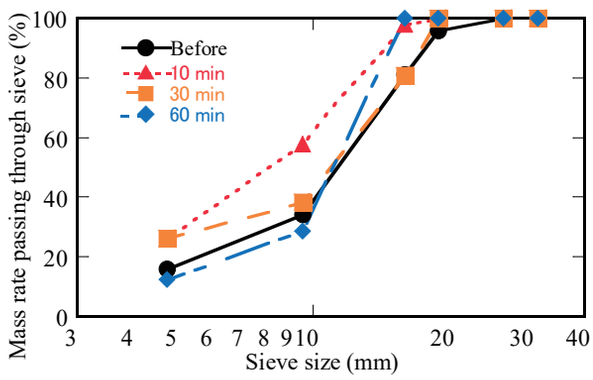


(a) 粒度の変化

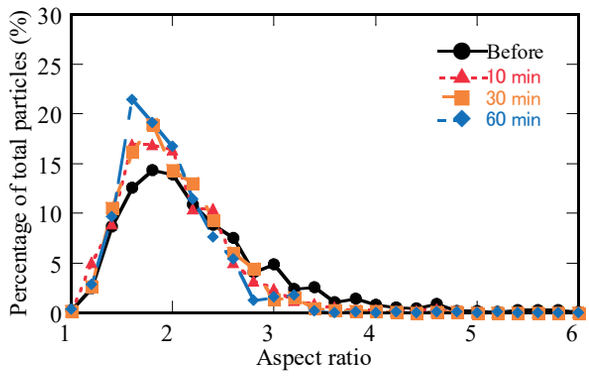


(b) アスペクト比の変化

図9 ジョークラッシャ破砕後の粒度とアスペクト比



(a) 粒度の変化



(b) アスペクト比の変化

図10　ボールミル処理後の粒度とアスペクト比

ア試験体3、4を採取した。

図8にコア試験体定水位透水試験の概要と様子を示す。水頭差は0～30cmの間で3パターン行った。試験では、一つの水頭差で60秒間に外側の水槽から越流する水量を3回採取し、3回の平均値から透水量を算出した。なお、試験体上面の位置をカラム内で一定にできなかったため、試験ごとに供試体上面から水面位置までの高さを鋼製定規で計測して水頭差を求めた。

３．実験結果と考察

３．１　破砕による粗骨材の形状の変化

図9に、ジョークラッシャにより破砕した際の粒度とアスペクト比の変化について示す。ここでは19～31.6mmの粒度にふるい分けた砕石2kgを用いて、ジョークラッシャの開口幅を12.5、20、25および30mmと変えた際の結果を示している。

粒度の変化をみると、破砕前に比べて、開口幅が小さくなるほど、曲線が左にシフトし、粒度が細かくなった。破砕後の最大粒径は開口幅とほぼ同じであった。

一方、アスペクト比は、開口幅12.5mmと20mmでは差が小さいが、開口幅25mm、30mmと大きくなると最頻値が右へシフトした。投入した粒子の最小寸法よりも開口幅が小さすぎると、破砕箇所での滞留時間が長く、すりもみ効果も生じてアスペクト比が小さくなると考えられる。一方で、適度に開口していれば、滞留時間が短くなり、圧壊の効果が高くなると考えられる。したがって、必要な粒度範囲の下限以上の粒径の粒子を、下限値と同じ幅に開口したジョークラッシャで破砕すると、圧壊が適度に作用し、扁平な粒子を効率よく得られると考えられた。

図10にボールミルにより破砕した際の粒度とアスペクト比の変化について示す。ここでは、5～19㎜の粒度にふるい分けた砕石2kgを用いて、ボールミルの処理時間を10、30および60分と変えた際の結果を示している。粒度の変化をみると、明確な傾向は見られず、60分程度の処理ではほぼ変化がなかった。なお処理時間10分で粒度が細かくなっているが、これは採取した粒子のばらつきが影響していると考えられる。アスペクト比は、破砕前に比べて10分以上処理を行うと、少しずつ減少した。すなわち、ボールミルでは、粒子の破砕効果よりもロサンゼルス試験機と同様にすり減りによる長軸方向の角取りの効果が高かったと考えられる。そのため、アスペクト比を小さくするには長い処理時間が必要だと考えられる。

以上の結果を受けて、表6のようにジョークラッシャの開口幅とボールミルの処理時間を設定し、アスペクト比の平均値が2.03、2.32および2.82となる砕石を作製することとした。アスペクト比2.03では、ボールミル処理による粒度変化がほとんど無いため、処理後に5～20㎜の粒度にふるい分けてそのまま使用した。アスペクト比2.32は、入手した粗骨材をそのまま用いたことを示している。また、アスペクト比2.82の粒子を作製する際には、効率よく扁平な粒子を作製するため、破砕前にふるい分けて、それぞれの粒子をジョークラッシャで破砕、ふるい分け後、目標粒度となるように混合したことを示している。

３．２　試験板の見かけの流れやすさの計測結果

試験板の見かけの流れやすさを調べた結果として、図11にアスペクト比と透水量の関係、図12にアスペクト比と初期透過時間を示す。

アスペクト比が大きくなると、およそ15秒間の透水量は多く、初期透過時間は短くなった。初期透過時間は試験板の上面に水が流入し始めて、底面から排出し始めるまでの時間としたことから、この結果は、骨材の形状が扁平なほど舗装面への水の侵入やその後の透過までの速度が速いことを示していると考えられる。

３．３　コア試験体内の粗骨材粒子の角度の計測結果

図13にコア採取位置1におけるアスペクト比の違いによる骨材粒子の長軸の鉛直方向からの角度を示す。長軸が水平方向に向くと90°、鉛直方向に向くと0°または180°となる。アスペクト比が大きくなると、0～30°および150～180°の割合が減り、70～110°の割合が増加した。したがって、扁平な砕石を用いれば、横倒しの骨材が増えるといえる。当初考えていたように、扁平な砕石を用いた場合、締固めの結果、長軸が水平方向になるように配列された。

３．４　コア試験体の定水位透水試験の結果

図14に定水位透水試験から得られたアスペクト比2.03および2.83の骨材を用いたコア試験体の透水係数を示す。一般には水頭差が変化しても透水係数は変化しないが、砕石を用いた多孔質体の場合、既往の研究では動水勾配が大きいほど乱流に起因する水頭損失が生じて曲線的に流速が変化することが知られており、今

表６　決定した砕石作製条件

Aspect ratio	Particle range before processing (mm)	Opening width of jaw crushers (mm)	Processing time by ball mill (min)
2.03	5.00~20.0	―	30
2.32	5.00~20.0	―	―
2.82	19.0~26.5	19.0	―
	26.5~31.5	26.5	―
	31.5~40.0	31.5	―

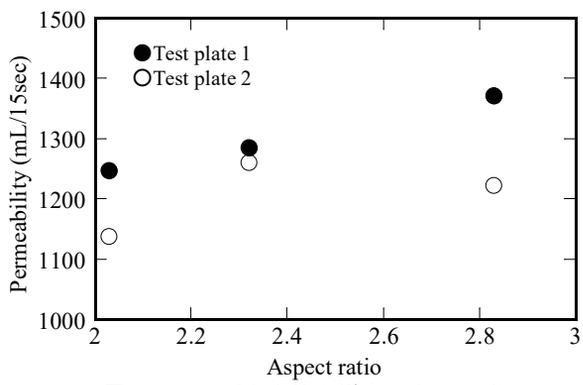


図11　アスペクト比と透水量との関係

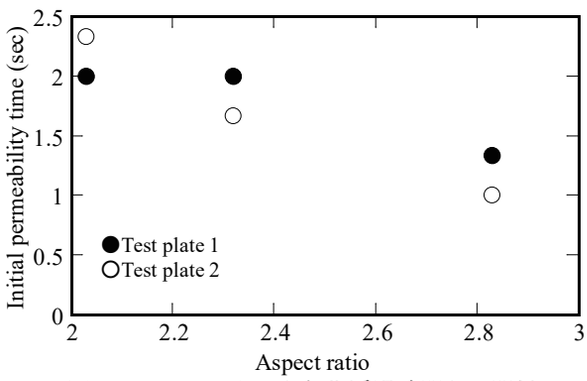


図12　アスペクト比と初期透過時間との関係

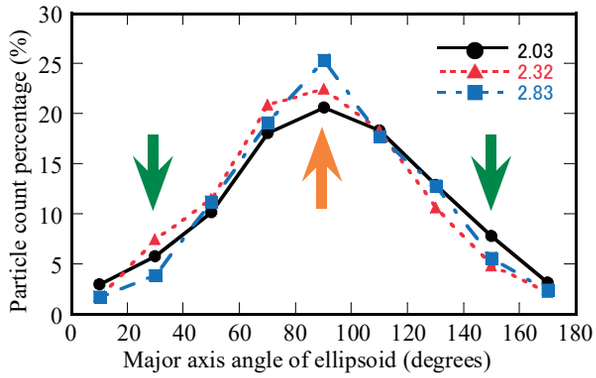
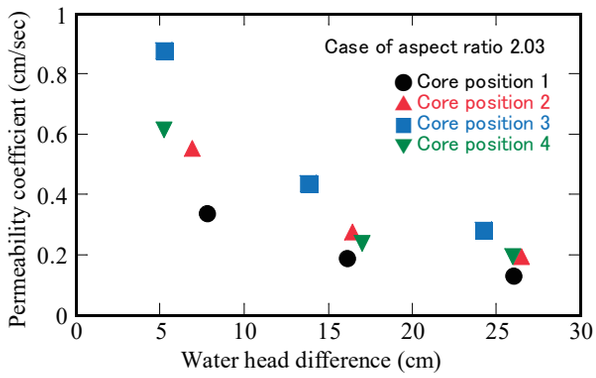
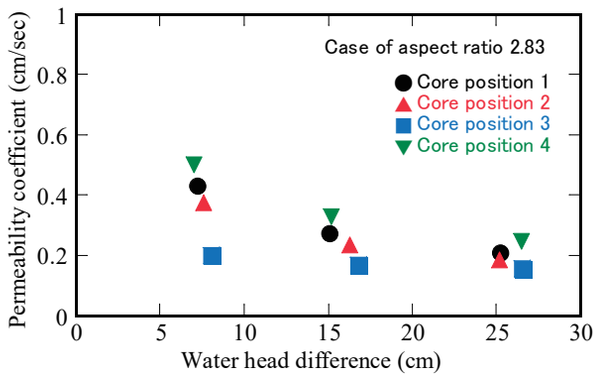


図13　長軸の鉛直方向角度



アスペクト比2.03



アスペクト比2.82

図14　コア試験体を用いた透水試験結果

回の範囲でも同様の結果となった[6]。また，同じ水頭差でも、アスペクト比が大きくなると透水係数は全体的に小さくなった。ただし，採取方向によって，水頭差の増加による透水係数の減少割合の明確な差は見られなかった。

本研究では、同じふるいにとどまり、アスペクト比が異なる粗骨材を使用した。そのため既往の研究[7]から、短軸や中軸の長さは同程度で長軸が異なると考えられる。締固めにより、アスペクト比が大きいほど水平に配置されたが，間隙構造は複雑で，採取方向による明確な増加は見られなかったと考えられる。それよりも、アスペクト比が大きいほど，透水係数自体が小さくなった。以上から、見かけの流れやすさの計測では、アスペクト比が大きいほど、上部から流入した水が、透水係数の低下や粒子の壁で阻まれ、横方向に広がった透水範囲が広がったと考えられる。

4．まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめた。

(1)　必要な粒度範囲の下限以上の粒径の粒子を下限値と同じ幅に開口したジョークラッシャで破砕すると、圧壊作用により扁平な粒子を効率よく得られた。一方、ボールミルでは破砕よりもすり減りによる角取りの効果は高く、アスペクト比は少しずつ増加した。

(2)　アスペクト比2.03，2.32，2.82の砕石を用いたアスファルト試験板では、骨材の形状が扁平なほど舗装面への水の侵入やその後の最初に水が試験板を通過するまでの時間が短かった。

(3)　試験版のコア試験体の計測では、扁平な砕石を用いれば、横倒しになる粗骨材が増える傾向にあったが、アスペクト比が小さいほど透水係数の変化が大きいが、採取方向で明確な差はなかった。

以上より、見かけの流れやすさの計測では、アスペクト比が大きいほど、上部から流入した水が、透水係数の低下や粒子の壁で阻まれることで横方向に広がった。つまり、透水範囲が広がったと考えられる。一方で、締固めにより、アスペクト比が大きいほど水平に配置され、水平方向の透水係数が増加すると考えたが、間隙構造は複雑で明確な増加は見られなかった。今後、アスペクト比の変化による空隙構造と流れの乱れについて詳細な検討を行いたい。

謝辞

本研究はJSPS科研費　19H02252および2020年度昭瀝記念財団研究助成の助成を受けたものです。

参考文献

1)　日本道路協会：舗装施工便覧平成18年度版、丸善、2006.

2)　日本コンクリート工学会性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会：性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書、日本コンクリート工学会、2015.

3)　麓隆行：新しい機構のX線CTの開発とポリマーコンクリートの圧縮試験への適用、 土木学会論文集E2、 Vol. 69、 No. 2、 pp. 182-191、 2013.

4)　麓隆行：X線CTを用いた3次元画像計測のポーラスコンクリート内部の物性評価への適用性、 コンクリート工学年次論文集、 Vol. 36、 No. 1、 pp. 1672-1677、 2014.

5)　日本道路協会：舗装調査・試験法便覧、丸善、2007.

6)　浅野勇、林田洋一、増川晋、田頭秀和：ポーラスコンクリートを通過する流れの流速と動水勾配の関係、農村工学研究所技報、Vol. 210、pp227-241、2009

7)　麓隆行、平井真一、溝口達也、松本嶺：X線CT画像の3次元粒子計測による砕石の粒子形状の分析、コンクリート工学会年次論文集、Vol. 34、No. 1、pp. 70-75、2012.

(2021 年 10 月 16 日受付　2022 年 2 月 8 日受理)