

# アスファルト混合物の骨材間 マトリックス強度に関する基礎研究

黒瀬雅詞<sup>1</sup>・福島祥夫<sup>2</sup>・内藤和也<sup>3</sup>・鈴木拓雄<sup>4</sup>・田口 仁<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 工博 群馬工業高等専門学校准教授 機械工学科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町 580)  
E-mail:kurose@mech.gunma-ct.ac.jp

<sup>2</sup> 工修 群馬大学大学院工学研究科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

<sup>3</sup> 群馬工業高等専門学校 専攻科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町 580)

<sup>4</sup> 教修 東京都立産業技術高等専門学校助教 ものづくり工学科 (〒116-8523 東京都荒川区南千住 8-17-1)

<sup>5</sup> 正会員 工博 福田道路株式会社 技術研究所 (〒959-0415 新潟県新潟市西蒲区大潟 2031)

アスファルト混合物は骨材を強化材とした複合材料である。複合材料のマトリックス強度は骨材に影響を受けることから、アスファルト混合物を粒子強化複合材料として考え、骨材の位置や粒子径による応力やひずみ分布を実験と解析によって調べた。実験は自作した粒子強化複合材料で行い、解析は有限要素法で骨材の個数によるマトリックスの縦弾性係数を複合則に従って求めた。さらに、骨材の配置や寸法、力学定数をパラメータとして、骨材間のマトリックスのひずみが小さくなるような最適化シミュレーションを行った。

**Key Word** : Composite, Optimization, Elastic modulus, Reinforcement, Pavement

## 1. 緒言

アスファルト混合物は、過荷重や温度応力によってクラックや流動などの欠陥が生じることは周知である<sup>1),2)</sup>。近年、ホイールトラッキング試験による流動やクラックに対する研究も多く取り組まれ<sup>3),4)</sup>、層間剥離などの欠陥の出現現象にも注目が集まっている<sup>5)</sup>。著者らは現道や試験路における表層や内部ひずみを測定し、その現象の把握に努めてきた<sup>6),7)</sup>。その他、骨材間や各層の境界におけるひずみを調べることは直接的に損傷と結びつくことも明らかにされている<sup>8)</sup>。

一方、アスファルト混合物は粒子強化複合材料と見なせるが、粒子強化複合材料の強化機構に関する研究は繊維強化複合材料などに比べて少なく、構成則理論<sup>9)</sup>や縦弾性係数の評価理論が主である。これらの理論は粒子の大きさが材料全体に対して小さい場合や微小な分子などには適用できるが、複合材料全体に対して粒子が極端に大きい場合や粒子形状が特殊な場合では理論に逸脱することもある<sup>9)</sup>。

そこで、本研究では粒子強化複合材料と見なしたアスファルト混合物のマトリックスと骨材がどのように応力を伝達し、全体の強度に影響を及ぼしているかを調べ<sup>10),11)</sup>、骨材径の大きい複合材料の場合における各種複合則による縦弾性係数との比較を行い、配置や骨材径など

による影響を解析した。また、積層構造の強度に着目した舗装体の報告は多く論じられているが<sup>11)</sup>、舗装体内の骨材配置に関する研究はあまり報告されておらず、粒度や配合に関する研究<sup>12)</sup>やその最適化<sup>13)</sup>に関する研究がほとんどである。そのため、強化材の配置や寸法に対するマトリックス強度やその最適化に言及した報告は近年では見受けられず、本研究の意義は大きいと考える。

今回は、アスファルト混合物の内部に生じている応力を調べるため、自作の供試体で載荷実験を行い、画像相関法によって二次元ひずみ分布を計測した。さらに、有限要素法により、骨材を配置させた複合材料の強度解析を行う。有限要素解析では骨材間のマトリックスひずみが最も小さくなる構成が流動などを抑える構造体と考え、最適化シミュレーションにより、品質工学的に配合の優位性および最適値について検討した。

## 2. アスファルト混合物モデル材料の載荷実験

アスファルト混合物をモデル化した供試体は図-1に示すようにマトリックスにエポキシ樹脂( $E_m=3\text{GPa}$ )、骨材に直径  $11\pm 1\text{ mm}$ のガラスビーズ ( $E_p=80\text{GPa}$ )を用いて、 $25\times 25\times 30\text{ mm}$ の型で常温成型した。骨材の配置はガラスビーズが1段に1~5個を均一に配置した場合と、ガラスビーズが1段に4~5個を最密となるように3~4層配置

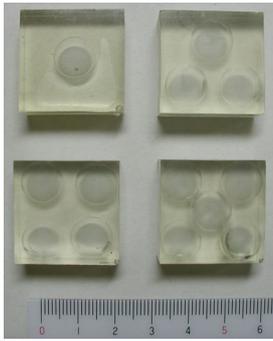


図-1 実験用粒子強化複合試料

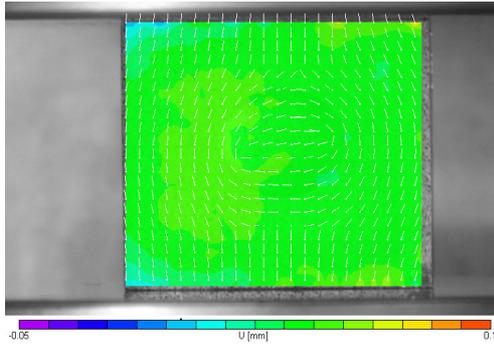


図-2 骨材入り試料の変位分布図(mm)

した場合とした。

実験は島津製作所製オートグラフ (AG-IS 50kN) を使用し、クロスヘッド速度 0.5mm/sec で、試料毎に 2kN~5kN の範囲で一軸圧縮荷重を載荷して縦弾性係数を求めた。得られた結果は後に述べる考察の図中に示した。

また、1/30sec 毎に試料表面の連続撮影も行い、画像相関法 Vic-2D (レーザー計測社製) によってひずみ分布を画像解析した。ただし、解析を容易にするために、エポキシ樹脂に軟化剤を混合して縦弾性係数を低下させた試料を別に用意し、デジタルビデオカメラで連続撮影した画像から静止画像へ変換して解析を行っている。

結果の一例としてガラスビーズ 1 個での載荷時の変形をベクトル表示した結果を図-2 に示す。ガラスビーズ部以外の周囲の変位は下方向に向いているが、中央部のベクトルはガラスビーズを避けるように偏向していることがわかる。

### 3. 有限要素解析

図-2 に示した実験結果のように骨材がマトリックスに与える影響は骨材周辺のひずみ分布や変位分布を調べることが重要であることから、解析的に骨材周囲の変位分布を検討する。

実験した供試体と同じ寸法で有限要素解析ソフト ANSYS (Ansys 社) により複合材料断面とソリッドモデルによる三次元有限要素解析を行った。解析に用いた定数はマトリックスの縦弾性係数  $E_m=3.08\text{GPa}$ 、ポアソン比  $\nu_m=0.34$ 、骨材 (10 mm 径) の縦弾性係数  $E_p=80.1\text{GPa}$ 、ポア

ソン比  $\nu_p=0.27$  とし、載荷する荷重は実験と同様に上下方向での一軸圧縮荷重であり、モデルの寸法は  $25 \times 25 \times 30$  (mm) である。

#### (1) 骨材数によるマトリックス強度

相当応力分布の二次元解析結果を図-3 に示す。骨材 1 個の図-3 (a) では、骨材の対角線方向の境界位置に最大応力を生じ、骨材の側面部側は小さい値となった。骨材を増やした場合でも、同様に骨材の側面部で応力が小さくなる傾向がみられる。底面を拘束しているため、図-3 (b) ~ (d) では、下側に配置されている骨材の底面側に最大応力を生じている。また、骨材 5 個の図-3 (d) では、中央に配置された骨材下部と最も下に配置された骨材間のマトリックス部に最大応力が生じている。このように骨材の配置は骨材間に存在するマトリックスの応力に影響を及ぼしていることが分かる。

また、最大応力値は骨材数が増えると大きくなる傾向がある。つまり、骨材間の距離が近接し、応力集中が大きくなるためである。また、図-3 (d) のように最大値がマトリックスに生じている場合もあるが、比較的大きな応力が生じているのは骨材であることから、骨材部が主に応力を分担しており、マトリックスはその応力を骨材へと伝達する働きになっていると考えられる。よって、骨材間の距離をある程度、確保して配置することも有益な場合もあると考える。

次に、三次元解析による水平方向変位の変位解析結果を図-4 に示す。このモデルは内部に骨材を有しているモデルで、実験した供試体と同じように表面には骨材が現れないようにした。つまり、この図-4 (a) の骨材が 1 個の場合は、図-2 で示した試料と同様の構成である。すると、図-4 (a) は中央を囲むように変位しており、解析結果は実験結果とほぼ同等の変位を示していると思わせる。また、図-4 (b) の 4 個が介在した場合でも変位分布は骨材を形

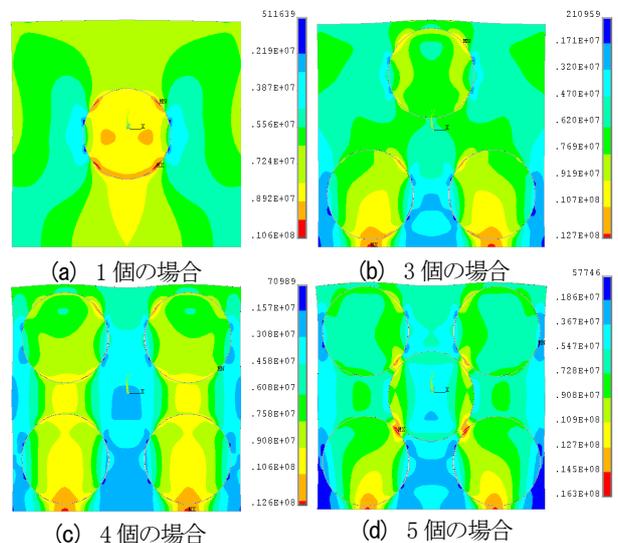
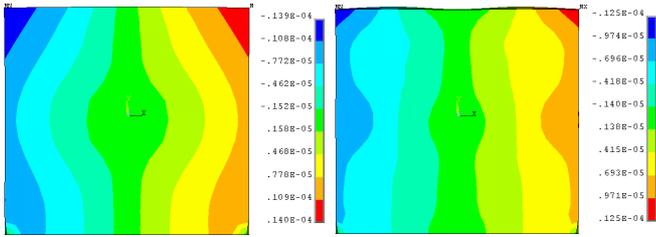
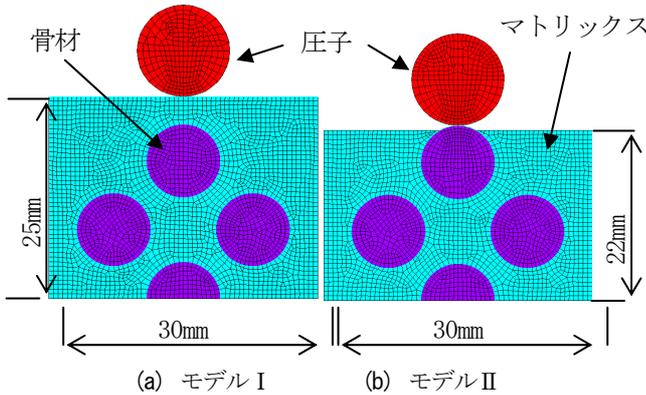


図-3 骨材数による相当応力分布図



(a) 1個の場合 (b) 4個の場合  
 図-4 解析による水平方向の変位分布(mm)



(a) モデル I (b) モデル II  
 図-5 骨材埋設モデル(幅 30mm)

表-1 解析モデルの拘束条件

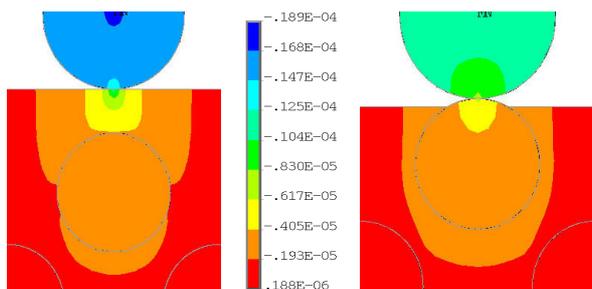
条件 1	モデル側面を拘束フリー
条件 2	モデル側面を荷重拘束
条件 3	モデル側面を変位拘束

どっているように見える。

よって、この程度の厚さであればアスファルト混合物表面部にまで変位が現れ、内部を可視化できなくても、骨材がどのように介在しているか推定できると考える。

## (2) 表面骨材の位置による影響

次に、アスファルト舗装の表面に現れる骨材による影響を調べるため、2通りの骨材埋設モデルについて有限要素解析を行った。図-5に示すように、一つは施工直後を想定したようなマトリックス内に骨材が埋設している「モデルI」とし、他方を、表面が摩耗した状態あるいは透水性舗装などを想定したようなマトリックスから骨



(a) モデル I (b) モデル II  
 図-6 条件 1における各モデルの全変位図(mm)

材が突出している「モデルII」とした。このモデルの上面から荷重を加える方法として、輪荷重や異物などにより集中荷重を与えることをイメージし、モデルの上面に円形状の圧子を設けた。ただし、接触面は平面とした。モデルの幅は30mm、骨材の直径は10mmである。

それぞれのモデルにおいて表-1のように拘束条件を変えて解析した。条件1は温度収縮などで路肩と隙間があいた状態を想定できる。条件2は力によって拘束を受けるもので様な道路状態で熱応力などの側圧を受けるような路肩の状態と想定できる。条件3は直線状道路において走行方向断面に相当する。つまり、十分に長い材料の場合、平面ひずみ状態として扱われるように、変位が拘束された状態として想定できる。

各モデルにおける条件1の結果の変位図を図-6に示す。モデルIでは表層のマトリックスが大きく変形することが分かる。そして骨材周りの変位を見るとモデルIでは表層が変位する分、骨材下部のマトリックスの変位は小さいが、モデルIIでは骨材を回り込むように変位が生じており、当然ながら骨材が埋まり込む変位となっている。

前述のように骨材間のマトリックスのひずみに注目するため、図-7のような骨材間に最近接パスABを設定し、パスAB上のひずみ分布を調べた。図-8に、骨材径を6,8および10mmとして、条件1のモデルIの場合を解析した結果を示す。横軸は最近接パスAB上の位置であり、点Aを原点として点B方向への距離を示している。例えば、パス間位置が0.0mmのときは、点Aでの相当ひずみを示すことになる。また、骨材径が大きくなるほどマトリックスの間隔が狭くなることになる。この図から、パス間位

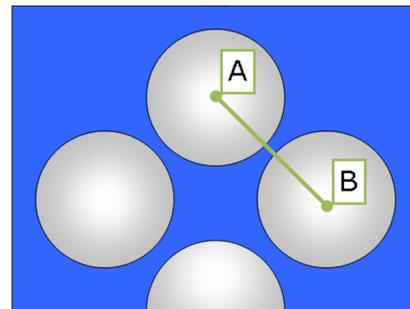


図-7 最近接パス(パス AB)のイメージ図

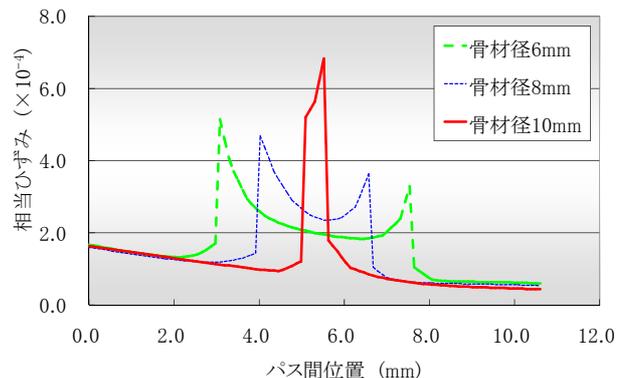
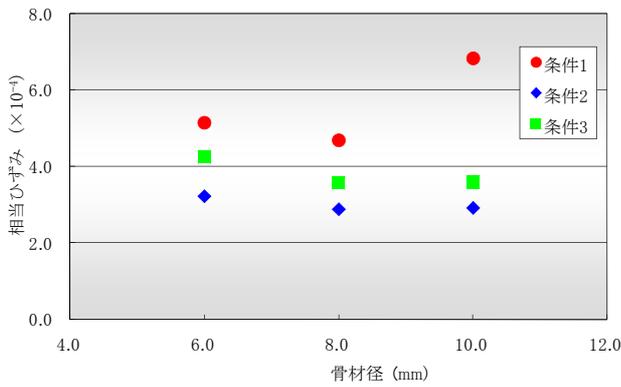
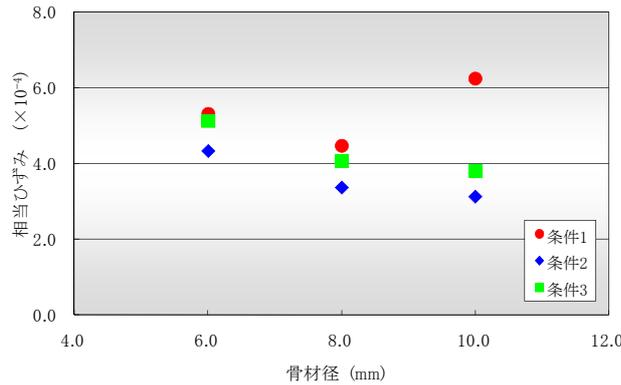


図-8 最近接パス上の相当ひずみ分布(モデル I の条件 1)



(a) モデル I の最大相当ひずみ



(b) モデル II の最大相当ひずみ

図-9 最近接パス間における拘束条件ごとの骨材径と相当ひずみの関係

置が小さい側のひずみ、すなわち骨材内部のひずみは、条件1では骨材径によらずほぼ変化していない。一方、マトリックスは縦弾性係数が小さいので、ひずみは大きい。また、骨材径が10mmの場合には片側の境界しかひずみが高くなっておらず、最大値は最近接パス上からずれて生じていると考えられる。

そこで、条件ごとの最大ひずみ値に注目して、骨材径との関係をモデルIとモデルIIについてまとめた結果を図-9に示した。いずれのモデルでも両端が自由境界であればひずみが大きいことは容易に推測できるが、側圧を受けている方が変位を拘束されているよりもひずみが小さくなっている。また、骨材径が10mmの場合、他の骨材径に比べて、条件1のひずみが突出して大きくなっていることが分かる。これらのことから、骨材径と相当ひずみは必ずしも比例関係ではなく、特に条件1では骨材径が8mm程度の場合に相当ひずみが極小値をとるような挙動を示しているのは注目すべきことである。

#### 4. 考察

実験結果と解析結果から、骨材径がマトリックスのひずみに大きな影響を及ぼすことは明らかとなった。以下では複合則に従って、複合材料としての強度が向上したかについて検討する。さらに、アスファルト混合物の粗骨材の配置と縦弾性係数などの力学定数などを影響因子

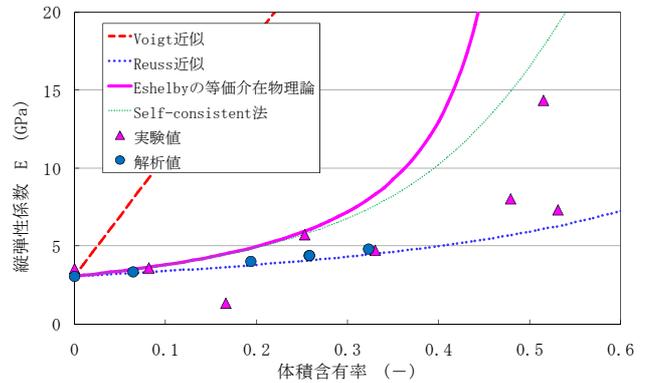


図-10 強化材の体積含有率に対する圧縮実験と有限要素解析結果および各種複合則による縦弾性係数の関係

として、粗骨材間のマトリックスのひずみを小さくするための最適化シミュレーションを行った。

##### (1) 複合則の適用

図-10に、2章で行った圧縮実験および3章で示した有限要素解析から求めた平均縦弾性係数と、体積含有率の関係を調べた結果を示す。▲印で示した圧縮実験結果は、一部低い値もみられるが、体積含有率の増加に伴い、縦弾性係数も増加する傾向にある。有限要素解析における縦弾性係数は、各節点の垂直応力からフックの法則により求め、●印で示した。この場合も骨材の体積含有率が増加すると、縦弾性係数が増加しており、これらのモデルが複合化による効果を発揮していることを確認できた。

また、今回の試料における各種の複合則を曲線で図-10に併せて示す。複合則はそれぞれ Voigt 近似, Reuss 近似, Eshelby の等価介在物理論, Self-consistent 法を引用した<sup>10)</sup>。

Eshelby の等価介在物理論とは、介在物のひずみの値は遠方で与えられたひずみと各構成要素にかかわる弾性定数を用いて等価に表すことができるという理論である。介在物はマトリックスと等価な弾性を持つ部分領域と考えるが、複合材料のように介在物がマトリックスとは異なる場合でも適当な置き換えをすると介在物をマトリックスと同じ取扱いができることを示したのである。

具体的には、マトリックスのせん断弾性係数を  $\bar{G}$  とすると、等価方程式は式(1)となる。ここで添え字  $m$  はマトリックス、 $p$  は介在物を意味し、 $\tau$  はせん断応力、 $\gamma$  はせん断ひずみである。また、 $\gamma^*$  は等価固有ひずみと呼ばれるものである。

$$\tau_m + \tau_p = 2\bar{G}(\gamma_m + \gamma_p - \gamma^*) = 2G_p(\gamma_m + \gamma_p) \quad (1)$$

これによって得られる平均体積弾性係数  $\bar{K}$  は次式となる。ただし、 $i=1\sim 3, j=1\sim 3$  である。

$$\bar{K} = K_m + \sum_{p=1}^n V_p (K_p - K_m) \bar{K} / \left\{ \bar{K} + \frac{1}{3} S_{ij} (K_p - \bar{K}) \right\} \quad (2)$$

Reuss 近似と Voigt 近似は、この等価介在物理論の特

殊な場合である。Reuss 近似は、各構成要素で応力がすべて等しく、それが平均応力に等しいとする近似であり、Voigt 近似は、介在物とマトリックスである各構成要素でひずみがすべて等しく、それが平均ひずみに等しいとする近似である。

Self-consistent 法は、Eshelby の等価介在物理論を拡張させたものであり、散在する介在物を複合材料と同じ弾性係数を持つ仮想的な一様なマトリックス中に埋め込まれた一個に代表させた等価介在物と考えて、Eshelby の等価介在物理論を適用させた理論である。

これらの理論値と体積含有率の関係について図-10 を見ると、実験値は一部を除き、Reuss 近似と Self-consistent 法との間の値をとっていることが分かる。また、有限要素法による解析値は Reuss 近似よりやや高い値となった。このように解析でも複合則に従う範囲は 30%程度の体積率までとなり、実験では大きな体積率まで調べているが、その精度は明らかに劣っており、骨材径が大きなモデルでは単に複合則を適用することが困難な場合もあると考える。

## (2) 骨材配置の最適化

骨材径が大きな場合、骨材の配合は複合則によって理論的に決定することは困難であり、骨材間のひずみの傾向から骨材の大きさによってマトリックスのひずみは比例しない場合もあることがわかった。そこで、有限要素法を用いた最適化シミュレーションによって最適なアスファルト混合物の構造を調べることにした。

注目すべき構造は多様にあるが、今回は図-5 で示した構成に基層を加え、図-11 のような圧子+マトリックス+骨材+基層をもつ第 2 モデルとして、添え字 2 を付けてモデル  $I_2$ 、 $II_2$  と区別した。接触する平坦部の長さはモデル程度であるが、マトリックスの幅と同一とすれば等分布荷重を負荷できる。これらの構成について、骨材径などの有効となる最適設計因子の傾向を調べる。

解析は最適設計支援ツール OPTIMUS (Noesis Solutions 社) で行った。遺伝的アルゴリズム法に基づいてパラメータを設置し、最適化の応答曲面や収束過程を調べ、最適条件を導いた。シミュレーションは設計因子や誤差因子

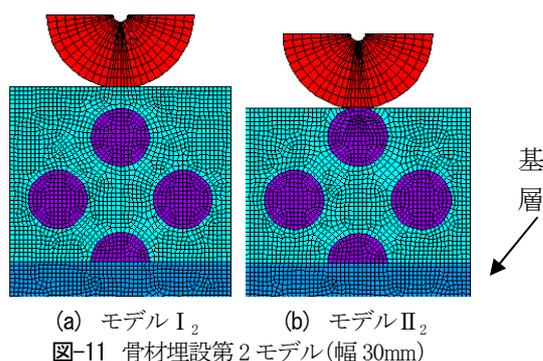


表-2 設計因子

マトリックス縦弾性係数, ポアソン比	$E_m, \nu_m$
骨材縦弾性係数, ポアソン比	$E_r, \nu_r$
基層縦弾性係数, ポアソン比	$E_b, \nu_b$
マトリックス—骨材摩擦係数	$\mu_{m,r}$
マトリックス—圧子摩擦係数	$\mu_{m,a}$
マトリックス—基層摩擦係数	$\mu_{m,b}$
基層高さ	$b_{height}$

表-3 誤差因子

骨材配置位置右 (x, y座標)	$x_{rein1}, y_{rein1}$
骨材配置位置左 (x, y座標)	$x_{rein2}, y_{rein2}$
骨材径 (骨材1~4)	$d_{rein1}, d_{rein2}, d_{rein3}, d_{rein4}$

を含めた品質工学的手法も可能である。設計因子は表-2 のようにアスファルト混合物の設計時に設計者側が与えられる変数とした。誤差因子は表-3 のように混合時に生じる偶発的な因子であり制御不能な不可避の変数として設定した。パラメータを変化させた範囲は骨材径が直径 6~10mm, 縦弾性係数がマトリックスを 9~11GPa, 骨材と基層を 27~33GPa である。その他の因子の数値範囲はそれぞれ 10%とした。この範囲において図-7 の経路に 2.5mm の幅を持たせ、骨材間の最大ひずみを目的関数 ( $v_{max}$ ) に設定し、この  $v_{max}$  の最小値における設計因子を最適条件とみなした。

### a) 最適化計算

それぞれのモデルにおける最適化に至る目的関数と各パラメータの関係を表層, 中間層, 最下層に分けて、図-12 に示した。図は、モデルごとに骨材 1~4 の直径  $d_{rein}$  とマトリックスの縦弾性係数  $E_m$  を横軸にとり、縦軸を目的関数である骨材間の相当ひずみの最大値  $v_{max}$  として 3 次元的に示した応答曲面となる。設計は目的関数を小さくした方が良いこととなり、暗色側が望ましいこととなる。すると、モデル  $I_2$  では表層の骨材径は大きいほど望ましく、中間層は小さいほど望ましい。最下層は骨材径にほとんど依存しないことが分かる。一方、モデル  $II_2$  では表層の骨材径が大きい傾向は同じであるが、中間層の骨材径も大きい方が良くなり、最下層の骨材径は 7mm 程度の大きさが望ましいようである。縦弾性係数に対してはモデルや骨材によらずほぼ同じ傾向であるが、骨材径に対してはモデルごとで異なる傾向となった。

さらに、モデル  $I_2$  の収束過程を図-13 に示した。モデル  $II_2$  もほぼ同様であったため省略したが、それぞれ骨材の水平位置に対する収束性はほとんど見られず、骨材径とマトリックスの縦弾性係数に対する収束効率が高いことが分かった。

これらの結果から、最適化に至るモデル  $I_2$  のパラメータの寄与度について図-14 に示した。

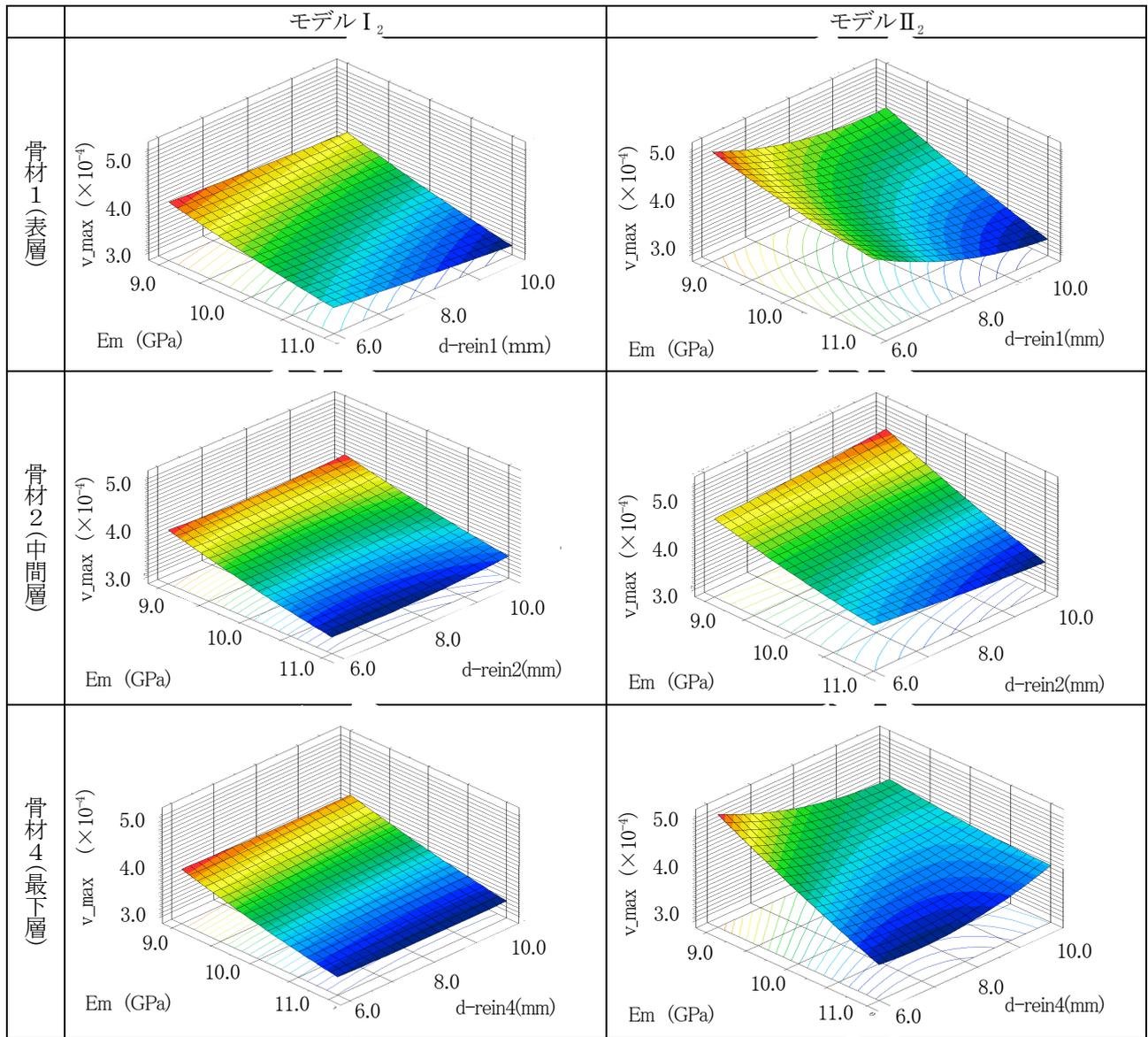


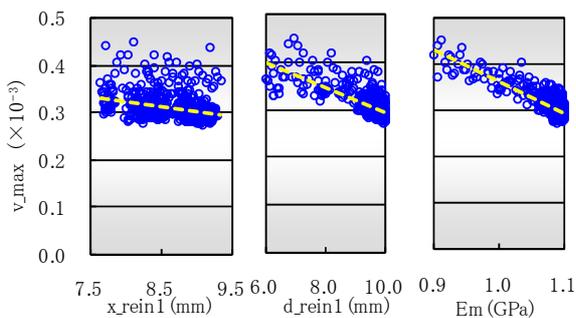
図-12 各モデルにおけるマトリックスの縦弾性係数に対する骨材径の応答曲面

寄与度が負になる側が目的関数  $v_{max}$  を小さくする因子、つまり、骨材間の最大ひずみを小さくする因子となり、正になる側がそのひずみを大きくする因子となる。このようにポアソン比  $\nu$  の絶対値よりもマトリックスと骨材の縦弾性係数 ( $E_m, E_r$ ) の絶対値の方が大きいので、ひずみには縦弾性係数が大きく寄与していることになる。

また、ひずみを小さくするには表層の骨材径  $d_{rein1}$  が大きく依存し、中間層の骨材径  $d_{rein2}$  は寸法が大きくなるとひずみを大きくする側に作用することがわかった。

#### b) 最適配置

この値をもとに得られた最適モデルでの相当ひずみ分



(a) 水平位置 (b) 骨材径 (c) マトリックスの縦弾性係数  
図-13 目的関数に対する収束計算過程 (モデル I<sub>2</sub>)

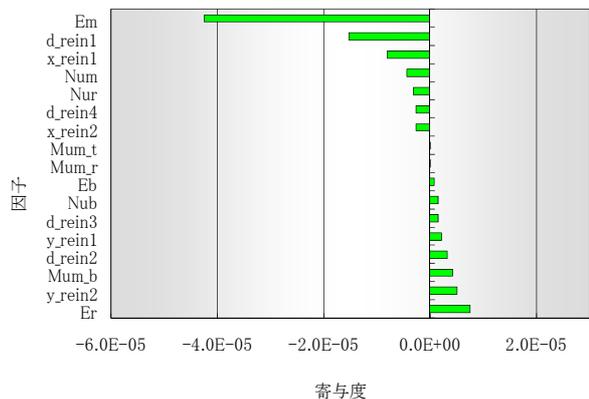


図-14 モデル I<sub>2</sub> の骨材間ひずみに寄与する各パラメータ

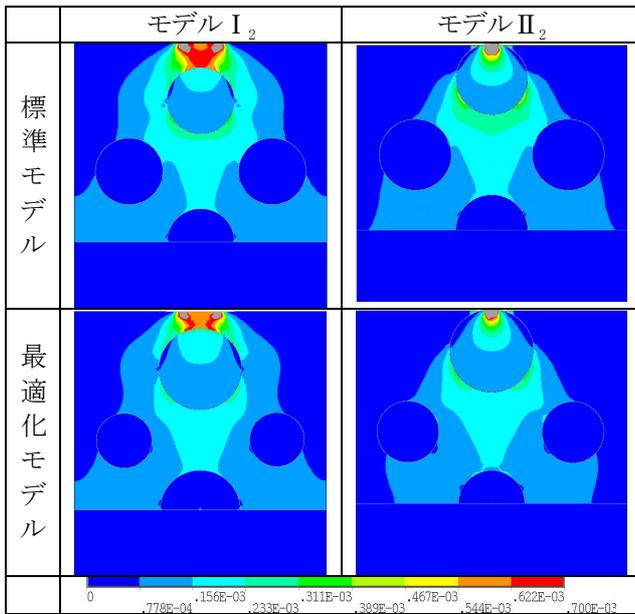


図-15 最適パラメータにおけるモデルと相当ひずみ分布

布図を図-15 に示す。比較のため、標準モデルでの解析を併せて示す。最適モデルでは、骨材径の大きさは表層が大きく、中間層が最も小さくなっている。その傾向は骨材が埋没しているモデル I<sub>2</sub> の状態の方が顕著であり、表層の骨材が露出すると全体の骨材径の差は小さい方がよいようである。ひずみ分布も最適モデルではモデル I<sub>2</sub>、II<sub>2</sub> とともに基層へのひずみ分布の幅が少なくなり、最適化の効果が表れている。

また、最適化計算から得られた値を表-4 にまとめた。モデル I<sub>2</sub>、II<sub>2</sub> の骨材の配置はほぼ変わらないものの、最下層の骨材 4 の寸法が異なることも注目である。モデル I<sub>2</sub> では上下の大きな骨材同士が支え合い、中間層は左右の流動を妨げているようにも見られるが、モデル II<sub>2</sub> は周囲の骨材で応力伝達を受け持ちやすいようにほぼ等しい骨材径で平等にマトリックス強度を向上させてひずみ分布の範囲を小さくしているように見られる。

表-4 最適パラメータ

因子	基準値	最適値	
		モデル I <sub>2</sub>	モデル II <sub>2</sub>
骨材 2 の x 座標 x_rein1 (mm)	8.50	9.076	8.997
骨材 2 の y 座標 y_rein1 (mm)	8.50	8.092	7.919
骨材 3 の x 座標 x_rein2 (mm)	8.50	9.191	9.247
骨材 3 の y 座標 y_rein2 (mm)	8.50	7.700	7.989
骨材 1 の直径 d_rein1 (mm)	8.00	9.944	9.276
骨材 2 の直径 d_rein2 (mm)	8.00	6.740	6.846
骨材 3 の直径 d_rein3 (mm)	8.00	6.464	6.834
骨材 4 の直径 d_rein4 (mm)	8.00	8.430	7.324
マトリックスの縦弾性係数 Em (GPa)	10.00	10.878	10.866
骨材の縦弾性係数 Er (GPa)	30.00	28.604	31.595
基層の縦弾性係数 Eb (GPa)	30.00	28.167	29.139
マトリックスのポアソン比 Num	0.35	0.372	0.377
骨材のポアソン比 Nur	0.40	0.489	0.342
基層のポアソン比 Nub	0.40	0.412	0.327
マトリックス間の最大ひずみ v_max	3.5E-04	2.7E-04	3.4E-04

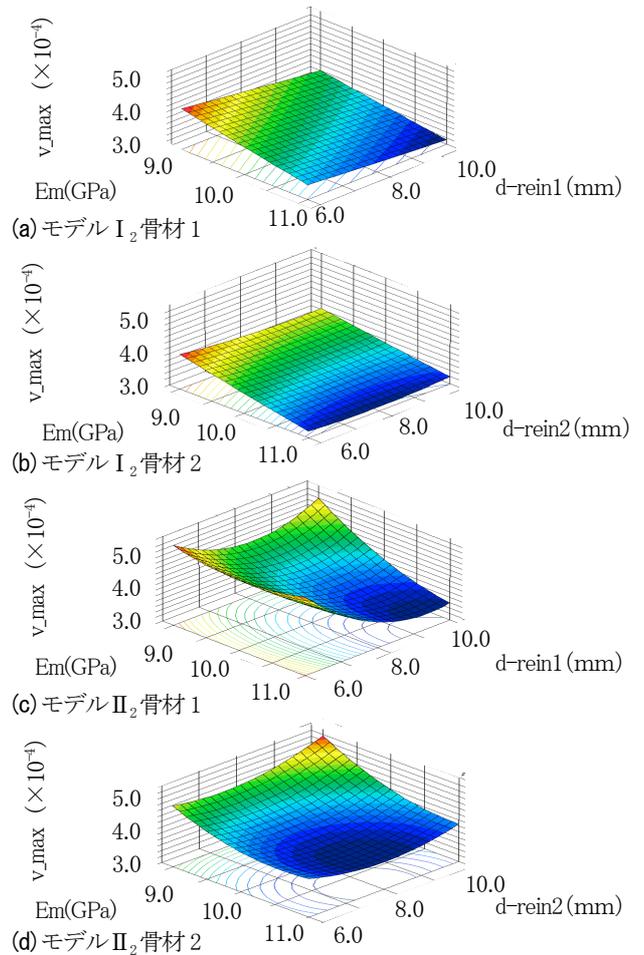


図-16 最下層骨材が 13mm の場合のマトリックス間の最大ひずみ値 v\_max に対する骨材径の応答局面

そこで、アスファルト舗装に用いられる骨材径は 13mm が多用されるため、上記の最適解を参考にして、13mm の骨材が最下層になった場合における最適化シミュレーションを行った結果を示す。寸法の制約上、中間層の骨材は中央までの配置として、残りのパラメータは前述と同様の範囲で解析した。

すると、図-16 に示すような応答局面が得られ、この場合でも中間層には最適な骨材径が存在することが分かる。骨材寸法の最適値のみ表-5 に示した。モデル I<sub>2</sub> ではマトリックス間の最大ひずみ v\_max 値は表-4 の最適解の v\_max より大きくなっており、13mm 以外の寸法でもひずみにくい最適解のあることが推測できた。

表-5 最下層骨材径が 13mm の場合における最適パラメータ

因子	基準値	最適値	
		モデル I <sub>2</sub>	モデル II <sub>2</sub>
骨材 1 の直径 d_rein1 (mm)	8.00	9.286	9.345
骨材 2 の直径 d_rein2 (mm)	8.00	7.673	8.676
骨材 3 の直径 d_rein3 (mm)	8.00	8.382	7.685
骨材 4 の直径 d_rein4 (mm)	13.00	13.0	13.0
マトリックスの縦弾性係数 Em (GPa)	10.00	10.9	10.9
骨材の縦弾性係数 Er (GPa)	30.00	27.5	27.7
基層の縦弾性係数 Eb (GPa)	30.00	29.7	27.6
マトリックス間の最大ひずみ v_max	3.5E-04	2.83E-04	3.27E-04

## 5. まとめ

粗骨材をもつアスファルト混合物モデルにおいて骨材間のマトリックスのひずみに注目して実験と有限要素解析を行った。骨材の粒度分布や積層構造の複合材料に関する解析に対し、今回のような最適化シミュレーションを含めた検討は、骨材の配置と寸法による強度について定量的に有効性を示すことができた。基礎研究として今回得られた事項をまとめると以下となる。

- 1) 骨材の密度が大きくなればアスファルト混合物の縦弾性係数は高くなるが、大きな骨材を含む材料に複合則を適用することは困難な場合があることを、実験と有限要素解析により示した。
- 2) 骨材径が6~13mmの場合では、最近接パス上に最大ひずみが生じない場合もあり、骨材径と骨材間の相当ひずみの関係は必ずしも比例しないことがある。
- 3) 骨材の粒度分布は均一な骨材径の配合よりも不均一な配合の方が推奨されているが、今回の最適化シミュレーションから、異なる骨材径を組み合わせた方がマトリックスのひずみは小さくなり、アスファルト混合物の変形を抑制するのに有効に作用していることを示すことができた。

## 参考文献

- 1) 北海道開発局土木試験所 舗装研究室:アスファルト舗装道路の横断ひびわれに関する調査研究報告書, pp12-14, 1985.
- 2) 安倍隆二, 岳本秀人, 鈴木拓雄, 木村清和, 黒瀬雅詞, 田口仁: 応力解放法によるアスファルト舗装の低温クラックに関する基礎研究, 北海道開発土木研究所月報, No.634 Page.17-26, 2006.
- 3) 近藤崇, 森吉昭博, 吉田隆輝, 高橋正一: 高温時のホイールトラッキング試験によりアスファルト混合物内部に発生するひび割れ, Journal of the Japan Petroleum Institute, Vol. 47, No.2, pp.90-99, 2004.

- 4) 近藤崇, 森吉昭博, 吉田隆輝, 高橋正一: ホイールトラッキング試験におけるアスファルト混合物内部の骨材の移動特性, Journal of the Japan Petroleum Institute, Vol.46, No. 3, pp.172-180, 2003.
- 5) 早野公敏, 水上純一, 鈴木哲雄: 層間剥離を有するアスファルト混合物層の表面温度分布特性に関する実験的検討, 地盤工学ジャーナル, Vol. 2, No.1, pp.1-10, 2007.
- 6) 田口仁, 黒瀬雅詞, 木村清和: 埋設式軟質ひずみセンサを用いた積層舗装構造の挙動評価, 日本道路会議論文CD-ROM), Vol.26th Page.ROMBUNNO.12P55, 2005.
- 7) 黒瀬雅詞, 木村清和, 鈴木拓雄, 田口仁: アスファルト混合物のひずみゲージ法における強度評価の一考察, 日本機械学会計算力学講演会講演論文集, Vol.17th Page.423-424, 2004.
- 8) 久保田聖, 宇尾朋之, 檜山和男, 寺田賢二郎: 固体-流体モデルを用いた均質化法に基づくアスファルト混合物の動的粘弾性解析, 理論応用力学講演会講演論文集, Vol.54, pp.151-152, 2005.
- 9) Toshio MURA: Micromechanics of Defects in Solids, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1987.
- 10) 黒瀬雅詞, 内藤和也, 安澤貴志, 鈴木拓雄: 強化材の埋入条件が粒子強化複合材料の応力分布に及ぼす影響, 日本機械学会計算力学講演会講演論文集, Vol.20th Page.721-722, 2007.
- 11) 藤波潔, James MAINA, 松井邦人: 求心荷重の作用を受ける舗装の多層弾性解析, 土木学会論文集, Vol.V-51, No.788, pp.43-51, 2005.
- 12) 本松資朗, 神谷恵三, 松本大二郎, 山田優: ハイブリッド舗装混合物の配合設計方法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.69, No. 802, pp.197-208, 2005.
- 13) 高原健吾: 高機能舗装混合物における骨材粒度の最適化手法の確立に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), Vol.58th, Disk 2, PageV-664, 2003.

## Basic Study of Matrix Strength between Large Stones in Asphalt Composite

Masashi KUROSE, Yoshio FUKUSHIMA, Kazuya NAITO, Takuo SUZUKI, and Hitoshi TAGUCHI

In this study, the asphalt deformation of asphalt contained large stone was investigated in micro area. First, we measured by compression experimentally coefficient of longitudinal elasticity for small asphalt model specimens. Specimens have several volume fractions of reinforcement. In addition, finite element analysis of the model specimens was preceded for coefficient of longitudinal elasticity and distribution of stress and strain. Furthermore, a few composite laws were adapted these specimens. They, however, were limited by volume fractions.

Therefore, based on the results of analysis and experiment, the variables of several mechanical properties and dimensions of stones in composite models changed to investigate for the minimum strain values of composite matrix. The results showed that structure of composite materials is more effective to optimize. Larger stones have near the surface, or, in intermediate layer have small stones that are better under the adaptive conditions.