

個別要素法によるアスファルト混合物のシミュレーションに関する基礎的研究

高橋 修¹・田口 仁²

¹正会員 工修 長岡技術科学大学 助手 環境・建設系 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

²正会員 工修 福田道路株式会社 技術研究所 (〒959-04 新潟県西蒲原郡西川町大潟字中ノ島2031)

アスファルト混合物の変形挙動の解析に個別要素法に基づいたシミュレーション手法を導入し、その適用性と個別要素モデルの特性について検討した。既往の個別要素法で用いられている要素モデルを、アスファルト混合物の物性を考慮して見直し、実際の試験データと比較して適用性を評価した。その結果、本研究で採用した要素モデルはアスファルト混合物の粘弾性的な変形挙動を十分に表現することが可能で、適用性はかなり高いことが確認された。また、要素モデルを構成する力学要素の物理定数をパラメトリックに変化させたシミュレーションを実施して、個々の要素モデルとその集合体との力学的な関連性についても検討した。

Key Words : *distinct element method (DEM), asphalt mixture, deformation, simulation*

1. はじめに

アスファルト混合物は、所定の粒度分布をもった骨材と適量のアスファルトバインダーを加熱混合し、締固めたものである。本来、骨材粒子が個々に独立している粒状材料(unbound material)を、アスファルトの付着性能と締固めによる骨材の噛み合い効果によってつなぎ止め、固体としての複合体を形成している。アスファルト混合物による層構造の力学特性の解析には、古くから弾性理論、塑性理論、粘弾性理論などの固体力学の理論が一般的に用いられているが、これらの基礎理論に基づいた解析解は、層の形状や構成および外力についていくつかの仮定や制約を設けたもので、任意の条件に対して汎用的に用いることはできない。これに対して、数値解析手法は任意の境界条件、任意の外力条件を有する構造物の力学特性や構造的メカニズムを検討するのに非常に有用なツールである。アスファルト舗装の分野でも構造解析で汎用的に用いられている有限要素法によって力学特性の検討が数多く行われている^{1),2)}。しかしながら、この種の手法は、解析対象の材料の均質性と連続性がある程度保証されたもので(部分的なクラック等は取り扱える)、破壊が生ずる前の変形が比較的小さい場合には適しているが、アスファルト混合物のように物性がある種の粘弾性を呈する複雑なもので、破壊するまでの変形量がかなり大きく、その過程を問題とする場合には適当な方法とは言い難い。さらに、力学特性を評価しようとする場合、アスファルト混合物はアスファルトに起因するレオロジー的な物性が支配的となることから、時間軸を考慮した力学量

の推移に着目する必要がある。アスファルト混合物の材料特性を的確に表現できる汎用の解析手法を導入する取り組みは、これまでの実験主体で経験に重きを置くアスファルト舗装の分野においては、他の分野に比べて立ち後れている問題であり、重要な課題の一つと考えられる。

計算力学の解析手法の一種に個別要素法(Distinct Element Method : DEM)がある。個別要素法は、いろいろな分野における非連続体の解析に用いられている方法で、主に砂や岩盤などの土質関連の材料を対象としたシミュレーションに適用されている^{3),4)}。解析対象の媒質を円形等の小要素の集合体で近似し、それら各小要素の運動を逐次追いかけることによって、作用応力や変形挙動の推移を調べていく方法である。したがって、粒状体の変形過程における破壊前から破壊後にわたる大変形の解析が可能で、衝撃や地震等の動的問題にも広く応用されている。アスファルト混合物の実際的な変形は、混合物が均質な連続体として変形するのではなく、骨材粒子は変形することなく骨材を皮膜しているアスファルトおよびアスファルトモルタル分がわずかに変形することによって骨材の相対的な位置が変化して、構造物全体の変形を呈しているものととらえられる。このように考えると、アスファルト混合物を粒状体である骨材とそれらを結合させるバインダーの組み合わせと簡略化することができ、力学特性の検討に個別要素法を適用できるのではないかと考えられる。さらに、粒子要素間の力の伝達モデルに複雑な粘弾性モデルを用いることが比較的容易で、アスファル

ト混合物のレオロジー的な挙動を表現しやすいと予想される。通常の個別要素法では、粒状体がそうであるように、物体を構成している個々の要素はすべて完全に独立しているものとして要素モデルを構成している。したがって、引張作用に対して抵抗力が作用するアスファルト混合物に、この要素モデルをそのまま適用するには問題がある。しかしながら、要素間の力の伝達モデルを見直すことにより、個別要素法の基本的な考え方を考えることなく、アスファルト混合物への適用性の検討を行うことができると考えられる。

本研究は、以上のような考えに基づいて、アスファルト混合物の変形解析に個別要素法が適用できるかどうかを検討し、そのための基礎的な知見を得ることを目的としている。まず最初に、アスファルト混合物の変形特性に即した要素モデルを選定し、そのモデルに基づいた解析プログラムを作成した。そして、アスファルト混合物についての基本的試験（一軸圧縮試験と直接引張試験）のシミュレーションを行って、実際の試験結果と照らし合わせて適用性を評価した。適用性の検討においては、実際の舗装用混合物との比較のみでは変形挙動を対応づけることが困難で評価が明確にできないことから、アルミ棒を用いた単純化したものについても比較した。また、本研究で用いた要素モデルの材料特性を把握するために、構成要素（バネとダッシュポット）の物理定数をパラメトリックに変化させたシミュレーションも行って、個々の要素モデルとそれらを集合体とした個別要素モデルの関係について検討した。なお、舗装構造の解析は、一般に軸対称問題として取り扱われることから、本研究でのシミュレーションは2次元モデルとした。さらに、実験結果とシミュレーション結果の比較、および解の安定性の評価が容易にできるようにひずみ速度が比較的遅い場合の変形挙動について検討を行った。

2. 要素モデルの選定

(1) 既往の要素モデル

個別要素法は、解析の対象を小さな粒子要素（通常は円形）の集合体で近似し、任意の外乱（荷重や強制変位）によって個々の要素に作用する力をそれぞれ求め、それらの力のつり合いから個々の要素の運動を決定する。そして、力のつり合い計算をすべての要素について行って構造物全体としての変形を求め、このような手続きを逐次繰り返して時間的な変形挙動や作用力の変化などを追いかけていく。力の計算を各要素について個別に行っており、作用力が大きく変化する場合、すなわち要素が相対的に大きく移動する場合についても解析が可能である。そして、同様な繰り返し計算を数

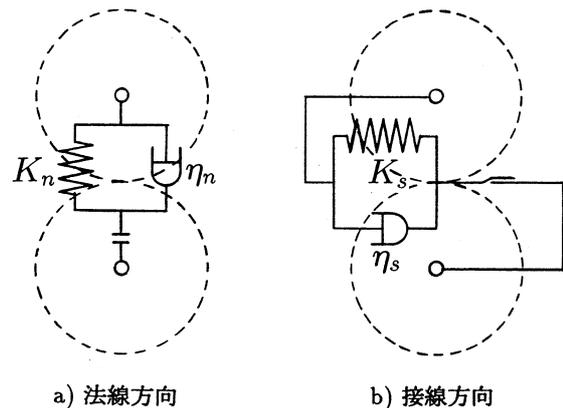


図-1 通常の要素モデル

多く行うことになるが、計算のアスゴリズムが極めて単純であることが特徴である。

通常の個別要素法では、要素の接触による力の伝達が図-1に示すような法線方向と接線方向のそれぞれ一組のVoigtモデルで行われるものとしている。そして、この抵抗力の作用は他の要素と接触関係にある場合のみ生じ、接触関係が成立しない要素については力の授受が全く行われない。このような要素モデルは、各要素が個々に独立している unbound material の力学モデルであって、土質関係の分野で一般的に用いられている砂や碎石に対するものである。引張に対しても抵抗力を有するアスファルト混合物の物性とは大きく異なっている。この要素モデルをアスファルト混合物の変形解析に適用する場合、アスファルト混合物の物性や作用する外力条件を考慮すると、以下に挙げるような問題点が指摘される。

- ① 要素相互には付着力が作用しないため、要素間では引張作用に対する抵抗力が全く生じない。この点が実際のアスファルト混合物の物性と最も異なっている。
- ② Voigtモデルは粘弾性モデルの一種であるが、基本的には変形が復元する固体の材料特性である。したがって、ひずみ速度が遅い場合の流体としての特性を表現できない。つまり、クリープ現象は表現できるが応力緩和現象を表すことができない。
- ③ 個別要素法は、一般に要素モデルの各種物理定数と繰り返し計算のタイムステップの選定いかんで、計算時間や解の安定性が大きく左右される。つまり、要素が振動して安定するのに時間を要したり、場合によっては微小な外乱で発散してしまうことがある。要素が相互に離れる運動に対して抵抗力が作用しないことから、力学モデルとしては解の安定範囲が狭いと考えられる。アスファルト混合物の力学特性は特に温度やひずみ速度によって非常に大きく変動するため、バリエーションに富んだ物性を表現できるモデルが望ましい。

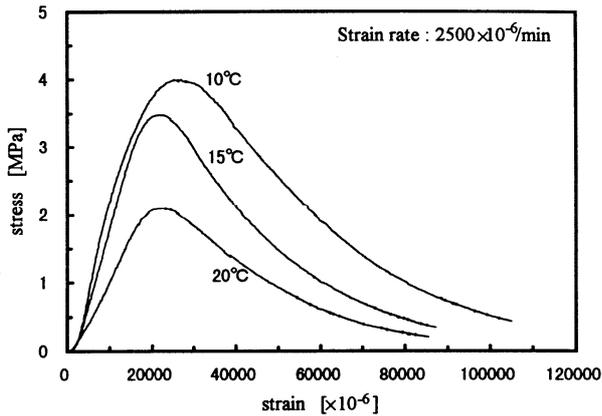


図-2 一軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線

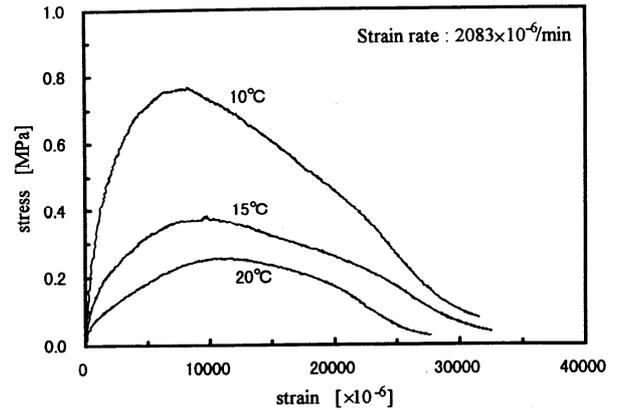


図-3 直接引張試験の応力-ひずみ曲線

①, ③の問題点はアスファルト混合物に対して限ったことではなく、他の分野の材料に対しても同様に指摘されている。既往の要素モデルを見直し、通常の個別要素法を拡張した研究例は、数は少ないがいくつか見上げられる。そのなかで代表的なものは、目黒ら⁵⁾によるセメントコンクリート構造物の破壊についてのシミュレーションに応用した要素モデルと、阿部ら⁶⁾による雪の沈降現象のシミュレーションに応用した要素モデルである。これらは、解析対象の材料特性を考慮して既往の要素モデルを改良したものであるが、そのままこれらをアスファルト混合物の解析に流用するには難がある。しかしながら、阿部らの要素モデルは先の問題点をほぼ解決するもので、さらなる細部の改良を施せばアスファルト混合物にも十分適用できると考えられる。そこで次に、実際のアスファルト混合物の基本的な材料特性を把握するために物理試験を実施して、実際に即した要素モデルを決定するための情報を得ることとした。

(2) アスファルト混合物の材料特性

アスファルト混合物の材料特性は、最も単純な一軸圧縮試験と直接引張試験を実施して評価した。アスファルト混合物としては、表層に一般的に用いられている密粒度アスファルト混合物(13)(以下、密粒度アスコンと記す)を使用した。(配合等の詳しい諸元は付録を参照のこと。)なお、一軸圧縮試験および直接引張試験ともに、アスファルト混合物については、試験法が標準化されていないので、既往の研究において行われてきた方法に準じた。

a) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験の供試体は、直径10cm、高さ20cmのモールドを使用し、材料を3回に分けて投入、締固めを行って作成した。試験は、ひずみ速度を変化させないで、温度のみを10°C、15°C、20°Cの3水準変化させて実

施した。ひずみ速度は、使用した試験機の最も遅い載荷速度が0.5mm/minであるために、 $2500 \times 10^{-6} / \text{min}$ であった。なお、各温度条件に対してのサンプル数は3であった。

図-2に各試験温度についての応力-ひずみ曲線を示す。これらは、各温度の3本の供試体のなかで平均的なものを選んだ結果である。本文では、応力のピーク値を破壊応力、そのときのひずみ値を破壊ひずみと称することにする。わずか10°Cの温度変化であるが、破壊応力はかなりの差が認められる。一方、破壊ひずみに大きな違いは見られず、 2500×10^{-6} 前後の値である。応力はピークに達してから徐々に減少しており、破壊応力に達してから供試体が破断して応力が抜けるまで、かなり多くの変形を要している。

b) 直接引張試験

直接引張試験は、吉田ら⁷⁾の方法に準じて実施した。供試体は、圧縮試験と全く同じ配合の混合物で、ほぼ同じ密度となるように締固めた。ローラコンパクタを用いて $300 \times 300 \times 40 \text{mm}$ の供試体を作成し、ダイヤモンドカッターで $40 \times 40 \times 240 \text{mm}$ のものを5本切り出した。そして、両端面に載荷用治具をエポキシ樹脂系接着剤で張り付け、十分に養生した後、これをユニバーサルジョイントが配備されている載荷ロードにセットして試験を実施した。一軸圧縮試験と同様に温度のみを3水準変化させ、各温度に対して供試体を5本使用した。ひずみ速度は、一軸圧縮試験と供試体の長さが若干違うために、 $2083 \times 10^{-6} / \text{min}$ であった。

図-3に試験結果の応力-ひずみ曲線を示す。破壊応力、破壊ひずみともに一軸圧縮試験の結果とかなり異なっているが、曲線の形状は共通する点が少ない。一軸圧縮試験では、破壊応力は15°Cと10°Cとで差が小さかったが、直接引張試験では20°Cと15°Cで差が小さくなっている。

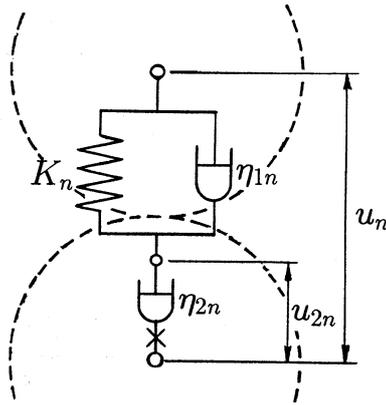


図-4 法線方向の要素モデル

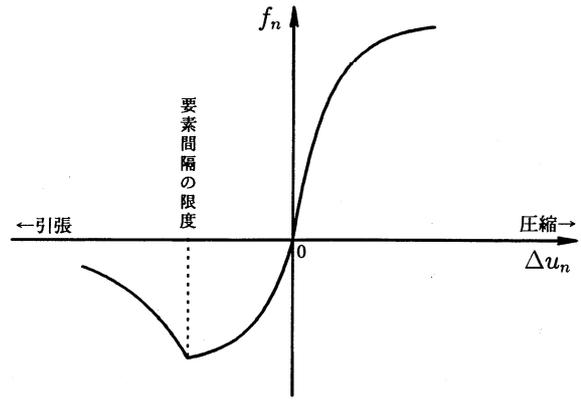


図-5 要素間作用力の概要

c) アスファルト混合物の物性

以上の一軸圧縮試験と直接引張試験の結果から、個別要素法の要素モデルを選定するに際しての、考慮すべきアスファルト混合物の材料特性として次のことが指摘される。

① 圧縮と引張では破壊応力がかなり違う。本試験での狭い温度範囲でも、圧縮の方が引張よりも約6~9倍も大きい。これに対して、破壊ひずみは圧縮の方が約2.5倍ほど大きい。

② 圧縮、引張ともに応力-ひずみ曲線は応力緩和のために上に凸の形状であり、応力がピークに達しても急激に低下するのではなく、下に凸形の緩やかに横軸に漸近するように低下している。

これらは、前節で記した既往のモデルでの問題点と同様にアスファルト混合物では至極あたりまえのことかもしれないが、既往の個別要素法の要素モデルを考えると特筆すべき点である。このような物性も要素モデルに考慮する必要がある。

(3) 要素モデルの選定

本節では、前節で言及した既往の要素モデルに対する問題点を考慮し、実際の物理試験に基づいて、アスファルト混合物の物性に即した要素モデルを選定する。本研究の法線方向のモデルは、目黒らの要素モデルと阿部らの要素モデルのそれぞれの長所を生かし、基本的には阿部らの要素モデルと同じ力学要素の構成を用いることにした。すなわち、具体的には図-4に示す3要素流体で、圧縮およびある限度までの引張はこのモデルで抗力が作用し、さらにアスファルト混合物がそうであるように、圧縮と引張では変形抵抗が異なるようにした。そして、引張抗力がこの3要素流体のモデルで作用する条件としては、要素間隔に限度を設けることとし、要素がその限度より離れると間隔に応じて引張抗力が指数関数的に徐々に減少するものとした。このような要素間に生じる作用力を変形量との関係で概

念的に表すと、図-5に示すようになる。

要素モデルに3要素流体を用いる場合、相対変位をVoigtモデル部とダッシュポット要素部に分けて考える必要がある。これらの変位からその時間 t におけるダッシュポット要素部の速度 $[u_{2n}]_t$ を求め、その速度から作用力 $[f_n]_t$ を次式に基づいて計算した。

$$\begin{aligned} [u_{2n}]_t &= \frac{1}{\eta_1 + \eta_2} \{ K_n ([u_n]_t - [u_{2n}]_t) + \eta_{1n} [u_n]_t \} \\ [f_n]_t &= \eta_{2n} [u_{2n}]_t \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 K_n 、 η_{1n} 、 η_{2n} は図-4に示した3要素流体を構成する各力学要素の物理定数である。これら K_n 、 η_{1n} 、 η_{2n} に同一の重み付け(係数 α を乗ずる)を行って圧縮と引張とで抗力を変化させた。また、要素間隔が限度を越えてからの引張抵抗は次式によるものとした。

$$[f_n]_t = [f_n]_{max} \cdot e^{-\left\{ \frac{\gamma}{R_i + R_j} ([D_{ij}]_t - \beta(R_i + R_j)) \right\}} \quad (2)$$

ここに、 $[f_n]_{max}$ は限度に達したときの引張抗力の最大値、 R_i 、 R_j は要素 i 、 j の半径、 $[D_{ij}]_t$ は時間 t における要素間隔である。 β は要素間における相対変位の限度を示すもので、 γ は指数全体にかかる係数である。

接線方向の要素モデルについては、吉田ら⁸⁾の研究によると、要素の運動への影響は比較的小さいので、通常の個別要素法のモデルと同じVoigtモデルを用いることにした。ただし、要素が離れている場合(法線方向の作用力が引張の場合)は、要素表面の間隔に反比例して抗力が変化するものとし、法線方向の要素間隔が設定した限度に達すると接線方向の抗力はゼロとなるようにした。

3. 適用性の検討

本研究で作成した解析プログラムの妥当性を確認し、さらに選定した要素モデルに基づいた個別要素法がアスファルト混合物の解析に適用できるか否かを検討するために、単純な力学試験のシミュレーションを実施

表-1 供試体および試験条件

アルミ棒半径	5.0 [mm]	アルミ棒長さ	100 [mm]
供試体幅 W	60.0 [mm]	供試体高さ H	114.6 [mm]
アスファルト量	13.3 [g]	平均皮膜厚	55 [μ m]
試験温度	25 [°C]	載荷変位速度	0.5 [mm/min]

表-2 圧縮試験の解析条件

重力加速度 g	0.0 [m/s^2]	要素密度 m	2.69×10^3 [kg/m^2]
タイムステップ Δt	1.0×10^{-6} [sec]	圧縮引張係数 α	0.2
摩擦係数 μ	0.2	引張変位規準 β	1.006
粘性係数 (法線) η_{2n}	1.0×10^7 [Ns/m]	引張減少係数 γ	3.0
バネ定数 (法線) K_n	8.0×10^5 [N/m]	バネ係数 (接線) K_s	5.0×10^4 [N/m]
粘性係数 (法線) η_{1n}	4.0×10^5 [Ns/m]	粘性係数 (接線) η_s	5.0×10^4 [Ns/m]

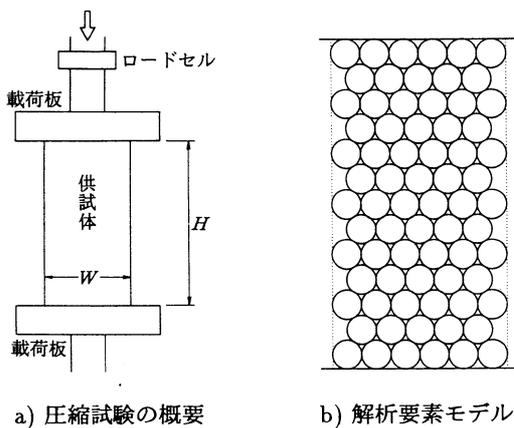


図-6 圧縮試験のシミュレーション

した。適用性の検討では、実際のアスファルト混合物の試験結果とシミュレーション結果を照査して考察を行った。ここでは、アスファルト混合物の試験結果として、前章で記した密粒度アスコンの一軸圧縮試験と直接引張試験のデータと、変形挙動の比較が明確にできるように単純化した混合物のデータを使用した。これは、ストレートアスファルトを皮膜させたアルミ棒を積層したもので、アスファルトの粘着力によって完全に自立する。

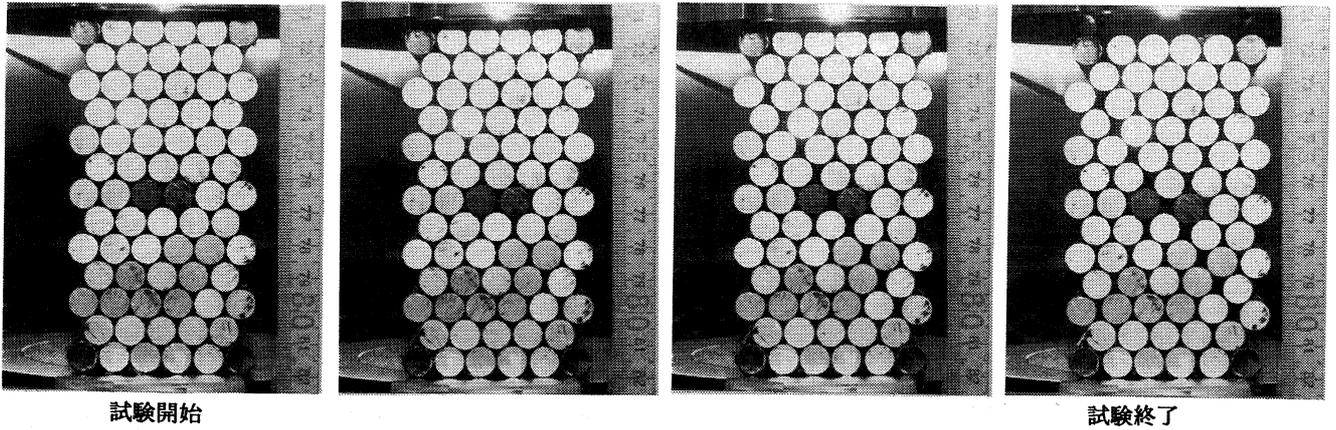
(1) アルミ棒を用いた圧縮試験のシミュレーション

まず最初に、基本的で最も単純と考えられる一軸圧縮試験について検討を行った。図-6 に実施した圧縮試験の概要とその供試体を円形アルミ棒の集合体でモデル化したものを示す。また、この供試体および圧縮試験の条件を表-1 にまとめる。一方、この圧縮試験についてのシミュレーションの解析条件を表-2 に示す。

力学要素の物理定数の記号は 図-1 および 図-4 で記したものと同一である。表中の圧縮引張係数 α とは、圧縮の場合と引張の場合とでの要素間に発生する抗力の比率のことで、表の力学要素の物理定数は圧縮の場合の値であり、引張の場合はこれらに0.2を乗じた値になることを意味している。また、 β と γ は式(2)で示した引張抗力に条件を与える係数である。表中の力学要素の数値は、いくつかの既往の研究^{3),5),8),9)}を参考にし、さらにシミュレーション結果の応力の推移がアルミ棒の試験結果と近くなるように、数パターンの試行を行って決定したものである。なお、シミュレーションでは重力加速度をゼロとして自重の影響を無視した。

変形挙動について、アルミ棒供試体の圧縮試験結果とシミュレーション結果を対比させて 図-7 に示す。上段が試験結果の写真、下段がシミュレーション結果であり、試験開始から降伏点を過ぎてかなり変形が進行し試験終了に至るまでの様子を断片的に示したものである。これらの試験結果とシミュレーションの結果を比べると、両者とも変形が進行するに従って、圧縮試験特有の供試体対角線方向にせん断変形が卓越する様子が明確に現れており、両者の変形の様子が非常に近似していることが確認される。

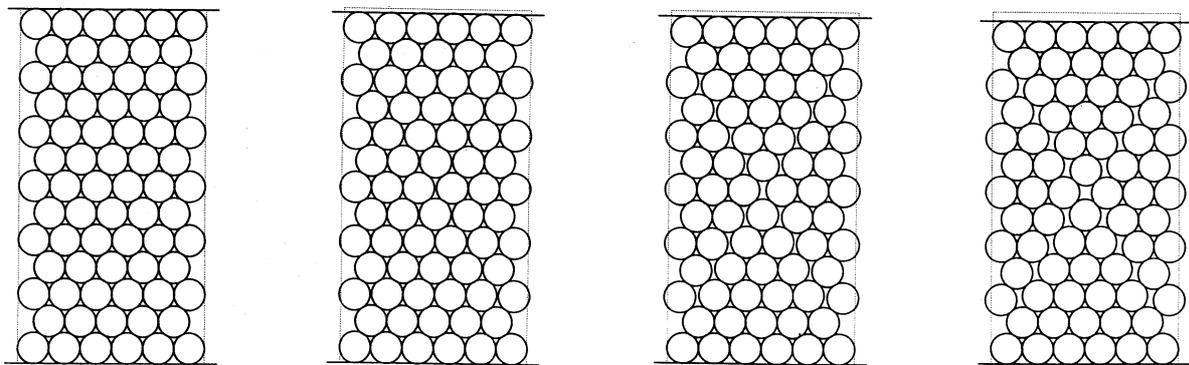
一方、それぞれの応力とひずみの関係を 図-8 に示す。応力を求める際の供試体断面積は、供試体幅 W は 図-6 で示したように要素直径の6倍の長さとし、奥行きはアルミ棒供試体では棒の長さ、シミュレーションでは単位長さとして計算している。両者の結果が近似するようにシミュレーションの計算条件をチューニングしているため、両者の対応は非常によくとれている。さらに解析条件を調整すれば、破壊応力と破壊ひずみの値



試験開始

試験終了

a) アルミ棒圧縮試験の変形の推移



b) シミュレーションによる変形の推移

図-7 変形過程の比較

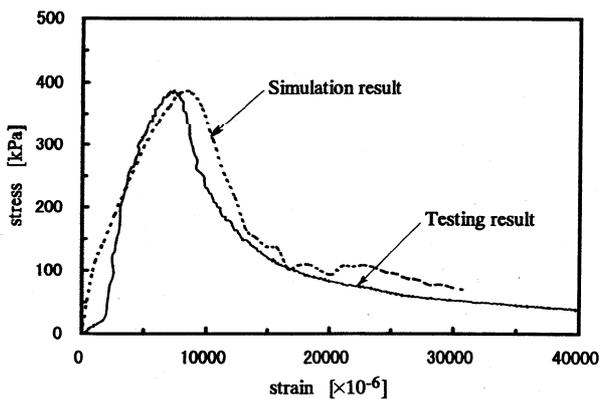


図-8 応力-ひずみ曲線の比較

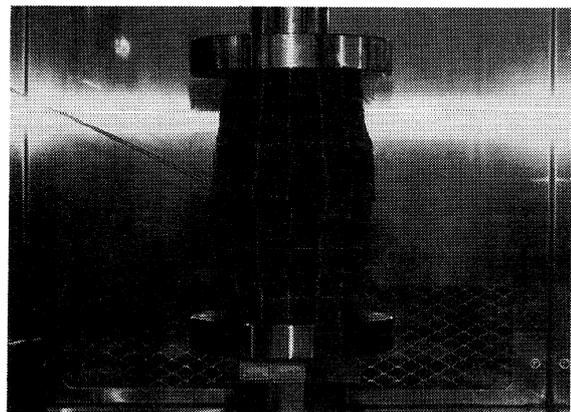
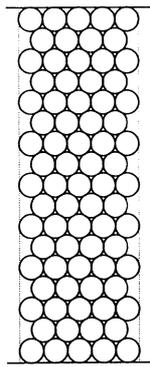


写真-1 アスファルト混合物の変形

を一致させることが可能である。シミュレーション結果の方は、降伏点を過ぎて応力が減少する過程で、要素の運動が安定しないために曲線が上下している。図-7に示した変形挙動の対応も考慮すると、応力および変形の時間的推移を破壊がかなり進行した時点までも、良好にシミュレートできているのが確認される。このように、単純化したアスファルト混合物ではあるが、そ

の変形挙動を十分にシミュレートできていることから、本手法のアスファルト混合物への適用性はかなり高いと考えられる。ちなみに、前章2節で示した密粒度アスコンの一軸圧縮試験における供試体の変形は写真-1に示すような状況で、せん断によって中央部が横方向に膨らんでおり、アルミ棒の試験およびシミュレーションの結果と共通している。



計算条件

Δt	1.0×10^{-6} [sec]
α	0.35
β	1.008
γ	1.0
K_n	1.2×10^6 [N/m]
η_{1n}	6.0×10^5 [Ns/m]
η_{2n}	1.0×10^7 [Ns/m]
K_s	5.0×10^4 [N/m]
η_s	5.0×10^4 [Ns/m]

図-9 直接引張試験のシミュレーションモデル

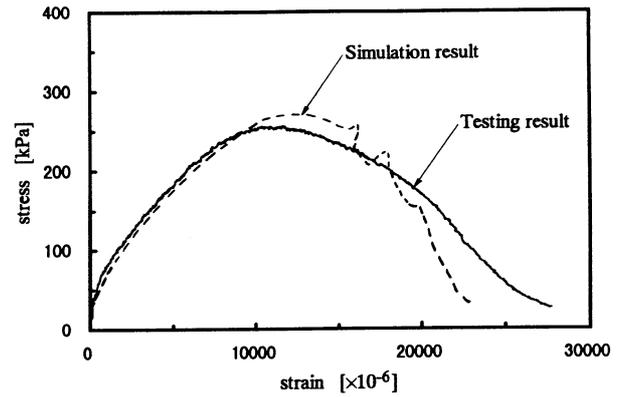


図-10 応力-ひずみ曲線の比較

(2) 直接引張試験のシミュレーション

引張に対しての挙動について、同様に定ひずみ速度の直接引張試験のシミュレーションを行った。アルミ棒を使用する試験では明確な結果が得られなかったため、ここでは前章で示した密粒度アスコンの結果と比較する。

図-9 にシミュレーションに使用した個別要素モデルと解析条件を示す。そして、図-10 に密粒度アスコンとシミュレーション結果の応力-ひずみ曲線を示す。ここでも、シミュレーション結果が実験結果と近似するように解析条件を調整しているが、応力がピークを過ぎて徐々に緩やかに減少する部分がうまく表現されていない。降伏点を過ぎると要素の安定性が非常に悪くなってしまふのである。このような挙動は、圧縮試験のシミュレーションでも確認された。これは、要素分割が粗すぎたためと引張限度を越えてからの要素モデルの設定条件が不十分であったためと考えられる。要素分割が粗いと、全体の粒子運動に対する一つの作用力の影響が大きくなり、引張によって一度要素間の作用力が消失すると急速に応力が減少してしまう。しかしながら、降伏点の付近までは両者はかなり近似しており、ここまでの力学挙動は良好にシミュレートできている。

以上の実際の試験結果とシミュレーション結果の比較から、アスファルト混合物への本シミュレーション手法の適用性はかなり高いと判断される。特に、降伏点に達するまでの力学挙動は、圧縮および引張ともに良好に近似することが可能で、実用レベルとしては十分であると考えられる。

4. 要素モデルの条件とその集合体の関係

本研究で用いた要素モデルをアスファルト混合物の実際の問題に適用する際の重要な情報として、法線方向の3要素流体の各種物理定数、および作用力の条件パラメータがその要素を集合体とした個別要素モデル

表-3 パラメトリック解析の基準値

Δt	5.0×10^{-6} [sec]	α	0.2
β	1.006	γ	3.0
K_n	2.5×10^4 [N/m]	K_s	5.0×10^3 [N/m]
η_{1n}	2.5×10^4 [Ns/m]	η_s	5.0×10^3 [Ns/m]
η_{2n}	1.0×10^6 [Ns/m]	—	—

と力学的にどのような関係があるのか検討した。前章で行ったアルミ棒の圧縮試験のシミュレーションをケーススタディとして、上記の K_n , η_{1n} , η_{2n} , α , β , γ をそれぞれパラメトリックに変化させてその応答を計算した。基準とした要素モデルの解析条件は表-3 に示すとおりである。ここでは、実際の結果と近似させる必要がなく、計算時間の短縮をはかるために、前章のシミュレーション条件よりも材料定数の値を1オーダー落とし、タイムステップを5倍にした。ただし、個別要素モデルと載荷条件、およびこれ以外の解析条件はすべて前章と全く同じで、先の図-6 と表-2 に示したとおりである。

(1) 各力学要素の物理定数の影響

法線方向の要素モデルを構成する力学要素の、各物理定数 K_n , η_{1n} , η_{2n} をそれぞれ変動させた場合について、その応力-ひずみ曲線の違いを図-11 に示す。

a) は3要素流体のバネ要素の弾性係数 K_n のみを変動させた場合で、弾性係数が大きくなるに従って応力の値は全体的に大きくなっている。ただし、応力のピーク時のひずみ値は全く変化していない。b) は Voigt モデル部のダッシュポット要素の粘性係数 η_{1n} のみを変動させた場合である。粘性係数の増加に対して応力値も大きくなっているが、その割合はわずかである。そして、これらの応力-ひずみ曲線はほぼ同じ形状で、上下に平行移動したような形である。したがって、この粘性

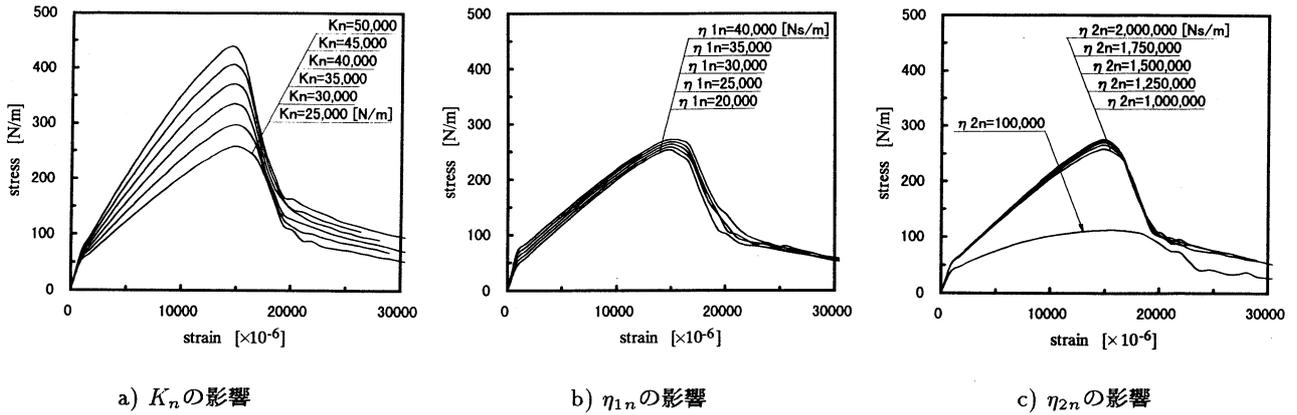


図-11 力学要素の特性を変化させた場合

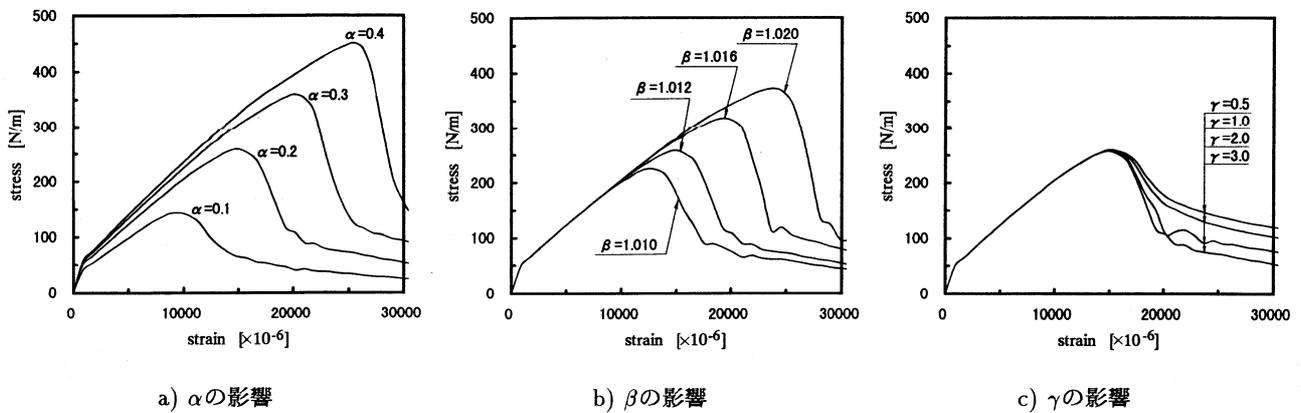


図-12 作用力の条件を変化させた場合

係数が変化しても応力-ひずみ曲線の傾きは変化していない。すなわち、応力緩和の程度は変わらないということである。また、c) はもう一つのダッシュポット要素の粘性係数 η_{2n} を変化させた場合の応力-ひずみ曲線である。バネ要素に比べて感度は小さいようであるが、バネ要素と同様にスティフネスを支配する要素であることが読み取れる。ここで注目したいのは、粘性係数が大きいレベルで多少変動させても曲線の変化は非常に少ないが、Voigt モデル部のダッシュポット要素と異なり、応力-ひずみ曲線の傾きが徐々に変化していることである。つまり、この要素は曲線の傾きの減少程度、すなわち応力緩和の程度に大きく影響する要素であることが指摘される。

これらを比較すると、個別要素モデルの挙動は主に K_n と η_{2n} によって決まることになり、これらの値の選定が重要であることがわかる。図-11 に示した結果からは読み取ることができないが、実際のシミュレーションでは他の η_{1n} も重要で、要素の安定性を確保するには η_{1n} の値も考慮する必要がある。 K_n に対して η_{1n} を相対的に大きく設定すると、要素が振動して安定した解が

得られなかった。

(2) 作用力の条件パラメータの影響

つぎに、要素間の作用力の条件として与えた α 、 β 、 γ をそれぞれ変動させた場合について検討する。図-12 にシミュレーション結果の応力-ひずみ曲線を示す。 β と γ は要素モデルの各力学要素の特性と関係が無いので、応力とひずみの関係は破壊に達するまでほとんど影響されていない。 β と γ は、それぞれ破壊ひずみとそれ以後の応力の減少程度に条件を与えるもので、結果は当然のことながらそのようなものとなっている。降伏点より以前の挙動を問題とする場合は全く影響ないが、降伏点近く、あるいはそれ以後の大きな変形に至るまでも問題とする場合には重要なパラメータとなり得る。そして、 γ の値はあまり敏感でないが、 β についてはわずかな変動で破壊ひずみが大きく変わってしまう。

これらに対して、圧縮と引張とでの材料特性の比率である α は、応力とひずみの関係に多大な影響を及ぼす。図-12 の a) で違うのは引張の時の特性で、圧縮に対しては同じように抗力が作用している。引張抗力の違い

だけで破壊応力、破壊ひずみ、スティフネスが大きく変動しており、 K_n 、 η_{2n} と同様に個別要素モデルの力学特性を決める主要なパラメータであることが確認される。単に、スティフネスの変化だけでなく、他にも応力がピークとなる破壊ひずみの値も大きく変動している。

5. まとめ

本研究では、多くの分野で既に幅広く応用されている個別要素法をアスファルト混合物の分野に適用し、簡単な力学試験との比較によって適用性を評価した。既往の要素モデルを見直して、3要素流体のモデルにアスファルト混合物の物性に即した条件を加味した法線方向の要素モデルを提案し、アスファルト混合物の変形挙動のシミュレーションに応用した。アルミ棒による単純化したアスファルト混合物の一軸圧縮試験では、変形の挙動および応力-ひずみの関係とともに、実験結果とシミュレーションの結果をかなり近似させることができた。実際の舗装用混合物では、全体的な変形の様子と降伏点に至るまでの応力-ひずみ曲線がある程度近似させることができた。これらの比較から、本研究で用いた要素モデルのアスファルト混合物への適用性が十分に高いことを確認した。

本手法を実際問題に応用する際に重要となるのが要素モデルの各種パラメータ値の設定である。ここでは、要素モデルを構成する力学要素の物性と作用力に条件を与える定数をパラメトリックに変化させたシミュレーションを行って、要素モデルとそれらを集合体としたときの力学的関係について検討した。その結果、個別要素モデルの挙動は主に K_n 、 η_{2n} および α によって決まることになり、 β と γ によって破壊ひずみの値や降伏点以降の挙動が変化することが確認された。 K_n 、 η_{1n} 、 η_{2n} は力学挙動を直接的に支配するものであるが、同時に要素の運動の安定性を決めるものとなる。特に、 K_n 、 η_{1n} の組み合わせは重要である。

本研究では、要素半径、すなわち個別要素モデルの構成(数と径の組み合わせ)とタイムステップの取り扱いについて全く考慮しなかった。これらは、シミュレーションの計算時間と解の安定性に直接関係するもので、個別要素法では重要なパラメータである。この辺の詳しい検討は今後の課題としたい。

謝辞：本研究における個別要素法のプログラムの作成には、新潟大学工学部 阿部和久助教授、および金沢大学工学部 榎谷 浩助教授から多くの有益な助言をいただいた。また、材料試験の一部は平成6年度文部省科学研究費補助金 奨励研究(A)(課題番号:08750571)の援助を受けた。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

表-4 密粒度アスファルト混合物(13)の配合

最大粒径 [mm]	通過量 [%]
20	100
13	99.7
10	88.2
5	58.0
2.5	41.0
1.2	34.1
0.6	26.4
0.3	14.9
0.15	8.8
0.075	6.8
アスファルト量	6.0
針入度 [1/10mm]	73 (25 °C)
軟化点 [°C]	47.0

付録

本研究で使用した密粒度アスコンの配合、およびストレートアスファルトの主要な諸元は表-4に示すとおりである。

参考文献

- 1) 西澤辰男, 松野三朗: アスファルト舗装の車輪走行位置に生ずる縦表面ひびわれについて, 土木学会論文集, 第478号/V-21, pp.71-80, 1993.
- 2) Scarpas, A., Blaauwendraad, J., de Bondt, A. H. and Molenaar, A. A. A.: CAPA: a modern tool for the analysis and design of pavements, *Proceedings of the Second international RILEM conference, Reflective cracking in pavements*, pp.121-128, 1993.
- 3) 松岡 元, 山本修一: 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.
- 4) Konagai, K., Matsushima, T. and Sato, T.: Dependence on frequency of dynamic inter-particle dislocation within a slope, *Proc. JSCE*, No.495/I-28, pp.21-29, 1994.
- 5) 目黒公郎, 伯野元彦: 粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析, 東京大学地震研究所彙報, Vol.63, pp.409-468, 1988.
- 6) 阿部和久, 宮野裕一: 積雪変形解析のための個別要素解析手法, 土木学会 構造工学論文集, Vol.38A, pp.339-350, 1992.
- 7) 吉田隆輝, 高橋正一: アスファルト混合物の直接引張試験について, 土木学会 第49回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp.66-67, 1993.
- 8) 吉田 博, 榎谷 浩, 今井和昭: 個別要素法による敷砂上への落石の衝撃特性に関する解析, 土木学会論文集, No.392/I-9, pp.297-306, 1988.
- 9) 園田佳巨, 佐藤紘志, 石川信隆, 太田俊昭: 個別要素法によるサンドクッションの衝撃応答特性に関する基礎的考察, 土木学会論文集, No.483/I-26, pp.51-60, 1994.

FOUNDAMENTAL STUDY ON APPLICABILITY OF DISTINCT ELEMENT METHOD TO DEFFORMATION ANALYSIS OF ASPHALT MIXTURE

Osamu TAKAHASHI and Hitoshi TAGUCHI

In this paper, simulation approach based on distinct element method (DEM) was applied to deformation analysis of asphalt mixture, and the applicability and mechanical property of the distinct element assembly were probed. Since a mechanical element model used in ordinary DEM was not suitable for simulating a deformation of asphalt mixture, different element model was reconsidered in accordance with real material property. The applicability was evaluated in comparing simulation results with real behavior of asphalt mixture. As a result of comparisons, it was found out that the proposed element model could represent viscoelastic behavior of asphalt mixture on the whole and this simulation method was applicable to deformation analysis of asphalt layer. In addition, mechanical relations between element model and the assembly were also studied by the parametric simulations in which physical properties of mechanical element were changed.