

3209 粒子強化複合材料の弾性率に及ぼす強化材の寸法効果

Size Effects of Reinforce Materials on Elastic Modulus of Particle Reinforced Materials

○内藤和也 (群馬高専専攻科生)
福島祥夫 (群馬産業技術センター)

安澤貴志 (横浜国立大学大学院工学府生)
正 黒瀬雅詞 (群馬高専)

Kazuya NAITO (Gunma National College of Tech., Advanced course)
Takashi ANZAWA (Yokohama National University, Graduate course)
Yoshio FUKUSHIMA (Gunma Industrial Technology Center)
Masashi KUROSE (Gunma National College of Tech.)

Key Words: Size Effect, Elastic Modulus, homogenized method

1. 諸言

近年、複合材料の進歩は目覚ましく、機械系構造物も金属製品から、非金属製品への介入がみられるようになってきた。非金属複合材料は金属材料と比較して比強度や比剛性が高く、耐食性にも優れているため、化学的な複合効果も高いが、材料の複合化を行う目的は高強度化が主因である。しかし、粒子強化複合材料の強化機構に関する研究は繊維複合材料などに比べ多くはなく、介在物問題やマイクロメカニクスなどで扱われ、複合化による強度向上のメカニズムを把握することは非常に重要である。これまでも粒子分散複合材料の構成則理論に関する研究は行われてきているが、均質化法による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微小な分子や複合材料全体に対して小さい場合に適用されるが、粒子が極端に大きい場合や粒子形状が複雑な場合では理論に逸脱することも指摘されている。

そこで本研究では均一分散ではなく、比較的大きな均一粒径をもつ粒子強化複合材料モデルについて有限要素解析を行い、強化材周辺の応力状態や強化材寸法が複合材料の弾性率に及ぼす影響について調べた。また、一部はエポキシ樹脂とガラスビーズによる複合材料を自作し、材料試験において弾性係数を求めた。

2. 解析条件

今回解析に用いたソフトは ANSYS ver.10.0 であり、一部は ED version で解析している。解析モデルは Fig.1 のような 2 次元断面モデルとした。アスファルト舗装を想定し、母材の形状は立方体、強化材の形状は球体とし、母材上の球体である圧子が母材を圧縮するモデル (Model-1) と、圧子が強化材を圧縮するモデル (Model-2) の 2 種類を設定した。拘束条件は下面固定で、モデル上下中心線の線対称モデルである。荷重は大型車両の走行実験を参考にし、複合モデル上部に設置された球の中心部に 39.2[kN] を下向きに与えた。

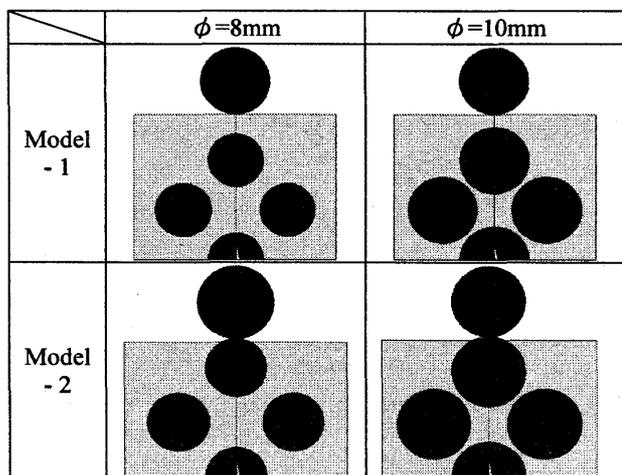


Fig.1 Illustrations of analytical models.

解析に用いた機械的性質を Table.1 に、解析の条件を Table.2 に示す。なお、座標系は水平方向を x、上下方向を y としている。

Table 1 Mechanical properties and model dimensions.

	Matrix	Reinforcements
Young's modulus [GPa]	10.0	30.0
Poisson's ratio	$\nu_m = 0.35$	$\nu_r = 0.15$
Dimension [mm]	22.0×29.0	Diameter=6.0, 8.0, 10.0

Table 2 Analytical condition and models.

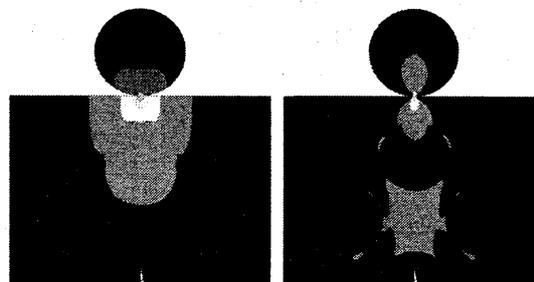
	Model-1	Model-2
Elements	Quadrilateral 8-node element	
The number of Reinforcements	3 ball, 1 hemisphere	
Friction coefficient	1.0	

3. 解析結果

解析結果の一例として、Model-1 ($\phi=8\text{mm}$) の変位解を Fig.2(a) に、y 方向ひずみ解を Fig.2(b) に示す。表示の都合上、明色になるほど、変位やひずみが大きいことを示している。モデルは左右対称なのでモデルの中心を軸として、変位・ひずみともに左右対称となっていることがわかる。

変位図からは、圧子によって押されている母材は水平方向にも広がっているが、強化材は母材よりも弾性率が高いため、母材のように一部が大きく移動することなく、全体が垂直下方向に移動している。また、この条件では他の強化材は上部と比べると移動はわずかである。

一方、ひずみ解は、荷重負荷方向に母材の大きなひずみが生じているが、中間に位置する強化材の最狭部でもひずみが広がっている。また、強化材と母材の界面において斜め方向に y 方向ひずみが見られるが、側面付近で微小な剥離が発生していた。



(a) Deformation (b) Strain of y-direction
Fig.2 Results of analysis in Model-1.

次に、相当応力解を Fig.3 に示す。明色になるほど、応力が高いことを示している。Fig.2 の結果と同様左右対称の応力分布をしているが、強化材へ応力が大きく作用していることがわかる。また、中間に位置する強化材の上 45 度方向

からおよび、中心軸側の側面に応力の伝達が確認できた。

このことから、強化材間の応力伝達は荷重作用軸から離れた位置に強化材がある場合、強化材間距離の最狭部分および剥離の生じる側面部で起こることが分かる。

これらの結果は、他の強化材径でも同様な傾向であった。

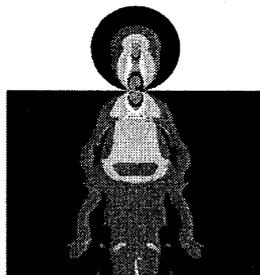


Fig.3 Results of stress analysis in Model-1.

4. 考察

強化材径を比較的大きくした場合でも応力分布などに大きな変化は見られなかったが、強化材間の応力伝達は母材を介する場合と、強化材が直接に接触する場合は母材の応力分布がことなることは容易に推測できる。

そこで、Fig.4 のように複合材料の中央上部の強化材中心から、右下強化材中心部のライン上における相当ひずみを求め、それぞれの強化材径をまとめて Fig.5 に示した。図中、左端が Fig.4 の点 A の位置、右端が点 B の位置である。Fig.5 (a) に Model-1, Fig.5 (b) に Model-2 の結果を示す。図の中央付近で値の高くなっている部分がそれぞれの母材の部分のひずみである。左右の値の低い部分が強化材のひずみをそれぞれ示している。Fig.5(a) の Model-1 では、母材のひずみ強化材径が $\phi=10\text{mm}$ で最も大きな値を示している。これは強化材の間隔が狭いため強化材による母材への圧縮が大きく働いていることと一致する。 $\phi=8\text{mm}$ では強化材同士の間隔が $\phi=10\text{mm}$ よりも広いいため母材のひずみが中央付近に向かって小さくなっている。ただし、ひずみは一様ではなく、母材部で最低値をとるとすぐに値が大きくなる V 字型のひずみとなっている。また、母材部分でのひずみの変化 $\phi=10\text{mm}$ に比べ、線形的である。 $\phi=6\text{mm}$ は強化材同士の間隔がもっとも広いいため、母材中央部付近でひずみ値が安定する区間が見られる。安定した値になるまでのひずみの変化は $\phi=8\text{mm}$ と同様に線形的であり、傾きもほぼ等しい。よって、強化材付近の応力集中は傾向が等しいことを裏付けている。このように比較的大きな強化材寸法を持つ場合、強化材の間隔が複合材料の応力分布に大きな影響を与えることがわかる。

Fig.5(b) の Model-2 についても傾向は同様であるが、Fig.5(a) と比べると上部の強化材部分ではひずみが大きくなり、強化材内部の応力分布に影響を与えていることが明確となっている。また、母材部の最大のひずみの値は小さくなっているが、 $\phi=6, 8\text{mm}$ のモデルでは母材のひずみは全体的に大きくなっている。このことは、強化材を直接圧縮することによって応力の伝達割合が大きくなり、母材をより変形させたためと考えられる。

解析結果では全体寸法に比べ、この程度の強化材寸法の差異では変化が顕著ではないが、複合則の観点から体積率と弾性率の関係を検討した。

垂直方向の応力と材料全体のひずみから複合材料の弾性率を求め、強化材体積率との関係を Fig.6 に示す。◆印が Model-1, ●印が Model-2 の各体積率における弾性率である。また図中の曲線は複合材料の弾性率の理論式として提唱されている式より求めた弾性率である。まず、Model-1, Model-2

ともに Ruess Model を超える値を示しているもので、複合効果が現れていると考える。また、Model-1 は Eshelby Model に近い値を示していることが Fig.6 から読み取れる。このことから強化材の体積率を増加させた場合、いずれかのモデルに従って弾性率が上昇していくと考えられる。

しかしながら、Model-2 では Voigt Model を超えおり、想定される複合則から外れている。これはヤング率の計算を行う際に、強化材の特異点の影響が計算に含まれているためと考えられる。

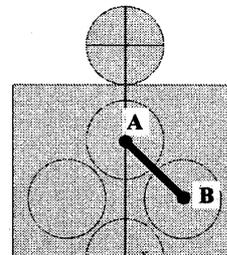
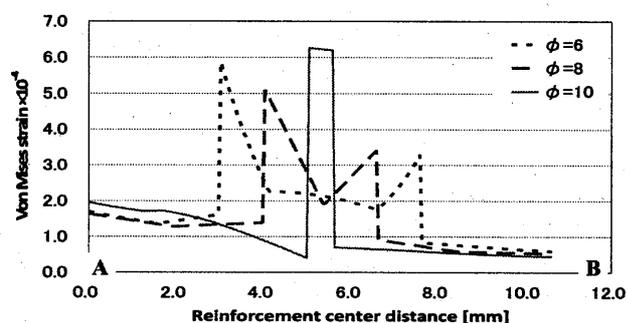
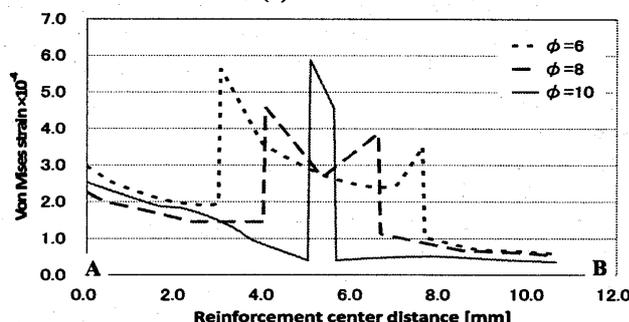


Fig.4 Schematic illustration of measured span in each analytical model.



(a) Model-1



(b) Model-2

Fig.5 Strain of matrix at A-B path in each diameter of reinforcement of Model.

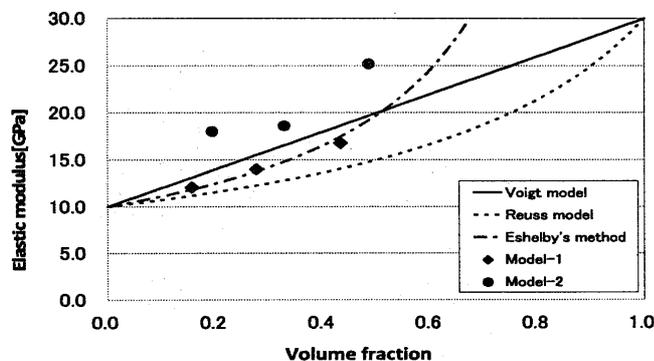


Fig.6 Young's modulus against volume fraction of reinforcement.