

廃木材を混練した生分解樹脂の力学的挙動

Mechanical Behavior of Biodegradable Plastics Mixed with Scraped Woods

鈴木 素之	Motoyuki SUZUKI	(山口大学工学部)
山本 哲朗	Tetsuro YAMAMOTO	(山口大学工学部)
長谷川秀人	Hideto HASEGAWA	(山口大学大学院)
渡邊 良一	Ryouichi WATANABE	(ジーザック(株))

建設工事や間伐で発生する廃木材は他の建設副産物と比較して再資源化率が低く、ここ数年横ばい状態である。本文では木材と生分解性樹脂を混練しペレット状に加工したバイオマス混練樹脂と呼ばれる複合素材に着目し、これを土木分野で地盤材料、地盤改良材として有効利用することを目的として一連の土質試験を行い、その基本的な力学的挙動について調べた。その結果、バイオマス混練樹脂は比較的剛な材料であり、地盤材料として有効利用できる可能性を有していることが確認された。

キーワード：木材，生分解樹脂，リサイクル，一軸圧縮強度，一次元圧縮，三軸圧縮（IGC：M04）

1. はじめに

建設工事ではコンクリート塊，アスファルト・コンクリート塊，建設発生木材，建設汚泥，建設発生土など多くの建設副産物が発生する。これらの建設副産物のうちコンクリート塊，アスファルト・コンクリート塊の再資源化率はそれぞれ 98%，97%であるのに対して，建設発生木材に関しては 38%と低く，平成 7 年から現在まではほぼ横ばい状態である¹⁾。また，建設工事で発生する伐採樹木はリサイクル法において，指定副産物(建設発生木材)として再使用の促進が求められている。

ところで，最近様々な分野でバイオマスや生分解性プラスチックという用語が登場する。バイオマス(Biomass)とは，「太陽エネルギーを貯えた生物体」を意味し，小麦やトウモロコシなどの粗粒穀物，自然森林資源等植物を含む生産系バイオマスおよび紙くずやパルプ廃液等の廃棄物系バイオマスとに分類される²⁾。木材は生産系バイオマスのリグノセルロース系に分類される。一方，生分解性プラスチックとは「使用中は従来のプラスチックと同等の機能を持ちながら，使用後は自然界に存在する微生物の働きによって低分子化合物に分解され，最終的には水や二酸化炭素等の無機物に分解される高分子素材」と定義され³⁾，近年様々な商品に生分解性プラスチックが適用されるようになってきている。

生分解性プラスチックは自然循環し環境負荷を低減させるが，その反面従来のプラスチックと比較しコストが高く，強度が低いという欠点を有している。そのため利用用途が限られている。そこで，生分解性プラスチックのコスト低減を目的として，生分解性プラスチックを天然繊維，木材と複合化する研究が行われている³⁾。天然繊維，木材等を生分解性プラスチックと複合化することにより，いろいろな形状に成形できればその用途を大幅

に拡大でき，建設発生木材の再資源化率の増加にも繋がると考えられる。

木材と生分解性樹脂を混練し複合素材化することによる利点として，木材の観点では熱可塑性が付与されて成形の可能性が大幅に拡大すること，そして端材，廃材，おがくずなどの未利用材の有効利用に繋がることがある⁴⁾。一方，生分解性樹脂の観点からみれば単位あたりのコストを低くすることが可能となり，竹などの天然繊維を複合化させることにより強度特性の改善を図れることが挙げられる。また，熱膨張率が小さくなり，熱安定性が増すことなどの利点もある。

本研究では建設工事や間伐等で発生する廃木材を土木分野で有効利用することを目的として，木材と生分解性樹脂を混練しペレット状に成形した複合素材に着目した。この複合素材は本来は生分解性の園芸用ポットや食品容器などの原料となるものであるが，加工成形時のバイオマス混練樹脂は一様に円柱状をした粒状体であり，一種の骨材のような材料である。土木分野での利用法としては軽量盛土材や盛土中に水平に敷設することにより水平排水材としての利用が考えられる。土木分野でこのような生分解性複合素材に関する研究はほとんどなく将来的に有望な研究であるといえる。本文ではこのバイオマス混練樹脂に対して実施した物理試験，一軸圧縮試験，圧密試験および三軸圧縮試験の結果に基づいて，その力学的挙動について考察する。

2. 試料の諸性質

2.1 物理的・化学的性質

生分解性樹脂は普通プラスチックと異なり土中の微生物により分解され，環境に負荷を与えないというメリッ

トがある。また、土木材料としての使用を想定した場合、その方法にもよるが、地盤中である一定期間の使用後は自然に分解されるため、材料の回収にかかる労力と費用が要らないというメリットが考えられる。

本研究で使用したバイオマス混練樹脂とは木質材料として粉碎した桂を 53%、生分解性樹脂としてポリ乳酸を 47% 混合した複合素材である。ポリ乳酸とはトウモロコシや小麦などの穀物および馬鈴薯などの澱粉を酵素分解によりグルコース、乳酸菌の作用により乳酸、最終的にラクチド経由で化学的に重合して製造される生分解性プラスチックである。特徴として繊維や種々の形状に成形でき、実用的な強度を有している。水中での生分解性はきわめて遅く、30 日で数%である⁴⁾。また、堀越らはポリ乳酸を含む 6 種類の生分解性プラスチックで土壌埋設試験を行った結果、ポリ乳酸が他の生分解性プラスチックと比較して比較的長期に形状を保持することを報告している⁵⁾。

バイオマス混練樹脂（以下、ペレットとする）の形状は一樣に薄茶色で円柱状を呈している。また、その表面は滑らかで多少の光沢があり、高分子としての性状を示している(写真-1)。本研究ではペレット単体を一つの単粒子とみなして、一連の土質試験を行った。まず、形状測定、比重試験、最小・最大密度試験、強熱減量試験を行い、その物性について調べた。

形状測定はサンプル数を 100 個として、長径 d_1 、短径 d_2 および高さ h をノギスで測定し、単粒子の直径 ϕ と高さの平均値を求めた。なお、直径は式(1)を用いて定義した。

$$\phi = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (1)$$

比重試験、最小・最大密度試験および強熱減量試験は地盤工学会基準、日本工業規格と同様の方法で行った。なお、比重試験ではペレットを粉々に粉碎し、 $850 \mu\text{m}$ ふるいを通した粉末状の試料を用いた。

図-1 に形状測定を行った結果を示す。直径の最頻値は $4.2 \sim 4.3 \text{ mm}$ 、高さの最頻値は $4.0 \sim 5.0 \text{ mm}$ であった。寸法に多少ばらつきはあるが、比較的形状が均一な材料であることがわかる。また、扁平率 R を式(2)で定義した。 R の平均値は 1.05 であり、このことから、ペレットはほぼ円柱状の材料であることが確認できる。

$$R = \frac{d_1}{d_2} \quad (2)$$

表-1 および表-2 にそれぞれ形状の平均値と各物理試験を行った結果および他の材料の物性を併せて示す。ペレットの比重は豊浦砂の約半分であり、ポリ乳酸⁶⁾に近い軽量な材料であることが確認できる。また、ペレット

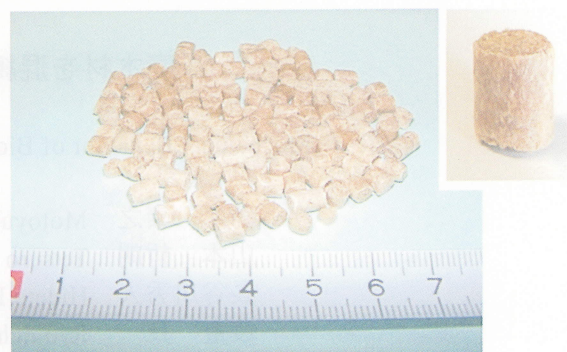


写真-1 バイオマス混練樹脂

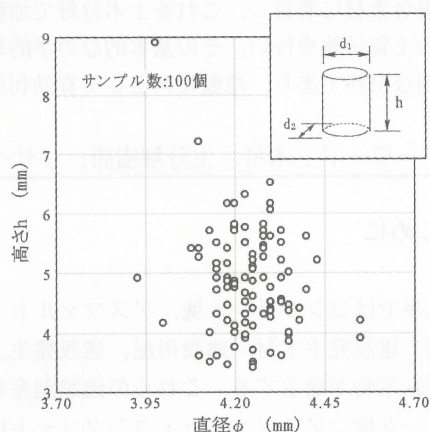


図-1 形状分布

表-1 ペレットの平均形状

形状	ϕ_{AVE} (mm)	h_{AVE} (mm)	R_{AVE}	m_{AVE} (g)
ペレット	4.24	4.83	1.05	0.066

表-2 物理的・化学的性質

	G_s	ρ_{dmin} (g/cm ³)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	L_i (%)
ペレット	1.343	0.582	0.675	99.5
豊浦砂	2.64	1.335	1.645	—
ポリ乳酸	1.25~1.29	—	—	—
木材	1.54	—	—	—

は形状の均一性と最大密度と最小密度の差が小さいことから、密に詰まりにくい材料であるといえる。なお、最小・最大密度試験ではペレットの粒径が基準値以上であったため、使用した小型のモールドではモールド上端面の余盛部分をカットするときに単粒子を押込む、また取除くなどにより試験結果に誤差が生じると考えられる。そこで、最小・最大密度試験をいずれも 15 回ずつ実施し、試験回数を増やすことによりその影響を低減するようにした。

2.2 微視的構造

写真-2(a)~(d)にペレット単粒子を走査型電子顕微鏡

(SEM) を用いて撮影したものを示す。(a), (b)はペレット表面を撮影したものであり、(a)はペレットの周面部分、(b)は端面部分である。周面は間隙が少なく平滑なのにに対し、端面は間隙が多く粗いことがわかる。また、(a)には間隙に白い糸状の物質が見られる。これはペレットを成形する過程で溶融していたポリ乳酸が冷却され、収縮したものと考えられる。ペレット単粒子は一様に円柱状を呈しており、端面部分と周面部分の表面構造が異なることから、集合体として単粒子が噛み合った場合に力学挙動に影響を与えると予測される。(c), (d)はペレット内部を撮影した SEM 写真であり、(c)はペレットの鉛直断面、(d)はペレットの水平断面の様相を示す。(c), (d)ともに内部に木質繊維と見られる物質が確認できる。(c), (d)よりペレット内部は比較的密に詰まっているが、所々に空隙があることが分かる。これは木質繊維が完全にポリ乳酸と結合しているわけではなく、所々で剥離している状態であると考えられる。つまり、単粒子の内部構造は均一ではないことが示唆される。また、ペレットを土中に埋設した場合、2.1の既往の知見のように、この間隙に水分の浸透のほかに微生物が侵入し、生分解が促進されるものと予測される。

3. 単粒子強度特性

3.1 一軸圧縮試験

ペレット単粒子の強度特性を調べるために一軸圧縮試験を行った。試験方法は地盤工学会基準の土の一軸圧縮試験と同様の方法で行い、一軸圧縮試験装置の下部加圧板に直径 8.5 cm, 高さ 5.5 cm の鋼製の円柱台座を取付け、その上にペレットを設置して行った(写真-3)。本試験では寸法・形状が不均一のペレット単粒子を個々に 1 つの円柱供試体とみなしており、当然ながら試験結果には形状効果が生じていると考えられる。現時点では試験方法の改良や試験結果の補正などは特に行っていないが、これらは今後の課題として捉えている。また、ペレットの排水条件に及ぼすひずみ速度の影響はほとんど無いものと考え、試験時間を短縮させるために、軸ひずみ速度は 2 %/min に設定した。

ペレットの原料の 53 % は木材であり、木質繊維に含まれる含水量が変化することによって、圧縮強度も変化することが予測される。そのためペレットの含水比 w_{pel} を式(3)を用いて定義した。

$$w_{pel} = \frac{m_a - m_b}{m_b} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

ここで m_a : 湿潤状態のペレットの質量, m_b : 気乾状態のペレットの質量である。湿潤状態の質量はペレットの表面の水分を除去するために 1 時間自然状態で放置した後

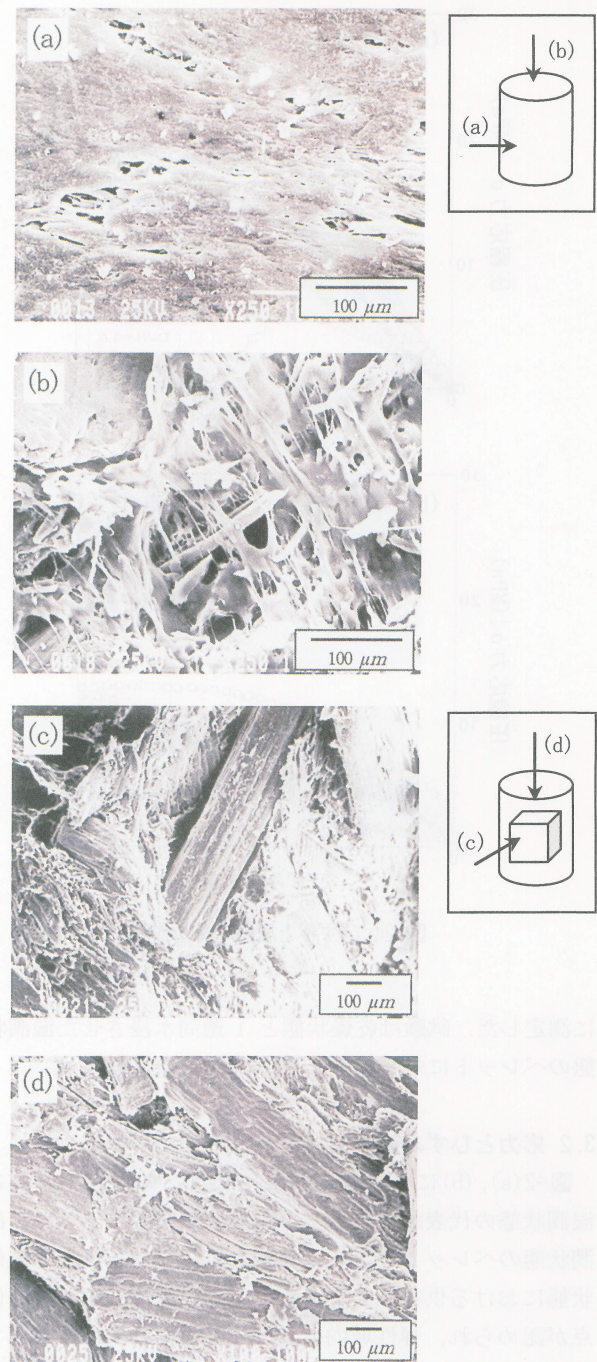


写真-2 走査型電子顕微鏡写真



写真-3 一軸圧縮試験装置

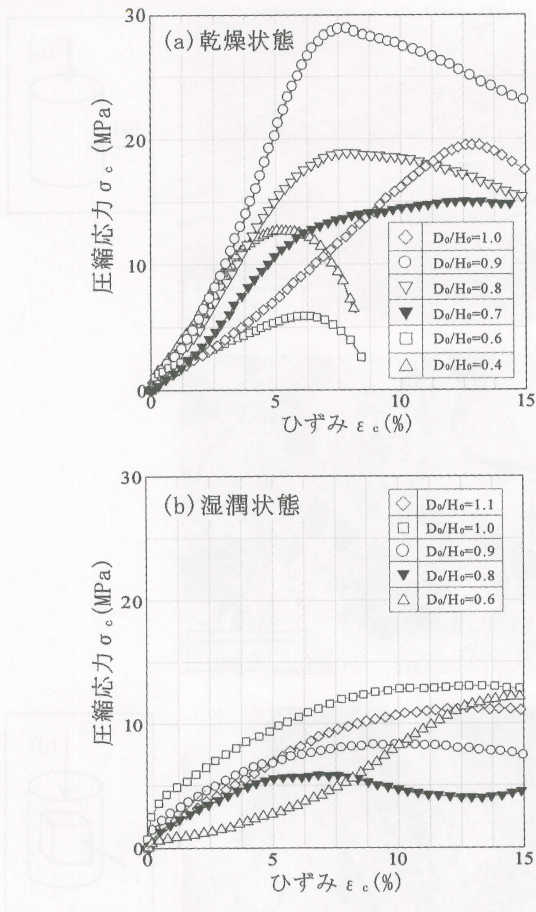


図-2 ひずみと圧縮応力の関係

に測定した。試験は乾燥状態と1週間水浸させた湿潤状態のペレットに対してそれぞれ25ケース実施した。

3.2 応力とひずみの関係

図-2(a), (b)に一軸圧縮試験における乾燥状態および湿潤状態の代表的な応力-ひずみ曲線を示す。なお、湿潤状態のペレットの含水比は $w_{pel}=23.4\%$ であった。乾燥状態における供試体の応力-ひずみ曲線は、明確な降伏点が認められ、弾性域内において応力はひずみに対して線形的に増加している。一方、湿潤状態における供試体の応力-ひずみ曲線では、明確な降伏点は認められず、弾塑性的な曲線を描いている。また、軸ひずみ15%に達した時点の圧縮応力がいずれも10MPa付近に収束する傾向にあり、乾燥状態の供試体と比較すると、圧縮応力は減少傾向にあることがわかる。いずれにしても両状態における最大圧縮応力および破壊ひずみにはばらつきが多い。供試体の破壊状況を写真-4(a), (b)に示す。(a)に示すように、乾燥状態の供試体には軸方向に沿って亀裂がみられる。これは単粒子内部に潜在的に存在する木質繊維に沿って、せん断破壊したと考えられる。(b)は試験後の湿潤状態の供試体を撮影したものであるが、乾燥状態の供試体と比較すると亀裂が認められる供試体は少なく、また、亀裂が小さい。以上のことから、湿潤状態では供試体中の木質繊維が吸水することによって、供試体が膨



写真-4 供試体の破壊状況

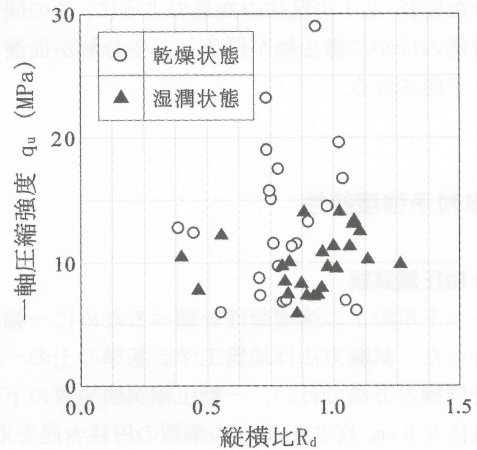


図-3 縦横比と一軸圧縮強度の関係

潤し、内部構造の間隙が減少することが示唆される。

3.3 縦横比と一軸圧縮強度の関係

圧縮前の供試体の直径と高さをそれぞれ D_0 および h_0 として、縦横比を式(4)で定義した。ここでの直径 D_0 には長径 d_1 を用いた。

$$R_d = \frac{D_0}{H_0} \quad (4)$$

図-3に R_d と乾燥状態および湿潤状態の一軸圧縮強度 q_u との関係を示す。乾燥状態と湿潤状態の q_u を比較すると、湿潤状態の q_u はばらつきが少なく5~15MPaの範囲に分布している。これは湿潤状態になることで単粒子内部での摩擦抵抗が増加したためと考えられる。乾燥状態と湿潤状態の q_u をそれぞれ平均すると、乾燥状態では

13.1 MPa, 湿潤状態では 10.0 MPa であり, 両状態においてペレットは十分な強度を有する剛な材料とみなせる. q_u にばらつきが生じる原因としてはペレットの端面が様に平滑でなく凹凸があるため, 载荷重が不均一に供試体に加わることに起因していると考えられる. また, ペレットは湿潤させることにより, q_u が低下する傾向にある. その理由として, 前述のように, ペレットが吸水したことにより体積が膨張し, 軟化したことが考えられる. しかし, 複合素材の不均質性や形状・寸法のばらつきの影響のため, 乾燥状態と湿潤状態の q_u には明確な差異がみられてはいない.

3.4 割裂引張試験

ペレット単粒子に対して一軸圧縮試験機を用いて割裂引張試験を実施した. 試験は一軸圧縮試験と同様, 乾燥状態および一週間水浸させた湿潤状態 ($w_{pel}=23.4\%$) のペレットに対してそれぞれ 25 ケース実施した. 試験方法はペレット単体を, 嵩上げた下部加压板に横にした状態で上部加压板を直径方向に軸ひずみ速度 2%/min で载荷した(写真-5).

一般の割裂引張試験は, 弾性理論に基づいて円柱供試体の直径方向に線载荷したときの引張強度を求めるものであるが, 対象とするペレットはひずみの進行にともなって扁平となり, 線载荷の条件から逸脱してしまう. そのため, 試験前の供試体の直径 d および試験後の供試体の直径 D を用いて, 式(5)により供試体の割裂引張強度 σ_t を求めた.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi(d+D)l} \quad (5)$$

ここに, P : 割裂破壊もしくは軸ひずみが 15% に達した時点の荷重(N), l : 試験前の供試体の長さ(mm)とする.

図-4(a), (b)に割裂引張試験における乾燥状態および湿潤状態の代表的な軸変位 δ と軸圧縮力 P の関係を示す. 軸変位と軸圧縮力関係については, 一軸圧縮強度のものと比較して乾燥状態および湿潤状態ともに同様の軌跡を描く傾向にある. 乾燥状態と湿潤状態の引張強度 σ_t を平均すると, 乾燥状態では 6.4 MPa, 湿潤状態では 4.8 MPa であった. 一軸圧縮強度 q_u と比較して σ_t は減少する傾向を示し, その大きさは q_u の 1/2 程度まで減少している.

4. 一次元圧縮特性

4.1 段階载荷・除荷による一次元圧縮および膨張挙動

ペレットが集合体となった場合の一次元圧縮性を調べるために, 圧密試験機を用いて段階载荷による圧密試験(JIS A1217)を実施した. ペレットは前節で述べたように

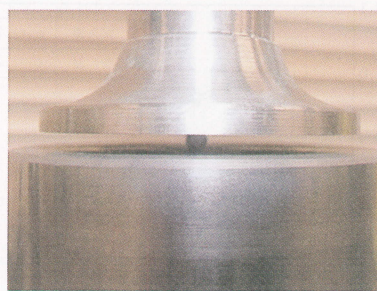


写真-5 割裂引張試験

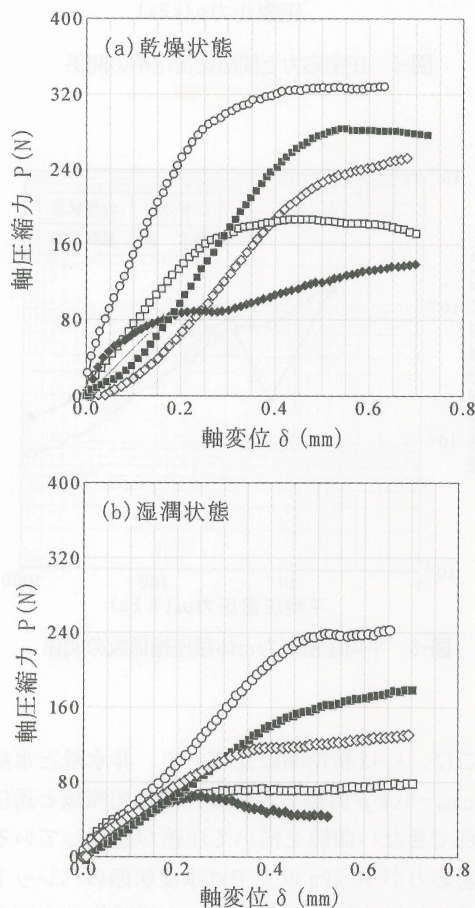


図-4 軸変位と軸圧縮力の関係

乾燥状態と湿潤状態によりその強度特性が異なることから, 圧縮性にもペレットの含水状態が影響を与えることが推定される. そこで, 試験は非水浸状態と水浸状態の2通りについて行った.

供試体は自然乾燥させた試料とあらかじめ水浸させ湿潤状態にした試料をそれぞれ直径 6cm, 高さ 2cm となるように圧密容器に詰めて作製した. 圧密圧力は $p=9.8, 19.6, 39.2, 78.4, 156.8, 313.6, 627.2, 1254.4$ kPa の 8 段階で载荷→除荷→再载荷させ, 各段階において沈下量および膨張量を測定した. なお, 湿潤状態の場合には圧密前の初期状態から水浸させた.

圧密試験によって得られた $e/e_0 - \log p$ 曲線を図-5に示

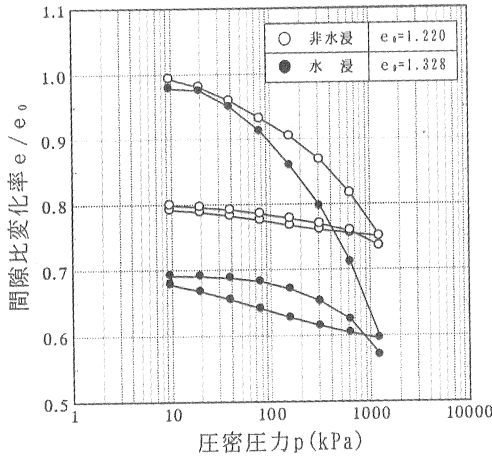


図-5 圧密応力と間隙比変化率の関係

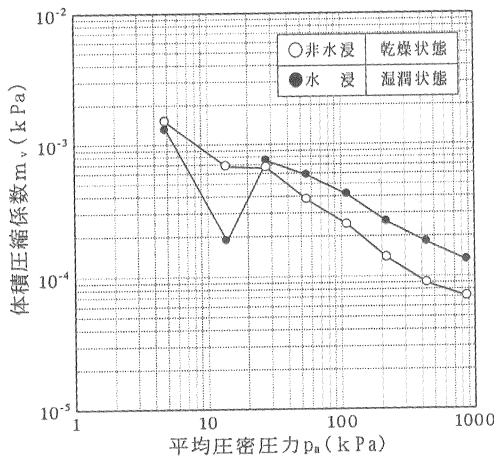


図-6 平均圧密応力と体積圧縮係数の関係

す。ここに、 e_0 は初期間隙比である。非水浸と水浸のいずれの $e/e_0 - \log p$ 曲線も明確な正規圧密領域と過圧密領域を区別できない曲線を描いて圧縮が進行している。また、圧密応力が 50 kPa 以上では水浸状態のペレットにおける間隙比の減少傾向が著しい。水浸状態の沈下量が非水浸状態のそれに比べて大きいのは、前述したように、ペレットが湿潤状態になったことにより、個々のペレットの圧縮強度が低下し、有効応力の増加とともにペレット自体の変形が発生し、圧縮が促進されたためと考えられる。また、湿潤状態のペレットにおける除荷曲線と再載荷曲線の経路の違いはペレットの吸水性に起因するものと考えられ、再載荷時には木質繊維に含まれる水分の排水に時間的な遅延を伴うことが考えられ、飽和粘性土の圧密に似た挙動を示している。実際の地盤では雨水などにより湿潤状態が想定され、さらに生分解作用も加わるため圧縮性はさらに高くなることが示唆される。

4.2 体積圧縮係数と平均圧密応力の関係

図-6 にペレットの乾燥状態および湿潤状態における体積圧縮係数 m_v と平均圧密応力 p_m との関係を示す。乾燥

状態および湿潤状態のペレットは、いずれも p_m の増加に伴い m_v は減少傾向にあることがわかる。また、 $p_m=13.9$ kPa の場合を除いて、各 p_m の m_v は乾燥状態よりも湿潤状態におけるペレットの方が大きく、湿潤状態の方が圧縮性が高くなる。

ペレットの一次元的な圧縮を考える場合、まず荷初期に単粒子間の噛み合わせがはずれることによる一次的な体積収縮が生じることが考えられる。水浸時の $p_m=13.9$ kPa の場合に m_v が他より低い値を示している理由として、前の荷段階 ($p_m=4.9$ kPa) においてペレット同士の噛み合わせがはずれる一次的な圧縮のほとんどが生じてしまったためと考えられる。その後、噛み合わせのずれによる体積収縮が終了し、完全に供試体中の単粒子の動きが拘束され、有効応力の増加に伴い粒子自体の変形が起こり、圧縮が進行すると考えられる。図-6 より $p_m=27.7$ kPa 付近から m_v の減少傾向が一定していることから、これ以降の圧縮は単粒子の変形に起因するものと考えられる。また、湿潤状態のペレットの方が乾燥状態に比較して m_v が大きい理由として、湿潤状態を呈することにより、ペレットに含まれる木質繊維が吸水し単粒子としての構造が軟化を起し圧縮性が高くなる、または剛性が低下し粒子破碎を起しやすくなり、集合体全体として圧密応力の増加とともに圧縮性が高くなったと考えられる。また、湿潤状態のペレットの場合、粒子間の摩擦力が増加し荷重の応力が個々の粒子に伝達されやすくなると考えられ、これも圧縮性を高めた一因と考えられる。

5. 三軸圧縮強度特性

5.1 試験概要

ペレットの集合体としての三軸圧縮特性を調べるために圧密非排水三軸圧縮試験 (JGS 0523-2000) を実施した。一般に、砂質土の力学特性に影響を与える因子として相対密度、飽和度、粒度分布および有効拘束圧が指摘される。ペレットの場合においてもそれらの影響を考慮するため相対密度と有効拘束圧に着目し、ペレットの力学的挙動について調べた。

試験には一定質量になるまで自然乾燥させたペレットを使用し、この時点での含水比 w_{pel} をゼロとした。各相対密度になるよう所定の量のペレットを純水中で 24 時間水浸させたものを、負圧法を用いてゴムスリーブ内に付けた線を目安に 5 層に均等に付けて詰め、直径 5 cm、高さ 10 cm の供試体を作製した。供試体内に脱気水を 10 分間通水した後、背圧 98 kPa を加えて飽和を行った。供試体の初期相対密度 D_{r0} は $40 \pm 5\%$ 、 $60 \pm 5\%$ 、 $80 \pm 5\%$ の 3 通りとして、初期有効拘束圧 σ_{30}' をそれぞれ 49 kPa、98 kPa、196 kPa、294 kPa の 4 通りに変化させて行った。なお、供試体を飽和させるためにペレットを 24 時間水浸させた。また、B 値はいずれの供試体も 0.95 以上あることを確認

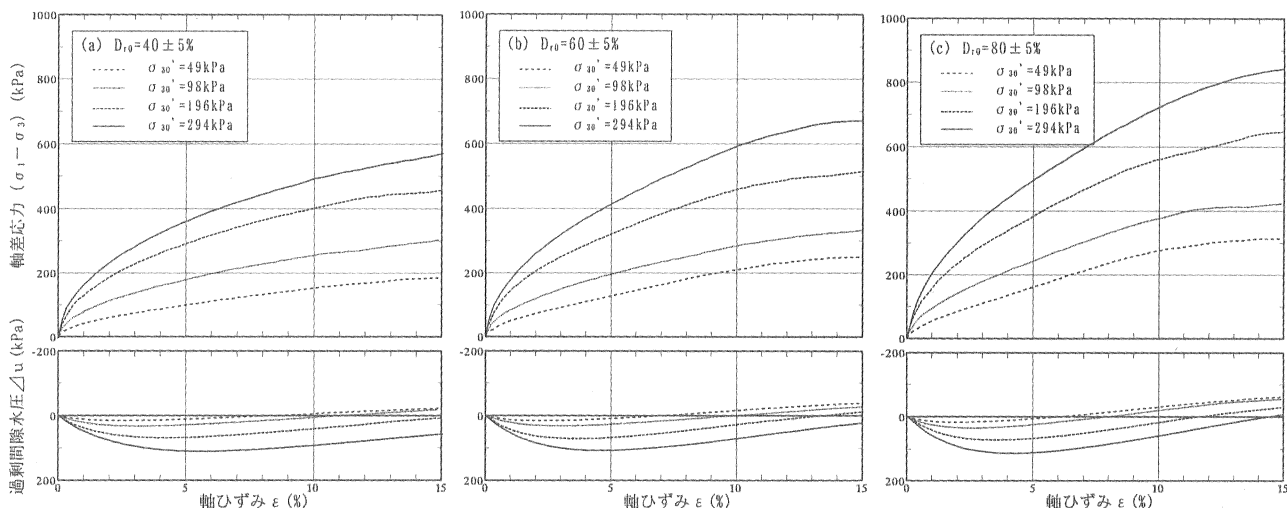


図-7 初期相対密度が異なる場合の非排水せん断挙動

している。

5.2 軸ひずみと軸差応力および過剰間隙水圧の関係

図-7(a)~(c)にそれぞれ $D_{r0}=40\pm5\%$, $60\pm5\%$, $80\pm5\%$ における軸ひずみ ε と軸差応力 $(\sigma_1-\sigma_3)$ および過剰間隙水圧 Δu の関係を示す。 $(\sigma_1-\sigma_3)$ はいずれの D_{r0} においてもせん断初期に急速に増加し、その後緩やかに単調増加し続け、明瞭な最大値を示すことなく軸ひずみが 15% に達する。また、軸ひずみが 5% から 10% の範囲ではいずれの D_{r0} においても $(\sigma_1-\sigma_3)$ は線形的に増加している。せん断に伴う粒子破碎はペレット単粒子の一軸圧縮強度が湿潤状態で 10.0 MPa 程度あることから、試験で採用した応力の 49 kPa から 294 kPa の範囲では顕著な粒子破碎は生じていないと考えられる。 Δu はせん断に伴い一旦増加した後、徐々に減少した。この減少傾向は相対密度が高く、また拘束圧が低いほど顕著で、低拘束圧では負圧域まで減少している点が興味深い。これは過剰間隙水圧が最大値を示す付近から供試体が収縮から膨張傾向に移り始め、供試体中に負圧が発生するためと考えられる。また、せん断に伴い徐々に粒子間に貫入していたメンブレンが押し出され、一種の体積膨張を起こしたことも過剰間隙水圧の減少に影響を与えていると考えられる。

5.3 メンブレン張力および貫入の影響とそれらの補正

試験結果に誤差を与える要因としてメンブレン張力と貫入の影響がある。本試験では厚さ $t=1.0$ mm、弾性係数 $E_m=2.3$ MPa のメンブレンを用いたため、拘束圧 50 kPa 以下の低圧域ではメンブレン張力により側方向応力が増大して、試験結果に影響を与える可能性が考えられる。そこで、側方向応力の補正を式(6)により行った⁷⁾。

$$\Delta\sigma_{rm} = -\frac{2E_m \cdot t}{d} \varepsilon_{\theta m} \quad (6)$$

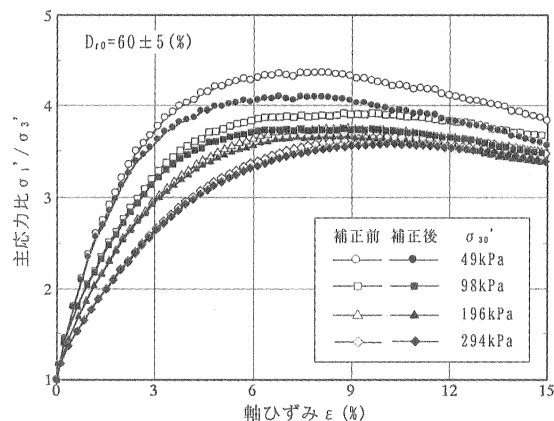


図-8 メンブレン張力の補正

ここで、 $\Delta\sigma_{rm}$: 側方向応力 σ_r の補正量 (kPa), $\varepsilon_{\theta m}$: メンブレンの円周方向ひずみ, d : 供試体の直径 (mm) である。

図-8 に $D_{r0}=60\pm5\%$ におけるメンブレン張力の補正前後の主応力比と軸ひずみの関係を示す。特に σ_{30} が 49 kPa と 98 kPa の間で補正前後の主応力比の差が顕著にあることが見て取れる。しかし、実際にはメンブレン張力の補正前後の最大軸差応力の差は、いずれの σ_{30} においてもたかだか 7 kPa 程度である。このことからメンブレン張力は試験結果にほとんど影響を与えていないものと考えられる。

一方、メンブレン貫入(写真-6)に対しては、等方圧縮後の除荷試験時には、供試体の砂骨格の膨張変形は等方性を示すという実験事実⁸⁾から、ペレットにおいても同様な仮定を立てた。補正方法は Vaid and Negussey⁹⁾ の第 2 方法をもとに等方圧縮除荷試験を行うことにより、式(7)を用いて単位面積当たりのメンブレン貫入量 ε_{mu} (cm^3/cm^2) を求めた。

$$\varepsilon_{mu} = \frac{\Delta V_{Tu}}{A_s} - \frac{3\varepsilon_{au}D}{4} \quad (7)$$

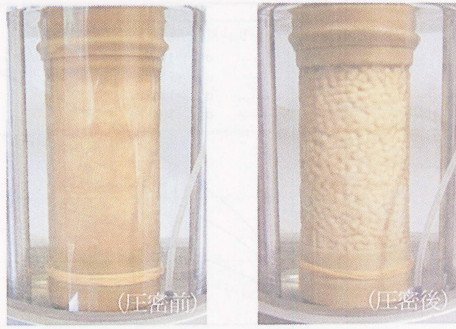


写真-6 メンブレン貫入

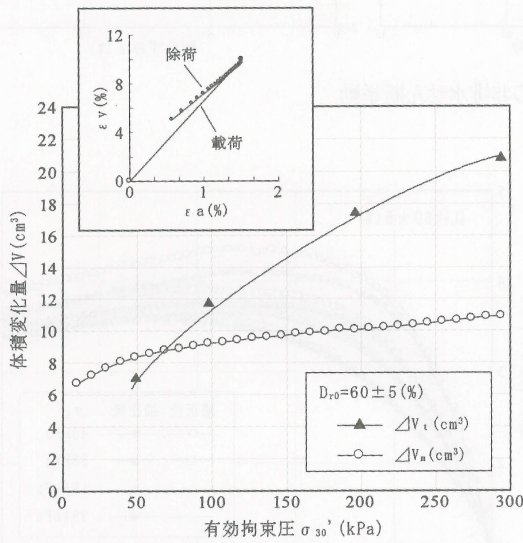


図-9 メンブレン貫入の補正

ここで、 ΔV_{iu} : 等方除荷時の体積変化量 (cm^3)、 A_s : メンブレンで覆われた供試体の表面積 (cm^2)、 ε_{au} : 等方除荷時の軸ひずみ、 D : 供試体の直径 (cm) である。

図-9 に式(7)より求めた $D_{r0}=60 \pm 5\%$ におけるメンブレン貫入量 $\Delta V_m (= \varepsilon_{mu} \times \text{メンブレンで覆われた各供試体の表面積})$ と各試験時の実測体積変化量 ΔV_i の関係を示す。 ΔV_i と ΔV_m の差が真の体積変化量となるが、 $\sigma_{30}'=49\text{kPa}$ の場合のみは ΔV_i と ΔV_m の関係が逆転しており、等方除荷時のペレットの供試体骨格の膨張変形は等方性を示すという仮定がこの場合のみ成立しない。ここで有効拘束圧が最も高い $\sigma_{30}'=294\text{kPa}$ において、メンブレン貫入の補正前後の最大軸差応力を比較すると、いずれの D_{r0} においても約 40kPa 程度低下しており、試験結果に大きな誤差を与えていることが確認できた。試験結果の整理に関して、メンブレン貫入については、今回の補正方法ではまだ検討が必要なことから、今回はメンブレン張力の補正のみを行った結果を用いて考察することとした。

5.4 初期有効拘束圧と最大軸差応力の関係

図-10 に初期有効拘束圧 σ_{30}' と最大軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ の関係を示す。 σ_{30}' と D_{r0} の増加に対して最大軸差応力が

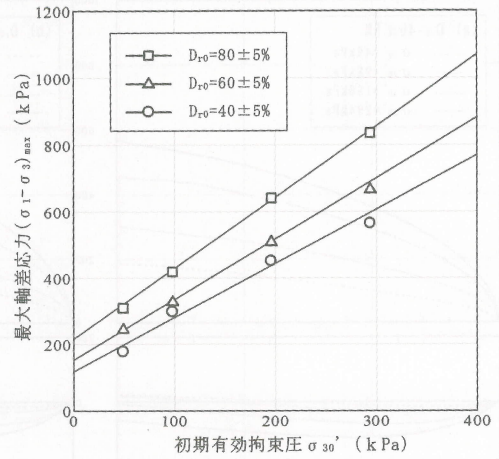


図-10 初期有効拘束圧と最大軸差応力の関係

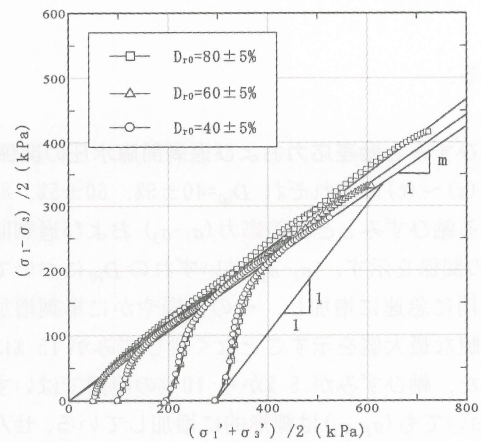


図-11 有効応力経路

増大している。プロット点を直線近似し、その傾きから強度増加率を求めると、 $D_{r0}=40 \pm 5\%$ 、 $60 \pm 5\%$ 、 $80 \pm 5\%$ でそれぞれ 0.77 、 0.88 、 1.08 であり、 D_{r0} に依存して増加している。また、 D_{r0} が $80 \pm 5\%$ と $40 \pm 5\%$ の間では、各拘束圧における $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ の差が約 100kPa あり、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ が D_{r0} の影響を大きく受けることがわかる。これは砂や礫などと同様な特徴であり、ペレットにおいてもせん断強度は相対密度と拘束圧に依存する材料であることがわかる。ペレットは円柱状の均一な形状をしていることから、拘束圧の増加に対してインターロッキング効果による噛み合わせの抵抗力が徐々に発揮されにくくなることが考えられる。

5.5 有効応力経路

図-11 に各 D_{r0} における有効応力経路を示す。非排水せん断時の平均有効主応力はいずれの D_{r0} においてもせん断初期から増加している。これは供試体がせん断に伴い正のダイレイタンスにより膨張傾向を示し、 Δu が減少するためと考えられる。また、軸差応力の大きさと比較し、 Δu の値が小さいため有効応力経路に Δu の影響はあまり見られない。また、初期有効拘束圧が低いほど早い

段階で破壊線に達し定常状態に至る傾向にある。破壊線の勾配 m より式(8)を用いて内部摩擦角 ϕ' を求めた。

$$\phi' = \sin^{-1} m \quad (8)$$

破壊線より換算した ϕ' は $D_{r0}=40\pm 5\%$, $60\pm 5\%$, $80\pm 5\%$ に対してそれぞれ 32.2° , 33.7° , 35.8° であり, D_{r0} に依存して増加する傾向にある。以上のことから, ペレットにおいてもモール・クーロンの破壊規準を適用することができ, ペレットが比較的高いせん断強度を有する材料であることが確認できた。ただし, この結果にはメンブレン貫入の影響を考慮していないので, 真の値よりも過大に評価しているものと考えられる。また, 有機質である木材が混合されていることにより試験結果に何らかの特異な挙動が現われることが予測されたが, 今回は特にその影響はみられなかった。これらのことより, 加工出荷時のペレットは砂質・礫質材料と近い材料であることが確認できた。今後は生分解による強度特性の変化を検討する必要がある。

6. 結論

本論文では木材と生分解樹脂を混練しペレット状に加工された生分解性複合素材に対して土質試験を実施し, その基本的な力学的特性について調べた。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) ペレット単粒子の平均圧縮強度は乾燥状態で 13.1 MPa, 湿潤状態で 10.0 MPa であり, 湿潤させることにより圧縮強度が低下する傾向にある。
- (2) ペレット単粒子の割裂引張強度の平均値は乾燥状態で 6.4 MPa, 湿潤状態で 4.8 MPa であり, 圧縮強度の約 1/2 まで低下する。
- (3) ペレットが集合体となった場合の一次元圧縮量は非水浸状態と比較し水浸状態の方が大きく, 圧密応力の増加に伴いその傾向は顕著になる。

- (4) ペレットが集合体となった場合の三軸圧縮挙動は砂質土と同様な挙動を示し, 内部摩擦角は約 $32^\circ \sim 36^\circ$ と比較的高いせん断強度を有している。

今回報告した内容はペレットの基本的な力学的特性であるが, その大部分が未解明である。今後地盤材料としての適用を考える場合, 特に生分解作用に伴う物理的性質や力学的性質の解明が重要であると考えられる。

謝辞

本研究を実施するにあたり, 鹿島建設(株)楠木覚士氏に実験の一部で御助力頂いた。ここに記して, 深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 建設公論社：月刊建設オピニオン, pp. 52-55, 2004.
- 2) 湯川英明：バイオマス 究極の代替エネルギー, 化学工業日報社, pp. 10-92, 2001.
- 3) 高木 均, 田倉隆輝：生分解性プラスチック竹粉複合ボードの試作とその強度評価, 材料, Vol. 52, No. 4, pp. 357-361, 2003.
- 4) 白石信夫, 谷 吉樹, 工藤謙一, 福田和彦：実用化進む生分解性プラスチック, (株)工業調査会, pp. 70-123, 2000.
- 5) 堀越禎一, 村上小枝子, 青木信義, 今井雄一郎, 木村皓一, 高橋 亮：生分解性プラスチックの土壌埋設による分解性評価, 神奈川県産業技術総合研究報告, Vol. 8, pp. 47-50, 2001.
- 6) 辻 秀人：生分解性高分子材料の化学, コロナ社, p. 13, 2002.
- 7) 地盤工学会：土質試験の方法と解説 第一回改訂版, 地盤工学会, pp. 706-708, 2000.
- 8) 足立紀尚, 龍岡文夫：新体系土工学 18 土の力学(Ⅲ), 技報堂出版(株), pp. 67-69, 1981.
- 9) Vaid, Y.P. and Negussey, D.: A critical assessment of membrane penetration in the triaxial test, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 7, No. 2, pp. 70-76, 1984.

(2004年7月30日 受付)