

生分解性樹脂の地盤材料特性

鈴木 素之 (社会建設工学科)

山本 哲朗 (社会建設工学科)

長谷川 秀人 (社会建設工学専攻)

松本 晶 (社会建設工学科)

Geomaterial characteristics of biodegradable wood waste

Motoyuki SUZUKI (Department of Civil and Environmental Engineering)

Tetsuro YAMAMOTO (Department of Civil and Environmental Engineering)

Hideto HASEGAWA (Graduate school of Civil and Environmental Engineering)

Aki MATSUMOTO (Department of Civil and Environmental Engineering)

Construction wastes such as concrete and asphalt have been reduced, recycled and reused. On the other hand, wood waste has not been sufficiently recycled. Attempts to improve mechanical characteristics of the biodegradable plastic by mixing with the wood have been made in various fields. A granular material with biodegradability has already been developed in the process of producing gardening, dish plate, architecture material, etc. We are researching an applicability of the granular material for drainage layer in fill material. It is very important to develop a new geomaterial that have a long-term safety for environment. The granular material was buried under a clay ground and a degree of the biodegradation was measured. Mechanical behavior of the buried granular material was examined using unconfined and triaxial compression tests. As a result, the biodegradable ratio of the granular material is approximately 3% per a year. Furthermore, the internal friction angle of the granular material is almost constant, irrespective of the buried period.

Key Words : *recycling, biodegradable plastic, scrapped wood, Unconfined compression, triaxial compression*

1. はじめに

近年良質な地盤材料が枯渇しつつあり、環境面の配慮からも産業廃棄物を土木分野で有効活用する研究が行われている。建設工事ではコンクリート、アスファルト、伐採樹木、建設汚泥、建設発生土など多くの建設副産物が発生する。この中で伐採樹木は建設リサイクル法において特定建設資材廃棄物(建設発生木材)として再生資源として有効利用が求められている。これらの建設副産物のうち平成 12 年におけるコンクリート塊、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 %、96 % であるのに対して、建設発生木材に関しては縮減量を加えると 83 % であるが、再資源化率のみで見れば 38 % とリサイクル効率は低い。建設リサイクル推進計画では建設廃棄物の再資源化率・縮減率は現状で 85 % に達し、量的には一定の成果をあげているため、今後は更なるリサイ

クル量の増加に加えて、リサイクル用途の拡大といったリサイクルの質を改善することを課題としている。また、里山の活性化につながるような事業開発として土木分野においては間伐材のリサイクル技術および自然環境の保全・復元など求められており、間伐材の処理・再利用は建設発生木材と同様に重要な社会的課題となっている。土木分野での木材の利用状況は、原木を用いたものには法枠工や砂防構造物、伐採樹木を粉碎しチップ化したものには植物の種子と現地発生土を混合して法面に吹付け植生工に利用されている程度である。

一方、近年様々な分野で生分解性プラスチックの環境に負荷が少ない点が着目されている。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ものの、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ため利用用途が限られている。そこで、土木分野においては生分解性を付加したリサイクル材料

が地盤材料として規定される性能以上を示し、かつ供用中に所要の役割を果たした後は土中で自然に分解されるものであれば、環境負荷の少ない地盤材料や地盤改良材として活路が開かれる可能性がある。本研究では他分野における生分解性プラスチックと複合化した製品の生産過程での粒状体に着目し、生分解性粒状体を地盤分野で活かす利用方法として高含水比高盛土の水平排水層材料や軟弱地盤の鉛直排水材としての利用を考えている。また、生分解性プラスチックの低強度や脆性的性質は部材としての使用は不利であるが、加工前の粒状体は5mm程度の粒径に圧縮加工されているため強度の欠点はみられず、地中の自然状態で生分解される性質は非常に有利であると考えられる。

本文では、この生分解性粒状材料に対して実施した物理試験、土壌埋設試験、一軸圧縮試験、一次元圧縮試験、圧密排水三軸圧縮試験および繰返し三軸試験の結果に基づいて、生分解前後の材料の基本的な力学的挙動について報告する。

2. 生分解性プラスチックの利用状況

生分解性プラスチックとは「微生物の作用により分解する高分子材料」、「生体内で分解する高分子材料」と定義されている。原料は植物由来のものを使用して生産され、所定の期間使用された後は、最終的に微生物の働きにより水と二酸化炭素に分解される。このような材料が開発された社会的背景として、近年の持続可能な社会システムの必要性から、材料分野に関しても循環型システムを構築する必要が生じたためである¹⁾。

現在、生分解性プラスチックは様々な分野で利用されており、例えば食品容器、化粧品容器、医療分野では医療用材料としての縫合糸、癒着防止膜、漁業分野では網、釣り糸、農業分野では育苗ポット、マルチフィルム、プリペイドカード等の情報記録カードにも利用されている。また、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おり²⁾、それにより様々な形状に成形でき、利用範囲を大幅に拡大できるようになっている。木材と生分解性プラスチックを混練し複合素材化することにより得られる利点として、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されること、端材・廃材・おがくずなどの未利用材の有効利用が図れることが挙げられる³⁾。生分解性樹脂の観点では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が図れることが挙げられる。さらに、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。



Photos.1 Biodegradable plastic mixed with wood

3. 試料の物理的性質

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、地盤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利点が考えられる。

本研究で使用した生分解性粒状材料（以下、ペレットとする）とは木質材料として粉碎した桂を53%、生分解樹脂としてポリ乳酸PLA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路で化学的に重合して製造される生分解性樹脂である。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³⁾。また、堀越ら⁴⁾はポリ乳酸を含む異なる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。ペレットの形状は一律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(Photos.1参照)。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、強熱減量試験により、その物性について調べた。形状測定はサンプル数を175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 D 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。

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

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。

Fig.1に形状測定を行った結果を示す。直径の最頻値は

4.2~4.3 mm, 高さの最頻値は 4.0~5.0mm 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。

$$R = \frac{d_1}{d_2} \tag{2}$$

Table 1 に各物理試験の結果と形状の平均値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 PLA¹⁾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。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。

ペレットは原料の約 53% が木材であり, 水浸させることにより単粒子内部に水分が吸水され, その含水状態が変化する一種の骨材のような材料である。また, その含水状態の違いにより単粒子自体の強度が低下し, それに伴い集合体としての強度も変化するものと予測される。そこで, ペレットを純水中で水浸させ, 水浸時間を変化させた場合の表面乾燥飽水状態における含水率を測定した。測定方法は気乾状態にある所定の量のペレットを純水中で水浸させ, 一定経過時間毎にペレットを取り出し, その含水比 w_{pel} を式(3)を用いて算出した。なお, 測定する際はペレット表面の水分を軽く拭ってから測定した。

$$w_{pel} = \frac{m_a - m_b}{m_b} \times 100 \tag{3}$$

ここで, m_a : 湿潤時の質量, m_b : 炉乾燥後の質量である。

Fig.2 に対数表示の水浸時間と含水比の関係を示す。ペレットの水浸前の自然状態の含水比は $w_{pel,n} = 5.5\%$ である。水浸から約 40 時間までは含水比は直線的に増加し, その後平衡状態に達する。各水浸時間において含水比にばらつきがみられるが, これはペレットの材質の不均質性に起因するものと考えられる。また, 水浸から 40 時間経過以降は含水比がほぼ一定していることから, この時点においてペレットは飽和状態に達しているとみられ, 40 時間水浸時の含水比を限界含水比 $w_{pel,L}$ とすると, $w_{pel,L} = 41.6\%$ である。ペレットの初期含水比との差は 36.1% であり, 吸水性の高い材料である。また, 木材とし

Table 1 Physical and chemical properties of sample

	G_s	$\rho_{dmin}(g/cm^3)$	$\rho_{dmax}(g/cm^3)$	$L_f(\%)$
Pellet	1.343	0.582	0.675	99.5
Tyoura sand	2.639	1.340	1.637	0.41
PLA	1.25~1.29	—	—	—
Wood	1.54	—	—	—

Shape	$\phi_{ave}(mm)$	$h_{ave}(mm)$	R_{ave}	$m_{ave}(g)$
Pelleto	4.24	4.83	1.05	0.066

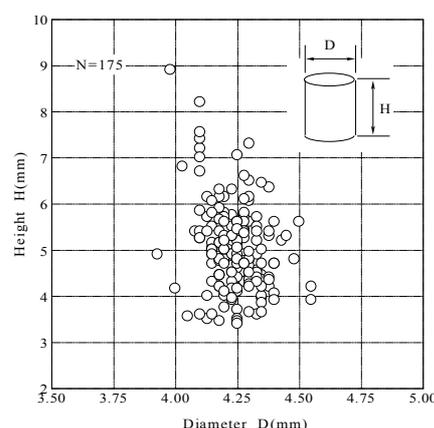


Fig.1 Shape measurement result of sample

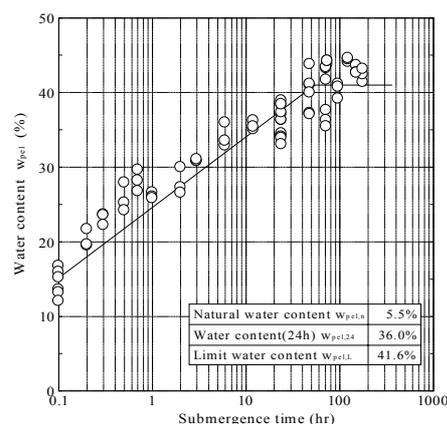


Fig.2 Relationship between submergence time and water content

ての性質が少なからず残っており, 保水性も有していることが推察される。

4. 土壌埋設試験

(1) 試験方法

試験はペレットの土壌中での生分解率ならびに強度の測定を目的とする。**Fig.3** に埋設試験の模式図を示す。試験方法はペレット 2.0 kg(自然乾燥状態)と液性限界の 2 倍に調整した大道粘土 8.0kg(液性限界 $w_L \times 2 = 114.4\%$) を混合・攪拌する。その後, 定期的に含水比調整を行ないながら, 常温の室内に静置する。所定の埋設期間 T_b が

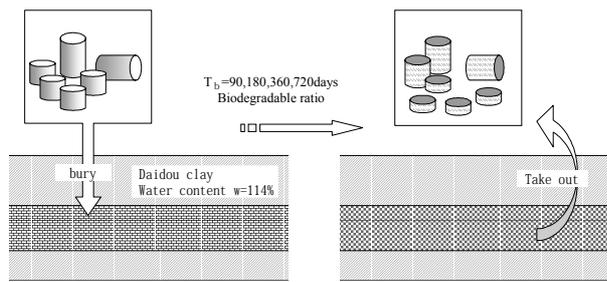
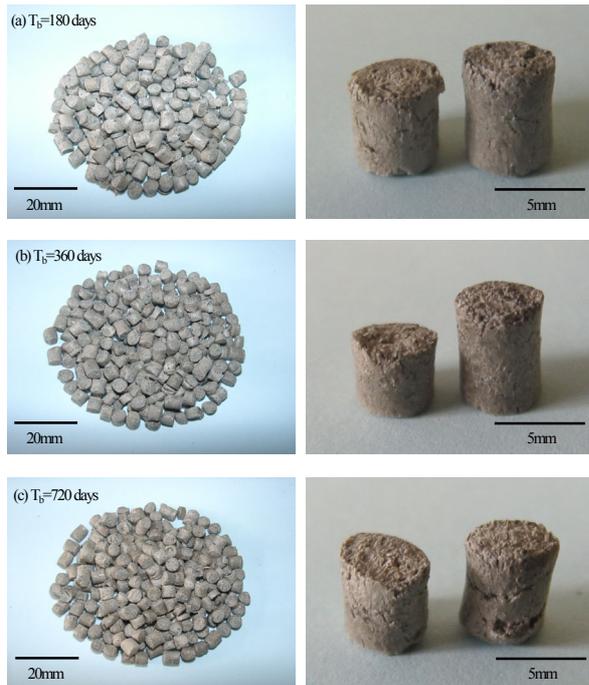


Fig.3 Burying test to measure Biodegradable ratio



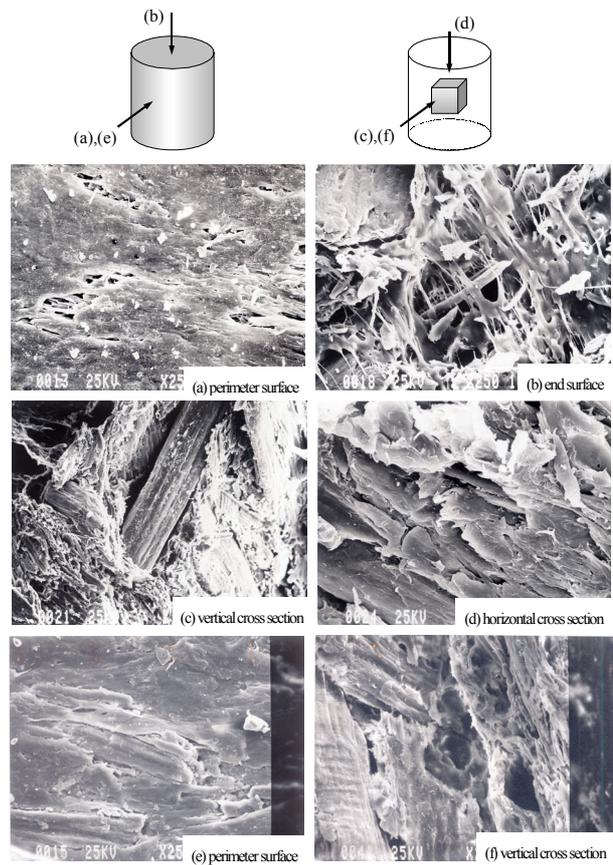
Photos. 2 Biodegradable plastic mixed with wood after burying test

経過した後は 850 μm のふるいを用いてペレットを洗い出し、自然乾燥させる。今回は $T_b=0$ day, 90 days, 180 days および 360 days の 4 ケースの結果について報告する。

(2) 形状測定

Photos. 2(a)~(c)に $T_b=180$ days, 360 days, 720 days の各ペレットの写真を示す。埋設前のペレットの表面が薄茶色で木材としての質感があるのに対し、埋設試験後の試料は灰色に変色し、色落ちしている。また、目視で判定した限り、表面付近が若干劣化しているペレットが多い。形状自体は初期の粒状態を維持しており、 $T_b=90$ days, 180 days 程度では著しく生分解したようにはみられない。一方、埋設期間が 360 days, 720 days と増加すると周面付近が裂けるように劣化しているペレットが多くみられる。

Photos. 3(a)~(d)に $T_b=0$ day の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)



Photos. 3 Microscopic observation biodegradable plastic mixed with wood

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律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、(e)はペレットの鉛直断面、(f)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、所々に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、既往の知見のように、この空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。(e),(f)は $T_b=720$ days のペレットの表面および内部断面を走査型電子顕微鏡で撮影したものである。撮影方向は(b),(d)と同様である。(b),(d)の $T_b=0$ day と比較すると表面に亀裂が多くなり、また内部

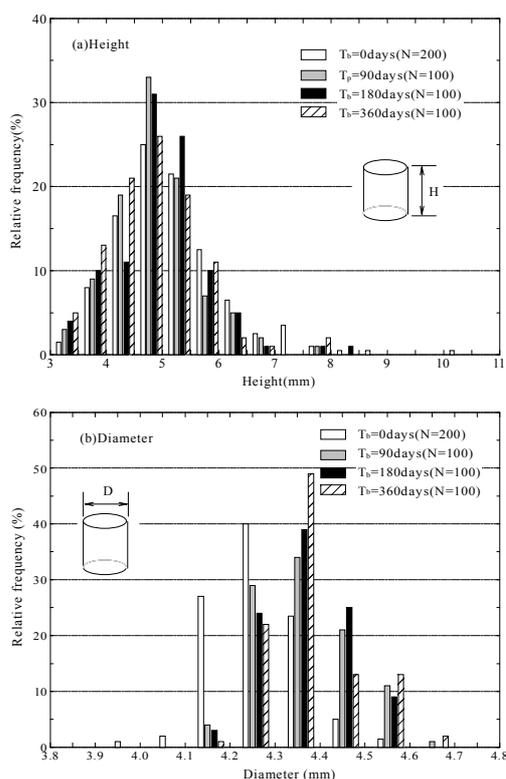


Fig.4 Shape measurement result of sample with different buried time

の空隙も増加した様子である。

Fig.4 に各埋設期間におけるペレット単粒子の形状測定(高さ H, 直径 D)の結果を示す。H はほぼ変化はないといえるが、D は埋設試験後のほうが若干増加している。これは加工段階で相当な力で押し固められていたペレットが吸水により膨張し、骨格が塑性変形したものと考えられる。ペレットを大量に地盤材料として用いる場合は乾燥・湿潤状態における体積変化の性質を把握しておく必要があると考えられる。

(3) 生分解率

ペレットの生分解性の評価指標として生分解率 BDR (Biodegradable Ratio) を式(4)で定義する。

$$BDR = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

m_1 : 埋設試験前の自然乾燥質量, m_2 : 埋設試験後の自然乾燥質量である。Fig.5 に埋設期間と生分解率 BDR の関係を示す。 $T_b=90$ days と 180 days での BDR はそれぞれ 0.65 %, 2.40% であり、生分解率はごくわずかであった。一方、 $T_b=720$ days では 6.13% まで増加して、BDR の不規則な変化が確認できる。これらより、粘土中で $T_b=180$ days 程度では、顕著な生分解や水中分解などの反応は確認されないが、埋設期間が増加するに従い徐々に分解速

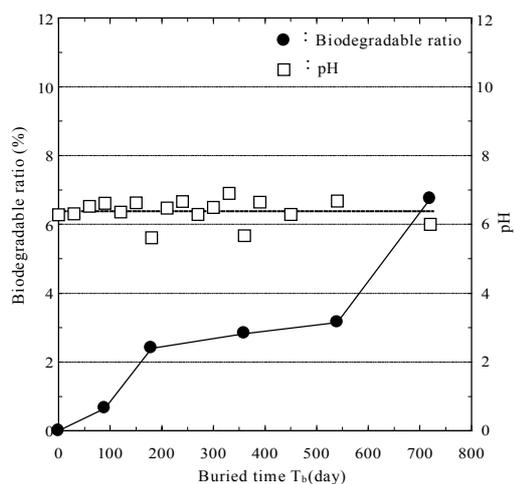


Fig.5 Relationship between buried time and biodegradable ratio

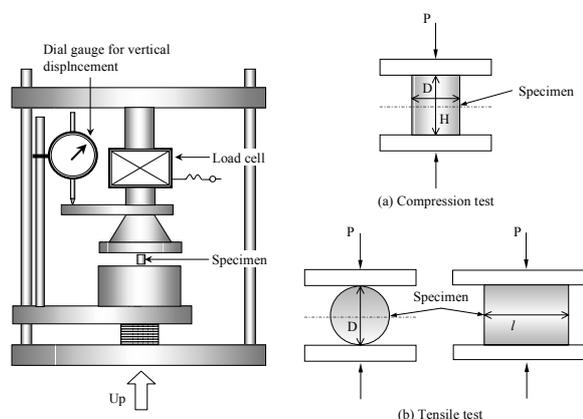


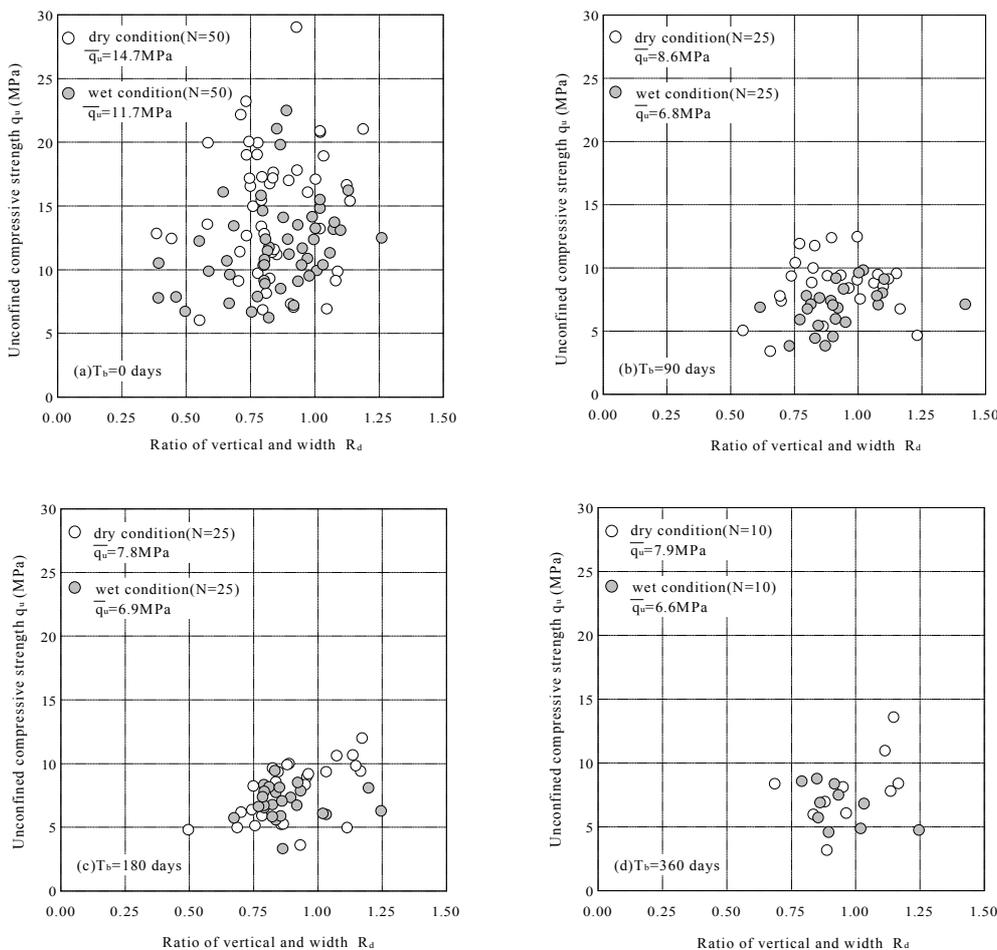
Fig.6 Schematic diagram of compression and tension tests

度も加速するのではないかと推察される。また、粘土中での pH は各 T_b を通して pH=6 程度の弱酸性で推移していることから、自然環境中での負荷もないものと考えられる。今回適用した埋設方法では少なくともペレットが長期間、湿潤状態にあっても水中分解することなく形状を保持することが可能であることが確認された。また、生分解性に影響を与える因子の一つに土壌の pH がある。特にペレットにはポリ乳酸が含まれているため、土壌の化学的性質や温度により生分解の速度は大きく影響を受けることが予測され、今後の課題として検討する予定である。

5. 単粒子強度特性

(1) 一軸圧縮試験

ペレットのように比較的粒径の大きい材料を取り扱う場合、集合体としての巨視的な挙動を把握する上で単粒子レベルでの破碎特性を把握しておくことは重要である。そこで、ペレット単粒子の生分解に伴う強度特性の



Figs.7 Distribution of unconfined compressive strength

変化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(試験方法の詳細は参考文献5)に記載)。Fig.6に試験模式図を示す。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。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。また、圧縮前の供試体の直径Dと高さHを用いて縦横比 R_d を式(5)で定義した。

$$R_d = \frac{D}{H} \tag{5}$$

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、試験回数Nを埋設試験前の試料については各50回、埋設試験後の試料については各25回を実施した。

Figs.7(a)~(d)に各埋設期間のペレットの一軸圧縮強度 q_u の分布を示す。平均一軸圧縮強度は埋設試験前の乾燥状態で $q_u = 14.7$ MPa、湿潤状態 $q_u = 11.7$ MPa、 $T_b = 90$ daysの乾燥状態で $q_u = 8.6$ MPa、湿潤状態で $q_u = 6.8$ MPa、 $T_b = 180$ daysの乾燥状態で $q_u = 7.8$ MPa、湿潤状態で $q_u = 6.9$ MPa、 $T_b = 360$ daysの乾燥状態で $q_u = 7.9$ MPa、湿潤状態で $q_u = 6.6$ MPaであった。乾燥状態と湿潤状態の q_u はいずれも最大値と最小値の変動幅が大きく、供試体の寸法比である縦横比 R_d との関連性は見出されない。埋設試験前の乾燥状態での最大値 $q_{u,max}$ は28.9 MPaで、最小値 $q_{u,min}$ は6.0 MPaであり、その差 $\Delta q_{u,max}$ は23 MPaもある。一方、湿潤状態でも $q_{u,max} = 22.4$ MPaで、 $q_{u,min} = 6.1$ MPaであり、 $\Delta q_{u,max} = 16.3$ MPaあり、やはり変動幅は大きいといえる。しかし、 T_b が増加するに従い、徐々に強度のばらつきが減少して、一定範囲に集束していく様子が見られる。また、乾燥状態と比較して湿潤状態の方がばらつきも少なく、分布がまとまっている。 $T_b = 90$ days, 180 daysの $q_{u,max}$ と $q_{u,min}$ についてみると、 $T_b = 90$ daysの乾燥状態では $q_{u,max} = 12.4$ MPaで、 $q_{u,min} = 3.3$ MPaであり、 $\Delta q_{u,max} = 9.1$ MPaあり、湿潤状態では $q_{u,max} = 10$ MPaで、 $q_{u,min} = 4$ MPaとなっている。 $T_b = 180$ daysの乾燥状態では $q_{u,max} = 11.9$ MPaで、 $q_{u,min} = 3.5$ MPaであり、

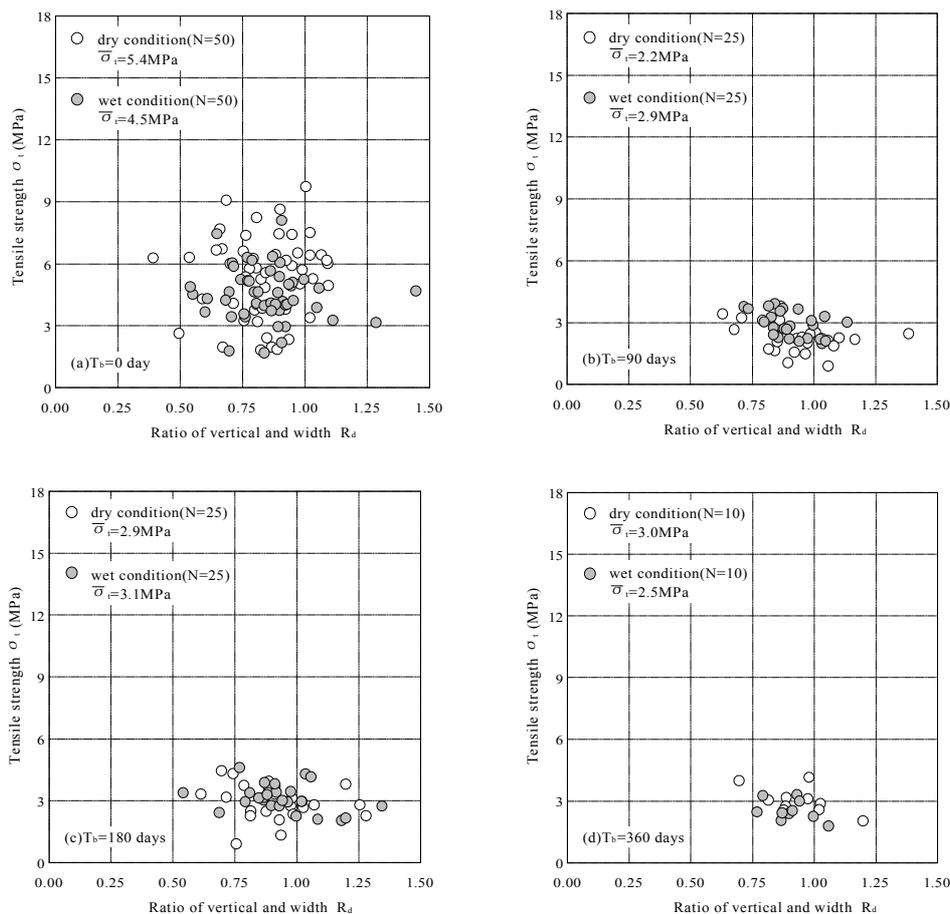


Fig.8 Distribution of tensile strength

$\Delta q_{\text{max}} = 8.4$ MPa あり、徐々に強度のばらつきが減少しているといえる。

(2) 割裂引張試験

ペレット単粒子に対し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のペレットに対して、埋設試験前の試料について各 50 回、埋設試験後は各 25 回実施した。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 で載荷した。

一般の割裂引張強度試験は、弾性理論に基づいて円柱供試体の直径方向に線載荷したときの引張応力の分布をもとに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、線載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_f を用いて、式(6)により供試体の割裂引張強度 σ_t を求めた。

$$\sigma_t = \frac{4P}{\pi(D+d_f)l} \tag{6}$$

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、 l ：試験前の供試体の長さ(高さ H)とする。

Fig.8(a)~(d)に各埋設期間の割裂引張強度 σ_t の分布を示す。平均割裂引張強度は埋設試験前の乾燥状態で $\sigma_t = 5.4$ MPa、湿潤状態で $\sigma_t = 4.5$ MPa、 $T_b = 90$ days の乾燥状態で $\sigma_t = 2.2$ MPa、湿潤状態で $\sigma_t = 2.9$ MPa、 $T_b = 180$ days の乾燥状態で $\sigma_t = 2.9$ MPa、湿潤状態で $\sigma_t = 3.1$ MPa、 $T_b = 360$ days の乾燥状態で $\sigma_t = 3.0$ MPa、湿潤状態で $\sigma_t = 2.5$ MPa であった。埋設前と較べるといずれも約 1/2 に強度が低下しているといえる。また、埋設試験前は乾燥・湿潤状態ともに強度にかなりのばらつきがみられたが、埋設後の試料は乾燥・湿潤状態および R_d の大小に関わらず同程度の強度で安定していることが分かる。

(3) 埋設期間と単粒子強度の関係

Fig.9 に埋設期間と平均一軸圧縮強度および平均割裂引張強度の関係を示す。いずれも埋設試験前の状態での強度が最も大きく、その後経過期間とともに強度が低下していく様子が確認できる。強度の低下が最も著しいのは埋設前から 90 days 経過するまでの間で、最大で約 6.1 MPa の圧縮強度の低下がみられる。この間にペレット

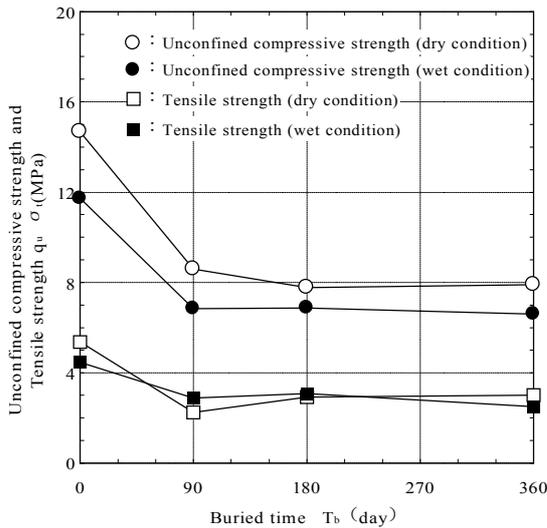


Fig.9 Relationship between buried time and Unconfined compressive strength and Tensile strength

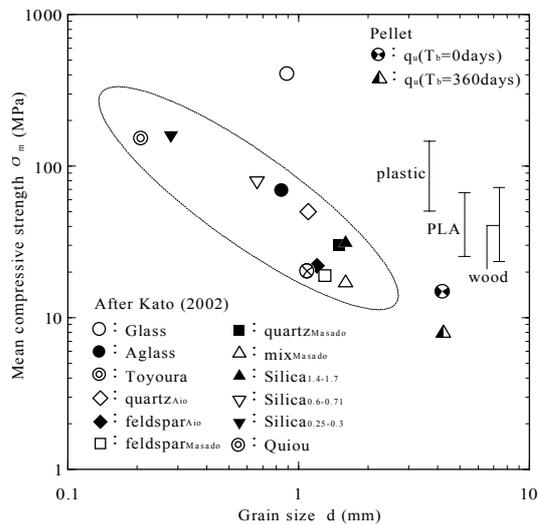


Fig.10 Mean compressive strength of various Materials

の構造に変化が生じることが推察される。一方、 $T_b=90$ days 経過後の各強度は、いずれも若干低下する傾向をみせているものの安定して推移しているといえる。これよりペレットの分解等に伴う強度低下は $T_b=90$ days 程度の短期間に生じるものと考えられる。この要因としては、大道粘土の土壌中の pH は中性から弱酸性であり、生分解作用に伴う強度の低下よりはむしろ長期間、含水比の高い粘土中に埋設していたために材料であるポリ乳酸と木粉の結合状態が弱くなり、材質が劣化して、荷重に対して抵抗力が低下したと推察される。ただし、 $T_b=90$ days 経過後は安定して推移していることもいえるため、地盤材料としては有効利用の可能性が十分あると考えられる。

Fig.10 にペレットと土粒子を含む破碎性材料における単粒子の平均圧縮強度の比較図を示す。図は文献(6)のデータに加筆修正を加えたものである。単粒子強度の算出

式がペレットと土粒子では異なるため単純に比較することはできないが、大まかな強度の比較は可能と考えられる。加登ら(2002)の研究によれば破碎性材料の単粒子破碎はまさ土等の粒子をみると、圧縮荷重の増加に伴い小さな荷重のピークを繰返しながら進行し、最終的に最大ピーク荷重に至る。最大ピーク荷重に至るまでの小さなピーク荷重の出現は粒子の角が破碎するか、もしくは粒子内のクラックに沿って粒子内の一部が欠けるような破碎に対応している。一方、ペレットの場合はこれと異なり、圧縮荷重の増加に伴い一度だけ最大ピーク荷重を示す。これはペレット単粒子に一度クラックが入るとそこから単粒子全体に亀裂が進行して耐荷力を失うためと考えられる。ただし、破碎パターンとしては急激に強度が低下する脆性的なものではなく、最大荷重を示した後は徐々に強度が低下する延性的なものが多い。

単粒子強度の算出方法については、既往の研究では破壊荷重を粒子体積の 2/3 乗で除す方法⁷⁾、破壊荷重を直接測定された加圧板と粒子の接触面積で除す方法(Hobbs (1963))、あるいは粒子を 14 面体と仮定して加圧板と粒子の接触面積を算出して、これで破壊荷重を除す方法⁸⁾などがある。加登らの研究では破壊荷重を粒子の高さの 2 乗で除す方法により破碎強度を算出している。これは粒子の形状が不規則であり、かつ径が微小なため、加圧板と粒子の接触面積を直接算出することが困難であることから、粒径から粒子全体に対する平均的な強度を求めるものといえる。一方、ペレットの場合は粒径が比較的大きく形状も均一に成形されていることからペレットの加圧板との接触面積をノギスを用いて直接測定して、最大荷重を除すことにより求めている。平均単粒子強度 σ_f の算出式としては加登らが式(7)、ペレットの場合は式(8)を用いている。

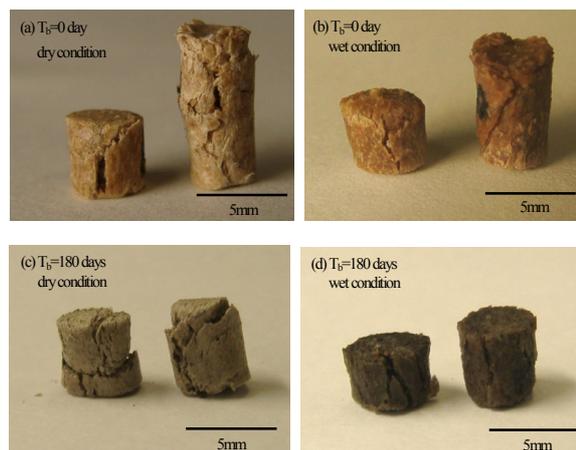
$$\sigma_f = \frac{P_f}{d_0^2} \tag{7}$$

$$\sigma_f = \frac{P_f}{A_0} \tag{8}$$

ここで、 P_f :最大荷重、 d_0 :粒子径、 A_0 :ペレットの加圧板との接触面積である。図中のプロット点は σ_f を試験回数で除すことに算出された平均値 σ_m である。ペレットの場合はこの σ_f は前述の q_u と等しいといえる。加登ら(2002)の研究では d_0 を粒子が試験装置の上盤に触れた時の、上盤と下盤との距離を計測して求めている。ペレットの場合も同様に上盤と下盤との距離であるペレット単粒子の高さ H がこれに対応すると考え、図中にプロット

している。

これよりペレットと加登ら(2002)の研究データを比較すると、平均単粒子強度は $T_b=0$ days では中程度に風化したまき土の土粒子に近い強度であることがわかる。主成分がいずれも石英で粒径が $0.1\sim 0.3$ mm のシリカ砂や豊浦砂と比較すると、その強度は著しく低いものである。また、ペレットの場合 $T_b=360$ days では土粒子に比較してかなり強度が低下しているため、地盤材料として利用する場合は検討する必要がある。Photos.4 は $T_b=0$ days と $T_b=180$ days の一軸試験後の供試体である。乾燥状態の方が圧縮破壊に伴い亀裂が大きく入っているが、湿潤状態では一箇所から亀裂が縦方向に入る傾向がみられた。



Photos.4 Specimen after unconfined compression test

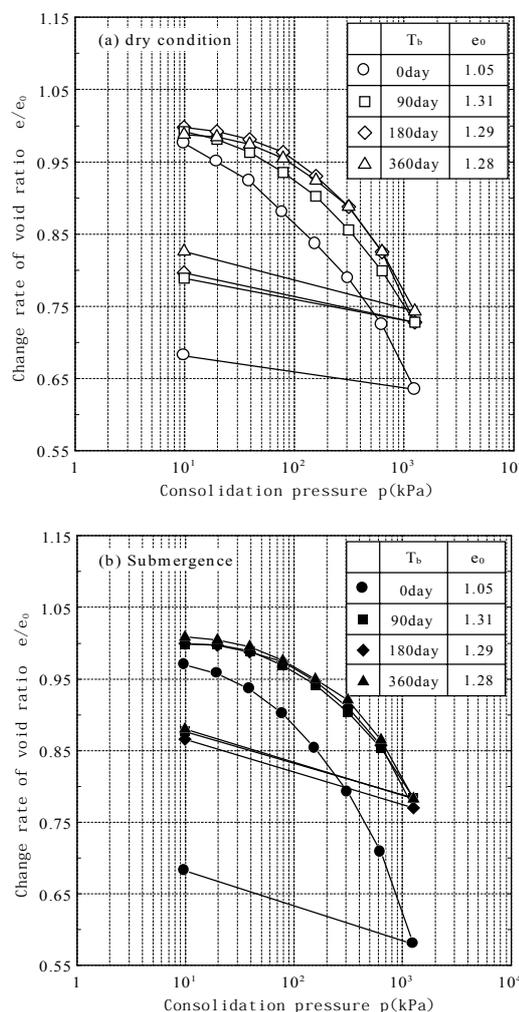
6. 一次元圧縮特性

(1) 試験方法

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(JISA 1217)を実施した。ペレットは前節で述べたように乾燥状態と湿潤状態、また埋設期間によりその強度特性が異なることから、一次元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、試験は非水浸および水浸状態の2通りについて行った。また、粗粒材や飽和度の低い土は载荷後の短時間内に一次圧密相当の即時沈下を生じ、二次圧密的な圧縮は一般に小さいと考えられる。ペレットの場合も一次圧密が载荷後短時間で終了することが予測され、その圧縮性について調べる必要がある。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、初期相対密度 $D_{r0}=80\%$ となるように圧密容器に詰めて作製した。圧密圧力 p は 9.8 kPa から 1256 kPa までの8段階で载荷し、その後 9.8 kPa まで除荷させ、各段階において沈下量(膨張量)を測定した。なお、水浸状態の場合には気乾状態の所定の量のペレットを 24 時間水浸させたものを用いて供試体を作製した。

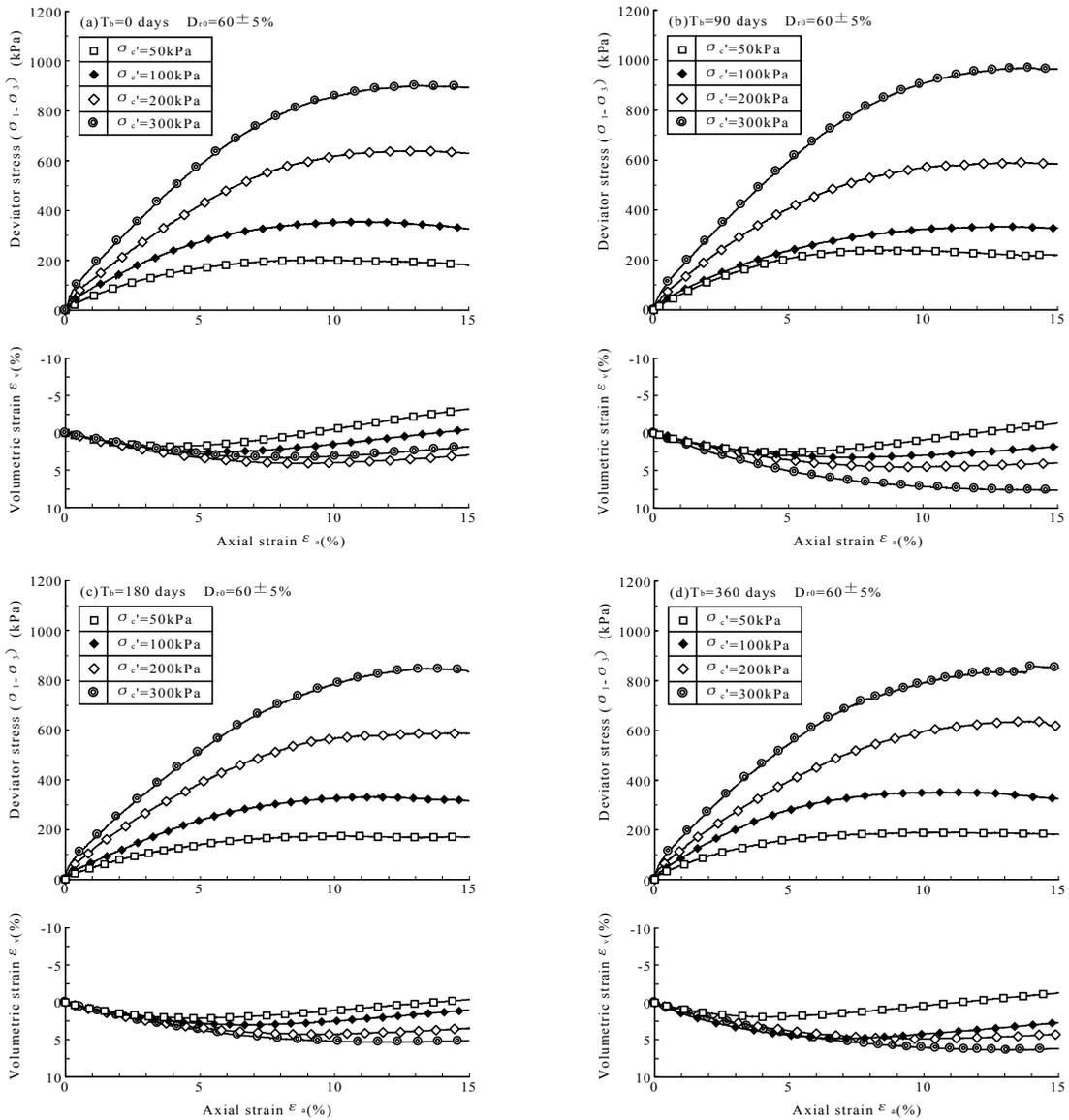
(2) 段階载荷・除荷による一次元圧縮および膨張挙動

Figs.11(a),(b)に圧密試験によって得られた間隙比変化率 $e/e_0 - \log p$ 曲線を示す。 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。 $T_b=0$ days では $p=300$ kPa 以上での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たためと考えら



Figs.11 Change rate of void ratio

れる。つまり、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こしやすく圧縮性が高くなる、または剛性が低下し粒子変形を起こしやすくなり、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、 T_b が増加すると非水浸・水浸条件のいずれの場合も



Figs.12 Relationship between axial strain, deviator stress, volumetric strain of samples with different buried times

圧縮量が減少している。これは埋設期間中にペレットの形状が初期の円柱状から、吸水膨張や分解作用などにより変形して、細くなり密に詰まりやすい状態になったためと考えられる。換言すれば、埋設試験前の初期状態のペレットは形状がほぼ均一に成形されていたため、密に詰まらず供試体中に間隙が存在するため圧縮性が高く、その一方、埋設試験後のペレットはその間隙に分解したものと分解途中のものが混じって配列されるため、間隙が減少したため圧縮量が低下したものと推察される。

7. 排水三軸せん断特性

(1) 圧密排水三軸圧縮試験

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排水三軸圧縮試験(JGS 0524-2000)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集合体としての強度に相対密度と拘束圧等の影響に加えて分解に伴う材質の劣化の影響が考えられる。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 D_{r0} 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12層に均等に分けて一層につき30回突き詰め、直径5cm、高さ10cm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98kPaを加えて20分間飽和をした。試験条件は $T_b=0$ days, 90 days, 180 days, 360 daysの4通りとして、供試体の初期相対密度 D_{r0} は $60 \pm 5\%$ とし、初期有効拘束圧 σ'_{30} をそれぞれ50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPaの4通りに変化させて行った。なお、圧密時間は10分、せん断過程での軸ひずみ速度を0.1%/minとした。

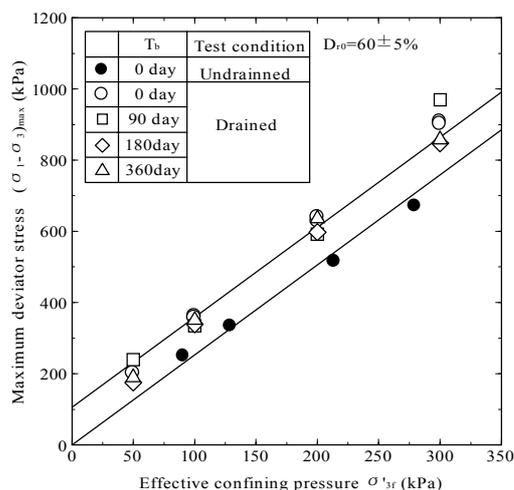


Fig.13 Relationship between effective confining pressure and maximum deviator stress

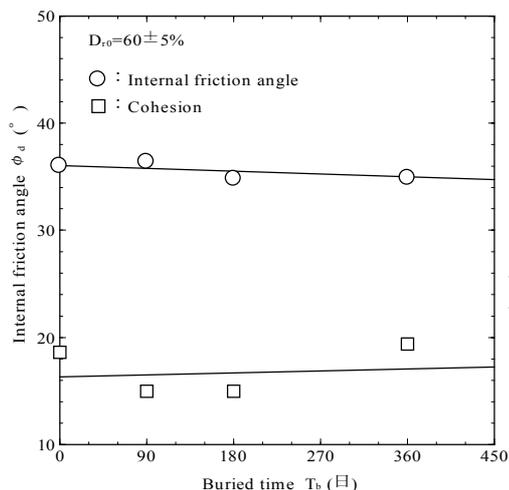


Fig.14 Relationship between buried time and strength parameters

(2) 埋設期間が異なる場合の排水せん断挙動

Figs.12(a)~(d)にそれぞれ $T_b=0$ days, 90 days, 180 days, 360 days における軸ひずみ ϵ_a と軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ および体積ひずみ ϵ_v の関係を示す。 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ はいずれの T_b においても $\epsilon_a=10$ % 付近まで単調増加した後、ピーク強度に達している。 $D_{50}=60 \pm 5\%$ では典型的な緩詰砂の応力ひずみ挙動を示しているが、密詰砂でみられる明瞭なピークはみられない。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 程度であることから、試験で採用した $\sigma_{30}'=50 \sim 300$ kPa の範囲では顕著な粒子破碎は生じていないと考える。 ϵ_v はせん断に伴い一度増加した後、徐々に減少して負の値になることもある。このダイレイタンシー挙動は T_b が少なく、また σ_{30}' が低いほど顕著であり、ペレットの非排水試験での過剰間隙水圧の減少傾向と対応する。

(3) 有効拘束圧と最大軸差応力の関係

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(9)により行った⁹⁾。

$$\Delta\sigma_{rm} = -\frac{2E_m \cdot t}{d} \epsilon_{\theta m} \tag{9}$$

ここで、 $\Delta\sigma_{rm}$: 側方向応力 σ_r の補正量(kPa), $\epsilon_{\theta m}$: メンブレンの円周方向ひずみ, d : 供試体の直径(mm)である。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 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。なお、試験結果の整理に関して、メンブレン貫入については、補正方法にまだ検討が必要であることから、今回はメンブレン張力の補正のみを行った。Fig.13 に破壊時の有効拘束圧 σ'_{3f} と最大軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ の関係を示す。なお、 $T_b=0$ days の圧密非排水三軸圧縮試験の結果も併せて示す。排水試験の場合、いずれの T_b においても σ_{3f} の増加に伴い $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ も増加し、各点はほぼ同一の直線上にある。ペレットの場合もせん断に伴い体積変化し、最終的に同一の限界状態線に達すると考えられる。

(4) 埋設期間と強度定数の関係

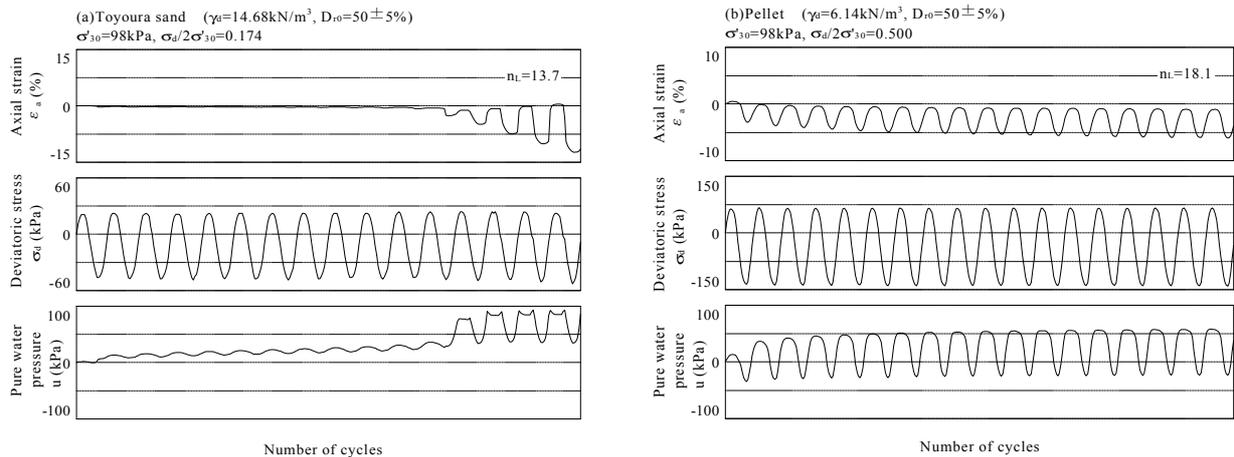
Fig.14 に T_b と強度定数の関係を示す。内部摩擦角 ϕ_d および粘着力 c_d は破壊線の勾配 m および切片 f から式(10)および式(11)を用いて求めた。

$$\phi_d = \sin^{-1}\left(\frac{m}{2+m}\right) \tag{10}$$

$$c_d = \frac{f}{2\sqrt{1+m}} \tag{11}$$

破壊線より換算した ϕ_d は T_b により若干異なるが、概ね約 36.0° 程度であり、粘着力 c_d も約 18 kPa であり、ほとんど変化はないといえる。

以上のことから、粘土中で長期間湿潤状態を呈していたペレットでも集合体としての強度はほぼ変化せず、比較的高いせん断強度を保持し続け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補正されていないので、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、土壌中の pH の影響も考慮されていない



Figs.15 Typical liquefaction test results on Toyoura sand and Pellet

い. 今後は、pH を変化させた状態で一定期間埋設したペレットを用いて、分解による強度特性の変化を検討する必要がある。

8. 液状化強度特性

(1) 試験概要

ペレットの集合体としての液状化特性を調べるために繰返し非排水三軸試験(JGS 0541-2000)を実施した。一般に、この試験で対象とするのは礫層が液状化したという報告もあり、ペレットのような粒径の比較的大きい材料の液状化特性を把握しておくことは重要である。液状化強度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。そこで、試料として豊浦砂とペレットの2試料を用いて結果を比較することとした。

三軸供試体は直径5cm、高さ10cmの円柱形であり、以下の方法で作製した。試験には一定質量になるまで乾燥させた豊浦砂とペレットを使用し、この時点での含水比 w をゼロとした。豊浦砂の場合はまず所定の量をピーカ中で煮沸し脱気を行ったものを準備し、負圧法を用いてモールド内に飽和水を満たして水中落下振動法で作製した。一方、ペレットの場合は形状が特殊なため、空中落下法や水中落下法では密度の管理や均質な供試体の作製が困難であったため、以下の方法によった。まず、純水中で24時間水浸させたものを、負圧法を用いて12層に均等に分けて一層につき25回突き詰め、直径5cm、高さ10cmの供試体を作製した。供試体の初期相対密度 D_{r0} はいずれも $50 \pm 5\%$ とした。次に供試体中を飽和水で満たすために供試体下部から脱気水を10分間通水し、背圧98kPaを加えてB値0.96以上を確認した。その後、拘束圧 $\sigma'_{30} = 98 \text{ kPa}$ で10分間等方圧密を行い、非排水繰返しせん断試験を行った。繰返し三軸試験は空圧載荷式の試

験機を用い、周波数0.1Hzの荷重制御で正弦波荷重を載荷することにより行い、破壊の定義を両振幅ひずみ $DA=5\%$ に達した時点とする。

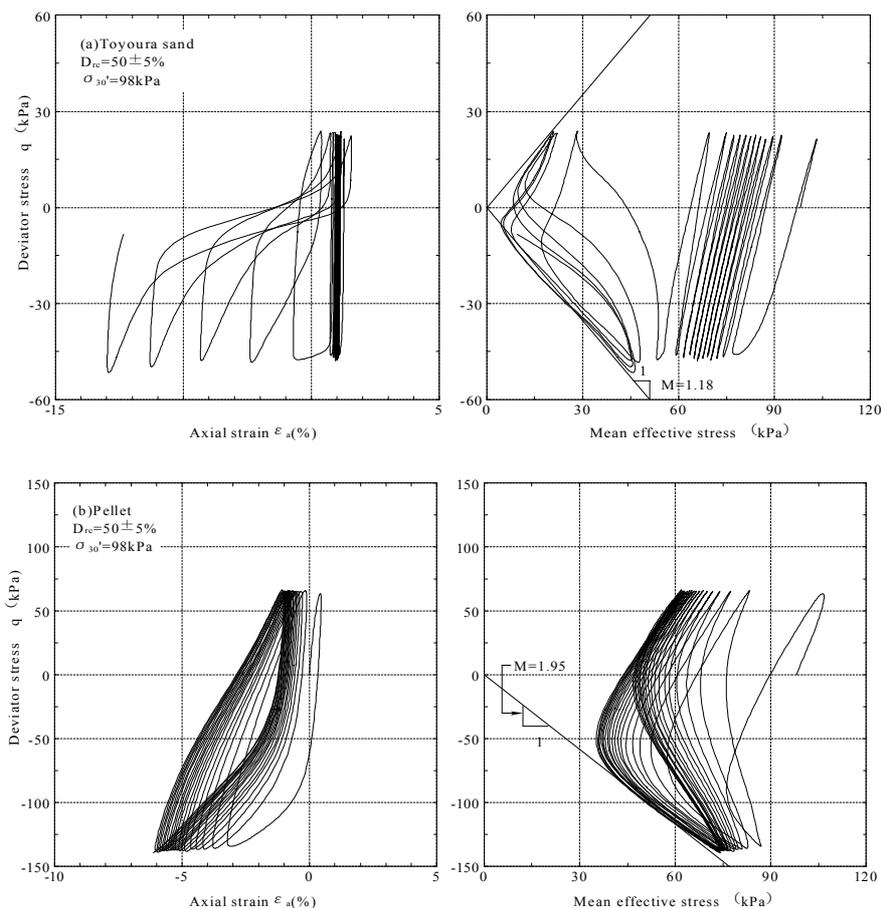
(2) 繰返しせん断挙動

Fig.15(a),(b)に豊浦砂とペレットの代表的な記録波形を示す。豊浦砂の波形は原点に対してほぼ対称であるが、ペレットは伸張側に片寄っている。また、軸ひずみと間隙水圧の波形を見ると、豊浦砂が途中で急激に間隙水圧が増大し DA が5%に達して液状化しているのに対して、ペレットは間隙水圧が徐々に増えて DA が5%に達している。

Figs.16(a),(b)に豊浦砂とペレットの代表的な軸差応力と軸ひずみおよび有効応力経路を示す。有効応力に関する内部摩擦角 ϕ' は引張側の限界状態線の傾き M より式(12)から求めた。

$$\phi' = \sin^{-1} \left(\frac{3M}{6+M} \right) \tag{12}$$

限界状態線の傾きは豊浦砂の場合には $M=1.18$ 、ペレットは $M=1.95$ となり、これから内部摩擦角はそれぞれ $\phi' = 29.5^\circ$ と $\phi' = 47.4^\circ$ になった。ここでペレットは軸ひずみが伸張側に生じ、破壊に至っていることから限界状態線を伸張側に示す。豊浦砂よりペレットのほうが、内部摩擦角が大きく地震動のような繰返し荷重に対する抵抗力が高いといえる。**Fig.17**に豊浦砂とペレットの繰返し強度曲線を示す。繰返し強度曲線から得られる繰返し回数 $N_L=20$ 回の繰返しせん断応力比を液状化強度としてそれぞれ求めると、豊浦砂が0.16、ペレットが0.50となった。ペレットの液状化強度は豊浦砂の約3倍であり、繰返し荷重に安定しているといえる。ペレットの場合、形状が均一に加工されているため、密に締まりにくい構造であるが、粒径が大きいため過剰間隙水圧が消散しや



Figs.16 Deviator stress and axial strain relation and effective stress path for Toyoura sand and Pellet

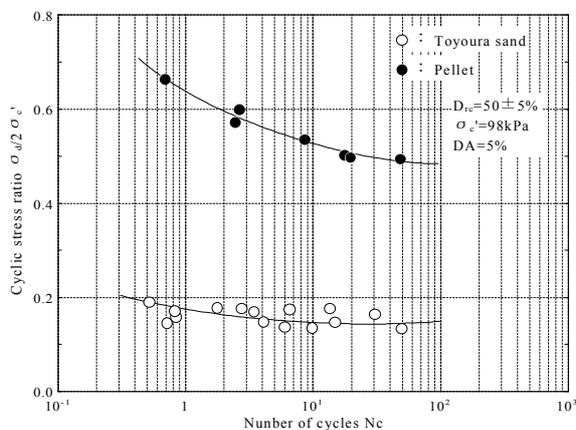


Fig.17 Relationships between N_c and $\sigma_d/2\sigma'_c$ for Toyoura sand and pellet

すいことが推察される。仮にペレットの粒径を調整し、粒度分布をよくすれば、液状化強度も増加し高盛土等の水平排水層材料として活用できるのではないかと考えられる。

9. 結論

本文では、生分解性粒状材料に対して生分解に伴う力

学的挙動の変化ならびに地盤材料としての適用性について検討した。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 中性の粘土中という限られた条件下ではあるが、生分解率は埋設期間の経過に対して増加することがわかった。しかし、生分解速度はきわめて遅く、目視で判断する限りでは表面の色落ち以外の顕著な変化は確認されなかった。
- (2) 単体の一軸圧縮強度および割裂引張強度は埋設期間が90日間程度で埋設試験前の約1/2まで低下す

るが、その後は360日間までほぼ変化はなく安定している。

- (3) 集合体としての一次元圧縮性は埋設試験前後で大きく異なる。埋設後の方が試料の形状が細かくなり、密に詰まりやすく圧縮量が減少すると推察される。
- (4) 集合体となった場合の排水せん断挙動に分解の影響はみられず、内部摩擦角は埋設期間が360日間までほぼ一定で約 36° である。
- (5) 集合体としての液化化強度は豊浦砂の約3倍であり、砂質土と比較して繰返し荷重に安定している。

本研究の意義としては循環型社会の達成に向けて建設廃木材のリサイクル率の向上に貢献できると考えられる。また、良質な地盤材料の開発もしくは既存の地盤材料に替わる代替材としての利用につながると考えられる。成長が持続可能な社会を達成するための方策の一環として、建設発生木材を土木分野で再利用する枠組みを構築することは地域開発と環境保全の均衡をとる上で大変重要であり、本研究成果はこのような社会的要請に応えたものの一つと考える。

参考文献

- 1) 辻 秀人：生分解性高分子材料の化学，コロナ

社，p. 13，2002.

- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 鈴木素之，山本哲朗，長谷川秀人，渡邊良一：廃木材を混練した生分解樹脂の力学的挙動，地盤と建設，Vol. 22, No. 1, pp. 9-17, 2004.
- 6) 加登文学：単粒子の形状および強度に基づく破碎性材料の力学特性に関する研究，山口大学学位論文，pp. 45-54, 2002.
- 7) 山口梅太郎，西松裕一：岩石力学入門，東京大学出版会，pp. 153-159, 1971.
- 8) 福本武明，原 健夫：粒状体の粒子破碎強度分布に関する研究，土木学会論文集，No. 596/ III-43, pp. 91-99.
- 9) 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.

(平成17年12月27日受理)