

擁壁裏込めに廃タイヤを用いた土圧低減の数値解析

Numerical simulations of earth pressure reduction using tire chips in sand backfill

金田一広*・ハザリカヘマンタ**・山崎浩之***

Kazuhiro KANEDA, Hemanta HAZARIKA and Hiroyuki YAMAZAKI

*工博 独立行政法人港湾空港技術研究所, 地盤構造部動土質研究室研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

**工博 秋田県立大学システム科学技術学部, 建築環境システム学科准教授

(〒015-0055 秋田県由利本荘市土谷字海老ノ口84-4)

***工修 独立行政法人港湾空港技術研究所, 地盤構造部動土質研究室室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

It is known that the use of compressible material (e.g. tire chips) on the backfill can significantly reduce the load against retaining wall. This reduction of earth pressure is achieved through a mechanism of simulating the quasi-active or the intermediate active state. If there exists a highly compressible material between soils and retaining wall, the backfill soils approaches to active state. In this paper, this mechanism has been numerically evaluated. In the numerical simulation, the modified Cam clay model with super-subloading yield surface and rotational hardening concept (SYS Cam Clay model) was used. The SYS Cam Clay model (Asaoka et al. 2002) is the elasto-plastic model that takes into the account the soil structure as well as overconsolidation and anisotropy, which was introduced by Hashiguchi. Using this model, the typical responses of dense and loose sand can be described.

Key Words: Tire chip, Earth pressure, Numerical simulation, SYS Cam clay model

キーワード: タイヤチップス, 土圧, 数値解析, SYS カムクレイモデル

1. はじめに

建設業界では廃棄物のリサイクルの促進が進められている。本研究では、廃タイヤを切断・粉砕したタイヤチップの土圧構造物への適用についての基礎的な研究を示す。廃タイヤの特徴としては、

- (1) 粒子密度が土石よりも小さい軽量材料である
- (2) 弾性体である
- (3) 断熱性が高い
- (4) 自然環境に有害な物質を溶出しない

などが挙げられ、欧米諸国では最近の約10年間で軽量盛土材などとして盛んに利用されており¹⁾特に現在の米国ではリサイクル量の約25%が土木資材としてマテリアルリサイクルされている。

一方日本では、廃タイヤの土木・地盤材料としての利用に関する研究が始められている²⁾⁷⁾。御手洗・安原・菊池・大谷らは、セメント固化処理土にゴムチップを混入することによって、その韌性(粘り強さ)を改善する研究や環境影響評価などの研究を行っている^{8), 9)}。

また、ハザリカらはタイヤチップス^{10)~12)}を擁壁の裏込めに用いた場合の擁壁にかかる土圧の低減メカニズムに

ついて調べている。さらに、ハザリカらは、擁壁の裏込めにタイヤチップスを設置した時の地震時の擁壁安定性の評価なども行われている。

さて、タイヤチップスなどの高圧縮性材料を擁壁の裏込めに緩衝材として用いると土圧が低減される。これは、緩衝材によって裏込めの土が擁壁側に変形し主働状態になるため、「擬似主働状態」(quasi active state)などといわれている^{たとえば 11)}。本研究は、このメカニズムを数値解析で示すことにある。

本研究では有限変形理論と土の骨格構造を記述できる弾塑性モデルによる有限要素解析を行っている。まず、タイヤチップスの特長について述べ、ハザリカらによって行われた擁壁の裏込めにタイヤチップスを用いた野外実験の概要を説明する。次に、数値計算を示し土圧低減のメカニズムについて説明する。裏込め砂が密な場合とゆるい場合についても検討する。

本研究は将来的に護岸構造物などの裏込めにタイヤチップスを設置した場合の静的土圧の低減の力学的なメカニズムを示す基礎的な研究である。

2. タイヤチップスの特性

廃タイヤは日本で年間 100 万トン発生するといわれているが、そのマテリアルリサイクルとしての有効利用が必要となっている。本研究で用いているタイヤチップスは、古タイヤを切断・粉砕したタイヤチップであり、図-1に写真を示す。本研究ではこのタイヤチップのみの集合体を取り扱っている。用いたタイヤチップの比重は1.15、非圧縮性の弾性体(ポアソン比:0.5、ゴムの弾性係数:4~6MN/m²)である。ただし、集合体としては圧縮性の高いものである⁸⁾。つまり、タイヤチップとタイヤチップの間は空隙が存在し、マスとしてゴムチップ集合体の圧縮挙動は、空隙の圧縮が大きく占めることとなる。

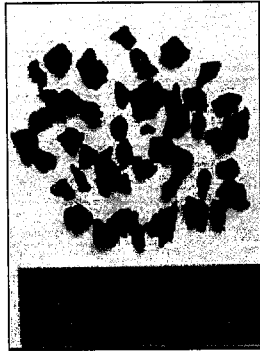


図-1 タイヤチップス

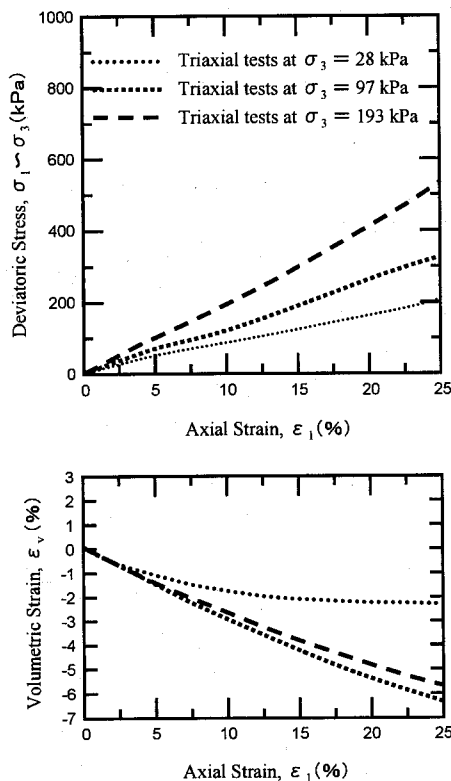


図-2 タイヤチップス集合体の三軸排水試験¹³⁾

次に、図-2にLeeら¹³⁾によるゴムチップ集合体の側圧一定の排水三軸試験結果を示す。偏差応力-軸ひずみ関係と体積ひずみ-軸ひずみ関係である。3つの拘束圧で試験を行っているが、偏差応力-軸ひずみ関係から多少の差はあるがほぼ直線とみなせ、この結果よりゴムチップ集合体の挙動は載荷過程では弾性体と仮定できる。また、拘束圧によって集合体としての弾性定数が異なっていることも分かる。

3. 野外実験の概要

ハザリカらによって行われた野外実験¹¹⁾について簡単に説明する。詳しくは参考文献を参照されたい。ハザリカの実験は、擁壁の背後にEPS(Expand Polystyrene)を設置したものなどもあるが、ここで示すのは次の2ケースである。図-3に示すように、Case (a)は1.5mの擁壁を設置し、擁壁を挟んで珪砂6号を投入し間隙比が0.53になるように転圧して締め固め、さらに8.3 kPaの上載荷重を加え、擁壁に作用する土圧を計測した。擁壁を挟んで両側に砂を設置することで擁壁を固定させるためである。擁壁にはあらかじめ0.3mおきに土圧計(直径10cm)を設置してある。Case (b)は同じ擁壁を設置し、一方は擁壁から30cmの部分にタイヤチップスを設置し、その背後に砂を(a)と同様な間隙比になるように作成し、同じように8.3 kPaの上載荷重を加え、擁壁に作用する土圧を計測した。用いた砂は $\rho_s=19.6 \text{ t/m}^3$ 、内部摩擦角 40° である。図-4に実験で得られた擁壁の深度方向の土圧分布を示す。砂だけのものが白丸、タイヤチップスを砂と擁壁の間に設置したものは黒丸である。タイヤチップスを擁壁と砂の間に設置したものが、明らかに土圧が低減している。

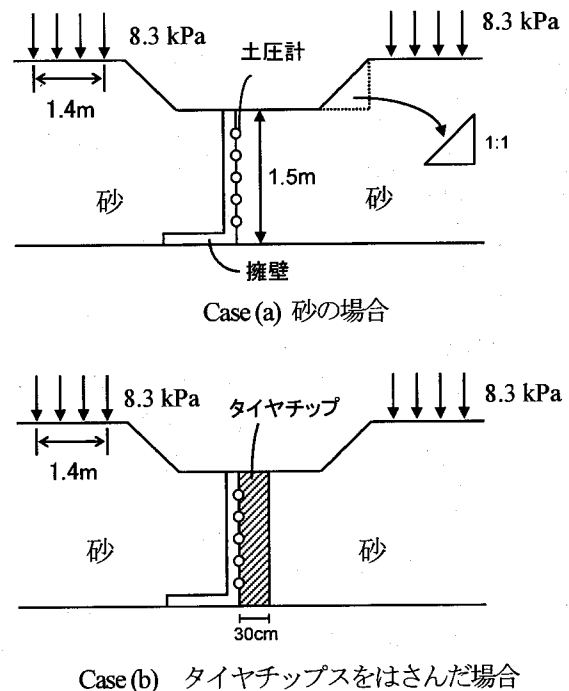


図-3 野外実験の概要

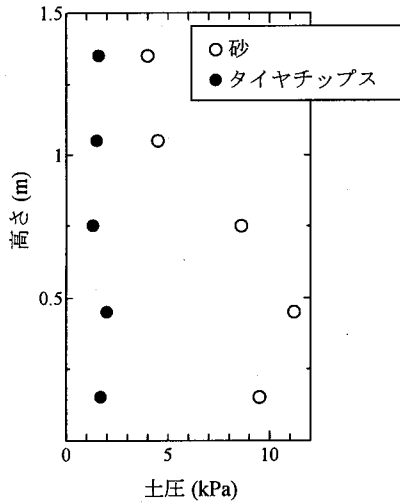


図4 実験結果

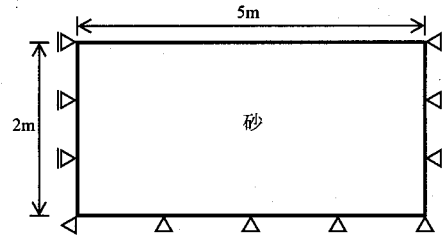
4. 土圧低減メカニズムの数値計算

本研究で用いる土の弾塑性構成モデルは名古屋大学地盤力学研究室で開発された土の骨格構造（構造・過圧密・異方性）の発展則の違いで、砂と粘土の違いを記述する回転硬化上・下負荷面修正カムクレイモデル（SYS カムクレイモデル）である^{14),15)}。このモデルの特徴は、発展則によってゆるい砂から密な砂までの密度によるせん断挙動の違いや、自然堆積粘土、さらに中間土の力学挙動まで統一されたパラメータで同じ理論の枠組みで説明ができるものである。詳細は参考文献を参照されたい。

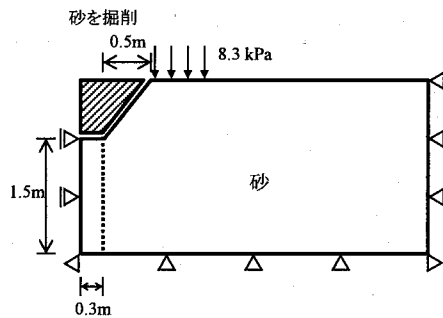
4.1 計算条件

はじめに、地盤の作成について説明する。平面ひずみ条件を仮定して、図-5に示すように、水平な地盤(a)を作る。次に、図-5(b)のように実験と同様な裏込め背後の傾斜地盤を作るため地盤を掘削する。擁壁部分の水平方向は動かさないようにx方向を固定している。その後、8.3 kPaの上載荷重を載荷し、定常状態になるまで計算を行い、擁壁の土圧を算定した。次にタイヤチップスを入れる場合は、擁壁の裏側30cmの砂を瞬時にタイヤチップスに置き換える¹⁶⁾という作業を行う(c)。置き換える砂の有限要素節点にかかる力を計算し、さらに置き換えるタイヤチップスの重量から節点にかかる力を算定し、これら二つの差分を置き換える部分の周囲の節点に作用させている。その後、地盤を掘削し(d)、8.3 kPaの上載荷重を載荷し、定常状態になるまで計算を行い擁壁にかかる土圧を算定する。計算では荷重を載荷するまで、ほぼ瞬時で行っている。図-6に掘削後に用いた計算のメッシュおよび境界条件を示す。表-1に計算で用いた典型的な砂の弾塑性パラメータ、発展則パラメータおよび初期値を示す。これらの意味については参考文献¹⁵⁾を参照されたい。また、下負荷面や誘導異方性については参考文献に詳しい。^{17), 18), 19)} 実験にあわせるように土の間隙比は0.53とし、地盤全体で構造の程度、異方性の程

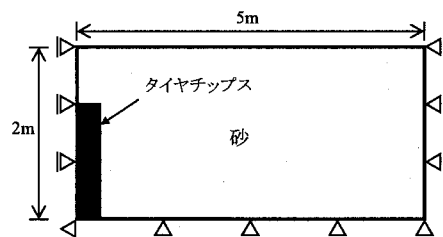
度は一定としている。さらに、砂の自重より拘束圧を算定し、地盤の過圧密比を求めている。密度の違いを調べるためゆるい砂も検討する。また、タイヤチップスはここでは単純に圧縮性の高い弾性体と仮定する。表-2にタイヤチップス集合体の弾性パラメータを示す。弾性定数とポアソン比を変えた3つのケースについて検討する。また、タイヤチップス集合体の弾性定数は拘束圧によって変化しているが、ここでは一定にし、弾性定数はタイヤチップスの重量、ポアソン比、タイヤチップス集合体の間隙比などを考慮して実験結果より推定している。



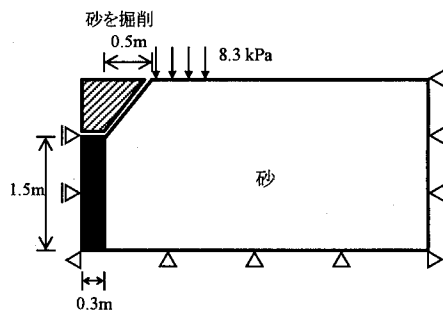
(a) 初期状態



(b) 砂を掘削



(c) タイヤチップスに置換



(d) 砂を掘削

図-5 地盤の作成方法

図-7に掘削後の砂の初期状態の分布(間隙比 e :一定、過圧密比の逆数 R 、構造の程度 R^* :一定)を示す。 R, R^* とも0から1までの範囲で、 R, R^* の値が小さい方ほど過圧密比が大きく、高位な構造を示す。過圧密比が地盤上部ほど大きくなる分布となる。図-8に高さ1.05mにおける要素(図-7の矢印部分)の側圧一定非排水条件における構成式の応答を示す。密な砂(a)は限界状態線を越えて硬化、ゆるい砂(b)は限界状態線より下側では軟化しその後には硬化する挙動である。実験は乾燥砂で行っているが、本来の施工では飽和砂であることから本研究では水-土連成計算²⁰⁾を行うこととする。ただし、実験結果と比較するために、計算結果の土圧は擁壁に作用する節点力から水圧を引いて有効土圧として算定している。また、砂とタイヤチップス、タイヤチップスと擁壁のすべりなどは考慮していない。

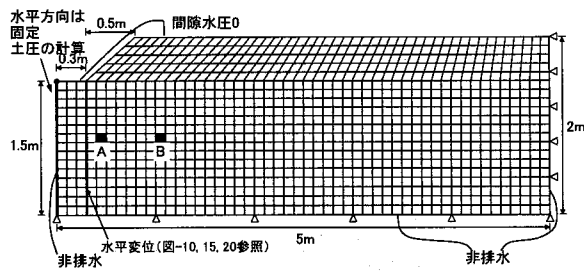


図-6 境界条件

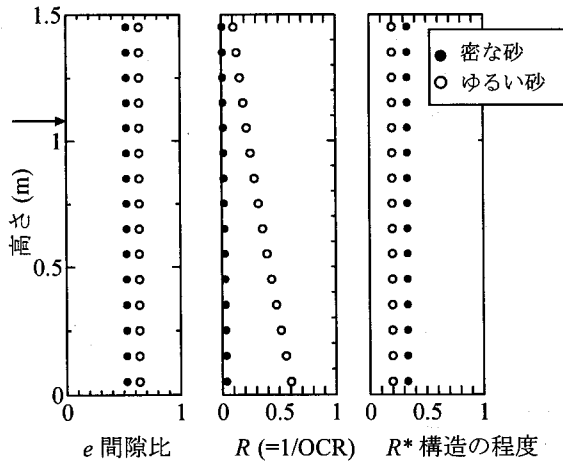
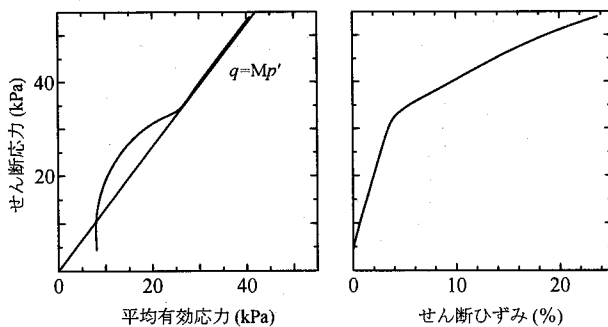
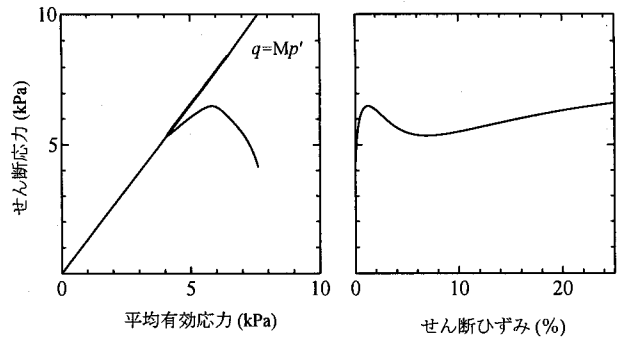


図-7 地盤の初期条件



(a) 密な砂



(b) ゆるい砂

図-8 初期地盤の非排水応答

表-1 弾塑性パラメータ

	砂	
	密な砂	ゆるい砂
[弾塑性パラメータ]		
圧縮指数 λ_c		0.05
膨潤指数 λ_r		0.017
限界状態定数 M		1.00
$\rho' = 98 \text{ kPa}$ の時の比体積 N		1.51
ポアソン比 ν		0.3
土粒子の密度 $\rho_s (\text{t/m}^3)$		2.65
[発展則パラメータ]		
正規圧密土化指数 m		0.05
構造劣化指数 a		1.0
構造劣化指数 b		1.0
構造劣化指数 c		1.0
回転硬化指数 b_r		3.0
回転硬化限界定数 m_b		0.7
[初期条件]		
間隙比 e_0	0.53	0.64
構造の程度 R^*	3.00	5.00
応力比 η_0		0.54
異方性の程度 ζ_0		0.231
透水係数 $k (\text{cm/sec})$	4.1×10^{-2}	

表-2 タイヤチップスの弾性定数パラメータ

	タイヤチップス		
	Case 1	Case 2	Case 3
[弾性定数]			
ヤング率 $E (\text{kPa})$	40	40	500
ポアソン比 ν	0.1	0.4	0.4
タイヤチップスの比重	1.15	1.15	1.15
初期のタイヤチップスの K_0	0.1	0.6	0.6

4.2 密な砂の計算結果

図-9に表-2のCase 1の計算結果を示す。白丸が砂のみで、黒丸がタイヤチップスを擁壁と裏込め砂の間に設置した場合の土圧分布である。図-4と同様に、タイヤチップスを砂と擁壁の間に設置した方が深度全体にわたって土圧の低減が見られる。図-10に図-6の太線(タイヤチップスを入れた場合は、タイヤチップスと砂との境界)のタイヤチップスを間に入れた場合と砂のみの場合の座標を描い

たものである。10cmの正方形メッシュで作成しているの
 で、初期のx座標は0.3mとなる。砂だけのものが白丸、
 タイヤチップスを入れたものが黒丸である。また、図-11(a)
 は砂だけの場合、(b)はタイヤチップスを間に入れた場合
 の変形が終了した後のせん断ひずみ分布を示す。砂だけの
 場合は図-10よりほとんど変形していない。せん断ひずみ
 分布をみると、上載荷重が加わることによって地盤の上部
 の方にせん断ひずみが発生している。一方、タイヤチップ
 スを間に入れた場合は、図-10より前方、すなわち主働側
 に砂が変形している。上部の水平変位を擁壁高さで割ると
 0.7%の変形が生じている。せん断ひずみ分布も、上載荷
 重を与えたところから深部までせん断面が発生し、タイヤ
 チップスが圧縮して土が主働側に変形していることがわ
 かる。図-12にタイヤチップスを入れた場合の変形終了時
 の構造の程度の分布を示す。なお、タイヤチップスの部分
 は表示していない(以下構造の程度の分布の図も同様)。
 数字が大きい方が高位な構造を有している。地盤の深部か
 ら構造の劣化が見られ、図-11(b)のせん断ひずみの卓越し
 ている領域とほぼ一致している。

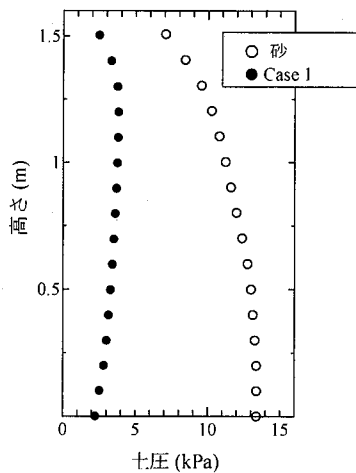


図-9 土圧の分布

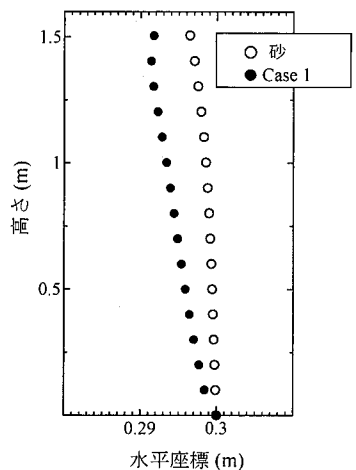
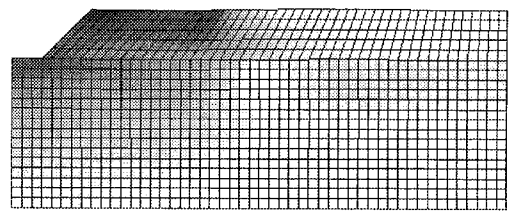
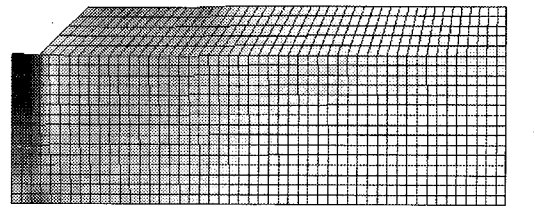


図-10 水平変位の違い



(a) 砂だけの場合



(b) タイヤチップスを入れた場合

図-11 せん断ひずみ分布(終了時)

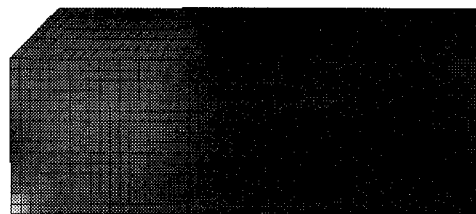
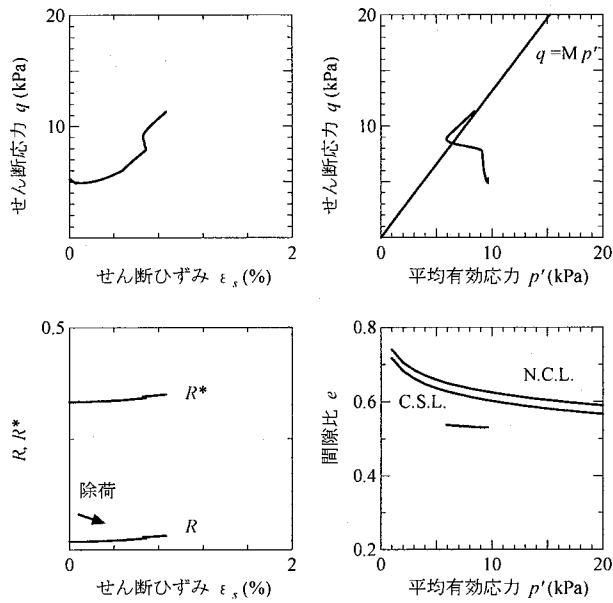
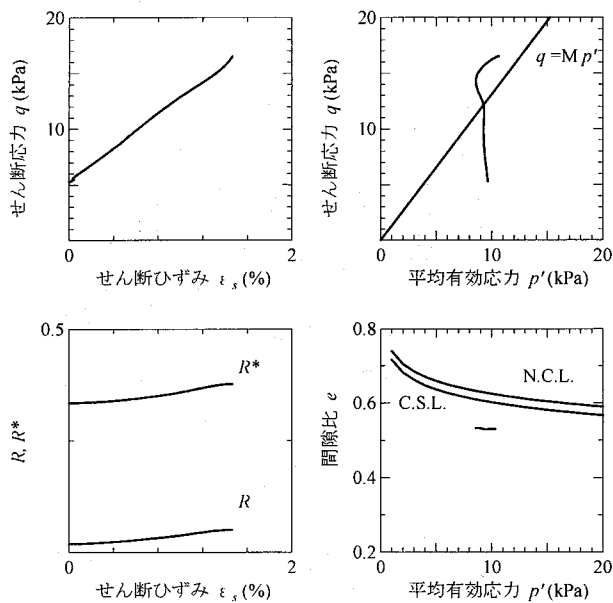


図-12 構造の程度の分布(タイヤチップスを入れた場合)

図-13に図-6のA,B点の要素のせん断応力-せん断ひずみ、平均有効応力関係、 R, R^* -せん断ひずみ、間隙比-平均有効応力関係図を示す。なお、 R, R^* の値が大きくなると正規圧密土化、構造の劣化を意味する。A要素はタイヤチップスに置き換えるときにわずかにRの減少、すなわち除荷が見られ、その後Rの増加、すなわち正規圧密土化していく。一方、B要素は、除荷は見られず、せん断ひずみが大きくなっている。A,B要素とも限界状態線を越えた塑性膨張域に状態をとるためわずかではあるが間隙比の増加、すなわち膨張が見られる。また、せん断応力はタイヤチップスへの置き換えや土要素の掘削の後に増加していき、相対的に水平応力の減少が起こるため土圧が低減すると考えられる。



A 点



B 点

図-13 土要素の挙動

図-14 はタイヤチップスの材料定数を変えた場合の土圧分布の計算結果を示す。図-15 に示すのは図-10 と同様に図-6 の太線 (タイヤチップスと砂との境界) の座標を描いたものである。それぞれ、比較のために砂のみの場合も記してある。また、図-16 にそれぞれの変形が終了した後のせん断ひずみ分布を示す。Case 2 の水平変位は、地盤上部では Case 1 の時と同じ程度出ている。土圧は全体的には砂のみの場合と比べて低減しているが、地盤の下部はあまり低

減されていない。また、せん断ひずみ分布を見ると、地盤上部のタイヤチップス部分が大きくせん断変形をしている。Case 2 のようにポアソン比が大きく弾性定数が小さいような場合は、弾性部分は変形はするが非圧縮性が高い。また、砂とタイヤチップス境界のすべりを考慮していないこともあり、タイヤチップス部分の変形を拘束している。地盤上部では、深部よりタイヤチップスの変形がしやすいため、上部の土圧の方の低減率が大きいと考えられる。また、ポアソン比が大きくなるとタイヤチップスの側圧係数も大きくなるため、全体的な土圧の低減が小さくなる。Case 3 の土圧分布は、地盤全体にわたって砂の場合とほぼ同じである。水平変位も砂の場合と変わらず、主働側に変形もしていない。せん断ひずみ分布もあまり変化はない。以上より土圧全体の低減効果があるのはタイヤチップスの弾性定数が小さくさらにポアソン比が小さいものである。

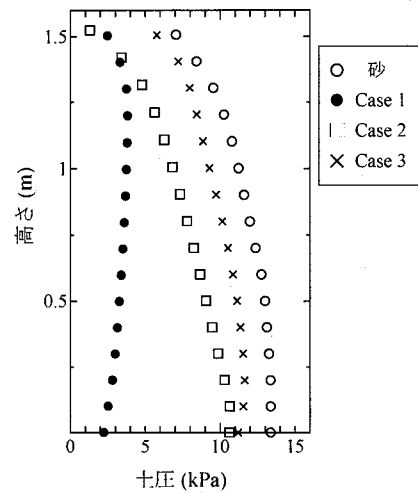


図-14 土圧の分布

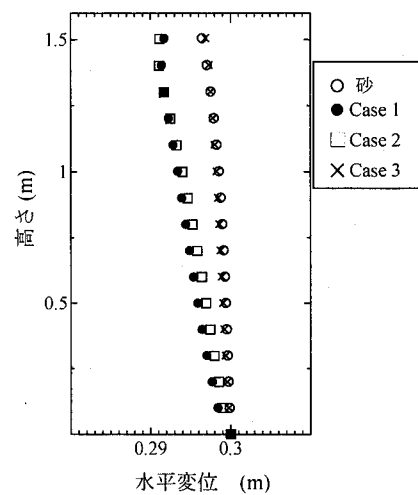
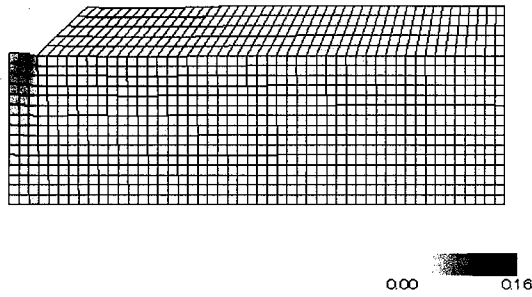
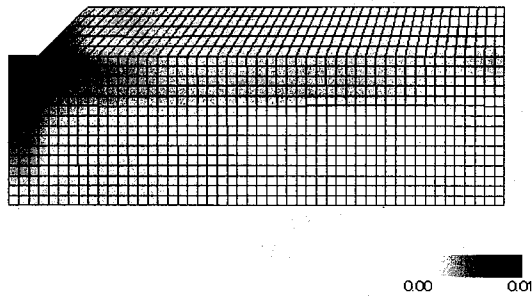


図-15 水平変位



Case 2 (ポアソン比 0.4、ヤング率 40 kPa)



Case 3 (ポアソン比 0.4、ヤング率 500 kPa)

図-16 せん断ひずみ分布

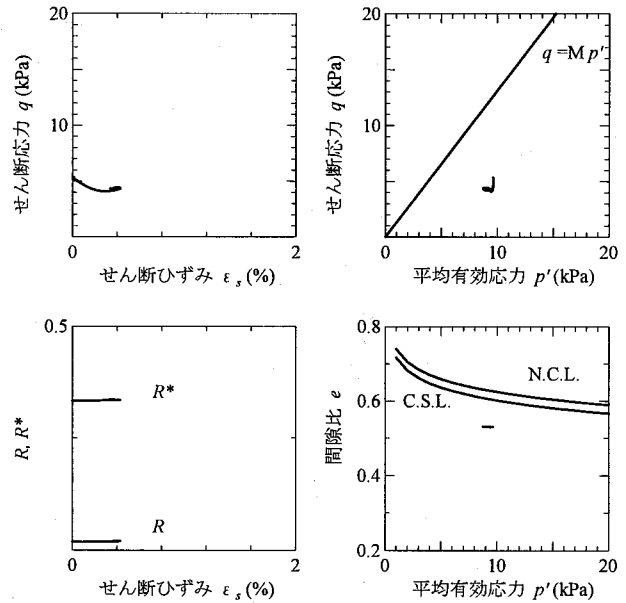


図-18 土要素の挙動 Case 3 (A点)

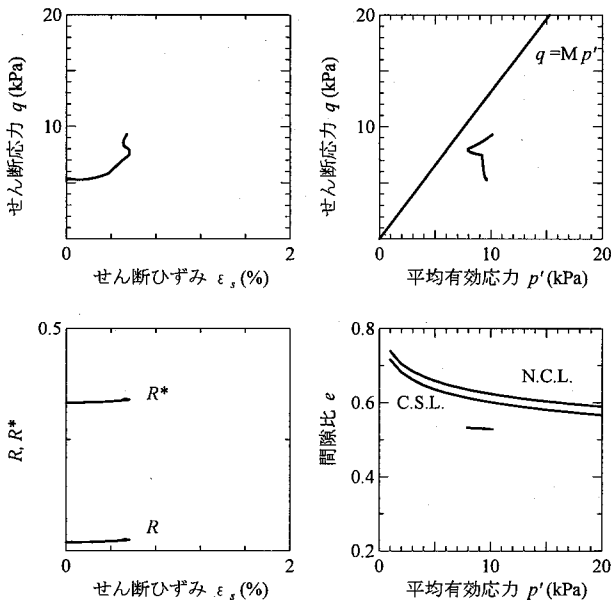


図-17 土要素の挙動 Case 2 (A点)

図-17にCase 2のA点(図-6参照)の要素の挙動を示す。タイヤチップスへの置き換え、掘削では除荷は見られず、その後のせん断応力の増加もCase 1に比べて小さい。タイヤチップスの側圧係数が大きくなったためと考えられる。図-18にCase 3のA点の要素の挙動を示す。タイヤチップスへの置き換えや掘削の影響はあまり見られない。Case 2, 3とも変形終了後のせん断応力はCase 1に比べて小さいため、土圧の低減も少ないと考えられる。

4.3 ゆるい砂の計算結果

裏込め砂の密度の違いについて調べるため、ゆるい地盤の場合の土圧の低減について調べる。タイヤチップスの材料定数はCase 1である。境界条件などは図-6と同じであるが、地盤がゆるいため、掘削後に8.3 kPaの荷重をかけると斜面が崩れ計算が困難になるため、ここでは掘削後荷重をかけない静止土圧と比較することにする。また、掘削度の荷重をかけない密な砂の結果も同時に示す。図-19に土圧分布の計算結果を示す。図-20に図-10と同様に水平変位を、変形終了時のゆるい砂のせん断ひずみ分布、構造の程度分布、および比体積分布(タイヤチップスの部分は表示していない)をそれぞれ、図-21, 22, 23に示す。さらに、図-24に図-6のA, B点の要素の挙動を示す。

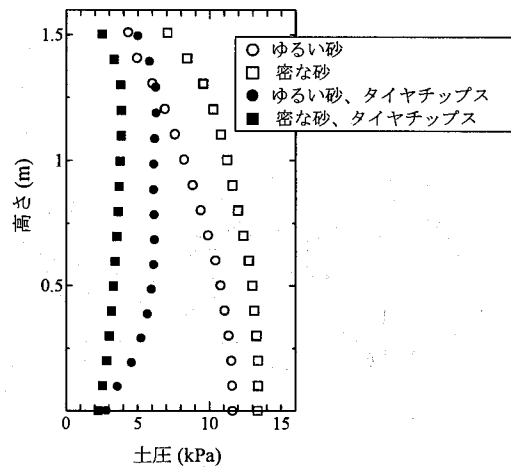


図-19 土圧の分布

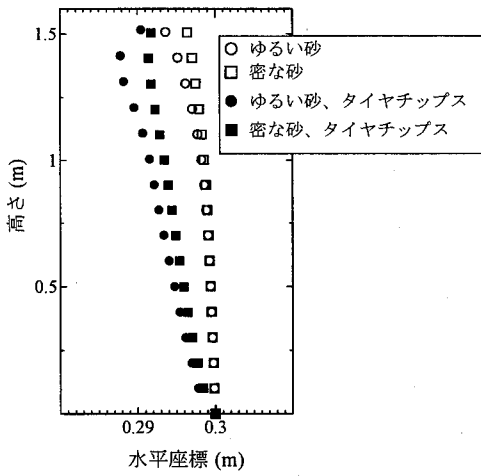
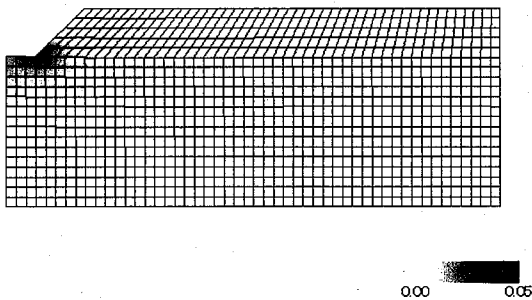
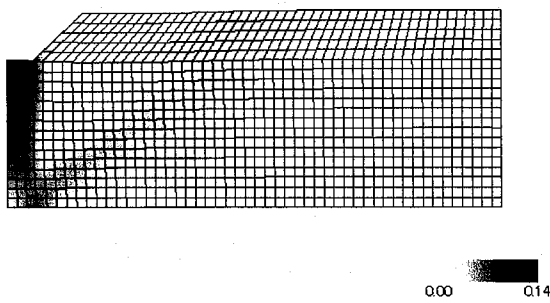


図-20 水平変位



(a) 砂だけの場合



(b) タイヤチップスを入れた場合

図-21 せん断ひずみ分布 (終了時)

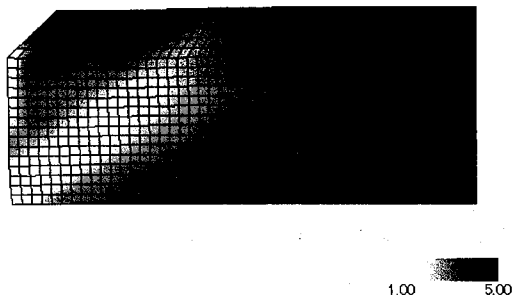


図-22 構造の程度の分布 (タイヤチップスを入れた場合)

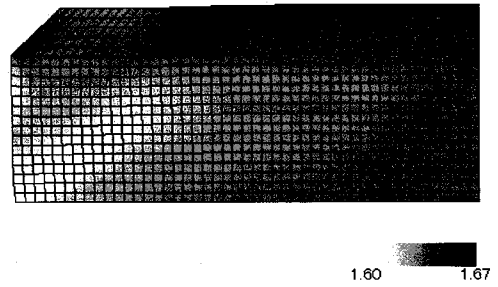
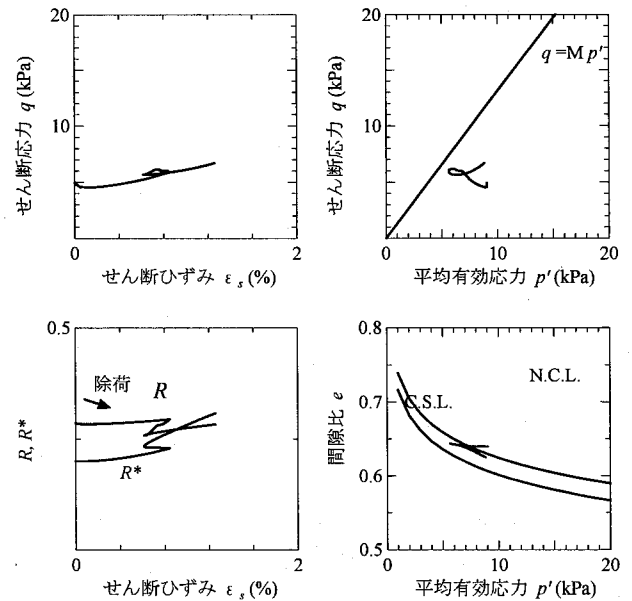
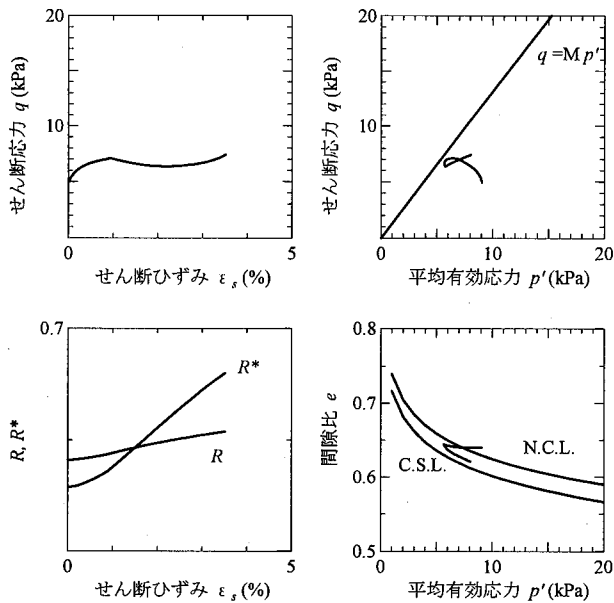


図-23 比体積分布 (タイヤチップスを入れた場合)

図-20 よりタイヤチップスを入れると、ゆるい地盤は主働側への水平変位が密な地盤より大きくなるが一方で、密な地盤の方がゆるい地盤より土圧の低減が見られる。ゆるい地盤では、せん断面で構造の喪失が大きくそれに伴って大きなせん断ひずみや比体積の減少が見られる。さらに、図-24 の A 点の挙動ではタイヤチップスの置き換え時の除荷、掘削後に発生する除荷によって R が減少する挙動が見られ、B 点の挙動は R^* の増加、すなわち構造の喪失が卓越し、圧縮が進み、せん断ひずみも大きくなっている。A、B 点とも限界状態線の下側で塑性圧縮を伴い、間隙比の減少が見られる。ゆるい砂をせん断すると初めはせん断力が増加せず、大きなひずみを与えるとせん断力が増加していく。密な地盤に比べて土圧の低減が小さいのは、せん断力の増加が密な地盤に比べて小さいことが考えられ、さらに多くのせん断ひずみが必要であると考えられる。



A 点



B 点

図-24 土要素の挙動

4.4 タイヤチップスの層厚を変えた計算結果

図-25 は表-2 の Case 1 の材料定数を用いて、密な地盤でタイヤチップスの層厚を変えた場合の土圧の分布の計算結果を示す。層厚を 10cm と 60cm に変化させた。60cm にした場合は、30cm の場合より若干土圧の低減が見られるが、相対的に土圧の低減効果はあまり変化がない。一方、10cm にすると上部の方が砂だけと同じ程度の土圧を示し、土圧低減効果が減少する。これは、圧縮できる層厚が少ないためである。この結果より、土圧の低減効果を得るためにはある程度の層厚が必要であり、それ以上ではあまり土圧の低減には影響を与えないことが示された。このような計算は実際の構造物などの性能設計にも活用できると考えられる。

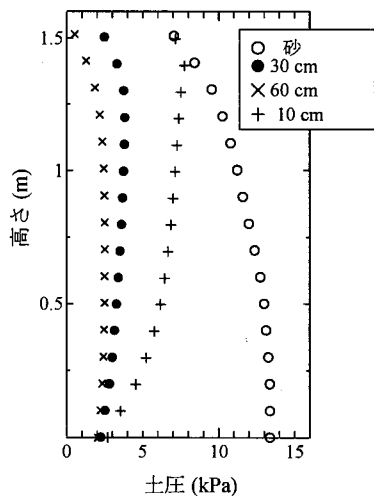


図-25 土圧分布

5. 結論

タイヤチップスなどの高圧縮性の材料を擁壁などの裏込めに設置したときの土圧の低減についての数値計算を行った。用いた砂の弾塑性構成式は、土の骨格構造(構造・過圧密・異方性)の働きを記述できる SYS カムクレイモデルである。以下の知見を得た。

- (1) タイヤチップスなどの緩衝材を 1 次的な近似として弾性体として扱うこととして、裏込めにタイヤチップスなどの高圧縮性材料を設置した場合、裏込めの砂が主働側に変形するとともに砂要素のせん断応力が増加するため土圧の低減が見られる。
- (2) 弾性体としての緩衝材は、弾性定数が小さく、しかもポアソン比が小さいものほど土圧の低減効果がある。これは、ポアソン比が小さい場合は弾性体の側圧係数が小さくなり、砂を弾性体に置き換えるときに砂が主働側に変形しやすくなる。
- (3) 密な地盤は変形するとせん断力が増加するが、ゆるい地盤はせん断力の増加が少ない。タイヤチップスの層厚の影響があると考えられる。
- (4) 砂とタイヤチップス、タイヤチップスの擁壁、砂と擁壁などの摩擦を考慮する必要もある。さらに、実際の施工過程を考慮した計算も必要であると考えられる。

本研究は静的な土圧についての検討であるが、今後は擁壁裏込めにタイヤチップスのような高圧縮性材料を裏込めに設置した時の地震時の安定性など、動的な検討も進めていく予定である。

謝辞

本研究にあたり、名古屋大学 浅岡顕教授、中野正樹教授、野田利弘助教授にはご助言をいただいた。ここに記して謝意を示す。浅沼組 高稲敏浩氏にもご助言をいただいた。さらに、(株) 東亜建設工業 御手洗義夫氏にはデータを提供していただいた。また、本研究は文部科学省科学技術研究費(基盤 A) 課題名: 廃タイヤのリサイクル材を用いた抗土圧構造物の耐震補強工法に関する研究、代表者: ハザリカ ヘマンタ、課題番号: 18206052 の援助を得た。ここに謝意を記す。

参考文献

- 1) Humprey, D.N., and Manion, W.P.: Engineering properties of tire chips for lightweight fill, Ground, Soil Improvement and Geosynthetics, ASCE, Vol.2, pp.1344-1355, 1992.
- 2) 川合弘之, 岸田隆夫, 御手洗義夫, 安原一哉, アショカ・K・カルモカル: 廃タイヤを利用した複合地盤材料の力学特性, 第 38 回地盤工学発表会講演集, pp. 691-692, 2003.

- 3) 伊藤弘毅, 御手洗義夫, 深沢健, 岸田隆夫:管理型廃棄物処分場の遮水工に使用する変形追従性材料の開発 その1 - セメント系固化処理土をベースにした遮水材料の開発 -, 第 38 回地盤工学発表会講演集, pp. 2433-2434, 2003. 7.
- 4) 大信克男, 安原一哉, 小峯秀雄, 村上哲, アショカ・K・カルモカル, 川合弘之:軽量地盤材料としてのタイヤチップスの非排水せん断特性, 第38回地盤工学発表会講演集, pp. 837-838, 2003. 7.
- 5) Ashoke K Karmokar, Hideo Takeiti, Kazuya Yasuhara, Hiroyuki Kawai: Compressed Scrap Tire Rubber Grain Blocks for Their Use as Lightweight Geomaterials, 第38回地盤工学発表会講演集, pp. 835-836, 2003. 7.
- 6) 御手洗義夫, 伊藤弘毅, 深沢健, 岸田隆夫, 堀井良介, 橋本文男:廃棄物処分場の遮水工に用いる各種リサイクル材料を利用した変形追従性遮水材料の開発, 第5回環境地盤工学シンポジウム, pp. 77-82, 2003. 7.
- 7) Ashoke K Karmokar, Hideo Takeiti, Kazuya Yasuhara, Hiroyuki Kawai: Large Scale Triaxial Tests on Segmented Scrap Tire Shreds for Their Use as Lightweight Geomaterials, 第58回土木工学年次講演会概要集, pp. 779-780, 2003. 9.
- 8) 御手洗義夫, 中村祐, 大谷順:古タイヤを破碎したゴムチップを用いた新しい地盤材料の開発に関する研究, 土木学会応用力学論文集, Vol. 9, pp. 591-601, 2006.
- 9) 御手洗義夫, 安原一哉, 菊池喜昭, アショカ・K・カルモカル:古タイヤゴムチップの地盤材料としての有効利用と環境影響について, 第6回環境地盤工学シンポジウム論文集, pp. 351-358, 2005.
- 10) Hazarika, H : A Soil-structure Interaction Model with Multiple Participating Media, 11th International Conference on International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Torino, Italy, pp. 659-666, 2005.
- 11) Hazarika, H., Sugano, T., Yasui, K., Mae, Y. and Ejiri, A. : Retaining Structure with Artificial and Recycled Geomaterials as Sandwiched Cushion, Symposium on Artificial Geomaterial, Fukuoka, pp. 77-82, 2005.
- 12) Hazarika, H., Kohama, E., Suzuki, H., and Sugano, T. : Enhancement of Earthquake Resistance of Structure using Tire Chips as Compressible Inclusion, Report of the Port and Airport Research Institute, Vol. 45, No. 1, 2006.
- 13) J. H. Lee, R. Salgado, A. Bernal and C. W. Lovell : Shredded Tires and Rubber-Sand as Lightweight Backfill, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp. 132-141, 1999.
- 14) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. : Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, 40(2), pp.99-110, 2000.
- 15) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, T., Kaneda, K. and Nakano, M. : An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), pp.47-57, 2002.
- 16) 野田利弘, 田代むつみ, 高稲敏浩, 浅岡顕:沈下低減と荷重分担に着目したパイルドラフト敷設地盤の変形解析, 土木学会論文集, No. 799, -72, pp. 37-50, 2005.
- 17) Hashiguchi, K. : Subloading surface model in unconventional plasticity, *Inter. Journal of Solids and Structures* 25, pp.917-945, 1989.
- 18) Sekiguchi, H. and Ohta H. : Induced anisotropy and time dependency in clays, *Constitutive Equations of Soils (Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Spec. Session 9)*, Tokyo, pp.229-238, 1977.
- 19) Hashiguchi, K. and Chen, Z. -P. : Elastoplastic constitutive equations of soils with the subloading surface and the rotational hardening, *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.* 22, pp.197-227, 1998.
- 20) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. : Soil-water coupled behavior of saturated clay near/ at critical state, *Soils and Foundations*, 34(1), pp.91-105, 1994.

(2007年4月12日 受付)