III－A 20

平面ひずみ水平繰返し載荷における砂の非線形応力―ひずみ履歴関係

東日本旅客鉄道　正会員　○増田　達
東京大学工学部　正会員　　龍岡　文夫
基礎地盤ｺﾝｻﾙﾀﾝﾂ 正会員　　山田　眞一

1　はじめに：掘削工事で切梁にﾌﾟﾚﾛｰﾄﾞを導入する場合，背面地盤に水平方向の載荷，除荷の繰返しがほぼ平面ひずみ状態で加わる（図１ a）。このような主働・受働土圧状態が繰返される時の土の変形特性を解明するため，原位置応力比$\sigma_h(f)/\sigma_v(f)=K_0$で異方圧密された砂の平面ひずみ繰返しせん断試験（図１ b）[1), 2)]を行い，非線形応力―ひずみ履歴の反転則を考察した。

2　反転則に関する考察：異方圧密から単調載荷試験により得られた y=sin ϕ_{mob}=（σ_v-σ_h)/(σ_v+σ_h) とせん断ひずみ x=γ=ε_v（LDT で計測）－ε_h（gap sensor で測定）の関係より，y=0 から載荷した時の関係を推定して，基本関数（骨格曲線）を求めた（図２）。これを，式（１）で表す。

$$PSC;\, y=f(x),\quad PSE;\ y=g(x) \qquad (1)$$

(a) 基本反転則：図３で反転則の概念を説明する。今，原点０から PSC 載荷（dy>0）を行い点１に来たとする。ここで，反転して（dy<0），点２，３へ向かう。x_{max}をこれまでに載荷方向を反転した点の x 座標のなかの最大値とする（点２，６においては $x_{max}=x_1$）。x_{min}は，x_{max}と０点を結んだ直線と y=g(x)の交点 C の x 座標である（点２，３においては $x_{min}=x_c$）。ただし，$x<x_{min}$となった時点で，x_{min}はその時の x となる（点８において $x_{min}=x_8$）。x_{max}も更新されて点９の $x_{max}=x_9$となる。ここで，次のような External rule 及び Internal rule を適用する。１）dy>0 の載荷の時：$x\leqq x_{min}$からの載荷は External rule；$x_{max}\geqq x\geqq x_{min}$からの載荷は Internal rule；$x\geqq x_{max}$からの載荷は y=f(x)。２）dy<0 の載荷の時：$x\geqq x_{max}$からの載荷は External rule；$x_{min}\leqq x\leqq x_{max}$からの載荷は Internal rule；$x\leqq x_{min}$からの載荷は y=g(x)。図３で曲線１→２は External rule による曲線１→C 上にあり，式（２）で表され，点 C で y=g(x)にスムースに再参加する。曲線２→４は Internal rule により，0→d 間の y=f(x)を拡大した式（３）で表され，点４（=点１）に至る。点４では，y=f(x)にスムースには再参加しない。

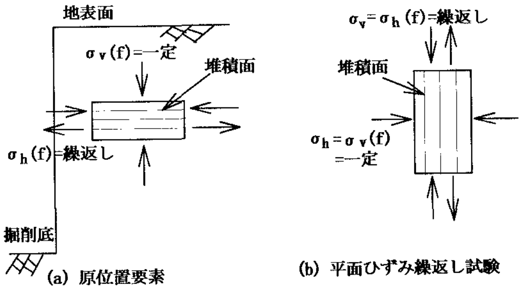
$$(y-y_1)/n_1=g((x-x_1)/n_1),\qquad n_1=(-y_c+y_1)/(-y_c)=(-x_c+x_1)/(-x_c)\qquad (2)$$
$$(y-y_2)/n_2=f((x-x_2)/n_2),\qquad n_2=(y_1-y_2)/y_d=(x_1-x_2)/x_d\qquad (3)$$

(b) 基本反転則の適用：図４（a）～（c）に繰返し載荷状態における sin ϕ_{mob}～γ 関係の実験結果を示す。図には式（１）の骨格曲線を入れている。表１には繰返し載荷状態の各履歴曲線が適用される基本反転則及びその際の式（２），（３）における n 値（図３の０点からの基本関数を用いて求めている）を示すが，1.0 より大きく一定値ではないことがわかる。$n_1=n_2=2$の時，Masing の第２ rule と同じになる。

(c) Drag rule について：基本反転則では，図３で点４は y=f(x)上にあるが，実験では点２が PSE 側（y<0 側）により載荷されるほど y=f(x)の上方に来る傾向がある。同様に図３の点 C は実験では y=g(x)の下方に来る傾向がある。この現象は，図５に示す応力振幅一定繰返し試験で伸張側に明瞭に現れている。これら現象を説明できるように，直前の反転前にたどっていた応力ひずみ曲線（y=f(x), y=g(x)含む）が現在の載荷方向に水平に移動する（引きずられる）Drag rule のようなものが必要である。図７（a）で Internal rule に従う曲線２→４’は点４で再参加する基本曲線は y=f(x)を-x 軸方向にΔx_{12}（<0）シフトした$y=f(x-\Delta x_{12})$になる。図７（b）では External rule に従う曲線８→９’が点９’でシフトされた基本曲線$y=f(x-\Delta x_{18})$に再参加する。Drag 量Δxは反転してからのひずみ増分(x_2-x_1, x_8-x_1)の増加に従って増加すると思われるが，定量的検討は今後の課題である。

(d) 改良が必要な点：図５で圧縮側（y>0）でのピーク点の x は繰返し載荷とともに増加している。この傾向は，図６に示す y の符号が反転しない繰返し試験で伸張側（y<0）でのピーク点でも見られる。これは，drag rule とは逆な現象である。これは$|\Delta x_r|=|\Delta x_u|+\Delta c$のような creep rule を導入する必要があることを示唆している（Δcは$|\Delta x_u|$が小さいほど大きくなる値）。この rule と上記 drag rule と合わせることにより，図８において，再載荷曲線２→３，４→５，６→７が基本曲線$y=f(x)$又は$y=f(x-\Delta x)$に再参加する点３，５，７が図に示すように$|\Delta x_u|$が大きくなると右から左へずれてゆくことが model 化できると思われる。

〈参考文献〉：１）増田達，龍岡文夫，山田眞一（1996）：平面ひずみ水平繰返し載荷における砂の非線形応力―ひずみ履歴，第３１回地盤工学研究発表会講演集. ２）山田眞一，増田達，佐藤剛司，山口勇，龍岡文夫（1996）：平面ひずみ圧縮・伸張試験と砂の挙動，第３１回地盤工学研究発表会講演集.



(a) 原位置要素　　(b) 平面ひずみ繰返し試験

図１　原位置要素と平面ひずみ繰返し試験の対応

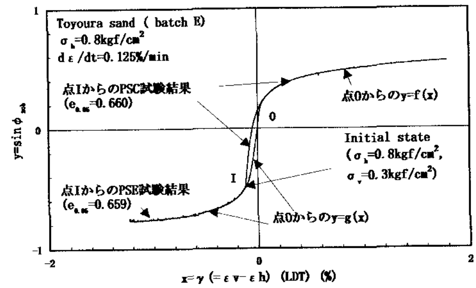


図２　単調載荷試験結果より求めた基本関数f, g

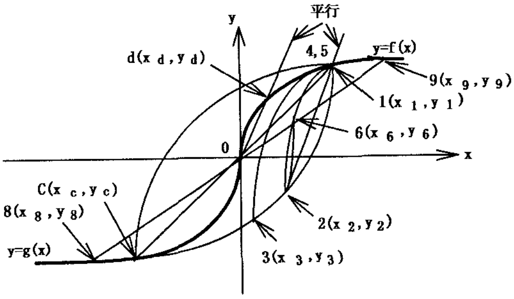


図3　反転則の説明

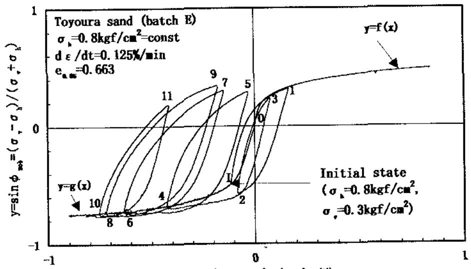


図４ (a)　繰返し載荷試験結果

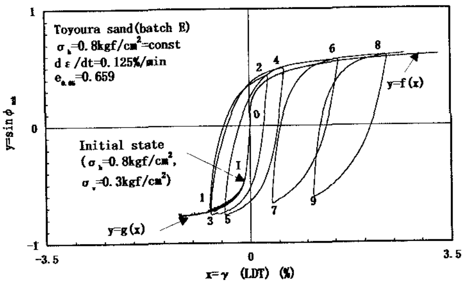


図４ (b)　繰返し載荷試験結果

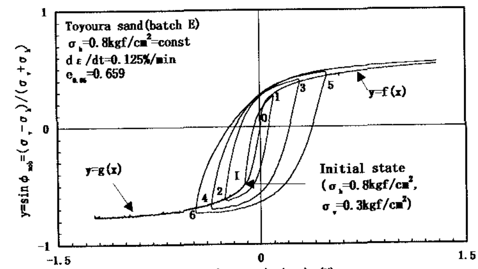


図４ (c)　繰返し載荷試験結果

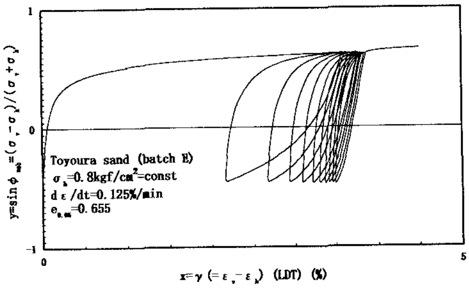


図５　繰返し載荷試験結果

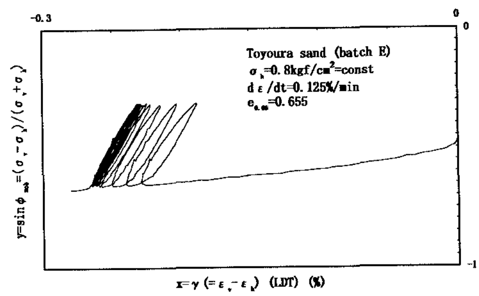
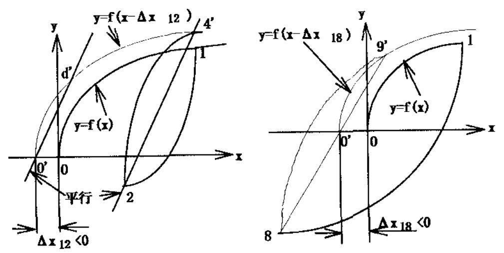


図６　繰返し載荷試験結果



(a) Internal ruleの場合　　(b) External ruleの場合

図７　Drag ruleの概念

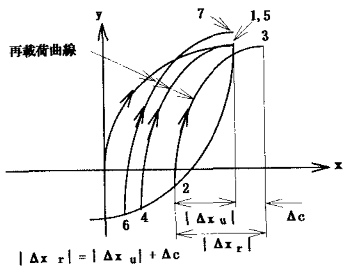


図８　Creep ruleの概念

表１　試験結果への反転則適用

図４	反転点	適用rule	n値
(a)	0→1	primary	
	1→2	External	1.49
	2→3	Internal	3.58
	3→2→4	Internal	2.11
	4→5	External	2.98
	5→4→6	Internal	1.63
	6→7	External	2.82
	7→6→8	Internal	1.63
(b)	0→1	primary	
	1→2	External	2.73
	2→3	Internal	1.59
	3→2→4	Internal	3.02
	4→5	External	1.66
(c)	0→1	primary	
	1→2	External	1.45
	2→3	External	3.21
	3→4	External	2.71
	4→5	Internal	3.16
	5→6	External	1.63
	6→5→	Internal	2.52