

交通荷重による飽和粘土地盤の変形挙動

兵動 正幸*・村田 秀一*・安原 一哉**

Behavior of Saturated Clay Ground Subjected to Traffic Loading

Masayuki HYODO, Hidekazu MURATA and Kazuya YASUHARA

Abstract

It is important to make clear the responses of saturated clays to repeated loads in relation to the low bank highway on the clay, because its settlement is conspicuous compared with that in the case of behavior subjected to static loads. In the present paper, for the comprehensive solution of this problem, experimental results by the cyclic triaxial compression test apparatus and their theoretical treatment are described. Concerning the theoretical study, a method of estimating the induced stresses of ground by traffic loads is proposed. Also, the experimental equations are build up by the results of undrained cyclic triaxial compression tests. It has become possible to estimate the behavior of clay ground subjected to traffic loading by combining the calculated stresses of ground and the experimental equations.

1. まえがき

軟弱な飽和粘土地盤上に構築された低盛土道路が、交通荷重により異常な沈下をきたすことが道路建設上大きな問題となっており、これまでも多くの調査・研究が行われてきた。現在までの研究では主として、交通荷重による地中応力の変動を表わすものとして繰返し三軸圧縮試験機により軸圧片振り変動の繰返し載荷試験が行われてきた^{1), 2)}また、最近では、交通荷重の移動の影響を考慮して主軸の回転等も含めた中空ねじり三軸試験機による方法も提案されている³⁾

しかしながら、現状においてはこれらの実験データと実際問題とを結び付け、交通荷重による地盤の変形を評価するための有効な手段は確立されていない。この目的のためには、まず交通荷重による地中応力の分布状態を正確に把握することが必要である。そのためには、現地における精度の高い計測が行われることが最も重要なことであるが、併わせて交通荷重をシミュレートした解析手法の確立も望まれる。次に、交通荷

重により生ずる地中各所で様々な大きさを持つ繰返し応力の作用に対して、応答量を決定するためのモデル化が必要である。近年、構成式の発達により、繰返し応力載荷時のバウシinger効果やメイシング則を表現できるモデルとして異方硬化モデルなどいくつかのモデル^{4)~7)}が提案されている。このようなモデルを導入し、繰返し応力に対する応答の変動を逐次追跡していくことも一つの手段と思われる。しかし、交通荷重の問題は、地震などとは異なりきわめて長期に及ぶ問題であるため、複雑なモデルでは実用上困難をきたすと思われる。一方、このような構成式によらず、生の実験データを用いて簡単な実験式を作り、実測あるいは解析により求められた地中応力に照合して応答量を求める方法も考えられる。この方法は構成式によるより汎用性には乏しいが、取り扱いにははるかに容易であり、誤差も累積しにくいと思われる。

本文は、以上のような観点に基づき、現状の要素試験で得られるデータを用いて、交通荷重を受ける軟弱地盤の挙動を解析するための手法について検討を行ったものである。

*建設工学科

**西日本工業大学土木工学科

2. 交通荷重による地中増加応力の評価

交通荷重は、静的なものでなくむしろ動的荷重と考えられる。従来、交通荷重の動的効果を表わすために、静的な大きさに衝撃係数のような割増係数が掛けられるようなこともあったが、その大きさを示す根拠は明確にはされていなかった。ここでは交通荷重をパルス荷重とみなし、有限要素法を用いて動的応答解析を試みた。交通荷重を受ける地盤内任意の質点の運動方程式は、次式のように表わされる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{R(t)\} \dots\dots(1)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックスであり、 $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$ はそれぞれ節点の加速度、速度、変位ベクトル、 $\{R(t)\}$ は外力のベクトルを意味する。

解析対象は、Fig. 1 に示す厚さ12.8mの粘土地盤上に高さ1.5m、幅16mの低盛土道路が存在する場合であり、道路盛土上に輪荷重5 tfの交通荷重が作用する場合を想定している。解析を行うためにFig. 2のような有限要素モデルを作成した。モデルは全要素数166、節点数194の長方形要素から構成されており、境界は下端部で完全拘束、左右両端部で水平方向のみが拘束されたものとした。交通荷重は、道路表面にFig. 3のような三角形のパルス荷重を鉛直下方に加えるものとし、節点に作用する荷重を節点質量で割り、節点加速度として式(1)に代入した。パルス荷重の作用時間 ΔT は、車両の速度により規定されるものであるが、ここでは、 $\Delta T=0.4, 0.8, 1.2\text{sec}$ の3ケースについて解析した。また、比較のために、交通荷重を静的な荷重とみなし、Fig. 2のFEMモデルを用いて、輪荷重5 tfを静的に作用させた場合についての解析も行った。解析に用いた盛土及び地盤の物性値はTable 1 に示している。これ

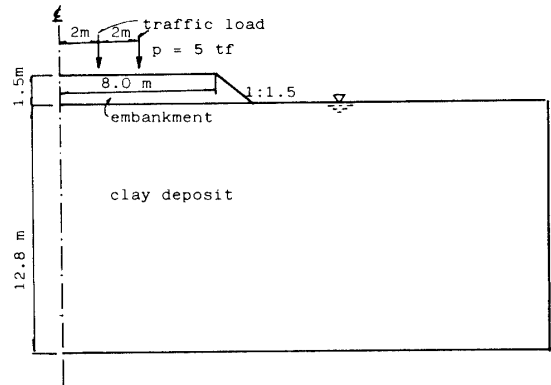


Fig. 1 Section of embankment and clay deposit analyzed.

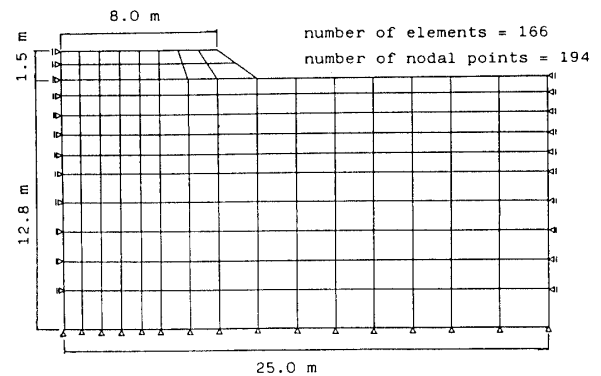


Fig. 2 Finite element model of embankment-ground system.

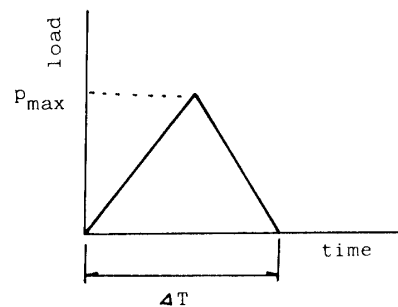


Fig. 3 Wave form of traffic load used in the analysis.

$$V_s = 100 N^{1/3}, G_0 = \rho V_s^2 \dots\dots(2)$$

ここに、 V_s は、せん断波速度を表わす。

動的解析は、パルス一波の作用に対して行い、等価線形解析法により剛性率及び減衰定数のひずみとの対応を満足させた。これらの定数のひずみ依存性を表わすデータとしては、Seedらの実験結果⁹⁾を用い、盛

Table 1 Material properties for the analysis

Material	E (static) (kN/m ²)	ν	G_0 (dynamic) (kN/m ²)	ρ (t/m ³)	N value
embankment	10000	0.35	76000	1.95	15
clay ground	7000	0.45	46000	1.58	5

らのうち、静的変形係数Eは三軸圧縮試験で求めた E_{s0} の値を、動的初期せん断剛性率 G_0 は、Table 1 に示されるN値と密度 ρ を用いて次式⁸⁾により評価した。

土、粘土地盤共に適用した。解析結果は、継続時間 ΔT の異なる三種のパルス荷重に対して顕著な違いは認められなかったので、 $\Delta T=0.8\text{sec}$ のみの結果を挙げる。

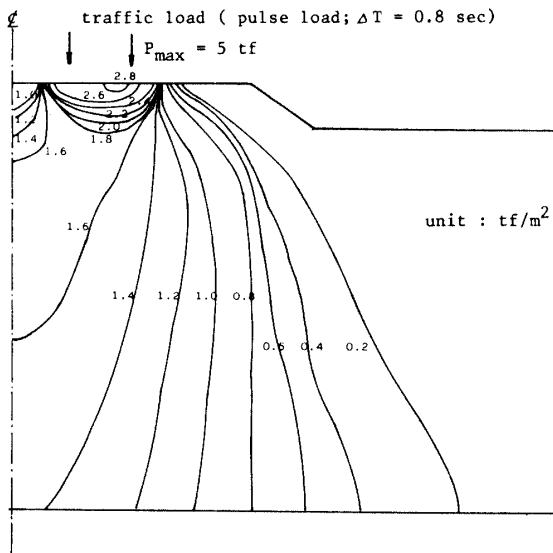


Fig. 4 Distribution of vertical stress in the ground by the dynamic analysis.

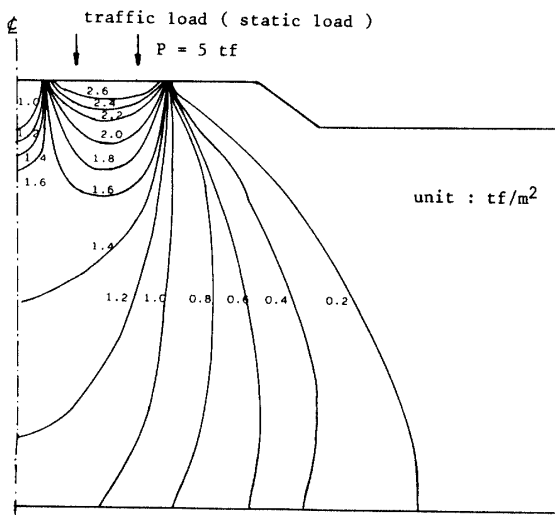


Fig. 5 Distribution of vertical stress in the ground by the static analysis.

Fig. 4 は、パルス荷重による地中の鉛直応力の増分 $\Delta\sigma_v$ の分布を示すものである。荷重周辺に高い応力が集中し、土中深部及び側方に分散していく様子が現わ

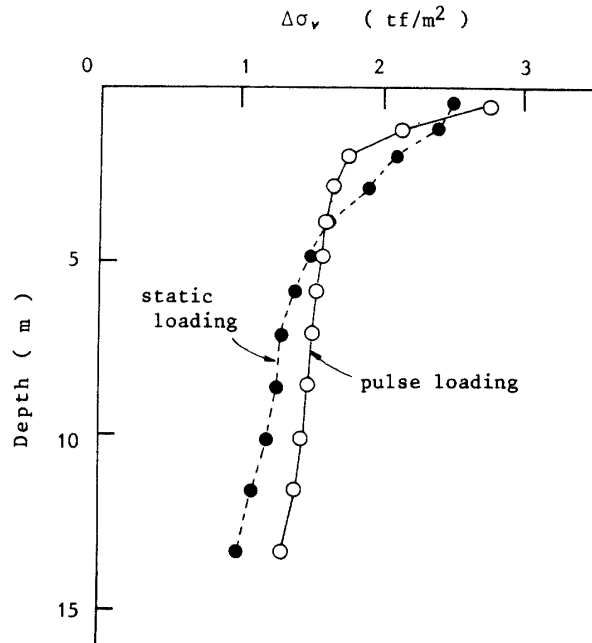


Fig. 6 Distribution of vertical stress with depth under the wheel of traffic.

れている。また、Fig. 5 に静的解析で求められた $\Delta\sigma_v$ のコンターを示す。Fig. 4, 5 の両図を比較してみると、応力分布の傾向は良く似ているが、動的解析結果の方が、より深部まで、より広域に大きな応力が伝わっているようである。Fig. 6 は、向って右側の輪荷重直下方向に応力値を拾いプロットしたものである。静的結果とパルス応答解析結果を比較してみると、盛土内部では静的結果の方が大きく現われているが、基礎地盤内では逆に動的な結果の方が2割程度大きな値となっている。このように、交通荷重をパルスとみなして行った動的解析結果は静的解析結果より大きな応力を得ることが判明し、動的解析による方が、地盤の変形量などの評価に厳しい条件を与えることができる。

3. 飽和粘土の繰返し三軸圧縮試験及び実験式の作成

乱した有明粘土を再圧密し、非排水繰返し三軸圧縮試験が行われた。使用した粘土の物性は、 $G_s=2.65$, $W_L=123\%$, $I_p=69$, $C_c=0.700$, $C_s=0.163$, $\phi'=40^\circ$ である。実験ケースは、Table 2 に示される通りで、初期圧密圧 $\sigma_c=100, 200, 300\text{kPa}$ の三種類の状態に対して、側圧一定の下、軸圧を片振りで圧縮側に繰返し載荷する。変動軸圧 $\Delta\sigma_r$ は Table の中に示すように種々の値がとられている。

Table 2 Summary of test programme

Test No.	σ_c (kPa)	w_i (%)	e_c	$\Delta\sigma_r$ (kPa)
A-1	200	95.6	2.021	40
A-2	200	93.3	1.982	80
A-3	200	90.6	1.953	100
A-4	200	93.8	1.960	120
A-5	200	90.5	1.871	140
A-15	100	93.8	2.086	35.6
A-16	100	94.5	2.071	64.1
A-17	100	93.3	2.084	85.5
A-18	300	94.1	1.822	76.4
A-19	300	95.6	1.861	137

非排水繰返し三軸圧縮試験において実測される量は軸ひずみと間隙水圧であり、これらは同一の試験条件においては、繰返し軸応力 $\Delta\sigma_r$ と初期圧密圧 σ_c ので表わされる応力比 $\Delta\sigma_r/\sigma_c$ と繰返し回数により表わせるようである。そこで、軸ひずみと間隙水圧をいずれも応力比 $\Delta\sigma_r/\sigma_c$ と繰返し回数 N の関数として実験データの重回帰分析を行い、次式のような指数関数表示の実験式を得た。

$$\epsilon_a = 0.114 (\log_{10} N)^{1.518} (\Delta\sigma_r / \sigma_c)^{1.621} \dots\dots (3)$$

(重相関係数 $R=0.939$)

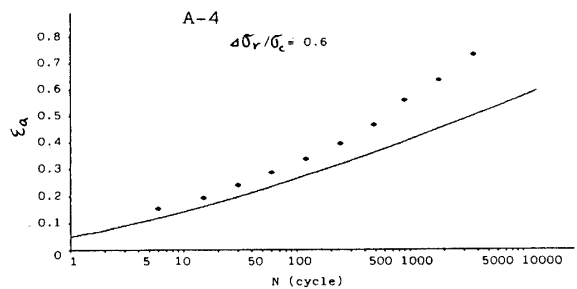
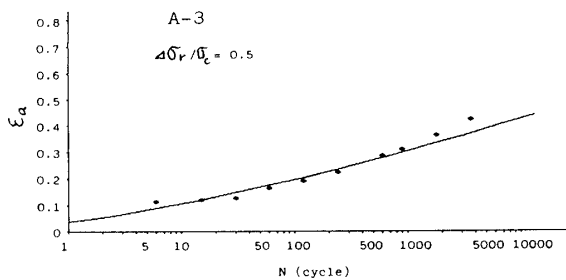
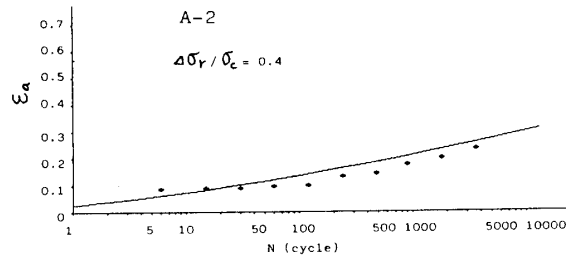
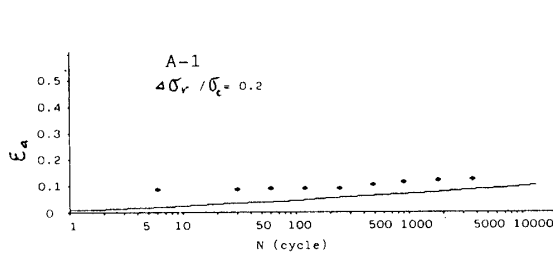
$$u/\sigma_c = 0.064 (\log_{10} N)^{1.535} (\Delta\sigma_r / \sigma_c)^{1.418} \dots\dots (4)$$

(重相関係数 $R=0.935$)

Fig. 7 に軸ひずみ・繰返し回数関係、Fig. 8 に間隙水圧比・繰返し回数関係をそれぞれ示す。Table 2 に挙げた実験ケースすべてについて実験結果 (黒丸) と回帰曲線 (実線) を示している。これらの回帰式の特徴について述べると、軸ひずみ、間隙水圧共に、応力比 $\Delta\sigma_r/\sigma_c$ の変化に対しては比較的敏感に反応するが、繰返し回数に対しては繰返しの初期において大きく変化するものの回数が増すにしたがって増加率が低くなり、微増傾向となっていく。したがって、これらの式形は、繰返しが長期に及ぶ場合の現象を表現するものとして有効と思われる。Fig. 7, 8 においては、本実験式は比較的良く実験結果を表現していると言えるようである。

4. 異方硬化モデルによる繰返し三軸圧縮試験結果の表現^{10), 11)}

Mrozらが提案したINSモデル (無数面モデル)¹²⁾ を用いて前節の繰返し三軸圧縮試験結果をシミュレートした。INSモデルには 8 個のパラメータがあり、これを与えてやる必要がある。ここではTable 2 に示した Test No. A-3 の試験結果をシミュレートしてみた。



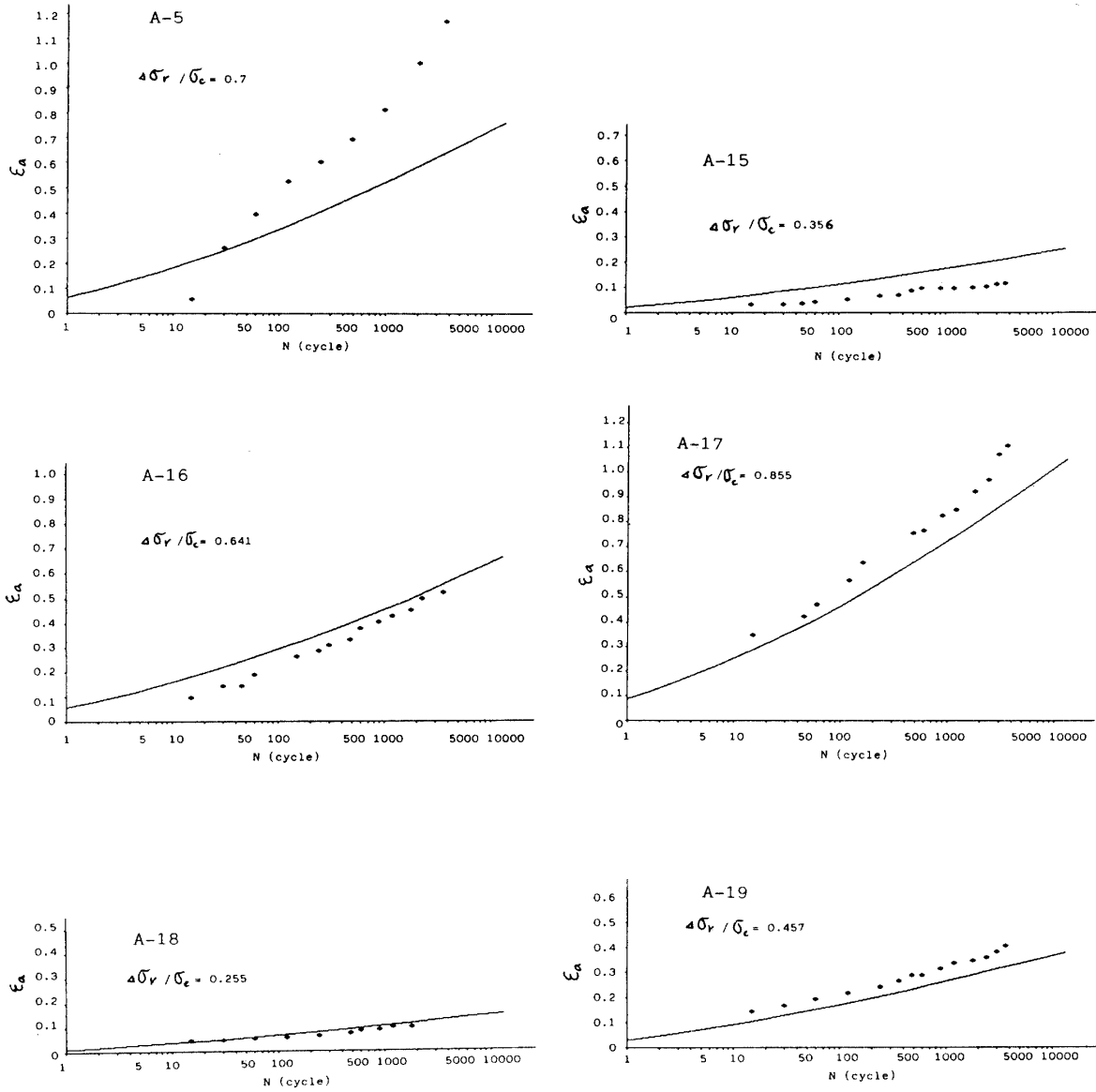


Fig. 7 Relationship between axial strain and number of cycles obtained by cyclic triaxial test.

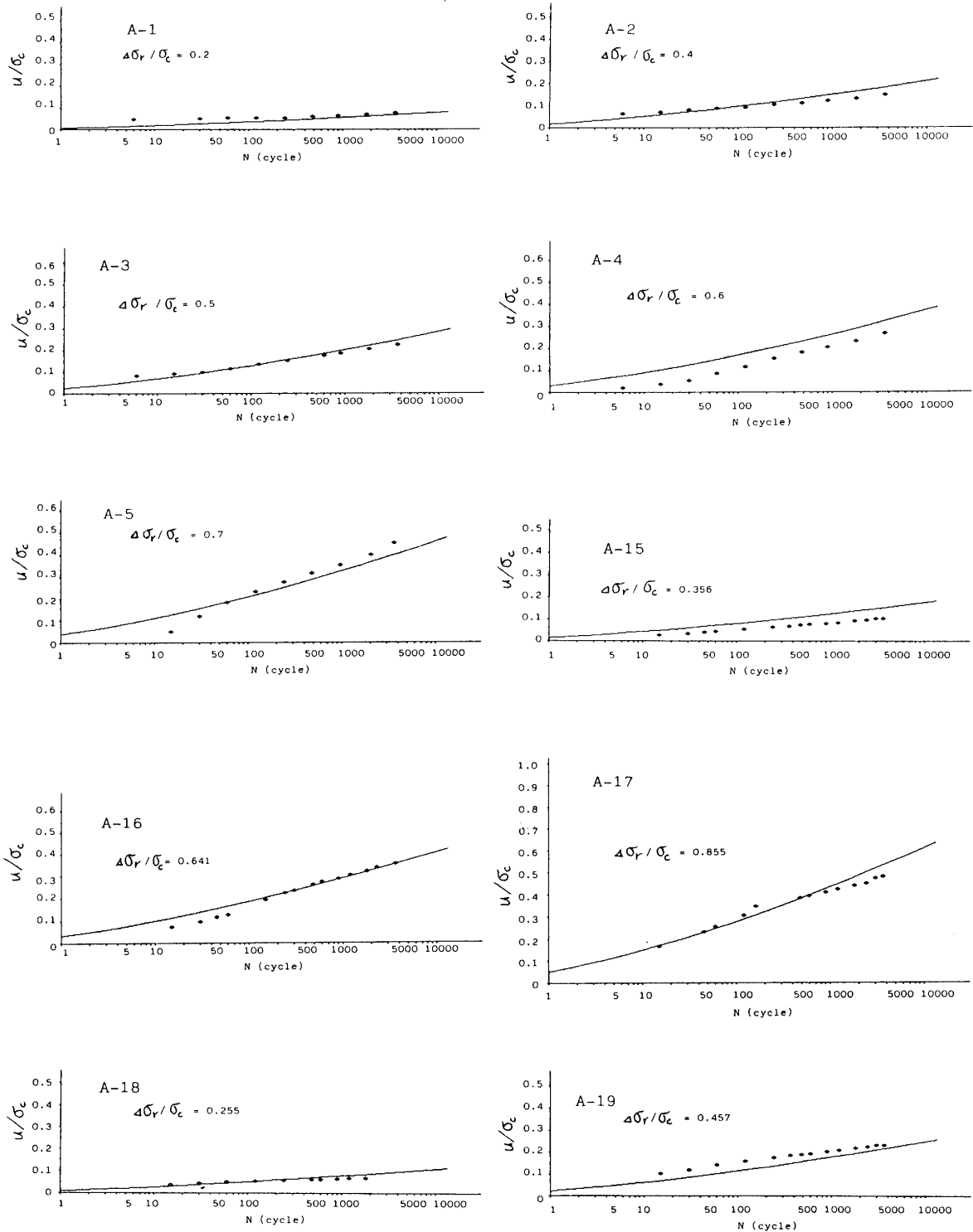


Fig. 8 Relationship between pore water pressure ratio and number of cycles obtained by cyclic triaxial test.

試験条件は、 $\sigma_c=200\text{kPa}$ で圧密された後に繰返し軸応力 $\Delta\sigma_r=100\text{kPa}$ が加えられるということで、間隙水圧と軸ひずみが得られている。ここでは試行錯誤に実験結果に最も近い挙動となるようパラメータを決定した。

Fig. 9, 10は、せん断ひずみと間隙水圧の繰返し回数増加に対する累積の状況を示すものである。決定された8個のパラメータ $\lambda, \kappa, G, K_{p0}, \gamma_0, \tau, \xi, \eta$ の値は図中に示されている。 $\eta=0.1\sim 1.0$ 程度とときに最も実験結果に近づくようである。実験結果と解析結果の近似度は図に示す通りであり、必ずしも一致しているとは言えない感がある。また、異方硬化モデルは、一般応力の適用に対して、応力空間における応力点の位置のみならず、その作用方法による硬化の違いを表現する必要があることなど、極めて複雑な解析となる。当モデルには、交通荷重の問題のように長期に及ぶ繰返しの問題に対しては不向きな面が感じられる。

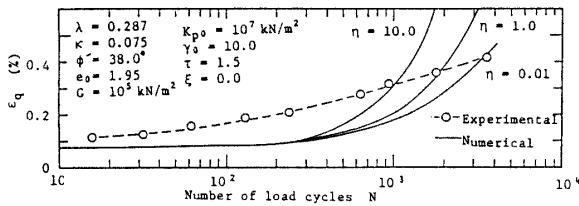


Fig. 9 Relationship between shear strain and number of cycles calculated by INS model.

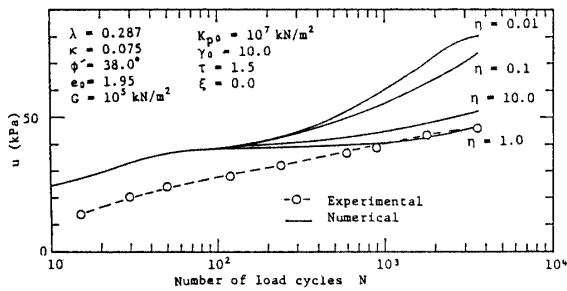


Fig.10 Relationship between pore water pressure and number of cycles calculated by INS model.

5. 交通荷重による地中のひずみ及び間隙水圧の評価

2. で解析した交通荷重による地中の増加応力を用いて、3. で得られた実験式と組み合わせることにより地盤内のひずみ及び間隙水圧の量を算定してみる。

地中増加応力としては交通荷重をパルス荷重としてとらえたパルス応答解析結果を用いる。地中応力は、先に示したFig. 4のように、盛土内では大きく現われるが基礎地盤内ではかなり減少しており、盛土下部の地盤内では大体 $\Delta\sigma_v=1.0\sim 1.6\text{tf/m}^2$ 程度と考えておけばよいようである。この解析結果を繰返し三軸圧縮試験結果と対応させる場合、本来、最大主応力を対応させるべきであるが、簡単のために土被り圧の増分ということで鉛直応力の増分 $\Delta\sigma_v$ を用いて試算を行った。この $\Delta\sigma_v$ を初期鉛直応力 σ_v で割り応力比 $\Delta\sigma_v/\sigma_v$ で表わしたところ、盛土内では $\Delta\sigma_v/\sigma_v=3.9$ にも及ぶ大きな値が現われたが、粘土層内では盛土との境界部で0.6程度となり、これも深くなるほど減少して行き、荷重直下の粘土層最下部で0.15程度となった。

各要素で計算された応力比 $\Delta\sigma_v/\sigma_v$ を先の実験式(3)、(4)中の $\Delta\sigma_r/\sigma_d$ に代入し地中各要素の鉛直ひずみ及び間隙水圧を算定した。繰返し回数としては、任意の回数が設定できるが、ここでは実験における最終繰返し回数 $N=3600$ のときの量を求めた。Fig.11に鉛直ひずみ分布をFig.12に間隙水圧の分布をそれぞれ示す。これらの図より、鉛直ひずみ、間隙水圧共に盛土と境界付近に大きな値が集中して生じていることが認められる。また、Fig.11より粘土地盤の沈下量を求めると、数cmのオーダーで沈下量が求められ、現実の沈下量に比べるとまだかなり小さい。さらに長期に渡る繰返し回数に対する解析が必要と思われる。

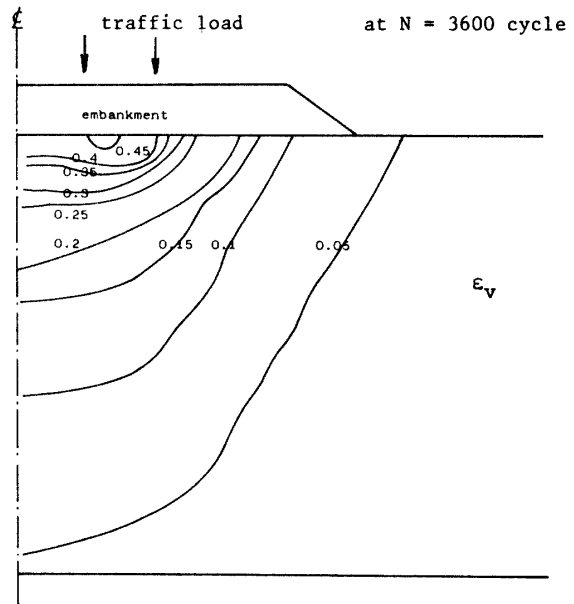


Fig.11 Distribution of vertical strain in the ground induced by traffic load.

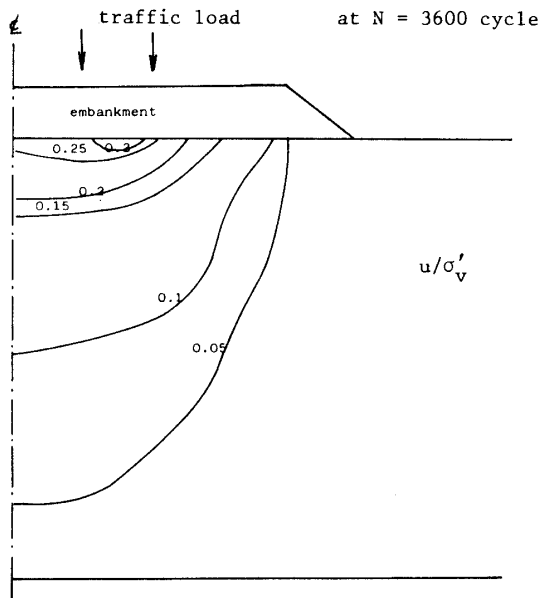


Fig.12 Distribution of pore water pressure ratio in the ground induced by traffic load.

6. 結 び

交通荷重を動的なパルス荷重とみなして、地中増加応力を計算し、飽和粘土の繰返し三軸圧縮試験結果と結合して、交通荷重作用下の地盤の挙動の評価を行った。まず、パルス応答解析により地中増加応力の評価を行ったところ、静的解析結果より基礎地盤内で約2割程度大きい値が得られた。次に、繰返し三軸圧縮試験結果を地中増加応力と対応させることを容易にするために、実験式の作成を行った。軸ひずみ及び間隙水圧を応力比と繰返し回数の関数形とし、指数関数として回帰したところ、かなりの相関係数で回帰が出来た。最後に、地中増加応力の値を回帰式に代入することにより、地中の鉛直ひずみと間隙水圧を求めた。

参 考 文 献

1) Yamanouchi, T. and Yasuhara, K. (1977): Deformation of saturated soft clay under repeated loading, International Symposium on Soft Clay, pp. 165—179.

- 2) Yasuhara, K. and Hirao, K. (1980): A simplified strain-time relation for soils subjected to repeated loads, International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, pp.791—800.
- 3) 石原研而・金谷守・高橋守男・上原秀幹 (1983) : 移動荷重を対象とした主応力方向回転を含む砂の繰返し試験, 第18回土質工学研究発表会, pp.355—356
- 4) Prevost, J.H. (1977) : Mathematical Modeling of monotonic and cyclic undrained clay behavior, International Journal Numerical and Analytical Method in Geomechanics, Vol. 1, No. 2, pp.195—216.
- 5) Dafalias, Y.F. and Herrmann, L.R. (1980) : A bounding surface soil plasticity model, International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, pp. 335—345.
- 6) Ghaboussi, J. and Momen, H. (1982) : Modelling and analysis of cyclic behavior of sands, Soil Mechanics - Transient and Cyclic Loads, John Wiley & Sons Ltd, pp.313—342.
- 7) Mroz, Z., Norris, V.A. and Zienkiewicz, O.C. (1981) : An anisotropic critical state model for soils subjected to cyclic loading, Geotechnique, Vol.31, No. 4, pp.451—469.
- 8) 日本道路協会 (1980) : 道路橋示方書・同解説V. 耐震設計編, pp.16—22.
- 9) Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970) : Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, Report of Earthquake Engineering Research Center, University of California-Berkeley, Report No. EERC 70—10.
- 10) 兵動正幸・落合英俊・釜瀬敏秀・益田宗則 (1985) : 異方硬化モデルによる飽和粘土の繰返しせん断時における挙動解析, 第20回土質工学研究発表会, pp.663—664.
- 11) 落合英俊・兵動正幸・釜瀬敏秀・益田宗則 (1985) : 初期応力状態を考慮した粘土地盤の動的非線形解析, 九州大学工学集報, Vol. 58, No. 4, pp.507—514.

(昭和61年4月15日受理)