

# 交通荷重を受ける飽和砂質地盤の地中応力の評価

兵動 正幸\*・村田 秀一\*・安原 一哉\*\*

## Evaluation of Stresses in Saturated Sand Deposit Subjected to Traffic Loads

Masayuki HYODO, Hidekazu MURATA and Kazuya YASUHARA

### Abstract

The present study aims at surveying earth pressures induced by traffic loads in soft soil deposits and developing an analytical method for evaluating the stresses due to such loads. Vehicle running tests were performed on the low embankment which was under construction on saturated alluvial sand deposit with very low standard penetration value. Earth pressures were measured at some points in the fill and base ground during the vehicle-running tests of various running speed. The observed distribution of vertical pressure was compared with the calculated values by both Boussinesq's equation and dynamic finite element method which has been developed by the authors. As the result, it was understood that the measured vertical pressures were several times as large as those of the results of Boussinesq's equation while the calculated results by the present dynamic finite element analysis agreed well with the observed ones.

### 1. まえがき

N値の低い飽和砂質地盤上に道路用低盛土が築造されることが計画された。現場の基礎地盤がゆるい飽和した砂質地盤であり、N値がほとんど0に近いことから盛土による上載荷重をできるだけ少なくするために低盛土道路の建設が行われることになった。しかし、盛土高さが低いので、重車両の走行に伴い振動荷重が盛土材を介して地盤中に伝播し、基礎地盤の破壊や残留変形等を伴うことが懸念された。

このような低盛土道路の施工例は、軟弱な粘土地盤においてよく見られるが、これまでにも交通荷重により盛土下及び周辺地盤の沈下や変形をきたした多くの事例や種々の対策が行われた例<sup>1)~4)</sup>が報告されている。しかしながら現在までのところ、交通荷重の性質やそ

れによる地盤内の応力状態及び地盤挙動のメカニズム等、いずれも十分に解明されていない状況にある。

この問題の解明のためには、まず交通荷重により発生する地盤内応力を正しく評価する必要があると考えられる。そこで今回、施工中の道路盛土及び基礎地盤中に土圧計を埋設し、トラックの走行による車両走行試験を実施して地盤中の応力測定を行った。また、走行車両による外力を動的荷重とみなしてFEM動的応答解析を行い、地中各要素の応力を求めると共に、実測土圧との比較を行うことにより有効な解析手法の確立をはかった。

### 2. 現地走行試験

#### 2.1 試験現場及び試験条件

走行試験を行った現地の地盤及び道路盛土の断面はFig. 1に示される通りである。現地地盤は河川堆積による砂質土が主体であり、地下水位が高く地表面まで飽和状態にある。地表面より深さ3 mまでが砂層で、そ

\*建設工学科

\*\*西日本工業大学土木工学科

の下に3m厚さのシルト質砂層、それ以深は粘土層が堆積している。砂層及びシルト質砂層のN値は、Fig. 2のように0に近い部分もあり極めて低い。また、盛土は高さ2.3mであり、材質はまき土である。盛土及び基礎地盤の物性値はFig. 1中に示されており、粒径加積曲線はFig. 3に描かれている。

このような道路盛土の未舗装の段階で、想定される交通車両による走行試験を実施して、盛土及び地盤内の土圧の計測を行った。土圧計を、Fig. 4に示すように盛土内、原地盤面及び基礎地盤中に9個埋設し、10tfダンプトラックを積載状態で走行させた。トラックは、前輪、中輪、後輪を有し図の矢印の方向に進行する。トラックの輪荷重を軸重計で測定したところ、総重量26,400kgf、前輪2,825kgf、中輪5,250kgf、後輪5,125kgfであった。

土圧の測定は、下記のそれぞれの条件に対して行った。

1) 車両静止時

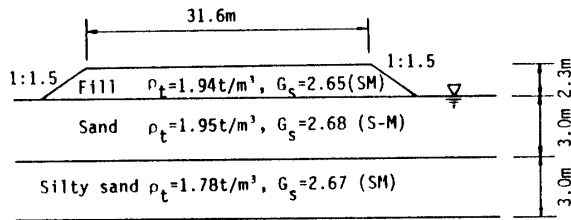


Fig. 1 Cross section of road-embankment and base ground in which the vehicle-running tests were performed.

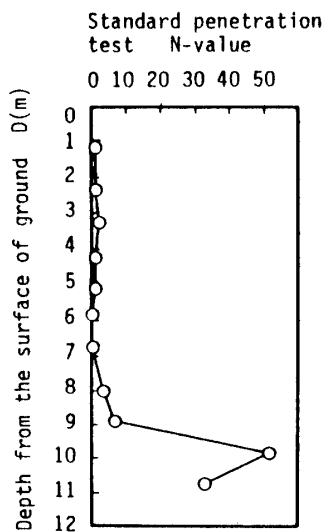


Fig. 2 Standard penetration test's N-value of the ground.

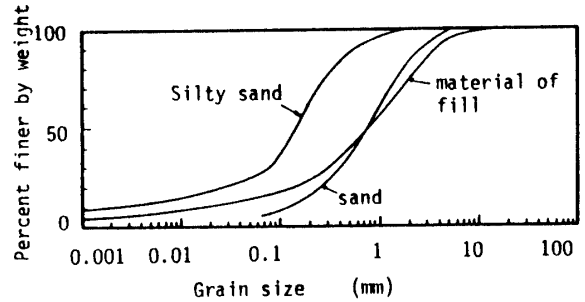


Fig. 3 Grain-size distribution curve.

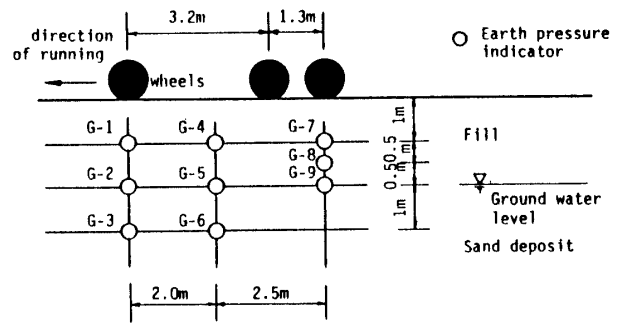


Fig. 4 Points of earth pressure indicator buried in the ground.

2) 車両走行速度を10km/h ~ 35km/hまでの4段階で設定した場合の車両走行時

3) 急ブレーキ作動時

4) 路面に段差をおきバウンド状態とした時

なお、1)の静荷重の測定にあたっては、Fig. 4における最前列と最後列の土圧計の真上にそれぞれ前輪及び後輪が来る位置に車両を停止して計測を行った。また、4)のバウンド状態については、車両をゆっくり走行させ1)と同じ位置において路面に敷いた10cmの段差から車輪を落下させ、地盤に衝撃力を与える方法をとった。

走行車両による土圧の測定位置についてFig. 5の3ケースを設定した。すなわち、各ケースで走行荷重に対する測定位置が異なることになり、それぞれ車輪直下(ケース1)、左右両輪中間部下(ケース2)、車輪外側2m地点直下(ケース3)について測定を行った。

2.2 試験結果

車両走行試験において、土圧は時系列で測定された。Fig. 6に埋設された土圧計により測定されたいくつかの土圧の時系列における波形を掲げる。それぞれ、普通走行時、急ブレーキ作動時、そして段差によるバウンド状態の3種類の代表的波形が描かれている。図はすべて、上から順に上部、中部、下部の土圧計による

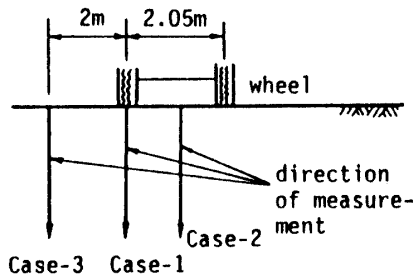


Fig. 5 Measured directions of earth pressure in the vehicle-running test.

測定結果となっている。

まず、普通走行時においては波形は比較的なめらかで3つのピークが表れており、車両の走行速度から計算してそれぞれ、前輪、中輪、後輪の通過に対応しているものと考えられる。この傾向は浅い地点の土圧計によるものほど顕著であり、深くなるにつれ各ピークの形が不鮮明になり三角形の山状に近くなっている。次に、急ブレーキ作動時の波形は、最初に大きなピークが表れた後、やや小さめでのこぎりの刃のような形の波形が続き、そしてまた最後に最初とほぼ同じ大きさのピークが表れる形となっている。深さを増しても大きさが異なるだけで傾向は同じである。段差を敷いた場合には波形に小刻みな振動成分が混ざり、全体的には三角形状をしている。

次に、これら時系列における波形のピーク値をとらえ、それぞれの埋設位置における土圧としてまとめたものが Fig. 7, 8 である。Fig. 7 は、普通走行時と静止時における土圧の分布を示すものである。走行速度 10, 20, 30, 35km/h の 4 種類による結果を掲げると共に、車両静止時における土圧についてもプロットを行った。また、車両静止位置における Boussinesq 解による結果も図中に記した。図には、土圧計 G 1 ~ G 9 によるそれぞれの測定結果とその位置における計算結果が示されている。また、車両の載荷位置の違いについてケース 1 (車両直下)、ケース 2 (両車輪間中央下)、ケース 3 (車輪外側 2 m 側方下) の結果が Fig. 7(a), (b), (c) にそれぞれ示されている。

Fig. 7(a), (b) の結果、すなわちケース 1, 2 においては、車両走行時における土圧が、静止時のものより数倍大きなものとなって表れている。しかしながら、車両走行速度の違いに対しては土圧にさほどの違いが生じておらず、走行速度の増加に対して幾分増加の傾向にあるが、さほど顕著ではない。また、これらの結果を Boussinesq 解による結果と比較してみると、Boussinesq 解は車両静止時の土圧を比較的良く近似してい

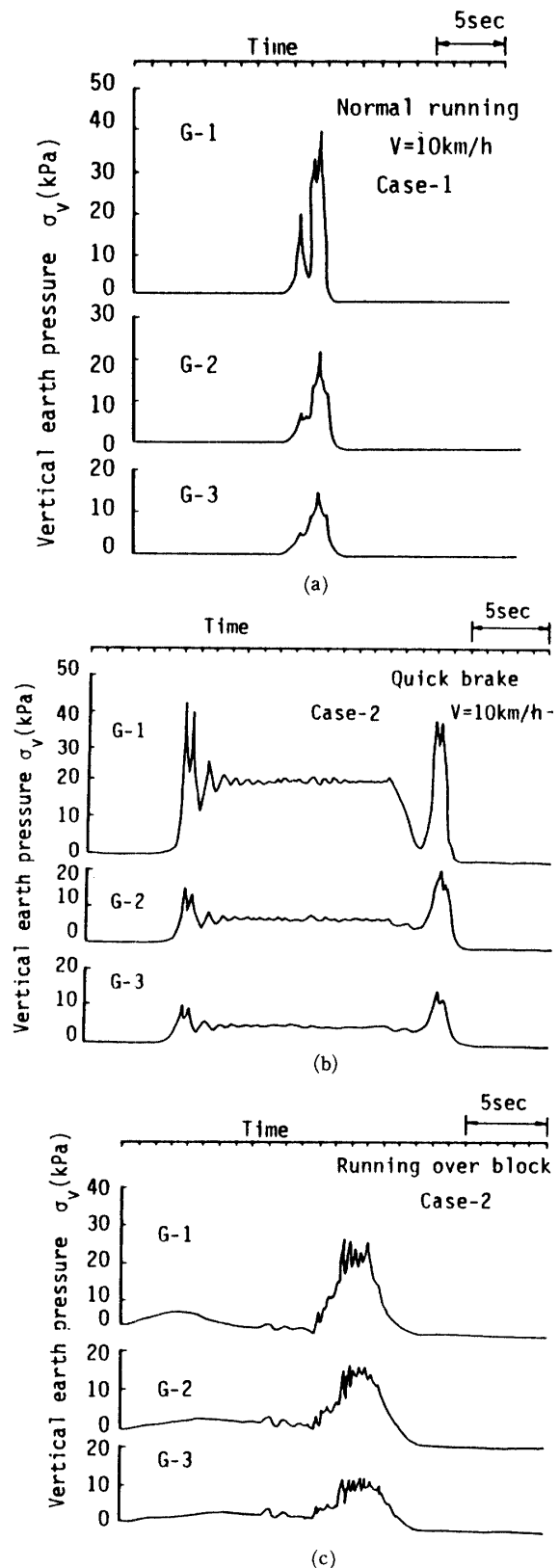
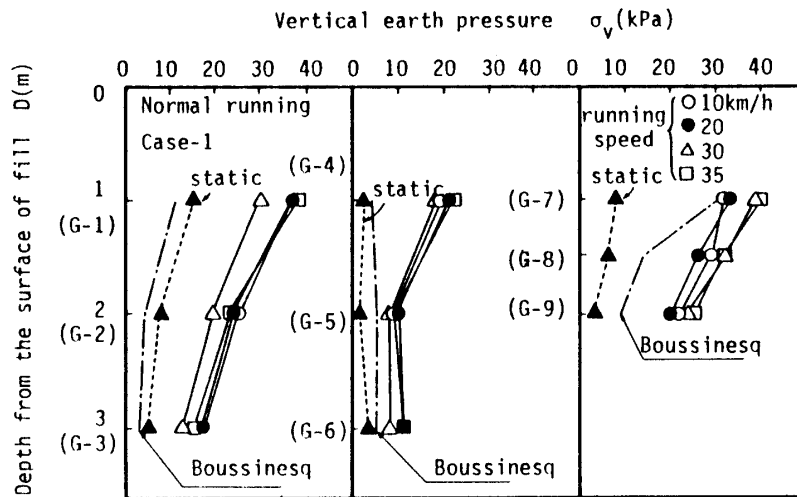
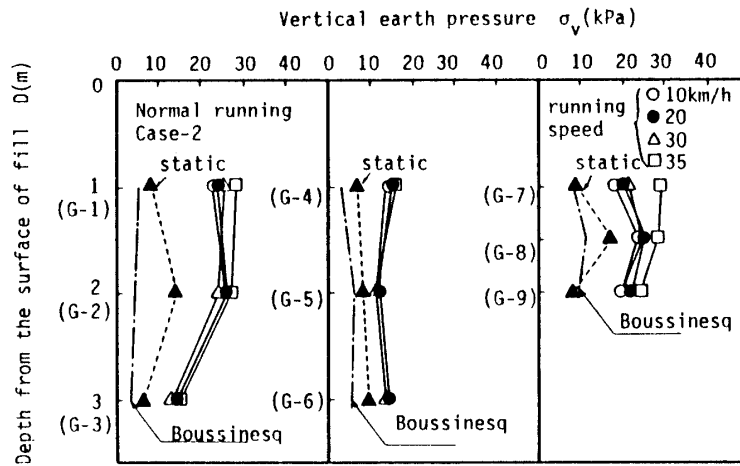


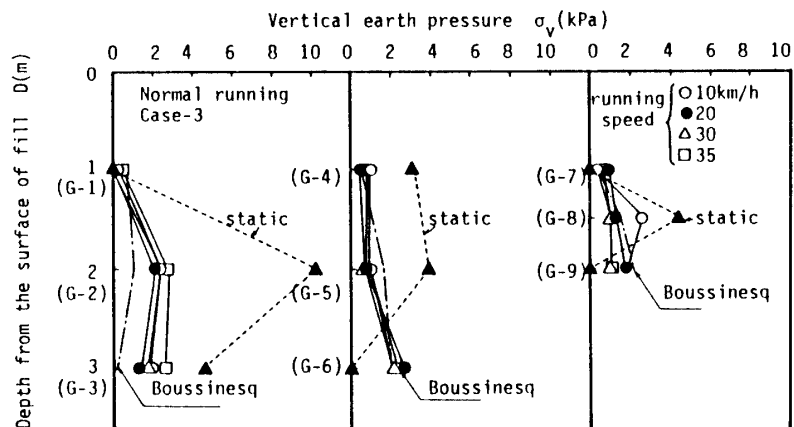
Fig. 6 Wave form of earth pressure measured in time domain, in the case of (a) : normal running, (b) : acting quick brake, and (c) : running over brock.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Distribution of earth pressure with depth by the various measured direction, (a) : Case-1, (b) : Case-2 and (c) : Case-3.

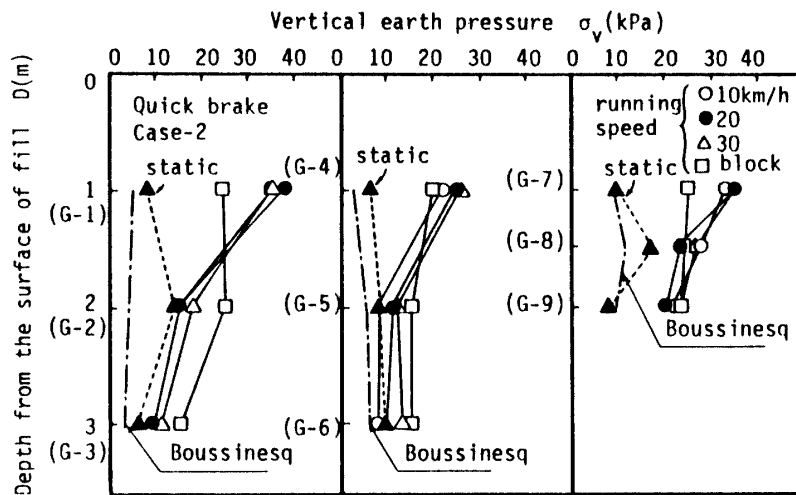
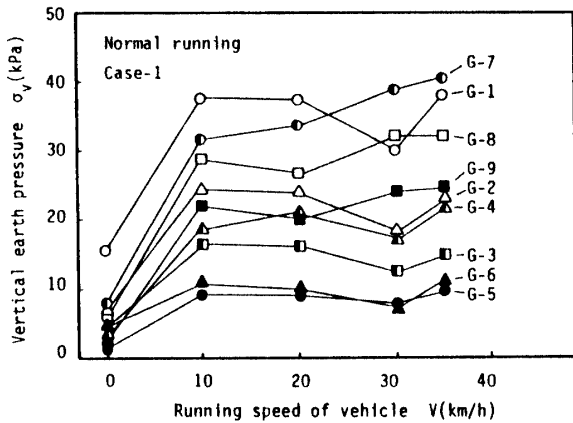
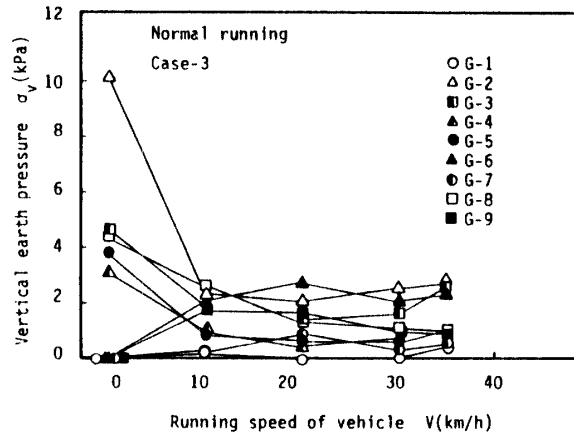


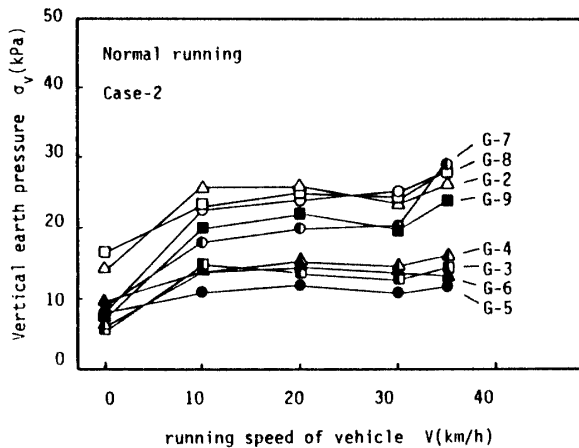
Fig. 8 Distribution of earth pressure in the case of acting quick brake.



(a)



(c)



(b)

Fig. 9 Relationship between vertical earth pressure and running speed of vehicle, (a): Case-1, (b): case-2 and (c): Case-3.

るものの、車両走行時の結果とは大きな隔たりがあることが認められる。

Fig. 7(c)のケース3においては、車両走行時と静止時の土圧はこれまでと逆転し、静止時の方が大きな値となっている。この場合については、Boussinesq解は走行時の結果に近い。また、土圧計設置位置から側方向4 m以上離れて走行した場合、土圧計は反応しなかった。これらのことから、車両走行により生じる動的土圧は静止時の土圧に比べ、側方よりもむしろ鉛直方向への伝播が卓越していることが推察される。このことは、交通荷重による基礎地盤の沈下の現象を考える上で重大な示唆となる。

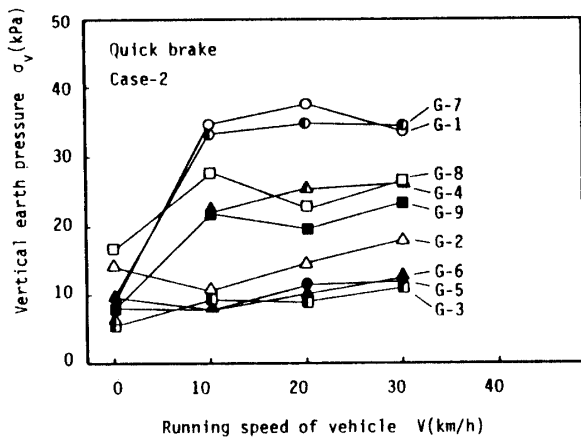


Fig. 10 Relationship between vertical earth pressure and running speed of vehicle in the case of acting quick brake.

Fig. 8 は、ケース 2 の状態において急ブレーキをかけた場合の測定結果を示すものである。Fig. 7 (b)との対比で明かなように、急ブレーキの影響が最上部すなわち盛土内の土圧計に表れており、大きな土圧値となっている。しかしながらその影響は深部まで伝わっておらず、それ以深の土圧計による土圧は Fig. 7 のものと同様である。また、段差によるバウンド状態における測定もケース 2 として行ったので、その結果を図中に示している。この試験は、ほとんど走行速度 0 の状態で行ったので、走行速度による影響は定かではないが、静止状態よりも大きな土圧値を与え、むしろ走行時のものに近い大きさとなっている。また、深部までほぼ一定値のまま伝播していることが認められ、段差による衝撃も地盤の変形に大きな影響を与えることが示唆される。

Fig. 9, 10 は、各土圧計から得られた結果を走行速度と土圧の大きさの関係をまとめたものであり、Fig. 9 が普通走行時、Fig. 10 が急ブレーキを作動させた時のものである。これらの図により、先に述べた土圧と走行速度の関係をより明かな形で見ることができる。

### 3. 有限要素法による応力解析

交通荷重による地中応力の評価方法として、これまで Boussinesq 解等静的弾性解が用いられてきた。この方法では 2. で示された通り、応力が盛土内においてほとんど消散され、基礎地盤までほとんど到達しない結果となり、また今回の実測結果とも大幅に異なることから、この方法は、本問題に関する限り現実的とは

思えない感がある。

交通荷重を動的に捉えるアプローチとしては、近年 FWD(Falling Weight Deflectometer) など衝撃荷重の載荷による調査が舗装設計に導入されるに至っており、Mamlouk ら<sup>5)</sup>や Sebaaly ら<sup>6)</sup>の理論的研究もなされている。また、移動荷重としての取扱は、古くは Cole ら<sup>7)</sup>の理論にさかのぼり、最近では、交通荷重による弾性体の変位を解析した中辻ら<sup>8)</sup>や斉藤ら<sup>9)</sup>の研究が挙げられる。このように、交通荷重に対する弾性的変形問題においてはすでに動的対応がなされているので、地中応力の評価に対しても動的な取り組みが必要と考えられる。

本研究では、FEM により動的応答解析により地中応力の評価を試みた。外力の大きさ及び特性はできるだけ現地実験の結果を踏まえることにした。走行試験の結果から車両走行時において Fig. 6 のような土圧波形が得られたので、Fig. 11 に示すようにこれを単純化して三角形のパルス荷重として、盛土表面の輪荷重作用位置において鉛直下向きに加えた。パルス荷重のピー

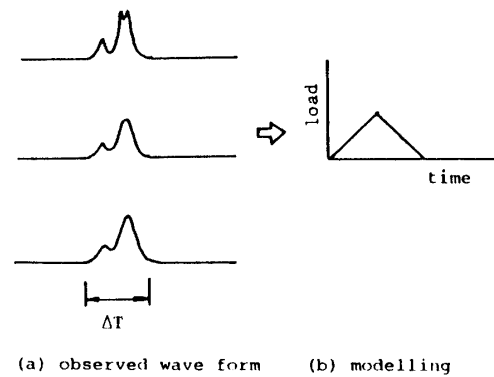


Fig. 11 Modelling as triangular pulsating load of traffic load.

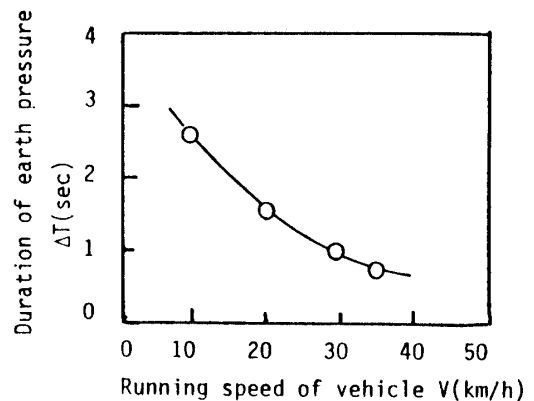


Fig. 12 Duration of earth pressure measured.

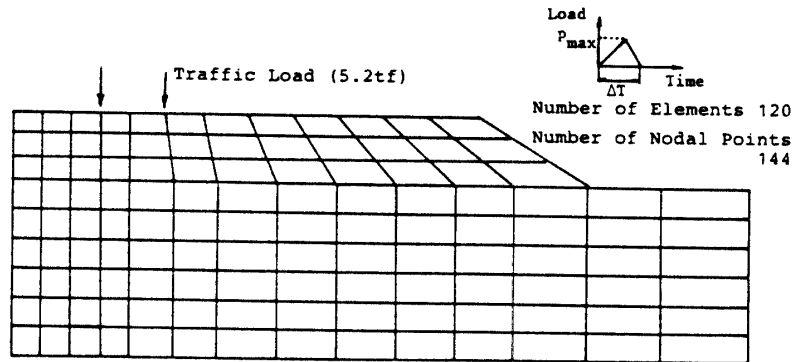


Fig. 13 Finite element mesh of embankment and base ground subjected to traffic load.

ク値  $P_{max}$ としては最大輪荷重5.25tfを与えた。また、荷重の作用時間  $\Delta T$  は Fig. 11のように土圧波形から類推して求めたが、その大きさは土圧の測定位置によってさほど違いはなく、車両の走行速度により異なっていたので、各走行速度について Fig. 12のようにまとめた。

運動方程式は次式のように表される。

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

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックス、 $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$ はそれぞれ接点加速度、速度、変位ベクトル、 $\{R(t)\}$ は外力のベクトルを意味する。解析のために作成された有限要素メッシュ分割図を Fig. 13に示す。また、解析に用いた材料定数は Table 1に示されるものを用いた。この中でせん断剛性率  $G_0$ はN値との関係式<sup>10)</sup> ( $V_s = 100N^{1/3}$ ,  $G_0 = \rho V_s^2$ )より求めた。動的解析は、パルス一波を外力として与え、等価線形解析を行うことにより、Seedら<sup>11)</sup>が示した砂の剛性率と減衰定数のせん断ひずみレベルとの対応を満足させる形で行った。走行速度を考慮するためにパルスの周期  $\Delta T$ として0.4, 0.8, 1.6secの3段階を設け、それぞれについて解析を行った。

解析により得られた鉛直応力の代表的波形を Fig. 14に掲げた。これは、荷重作用点直下の盛土内の要素でとられたものであり、現地試験ではG-1, 4, 7の測定値に対応する。主要な波形は、ほぼ三角形の形状をしており、測定された土圧波形とよく似た形となっている。

解析による鉛直応力を荷重作用点直下方向に拾い集め、まとめたものが Fig. 15である。図中に、各々のパルス周期による結果と Boussinesq 解による結果を示した。本解析結果は、Boussinesq 解による結果よりも3

Table 1 Material parameters used in the analysis.

Material	Density $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Shear modulus $G_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	Poisson ratio $\nu$
Fill	1.94	118000	0.4
Sand	1.95	12500	0.45
Silty sand	1.78	11500	0.45

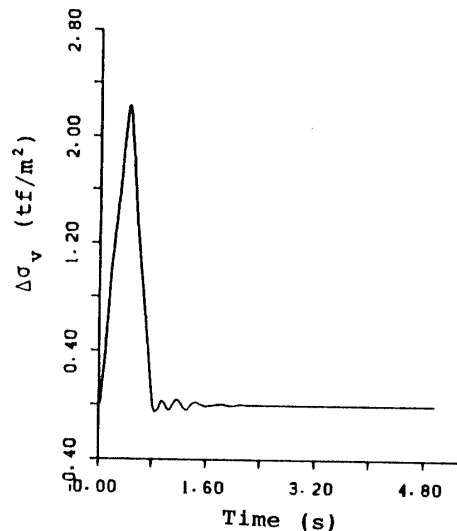


Fig. 14 Time history of vertical normal stress in the embankment obtained by the analysis.

~4倍大きいものとなっており、走行試験による結果と酷似の傾向を示している。また、走行速度によって変化したパルスの周期の影響については、図のようにならぬ。このことも走行試験の結果と対応してい

る。

実測の土圧と本解析により求めた土圧とを比較するために、Fig. 16のようなまとめを行った。実測値として、普通走行時の9個の土圧計の測定結果のうち同じ深さのものを平均し、それぞれケース1（輪荷重直下）、ケース2（両輪中間部下）、ケース3（車輪外側下）についてまとめ、これらを解析結果と比較した。その結果、図に示されるように実測値と解析結果は、かなり良く一致することが判明した。

Fig. 17は、解析により得られた地盤内の鉛直応力のコンターを示したものである。応力は、盛土部のみならず基礎地盤内にもかなり大きいまま伝播しており、

いわゆる球根型の伝播ではなく特に下方向へ広がる形となっている。このことは、走行試験で得られた車両走行時の土圧伝播が主として下方向に卓越する現象を裏付ける結果となっていると考えられる。以上のことから、本解析法がこの問題を解く上で有効な手段となりうるということが証明された。

4. 結 論

交通荷重による地盤内の応力伝播状況を調べるために、N値の低い飽和砂質地盤上に建設中の道路盛土において、トラックによる車両走行試験を実施した。ま

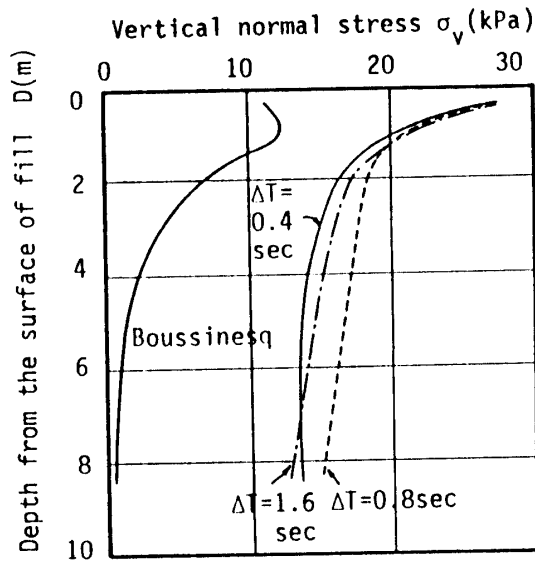


Fig. 15 Distributions of vertical normal stresses calculated by FEM and Boussinesq's equation.

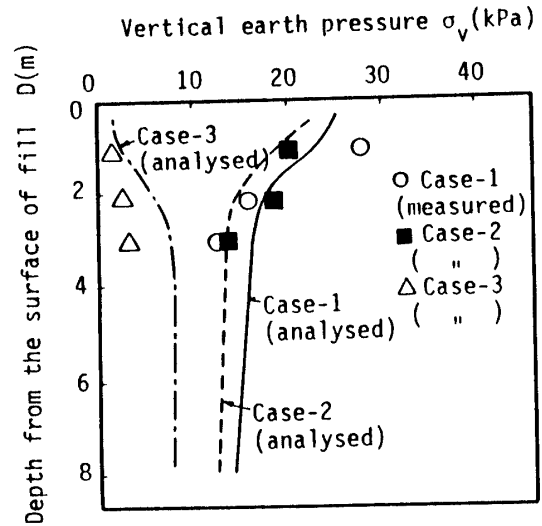


Fig. 16 Comparison between measured and analysed vertical normal stresses.

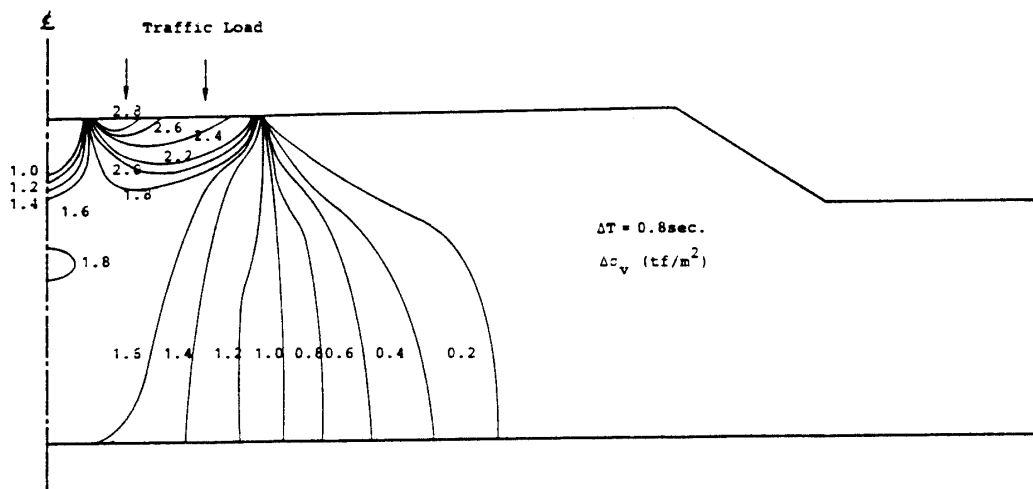


Fig. 17 Distribution of vertical normal stresses calculated by FEM.



た、それをシミュレートし評価するためにFEMによる動的応答解析を行った。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 車両走行時の土圧は、輪荷重作用点直下付近において静止時の土圧の約3～4倍の大きくなる。しかし、荷重点の側方では静止時より小さく現れ、車両走行時の土圧は下方方向へ伝播しやすい性質を持つ。
- 2) 車両の走行速度の違いによる土圧への影響は、10～35km/hの時速範囲においては顕著に現れない。
- 3) 急ブレーキ作動時の土圧は、作動開始時と終了時付近に2つのピークが現れた独特の形となる。土圧の大きさは、盛土内においてその影響を受け大きい値となる。しかし、深さ方向への減少は早く、基礎地盤内では普通走行時とほぼ同じ大きさとなる。
- 4) 路面に段差がある場合土圧は大きくなり、平滑な路面を普通に走行する場合よりも深部までほぼ一定の大きさで伝播する。
- 5) Boussinesq解による計算値は、車両静止時の土圧をうまく表しているが、車両走行時のものとは、かけ離れており動的解析法の導入の必要性が示唆された。
- 6) 交通荷重の外力を三角形のパルス荷重とみなしてFEMを用いて動的解析を行ったところ、得られた地中応力の大きさは比較的うまく車両走行時の土圧を表す結果となった。

#### 参 考 文 献

- 1) Yamanouchi, T. and Yasuhara, K. : Settlement of clay subgrades of low bank roads after opening to traffic, Proc. 2nd Australia-New Zealand Conf. on Geomechanics., Vol. 1, pp. 115-119, 1975.
- 2) 長井健・畑又佐男・松崎幸一・岡本憲三, 交通荷

重による盛土の振動と沈下について, 第7回土質工学研究発表会, pp. 241-244, 1972.

- 3) 秋吉成美: 軟弱地盤上における低盛土道路の沈下防止対策について, Proc. of the 1977 Special Lectures on Geotechnical Engineering, JSSMFE Kyushu Branch., pp. 5-9, 1977.
- 4) 久楽勝行・三木博史・真下陽一・関一雄, 軟弱地盤上の低盛土道路の沈下とその対策, 土木技術試料, 22-8, 1980.
- 5) Mamlouk, M. S. and Davies, T. G. : Elastodynamic analysis of pavement deflections, Proc. ASCE., Vol. 110, No. TE6, pp. 536-549, 1984.
- 6) Sebaaly, B., Davis, T. G. and Mamlouk, M. S. : Dynamics of falling weight deflectometer, Proc. ASCE., Vol. 111, No. TE6, pp. 618-632, 1985.
- 7) Cole, J. and Huth, J. : Stress produced in a half plane by moving load, Trans. ASME., 1958.
- 8) 中辻隆・芳村仁, 移動荷重による半無限体内の変位, 応力に関する一考察, 苫小牧工業高等専門学校紀要, pp. 131-138, 1979.
- 9) 斎藤二郎・吉岡尚也・木村薫, 交通機関の振動によって生まれる半無限体内の変位について, 大林組技術研究所報, No. 15, pp. 58-62, 1977.
- 10) 日本道路協会, 日本道路橋示方書・同解説, V, 耐震設計編, 1980.
- 11) Seed, H. B. and Idriss, I. M. : Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis, Report No. EERC 70-10. University of California, 1970.

(昭和63年4月13日受理)