

断層震源モデルを用いた震源域内のトンネル 構造物の変形の算定*

EVALUATION OF DEFORMATION OF TUNNEL STRUCTURES IN FOCAL REGION USING FAULT MODEL

川 上 英 二**
By Hideji KAWAKAMI

1. 序 論

1978 年 1 月 14 日の伊豆大島近海地震（マグニチュード 7.0）により、伊豆急行電鉄稲取トンネルは著しく破損した。本トンネルは伊豆半島の東海岸に沿った全長 906 m の単線鉄道トンネルであり、天城火山の泥流堆積物（稲取泥流）の中を掘削して作られている。また、本トンネルの下田側 1/2 は直線、中央部から伊東側は緩和曲線を含む R500 の曲線であり、大部分 70 cm 厚のコンクリートで覆われている。このトンネルの被害状況は多くの研究者により調査報告されておるとえはり¹⁾、稲取一大峰山断層によって切断され大きな変状を生じたことが指摘されている。

日本における地震断層によるトンネルの破壊の過去の例としては、1930 年 11 月 16 日の北伊豆地震で丹那トンネルの導坑が丹那断層により破壊した例が、また、1964 年 6 月 16 日の新潟地震により葡萄トンネルが破壊した例がある。

従来、土木構造物の被害は大別して、震動によるものと、断層などの地盤の破壊によるものがあるが、耐震設計のための計算を行う際には震度法で代表されるように震動を外力と考える場合が多い。この場合、設計に際しては、構造物に破壊を生じさせるような大きな外力を考える必要があり、震源の近傍での外力の大きさを決定することが重要な問題である。しかし、震源域内での大規模地震の観測例はきわめて少ないため、この問題は重要な未解決な問題であると考えられている¹⁾。一方、地盤の破壊による構造物の被害としては、地すべり・液状化・断層等によるものがある。しかし、これらの外力による土木構造物の応答の定量的な研究はいまだ十分に確立されていないように考えられる。しかし、土木構造物

を合理的に設計するためには、これらの影響をも考慮した耐震設計を行う必要があると考え、ここでは特に、地盤破壊の 1 つである断層運動およびそれから放出される震動に伴う地盤変形による構造物の挙動に注目した。そして、近年、地震学の立場から発展が著しい断層震源モデルに関する研究成果を土木構造物の耐震性の検討に応用することを試みた。地震学の分野では、余震分布、P・S 波の押し引き、地震前後の三角測量の結果および強震計記録等を用いて過去に発生した大きな地震に対して大局的に断層のパラメーターが推定され、これを用いて地震前後の震源近傍の地殻変動が明らかに説明されているのみならず、各観測地点で得られた比較的長周期の記録、つまり、速度、変位記録はかなりよく再現可能であることが認められている。さらに、最近では、短周期成分に対しても、断層の破壊の場所および時間に関する不連続、非一様性を考慮した発震機構を用い、また、震源から観測点に至るパスの地盤条件をさらに詳細に考慮することにより、加速度地震記録を再現させることが多く試みられている。これらの研究成果は、活断層の位置、規模および活動頻度などに関する研究成果とあわせて用いることにより、土木構造物の設計において、構造物に作用する外力を推定するために利用できるものと考えられる。

本論文では、断層モデルが、観測例の少ない震源域内での構造物に作用する外力を推定する手段を与えていること、また、長周期成分ではある程度信頼できる変位を与えることなどの利点を利用して、長周期成分が、つまり、加速度による慣性力ではなく、構造物の変形が構造物の安全性に大きな影響を与え、さらに、構造物の変形が地盤の変形または相対変位に関係が大きいといわれている¹⁾、¹⁾長大、地中構造物であるトンネル構造物を選び、この一例として稲取トンネルに断層モデルを適用し、トンネル軸に対する地盤の地震時における変位応答を算定した。さらに、得られた計算結果を、トンネルの変形の実測結果と比較し、トンネル構造物の地震時における変

* 土木学会年次学術講演会 I 部 1980 で一部発表

** 正会員 工博 埼玉大学助手 工学部建設工学科

形応答が断層モデルによってどの程度推定できるものかを検討した。ただし、本研究では、変形応答の第1次近似量を推定するため、断層モデルとしては最も基本的なモデルの1つである無限体中の断層モデルと半無限体中の断層モデルとを使用した。また、本研究で対象とした震源近傍での解析に適用可能なものとするため、観測点が震源から遠方であるという近似を用いずに展開された理論を使用した。これらのモデルについては次章で簡単に述べるものとする。

2. 断層モデル

(1) 無限体中の断層モデル^{12)~14)}

無限弾性体中のある面を境として、面に平行な方向の変位の不連続が生じる場合に、このような食い違いによって弾性体の内部に変位の放射が作り出される。一方、弾性体の中にこのような食い違いがなくて体積力の分布がある場合にも変位の放射が作り出される。このような食い違いによる変位の放射と、体積力の分布による変位の放射とが一致するための条件が地震学の分野で研究されており、断層面に平行な方向の食い違いと同等な体積力はダブルカップル型の体積力であることが理論的に明らかにされている¹²⁾。

Haskell¹⁴⁾ は上記の食い違いとダブルカップルモーメントの体積力との等価性に基づいて、直交座標系 (x_1, x_2, x_3) 内の (x_1, x_2) 面に断層面 Σ が生じ、断層面上の1点 $\xi = (\xi_1, \xi_2, 0)$ における時刻 t での変位の不連続量の x_1, x_2 方向の成分がそれぞれ $[u_1](\xi, t), [u_2](\xi, t)$ であった場合の、座標 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ 時刻 t での変位の i 方向成分が次式で求められることを示している。

$$u_i(\mathbf{x}, t) = \rho v_s^2 \iint_{\Sigma} \{ (M_{i1,3} + M_{i3,1}) [u_1](\xi, t) + (M_{i2,3} + M_{i3,2}) [u_2](\xi, t) \} d\xi_1 d\xi_2 \dots \dots \dots (1)$$

ただし、

$$M_{ij,q}[\phi(\xi, t)] = (4\pi\rho)^{-1} \{ [15 r_i r_j r_q - 3(\delta_{ij} r_q + \delta_{iq} r_j + \delta_{jq} r_i)] R^{-4} \int_{R/v_p}^{R/v_s} \phi(\xi, t-t') t' dt' + [6 r_i r_j r_q - (\delta_{ij} r_q + \delta_{iq} r_j + \delta_{jq} r_i)] (v_p R)^{-2} \times \phi(\xi, t - R/v_p) - [6 r_i r_j r_q - (2\delta_{ij} r_q + \delta_{iq} r_j + \delta_{jq} r_i)] (v_s R)^{-2} \phi(\xi, t - R/v_s) + r_i r_j r_q (v_p^3 R)^{-1} \dot{\phi}(\xi, t - R/v_p) - [r_i r_j r_q - \delta_{ij} r_q] (v_s^3 R)^{-1} \dot{\phi}(\xi, t - R/v_s) \} \dots \dots \dots (2)$$

$$R = |\mathbf{x} - \xi| \dots \dots \dots (3)$$

$$r_i = (x_i - \xi_i) / R \dots \dots \dots (4)$$

また、 v_p, v_s はそれぞれ縦波、横波の波速、 ρ は密度、 δ_{ij} は Kronecker のデルタである。

(2) 半無限体中の断層モデル^{15)~17)}

Kawasaki, Suzuki, Sato¹⁵⁾ はさらに自由表面が存在する場合は、半無限弾性体を対象として、この内部に断層による食い違いが生じた場合の、自由表面における変位の厳密解を求める方法を展開している。このモデルは(1)に示したモデルと同様、観測点が震源から遠方であるという近似を行っていないため、本研究で対象とした震源近傍での解析を行う際に役立つものと考えられる。また、このモデルは(1)に示したモデルと比べ自由表面を考慮していることにより、解析の精度がさらに向上する結果を与えるものと考えられる。

また、上記(1),(2)のモデルにおいて断層の破壊伝播に関して、単純化のため以下に示す基本的な仮定を設けた。すなわち、断層の破壊は断層面上を伝播するものと考え、ここでは簡単のため断層面上の一端を破壊開始点とし、一定の速度で破壊が伝播するものと仮定した。

3. 断層震源モデルによるトンネル軸の変形の算定

2. に示した理論に基づいて、本章では実際の土木構造物に断層震源モデルを適用し、その変形を算定することを試みた。ここでは伊豆大島近海地震により生じた稲取トンネルの変形を対象とした。伊豆大島近海地震の主断層のパラメーターは Shimazaki・Somerville¹⁸⁾ により、多くの観測点での地震記象、P・S波の押し引き、表面波のスペクトル振幅、水平距離の変化、水準測量の結果、余震分布等に基づいて推定されており、本解析においてはこれらの推定された値を用いた。これを **Table 1** および **Fig. 1** に示す。さらに、本解析では、稲取トンネルを横切って観測された断層を二次断層と考え、この断層のパラメーターは **Table 1** のように仮定した。

Table 1 Parameters of Main and Sub Faults

Parameters	Fault	
	Main Fault	Sub Fault
Fault Length	17 km	3.0 km
Fault Width	10 km	1.5 km
Fault Strike	N 90° W	N 51° W
Dip Angle	85° North	75° North
Slip Angle	188°	180°
Dislocation Right Lateral Strike Slip	183 cm	70 cm
Dislocation Normal Dip Slip	26 cm	0 cm
Rupture Velocity	2.8 km/s	2.8 km/s
P Wave Velocity	6.0 km/s	6.0 km/s
S Wave Velocity	3.5 km/s	3.5 km/s
Rise Time	2.0 sec	2.0 sec

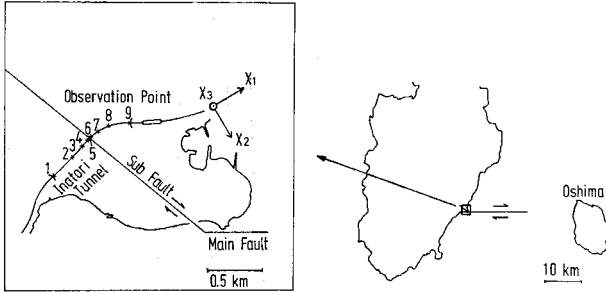


Fig. 1 Main and Sub Faults, Inatori Tunnel and Observation Points

また、破壊伝播に関しては次の仮定を行った。主断層の破壊は最も東端で始まるものと考え、2.8 km/s の一定速度で破壊が西へ 17 km にわたって伝播し、約 6 秒後に主断層の破壊の前線が西端に達するものと仮定した。また深さ方向への破壊の伝播速度は無限大、つまり、深さ方向には破壊の前線が常に揃っているものと仮定した。また、二次断層は主断層に連続して破壊するものと考え、主断層の破壊開始から 6 秒後に二次断層の破壊が南東端において開始するものと仮定した。そして、北西の方向に破壊が一定速度で伝播するものと仮定した。

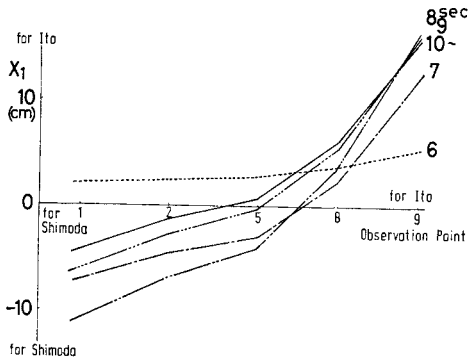


Fig. 2 Longitudinal Displacement due to Main Fault in Infinite Medium

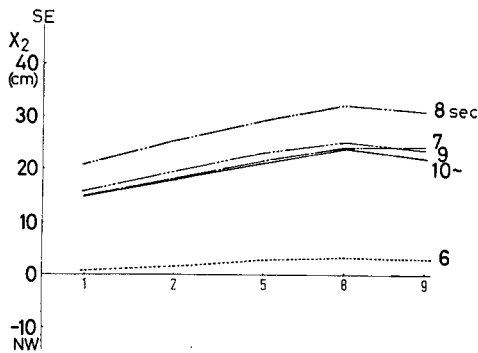


Fig. 3 Transverse Displacement due to Main Fault in Infinite Medium

一方、稲取トンネルは主・二次両断層と Fig. 1 に示すような位置関係にあり、下田側 1/2 は直線、中央部から伊東側は緩和曲線を含む R500 の曲線からなる全長 906 m の東線鉄道トンネルである。地震時におけるトンネル構造物の挙動を明らかにするためには、本来、構造物と地盤との連成作用を考慮して解析を行うことが最も理想的ではあるが、このような手法ではいたずらに問題を複雑にし、多くの仮定を用いなければ解明できないばかりでなく、問題の本質を見失う恐れがある。ここでは、地中構造物の応答が地盤の応答に大きく影響されるという従来の研究成果^{10), 11)}に基づいて、まずは第 1 近似として、構造物の影響を考慮せずに、トンネル軸に対応する地盤の地震時における変形挙動を解析した。その際、Fig. 1 に示すようにトンネル軸上に、下田側坑口を 1、二次断層が横切る位置を 5、伊東側坑口を 9 とする 1 から 9 の 9 つの測点を設け、各測点における変位を各時刻ごとに算定した。さらに、得られた変位を座標変換し、トンネル軸方向 (x_1)、トンネル軸直角水平方向 (x_2)、上下方向 (x_3) の 3 方向の変位を計算した。なお、各方向の正の向きは Fig. 1 に矢印で示すとおりであり、 x_1 - x_2 - x_3 座標系は測点により回転しているものとする。

まず、無限体中の断層モデルを用いて算定した各時刻におけるトンネル軸の変形を、主断層のみによるトンネ

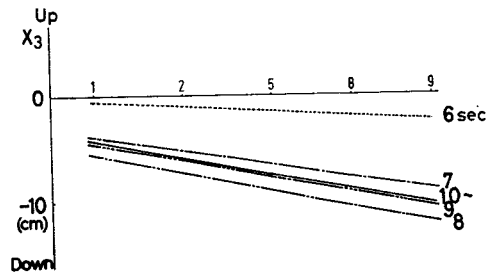


Fig. 4 Vertical Displacement due to Main Fault in Infinite Medium



Fig. 5 Longitudinal Displacement due to Sub Fault in Infinite Medium

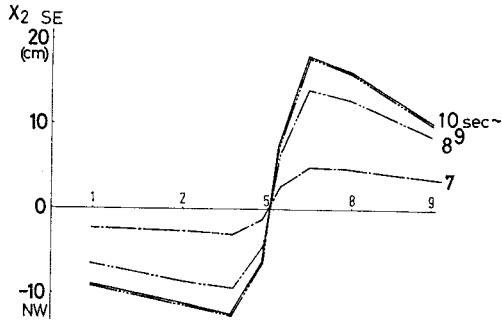


Fig. 6 Transverse Displacement due to Sub Fault in Infinite Medium

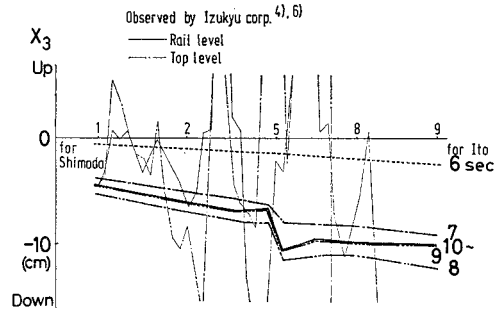


Fig. 10 Vertical Displacement due to Main and Sub Faults in Infinite Medium

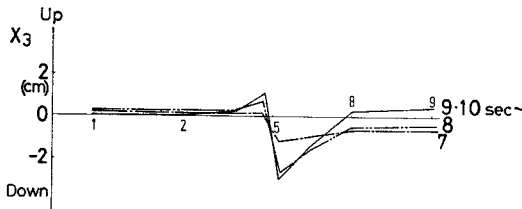


Fig. 7 Vertical Displacement due to Sub Fault in Infinite Medium

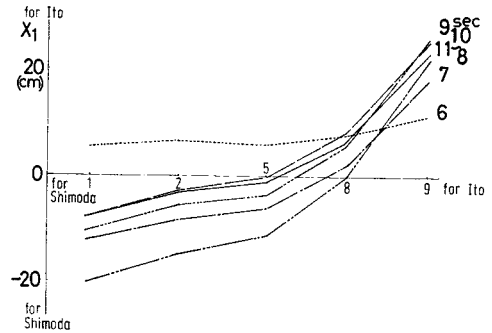


Fig. 11 Longitudinal Displacement due to Main Fault in Semi-Infinite Medium

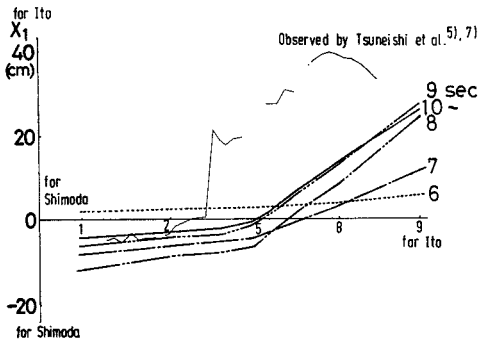


Fig. 8 Longitudinal Displacement due to Main and Sub Faults in Infinite Medium

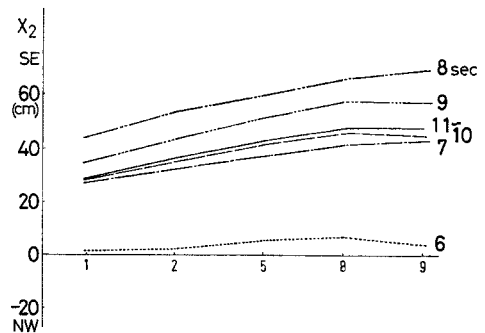


Fig. 12 Transverse Displacement due to Main Fault in Semi-Infinite Medium

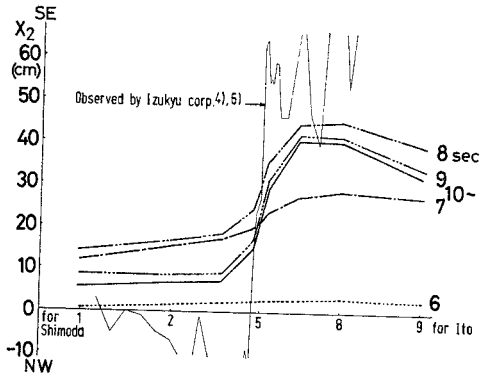


Fig. 9 Transverse Displacement due to Main and Sub Faults in Infinite Medium

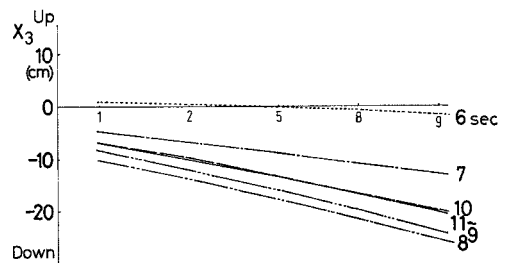


Fig. 13 Vertical Displacement due to Main Fault in Semi-Infinite Medium

ル軸 x_1 方向 (Fig. 2), トンネル軸直角水平 x_2 方向 (Fig. 3), 上下 x_3 方向 (Fig. 4) の3成分について, また, 二次断層のみによる x_1 方向 (Fig. 5), x_2 方向 (Fig. 6), x_3 方向 (Fig. 7) の3成分について分けて示してある. また, 主・二次両断層による x_1, x_2, x_3 方向の3成分について Fig. 8, 9, 10 にそれぞれ示してある.

また, 半無限体中の断層モデルを用いて算定した各時刻におけるトンネル軸の変形を, 無限体の場合と同様に, 主断層のみによるトンネル軸 x_1 方向 (Fig. 11), トンネル軸直角水平 x_2 方向 (Fig. 12), 上下 x_3 方向 (Fig. 13) の3成分について, また, 二次断層のみに

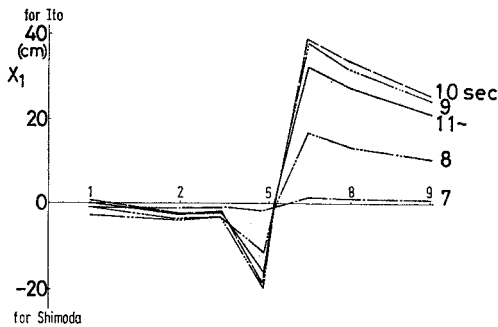


Fig. 14 Longitudinal Displacement due to Sub Fault in Semi-Infinite Medium

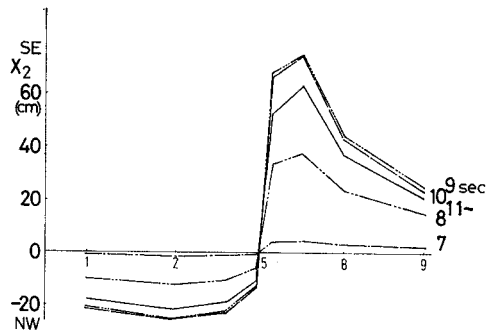


Fig. 15 Transverse Displacement due to Sub Fault in Semi-Infinite Medium

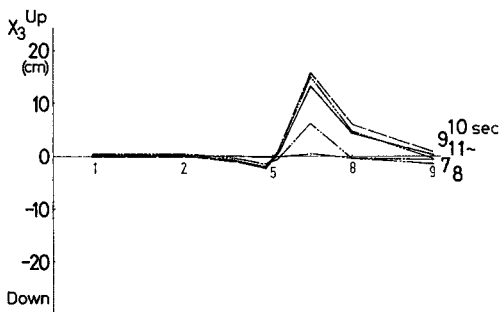


Fig. 16 Vertical Displacement due to Sub Fault in Semi-Infinite Medium

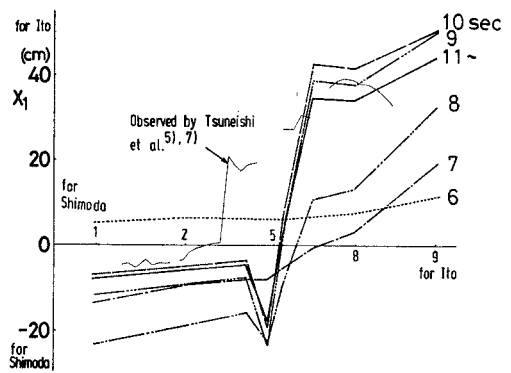


Fig. 17 Longitudinal Displacement due to Main and Sub Faults in Semi-Infinite Medium

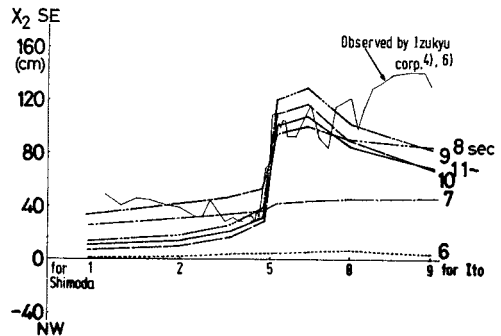


Fig. 18 Transverse Displacement due to Main and Sub Faults in Semi-Infinite Medium

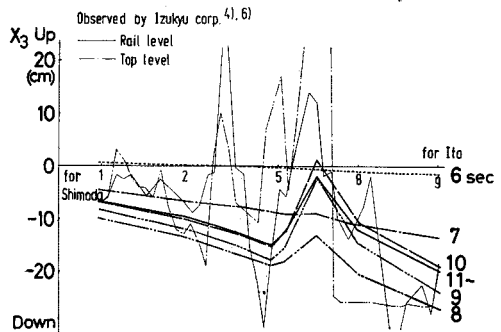


Fig. 19 Vertical Displacement due to Main and Sub Faults in Semi-Infinite Medium

よる x_1 方向 (Fig. 14), x_2 方向 (Fig. 15), x_3 方向 (Fig. 16) の3成分について分けて示してある. また, 主・二次両断層による x_1, x_2, x_3 方向の3成分について Fig. 17, 18, 19 にそれぞれ示してある.

なお, 本数値計算に用いた断層の分割数は, 無限体中の主断層については(長さ方向 34)×(幅方向 20)の680個であり, 無限体中の二次断層については(長さ方向 20)×(幅方向 10)の200個である. 一方, 半無限体の場合には, 主・二次断層ともそれぞれ(長さ方向 10)×(幅方向 5)の50分割とした. また, Fig. 2~19中のパラメーターは主断層が破壊し始めてからの時間を示

し、最終変位を実線で示してある。

以上得られた Fig. 2~19 に示した解析結果を、主断層のみによる変形、二次断層のみによる変形に分けて考察を行い、さらに 4. において、主・二次両断層による変形の計算結果を実測結果と比較した。

(1) 主断層のみによる変形

Fig. 2~4 には無限体中の主断層によるトンネル軸の変形の3成分を示し、Fig. 11~13 には半無限体中の主断層による3成分を示してある。その変形の概略は、トンネル軸方向では、下田側坑口が下田方向へ、伊東側坑口が伊東方向への変位をすることにより、無限体では約 15 cm の引張りを、また半無限体では約 30 cm の引張りを受け、軸直角水平方向では、全体に南東方向に無限体では約 20 cm、半無限体では約 40 cm 移動し、上下方向では、無限体で下田側が約 4 cm、伊東側で約 10 cm の沈下が生じ、また半無限体ではそれぞれ約 8 cm、約 20 cm の沈下が生じている。つまり、無限体および半無限体の場合でトンネル軸の変形の傾向は3成分ともそれぞれ類似しているが、その大きさは半無限体の場合には無限体の場合の約2倍である。これらの変形の傾向には次のような定性的で直観的な説明を加えることが可能である。

まず、水平方向の変位について考察する。断層とトンネルとの位置関係および断層のずれの方向を考えあわせると、トンネルは主断層の北側に位置しているため、断層運動により東の方にひきずられるような動きをするものと考えられる。ところが、この動きのトンネル軸 x_1 方向、軸直角水平 x_2 方向の成分は正であるため、トンネル軸は全体に x_1 、 x_2 軸の正方向へ変位するものと考えられる。特に、伊東側坑口付近(測点8, 9)でトンネル軸が断層となす角度が小さくなり平行に近づくにつれて、 x_1 方向の変位が正方向に急増しているものと考えられる。断層による変位は、上述の断層のずれによりひきずられるような動きと、このほかに次に示すような変位が加わるものと考えられる。つまり、まず、Fig. 20

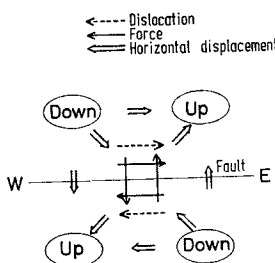


Fig. 20 Dislocation and Displacement

る。断層面で左右にずれ stlike slip が生じた場合、これと等価な連続体中の体積力は、前述したように、このずれの方向と一致したシングルカップルともう1つのシングルカップルの力の系である。このため、第1のシ

ングルカップルにより生ずる断層のずれにひきずられるような東西方向の変位のほかに、第2のシングルカップルにより断層の西端では南の方向に、東端では北の方向に変位が生じることになる。稲取トンネルが主断層の西端にあることより、この第2のシングルカップルによりトンネル軸方向には負方向、軸直角水平方向には正方向の変位が加えられることになる。この2つのシングルカップルによる変位を加えたものがトンネル軸上の各測点での変位になると考えられ、軸直角水平方向ではともに正であるためこの和は正となり、軸方向では第1および第2のシングルカップルによる変位がそれぞれ正および負であるため、この差が得られているものと考えられる。下田側(測点1)では後者の影響が大きく、伊東側(測点9)では前述したようにトンネル軸の方向の変化等の影響により前者の影響が大きくなり、下田側では負、伊東側では正の値を示しているものと考えられる。

次に上下方向に関して考えると、まず、断層の上下方向のずれによりひきずられるような動きを示し、断層の北側にあるトンネルでは負方向の変位が生じているものと考えられる。この影響のほかに、水平方向のずれによる影響、つまり、Fig. 20 のように水平方向のずれにより、引張りを受ける所はポアソン比の影響により沈下し、圧縮される所は隆起する影響も加わっていると考えられ、主断層の西端北部にある稲取トンネルではこの影響も加わりさらに大きく沈下しているものと考えられる。以上の影響のほかに、上下方向のずれによる水平方向の変位の影響等が考えられるが、上下方向のずれ量が水平方向のずれ量と比較して約1/7と小さいため、この影響はそれほど大きくないものと考えられる。

(2) 二次断層による変形

Fig. 5~7 には無限体中の二次断層によるトンネル軸の変形の3成分を示し、Fig. 14~16 には半無限体中の二次断層による3成分を示してある。無限体・半無限体モデルともにトンネル軸方向には概して引張が生じ、軸直角水平方向には、下田側坑口が北西方向へ伊東側坑口が南東方向へ変位し、断層面を境にして右ずれが生じている。これらの結果は、軸直角方向については断層のずれが右ずれであることにより説明可能である。また、軸方向については、断層とトンネル軸とがある角度をもって交わっており、断層が右ずれした場合の変位の軸方向の成分は、断層面より下田側では負、伊東側では正であり、したがってトンネル軸は断層面を境に引張られることにより説明可能である。さらに、伊東側(測点8, 9)ではトンネル軸が断層となす角度が小さくなり、断層のずれの軸方向の成分が大きくなり、この影響も加わり伊東側では正方向に変位しているものと考えられる。ま

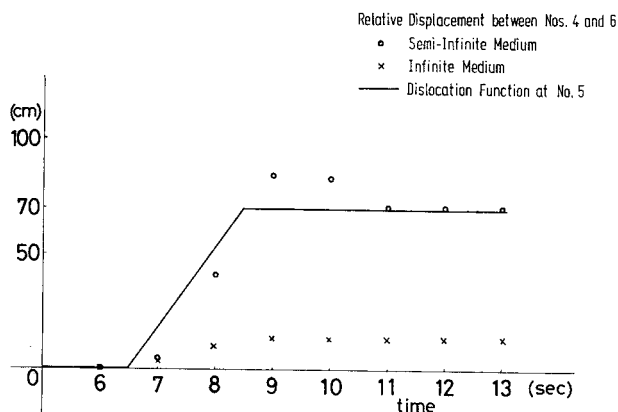


Fig. 21 Dislocation Function at Observation Point No. 5, and Relative Displacement between Point Nos. 4 and 6

た、上下方向の変位成分は断層面の直上部でのみ変位が生じており、他の方向の変位と比較して非常に小さい。これは、二次断層の縦ずれ量が零であるからと考えられる。

上述の計算結果で断層面におけるずれが正確に求められているか否かを明らかにするため、断層面からそれぞれ約 20 m 離れた断層面を挟む 2 つの測点 4 と 6 での水平方向の相対変位を $\{(\text{軸方向の相対変位})^2 + (\text{軸直角水平方向の相対変位})^2\}^{1/2}$ で計算し、Fig. 21 にこれを時間の関数として無限体に対しては×印で、半無限体に対しては○印で示してある。そして、これを断層面のずれの大きさの時間変化を表わすランプ関数（実線）と比較した。無限体での最終相対変位は約 14 cm と非常に小さいのに対し、半無限体では最終変位は約 70 cm であり、断層のずれの最終値と一致していることが認められる。この原因は半無限体では自由表面を仮定しているのに対し、無限体では地表面の上が連続弾性体で拘束されているため、相対変位が極度に小さく計算されたものと考えられる。

ここで、以上得られた結果に基づいて、構造物の変形に及ぼす主断層と二次断層との影響の大きさを比較した。地震の規模を表わすと考えられる地震モーメントと比較すると、二次断層の地震モーメントは主断層の約 1/100 であるにもかかわらず、主断層と二次断層とは同程度の変形量が求められている。特に、二次断層が構造物を横切った箇所では極端に大きな変形が生じている。この結果は、二次断層が直接横切ったといわれている稲取トンネルの被害がその近辺の多くの道路・鉄道トンネルの被害と比較して特に大きかったことの一つの原因を示すものと考えられる。さらに、この結果は、主断層とはならないような小さな断層が構造物を横切り二次断層として食い違った場合には、その影響が主断層の影響に劣らず大きいことを示すものと考えられる。

4. 稲取トンネルの変形の実測結果と計算結果との比較

上述の主・二次両断層それぞれによる変形を加え合わせて伊豆大島近海地震によるトンネル軸の変形の 3 成分を求め、無限体に対しては Fig. 8～10 に、半無限体に対しては Fig. 17～19 に示してある。これらの計算結果を稲取トンネルの地震後の変形の実測結果と比較して考察を加えた。ただし、計算値としては変形の時刻歴が算定されており、一方、実測値としては残留変形に相当する量のみが示されている。

第 1 の成分であるトンネルの軸方向の変形の実測結果としては、精密な測量結果が得られなかったため、これをトンネル内のレールの遊間および犬釘の動きから次のように推定した。

(ある測点での軸方向変位量) = $\Sigma \{(\text{地震後のレールの遊間}) - (\text{地震前のレールの遊間})\} + (\text{ある測点での犬釘とレールとの相対変位量})$

ただし、 Σ は下田側坑口からある測点までのすべての遊間に対しての和を求め、この場合、下田側坑口とある測点との相対変位量が求まるものとした。また、レールの遊間および犬釘の動きとしては Tsuneishi ら⁹⁾により測定された結果を用い、地震前のレールの遊間は 6 mm と仮定し、レール 1 本の長さは直線部で 20 m、曲線部で 10 m の実測値を用いた。得られた結果を Fig. 8, 17 に細実線で示してある。この実測結果には軌道の浮き上がりによる変形、下田側坑口で発生した軌道の湾曲などの影響が考慮されておらず、他の 2 方向成分の実測結果と比較して、精度上問題があると考えられる。ただし、地震後の測量結果においては、いずれの方向についても絶対変位を表わすものでなく、トンネル内の各点間の相対変位だけが意味がある量であると考えられるため、Fig. 8～10, 17～19 に示した実測結果は零線をそれぞれ適当に仮定して描いたものである。

一方、第 2、第 3 の成分である軸直角水平方向および上下方向については伊豆急行により精密な測量が行われており⁹⁾、この結果に基づいて作成されたトンネル中心線の軸直角水平変位を村井らの論文⁹⁾から引用して Fig. 9, 18 に細実線で示してある。また、トンネル軌道面およびアーチ天端（参考文献 4), 6) 参照)での上下変位も同論文⁹⁾から引用して Fig. 10, 19 にそれぞれ細実線、細一点鎖線で示してある。

各方向成分について計算結果と実測結果とを比較すると、計算結果は実測結果を細かい部分までも説明できるものではない。第一に、計算結果ではいずれの方向の成

分についても、実測結果で認められる短い波長の凹凸がほとんどならされた形として求められている。また、たとえば、軸方向では相対変位が実際に大きく生じている場所と、計算結果で生じている場所とでは約 120 m の隔りがある (Fig. 17 参照)。このことは、「トンネル復旧工事の際、外されたライニングの裏側に露出した地山の面には水平な擦痕が見られたという」(参考文献 7) より引用) 事実に基づき、トンネルのライニングが地山の中を軸方向に引きずられたという伊藤ら²⁾による説明で納得できるものであり、トンネル軸の変形に構造物の影響が現われている一例を示すものと考えられる。

ここでは、計算と実測とによる変形の概略を比較するため、まず、下田側と伊東側の両坑口付近における相対変位の最終値を、無限体・半無限体に対する計算値および実測値それぞれに対し読み取り、これらを比較した。まず、軸方向についてはいずれも引張が生じ、その大きさは無限体で約 30 cm、半無限体で約 50 cm、実測で約 40 cm である。次に、軸直角水平方向については、いずれも右ずれが生じ、その大きさは無限体で約 30 cm、半無限体で約 60 cm、実測で約 75 cm である。また、上下方向では、いずれも伊東側坑口が下田側坑口に比較して沈下しており、その大きさは、無限体で約 5 cm、半無限体で約 15 cm、実測で約 15 cm である。以上のように、いずれの方向の成分に対しても、変形の傾向は一致しており、また、その大きさに関しては、半無限体の場合と実測値との一致がよいことが認められる。

以上示した測量結果のほかにも多くの研究者が稲取トンネルの変形について考察を加えている。たとえば、伯野ら²⁾はレールの遊間量が断層付近で広がり、断層から離れた所では小さくなっていること、および下田側坑口でレールの湾曲が生じたことについて考察を加え、下田側坑口では路盤がトンネル軸方向に縮んだことを推論し、ダイレタンシーおよびP波を用いてこの現象の説明を試みている。本計算結果による軸方向の変位では、断層を挟んで伊東側では引張を生じているが、下田側ではほとんど引張は生じておらず、半無限体の場合には逆に、断層面の下田側よりで圧縮が生じていることがわかる (Fig. 17 参照)。この結果は伯野ら²⁾による推論と矛盾しない。

また、森野ら⁹⁾はレール、まくらぎ等の移動の状態を観察することにより、「軌桁は、活断層付近に生じた地盤の伸縮によりいったん下田方へ押し込まれ、比較的道床抵抗力の低下していた下田側坑口付近に湾曲を生じさせたのち、再び伊東方へ引き戻された」と推論している。本計算結果によれば (Fig. 17 参照) 主断層の破壊開始の 6 秒後にトンネル全体が伊東側から下田側坑口で約 5 cm 動いた後、7, 8 秒後には下田側坑口は下田側に約

28 cm、伊東側坑口は伊東側に約 20 cm 急激に移動しており、さらにその後 9, 10, 11 秒後にはトンネル全体が伊東側から下田側坑口で約 15 cm 動いており、この結果は森野ら⁹⁾による推論と矛盾しない。以上のように本解析で得られた結果は、稲取トンネルの地震時における挙動を推定するための一資料になるものと考えられる。

もとより、以上の結果は、構造物と地盤との連成作用を無視し、地盤を均質な弾性体と考え、地盤の塑性変形および不均質性等を考慮せず、さらには、発震機構を非常に簡単に仮定して求められた計算結果である。しかし、それにもかかわらず、トンネル軸の変形の傾向は両モデルともいずれの方向についても実測値と一致し、その大きさは半無限体モデルの場合には概略一致することが認められた。このことは、現在の基本的な断層震源モデル理論でも、震源域内におけるトンネル構造物の地震時における変形を第 1 次近似として推定するために有用であることを示す 1 つの根拠を与えたものと考えられる。この結果はまた、本解析においては無視された、構造物と地盤との連成作用、地盤の不均質性・塑性変形、断層モデルおよびそのパラメーターに関する詳細等をさらに考慮に加えることにより計算結果の近似度が一層よくなる可能性を示すものである。以上述べたように、断層震源モデルを用いた本方法は従来解析が不可能であった震源域内における長大地中構造物の地震時における挙動を解析するための新しい方法を与えるものと考えられる。

5. 結 論

地震学の分野で発展してきた断層震源モデルの理論が観測例の少ない震源域内での構造物に作用する外力を推定するための手段を与えていること、また、本理論が長周期成分ではある程度信頼できる変位を与えていること等の利点を利用して、震源域内における土木構造物の地震時の挙動を解析した。ただし、土木構造物としては長周期成分が、つまり構造物の変形がその安全性に大きな影響を与え、さらに、地盤の変形が構造物の変形と関係が大きいといわれているトンネル構造物を選んだ。本論文では、実際に伊豆大島近海地震により大きな被害が生じた稲取トンネルの中心軸に対する地盤の変形応答を別途提案されている断層モデルのパラメーターを用いて算定し、この結果を地震後のトンネルの変形の測量結果と比較した。そして、震源域内におけるトンネル構造物の挙動が断層モデルによってどの程度推定できるものかを検討した。その結果、次のことが明らかになった。

(1) トンネル軸の変形の概略の傾向は計算値と測量結果とでいずれの方向の成分に対しても一致した。ま

た、その大きさに関しては、半無限体モデルの場合と実測値との一致がよいことが認められた。しかし、本計算結果は実測結果を細かい部分までも説明できるものではなく、さらに、構造物、地盤、発震機構等の詳細を考慮に入れる必要があると考える。

(2) 主断層と二次断層とがトンネル軸の変形に及ぼす影響を分けて検討することを試みた。これらの変形の傾向の概略は定性的に説明可能なものであることが認められた。また、構造物の変形に及ぼす主断層と二次断層との影響の大きさを比較した。本例の場合、地震の規模が主・二次断層で大きく異なるにもかかわらず、同程度の変形量が求められた。この結果は、主断層とはならないような小さな断層が構造物を横切り二次断層として食い違った場合には、その影響が主断層の影響に劣らず大きいことを示すものと考えられる。

断層震源モデルを用いた本方法は、従来解析が不可能であった震源域内におけるトンネル構造物の地震時における挙動を解析するための新しい方法を与えるものと考えられる。また、本研究は、現在の断層震源モデル理論でも、震源域内におけるトンネル構造物の地震時における挙動を第1近似として推定するために有用であることを示す1つの根拠を与えたものと考えられる。

謝 辞：本研究中の数値計算に関しては埼玉大学建設基礎工学科卒業論文生であった村田裕昭（現 大成エンジニアリング）、松本久司（現 埼玉県庁）両君に、また、図面の作成にあたっては文部技官の堀野浩美君にご協力をいただいた。末筆ながら深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 耐震工学委員会：「1978年伊豆大島近海の地震」報告，土木学会誌，Vol. 63, No. 8, pp. 56~66, 1978年8月。
- 2) 伯野元彦・藤野陽三・片田敏行：1978年伊豆大島近海地震被害調査報告，地震研究所彙報，Vol. 53, No. 3, pp. 1101~1133, 1978年。
- 3) 岩崎敏男・川島一彦：1978年1月14日伊豆大島近海地震による地震動と土木構造物の被害，第5回日本地震工

学シンポジウム，pp. 1489~1496, 1978年。

- 4) 小野田耕治・楠山豊治・吉川恵也：伊豆大島近海地震による被害(1)，トンネルと地下，Vol. 9, No. 6, pp. 375~380, 1978年6月。
- 5) Tsuneishi, Y., T. Ito and K. Kano: Surface faulting associated with the 1978 Izu-Oshima-kinkai earthquake, 地震研究所彙報，Vol. 53, No. 3, pp. 649~674, 1978年。
- 6) 村井 勇・角田信子・辻村芳子：1978年伊豆大島近海地震の被害・震度と地震断層，地震研究所彙報，Vol. 53, No. 3, pp. 1025~1068, 1978年。
- 7) 伊藤谷生・恒石幸正・狩野謙一：伊豆大島近海地震によって東伊豆町稲取にあらわれた地震断層，第15回自然災害科学総合シンポジウム，pp. 85~88, 1978年。
- 8) 木宮一邦・高木照正：1978年伊豆大島近海の地震による伊豆急行稲取トンネルの変形と地震断層との関連，第15回自然災害科学総合シンポジウム，pp. 307~308, 1978年。
- 9) 森野宏亮ほか：伊豆大島近海地震調査報告，鉄道技術研究報告，No. 1097, 1978年11月。
- 10) 岡本舜三：耐震工学，オーム社，1971年。
- 11) 田村重四郎：地中構造物の耐震設計方法としての変位法に関して，生産研究，Vol. 29, No. 5, pp. 263~269, 1977年5月。
- 12) 竹内 均：地球科学における諸問題，葦葉房，pp. 95~105, 1972年。
- 13) 金森博雄編：地球科学8地震の物理，岩波書店，1978年。
- 14) Haskell, N.A.: Elastic displacement in the near-field of a propagating fault, B.S.S.A., Vol. 59, No. 2, pp. 865~908, April, 1969.
- 15) Sato, R.: Formulation of solutions for earthquake source models and some related problems, Journal of Physics of the Earth, Vol. 17, No. 2, pp. 101~110, 1969.
- 16) Kawasaki, I., Y. Suzuki and R. Sato: Seismic waves due to a shear fault in a semi-infinite medium, Journal of Physics of the Earth, Vol. 21, pp. 251~284, 1973.
- 17) 岡田義光：理論歪地震記象とその応用，地震研究所彙報，Vol. 55, pp. 101~168, 1980年。
- 18) Shimazaki, K. and P. Somerville: Summary of the static and dynamic parameters of the Izu-Oshima-kinkai earthquake of January 14, 1978, 地震研究所彙報，Vol. 53, pp. 613~628, 1978年。

(1981.8.11・受付)