

名古屋大学 工学部 正員 〇川 本 龍 万
 日本道路公団 正員 上野 建 昭
 名古屋大学 工学部 学生員 宮地 克 人

1. まえがき

市街地における双設シールドトンネルの建設がこれに行われるようになり、地表面の沈下や地盤内の応力状態が問題になっている。また、比較的深い地山内での双設トンネルについても、トンネル開削に伴なう生ずるトンネル周辺の弾塑性状態の解析や、逐次掘削によるトンネルの変形挙動と相互干渉の関連等についても考えねばならない。これをにらめかめ、前者は有限要素解析法を用いた種々の視長より双設トンネルの応力や変形状態について検討してきている^{1,2}；その結果の一部をここで報告する。ここでは、まず、地山が完全弾性体であると考えた場合の解析と、重ね合わせによる方法、応力解放による方法、有限破壊理論による方法等により行ない、双設トンネル中心間隔の変化による応力および変形状態を検討した。なお、この場合、重ね合わせ法については、地山に有限領域として解析するため生ずる種々の境界条件について検討した。ついで、地山の非線形性を考慮して、トンネル開削に伴なう地山の非線形弾性の変化する状態を検討した。この場合、二本トンネルと同時に掘る場合と、一本ずつトンネルを開削し、これによる地山の形状後にさらに一本掘る場合と、トンネル中心間隔を変化させて解析している。また、この問題に対する no-tension method の適用についても考えている。

2. 解析方法について

(a) 応力解放法：トンネルの開削に伴なう生ずる地山の応力や変位は、当然、掘削の過程と逐次に再現し、それによる起こる状態の変化を逐次解析することによって正確に把握される。このためには、掘削に伴なう生ずる応力解放（自由面を形成する）の現象を有限要素法に持ち入れて解析する方法がとられる。この方法は、まずトンネル掘削前の地山の初期応力と算定し、そのトンネル掘削予定面上の初期応力を解放することによりトンネル空洞を形成するように解析を行なうもの³。弾性解析のほかに、地山が岩盤の場合には地山のゆがみを考慮し、また、土質地盤ではトンネル掘削によっておこる応力変化や排水状態による地山材料の圧密効果も考慮した非線形解析が行われる。

いま地山を弾性体とし、図-1に示すように、AとBの部をからなる系とす。Aゾーンは掘削されるに残留部を、Bゾーンは掘削される部をとし、1-7-7'面を掘削面とする。要素④、⑤、⑥を掘削するとは、(A+B)系のつり合い状態をA系のつり合い状態に変えることである。そのために必要な掘削節点外力と呼ぶことにすれば、掘削の問題はそれを求めることに帰着する。いま掘削時の計算手順を示すと、(1)掘削面の境界節点と境界要素とデータとを与える。(2)掘削前の状態で初期変位 $\{u_0\}$ と初期応力 $\{s_0\}$ とを算定する。(3)掘削境界節点に注目し、その節点と周囲節点と要素について考え、掘削される要素だけ stiffness matrix を計算し、掘削節点外力 $\{F\}_B$ と変位 $\{u\}_B - B_0$ とを求めた（ここに、 B_0 はBゾーンに作用する物体力である）。(4)掘削後の系に

掘削節点外力のみと作用させて、変位 $\{u_e\}$ と応力 $\{\sigma_e\}$ を求め、(5)掘削によって実際に生じた変位 $\{u_e\}$ は $\{u_e\} = \{u_e\}$ であり、応力 $\{\sigma_e\}$ は $\{\sigma_e\} = \{\sigma_e\} + \{\sigma_e\}$ と求められる。

(b)重ね合わせ法：地山が線形弾性体と仮定されると共に、次のようを解析法が用いられる。すなわち地盤内にトンネルが掘削されている状態を考慮し、これに自重および外荷重と作用させた場合と解析するもので、トンネル掘削によって生ずる変位量は、この条件のもとで得られた値から、掘削前の初期沈下量と差し引いたものであり、また、応力状態はこれらの解析結果によって与えられる。線形弾性解析の場合には(a)の解法と同じ結果が得られる。

(c)有孔板理論による近似解法：いまこのトンネル解析によく用いられている方法で、トンネル掘削位置における初期応力状態と、トンネル孔と有孔の無限領域に作用させて解析する方法である。トンネルが深い位置にあつて、地表面の影響をうけずの場合の線形弾性地山に対して用いられる。有限要素法では有限の解析領域を用いて、その境界に初期応力を作用させている。

3. 解析領域および境界条件、荷重条件の検討

無限のものは半無限の領域に対して、有限要素解析と行かう場合には、解析領域の大きさおよび境界条件が問題になる。ここには2.の(c)の近似解法に対しては図-2に示す領域と、また、2.の(b)の重ね合わせ法に対しては、図-3(a), (b), (c)に示す境界から u に荷重条件を与えた。一般に、土質基礎の解析では、初期応力状態として自重による鉛直方向成分 $\sigma_y = \gamma z$ に対して、水平方向成分を $\sigma_x = K_0 \gamma z$ と、静止土圧係数 K_0 を介して与えることが多い。これに対して、水平方向変位が拘束されていることをより厳格に表現する $\lambda = 1/(1-\nu)$ が与えられる。このような荷重条件(や境界面での水平方向変位の拘束条件)が解析結果に与える影響は次に示されるとおりである。なお、これらと比較検討した結果、case 1が妥当と思われるので、以後の重ね合わせ法から u に応力解放法による解析にはcase 1の境界条件を用いた。

4. 線形弾性解析結果

2.の(c)の方法で解析したトンネルの変形状態から u にトンネル周辺要素の主応力の分布を図-4, 5に、また、トンネル中心を含む水平断面に沿う鉛直応力の分布を図-6に、それぞれトンネル中心間隔が $L = 1.5D, 2.0D, 3.0D$ の場合に対して示されている。

図-7に重ね合わせ法によって、図-3(a), (b), (c)の条件に対して求めた地表面の沈下量を示す。case 3の条件では地表面に隆起が生ずる場合がある。地表面の沈下量はトンネルの直上でもっとも大きく、中心間隔が小さくなるに従ってその量が增加することからわかる。case 1に対するトンネル周辺の要素における最大、最小主応力の分布を示すと図-8のようである。これらの応力値は要素の重心位置での値であると与えられるから、最大主応力はいわゆるトンネル周辺応力と与えておらず、実際より小さい値を示すことになる。また、かなり大きい最小主応力を生じている。これらの点については6節等三角要素(要素内の応力、ひずみは線形に変化する)を考慮して、さらに計算を進めている。トンネル周辺応力は中心間隔が小さくなるに従って内側壁で集中度が高くなる。その他の位置ではあまり変化しないようである。図-9にトンネル中心を含む水平断面に沿う最大主応力の分布を示す。

次に応力解放法によって求めた結果を示す。双設トンネルでは上下線が別々に掘削されたり、また1本のトンネルについても断面の掘削順序には種々ある。これらの場合のように逐次掘削が行なると

きには、お段階での掘削による地山の緩みと考慮し解析が必要である。こゝでは、トンネルの掘削と理想的に2段階にわけ考え、その場合のトンネル周辺の弾性変形および応力状態、地表沈下量の变化について示す。 $l=2.0D$ の場合に対し、第1次掘削で全断面の36%の掘削を行ない、第2次掘削で全断面を掘削するものと2計算の結果を示すと、図-10および図-11のようである。こゝに示す程度でトンネル深さでは、地表沈下量は掘削断面径にほぼ直線的に比例するようと思われる。これによりトンネル周辺の応力、変形量は地表沈下量ほど増加すると思われる。

5. 非線形解析について

砂質地盤を対象として、破壊包絡線が $\tau = c + \sigma \tan \phi$ で表わされる場合の応力-ひずみ (σ - ϵ) 関係と拘束応力 (σ_m) をパラメータとして求め、これを用いて双設トンネル周辺の応力および変位の非線形解析(弾塑性解析)を行なつていく。(図-12は実験値、図-13は計算値)。次に、図-13の曲線を弾性部と塑性部との2本の直線と表わされるような定弾塑性体と考へ、図-14に示すように応力履歴を考慮した逐次掘削による非線形解析を行なつていく。さらに地山材料の引張応力に抵抗できないものとしての解析を進めていく。この解析方法には、一次計算で引張応力を生ずる要素を、その引張主応力方向の主弾性係数を0とするような要素におきかえ、直交異方性体に対する解析の繰返し計算を行なうか、いわゆる no tension method (O.C. Zienkiewicz et al: Géotechnique 18, 1968, 56) を用いる方法があるが、著者は後者による方法を用いていく。これらの解析については講演会当日発表できたいと思ふ。

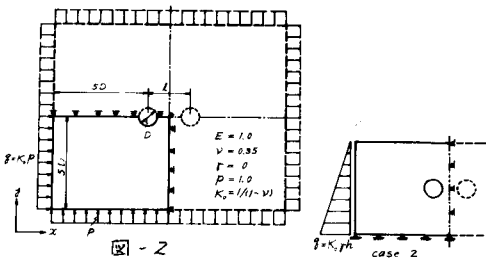


図-2

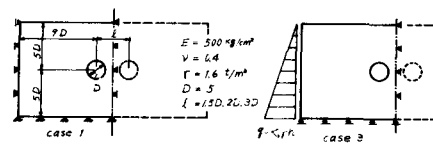


図-3

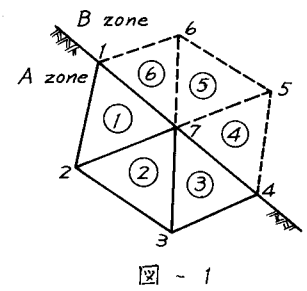


図-1

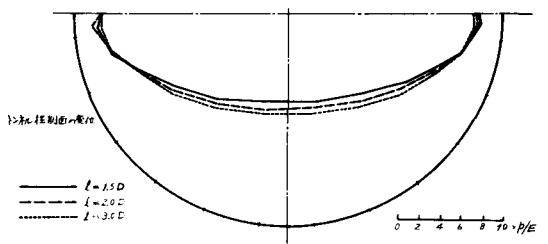


図-4

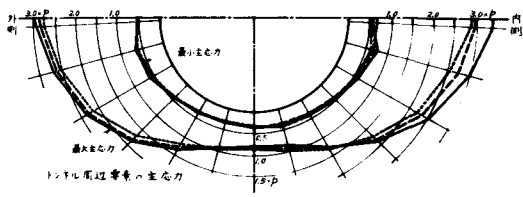


図-5

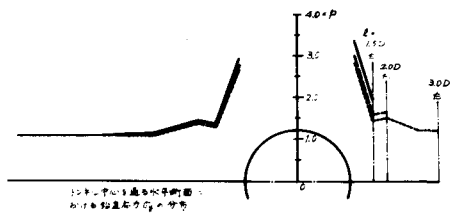
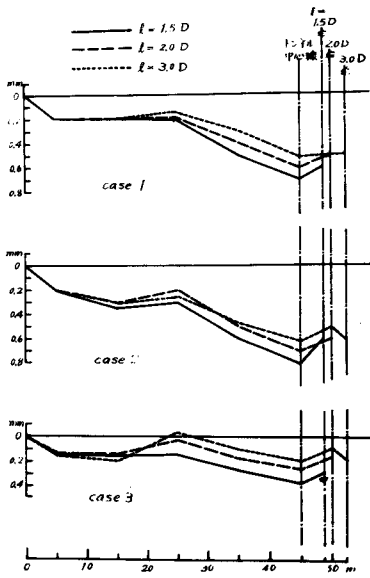


図-6



地表面の沈下
図 - 7

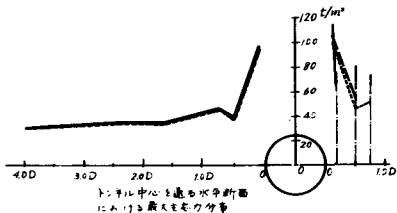


図 - 8

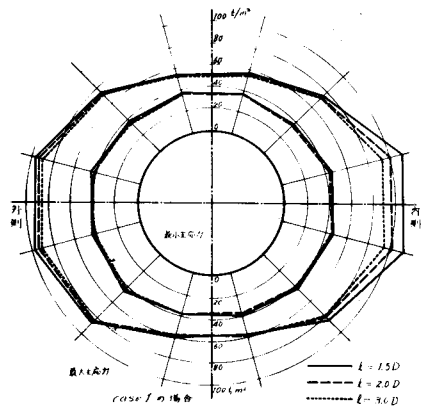


図 - 9

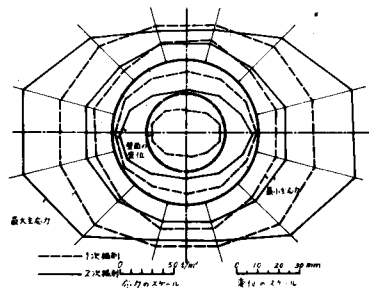


図 - 10

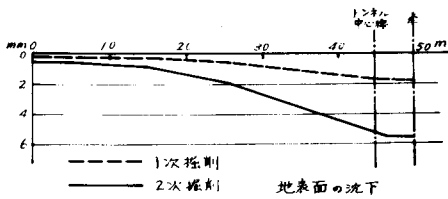


図 - 11

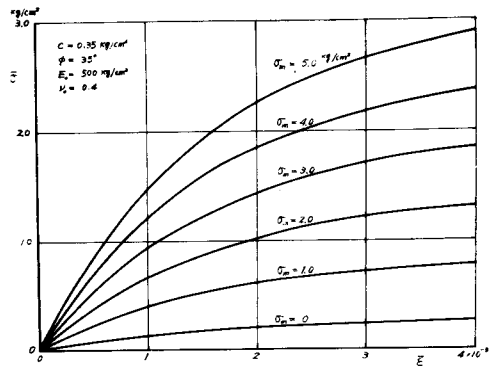


図 - 12

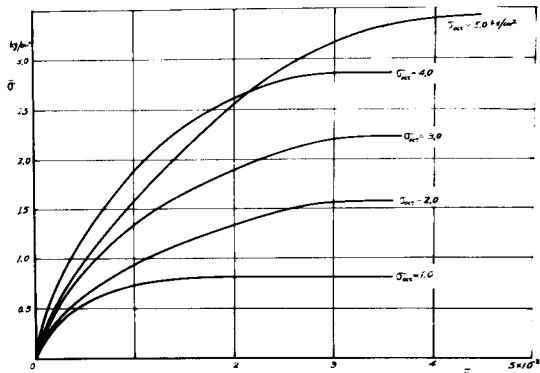


図 - 13

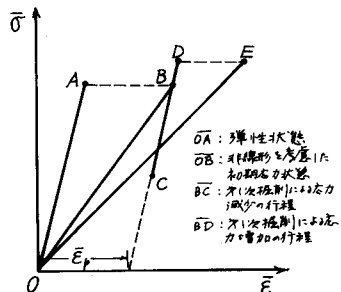


図 - 14