

周辺地盤の影響を考慮したシールドトンネルの 等価剛性とトンネル諸元との関係

INFLUENCE OF RIGIDITY OF SOIL SURROUNDING SHIELD TUNNEL UPON
EQUIVALENT RIGIDITY OF THE TUNNEL IN AXIAL DIRECTION

田村重四郎*・野口 利雄**

Choshiro TAMURA and Toshio NOGUCHI

The purpose of this study is to investigate interaction between the ground surrounding shield tunnel and the segments especially, ring-joint portion. When we regard the shield tunnel as a mechanically continuous tubular structure with equivalent rigidity in the axial direction, for practical use. In this paper, numerical simulation of the relation between mechanical properties of the ground and equivalent rigidities is described. The numerical simulation shows that the equivalent rigidity increase with increase of the stiffness of soil material, tunnel-diameter and earth covering.

Keywords : Shield Tunnel , Equivalent Rigidity , Surrounding Soil
Axial Deformation , Interaction

1. まえがき

地震時のシールドトンネルと地盤との関係は、地震時に発生する地盤の変位と変形が、地盤とトンネルを結ぶばねを介してトンネルに伝達され、トンネルが変形し、断面力が発生するとされている。このときシールドトンネルの変形、断面力を算出するには、軸方向に限って言えば、弾性係数、断面積によって表されるシールドトンネルの剛性が必要である。シールドトンネルは、トンネル軸方向に圧縮変形が発生する場合はセグメントの全断面が有効となるが、引張変形が発生する場合は、シールドトンネルはセグメント～セグメント間ばね（ボルト、継手板等）～セグメントの直列ばね系となる。構造力学的に線状構造物として取り扱うためには、そのばね系と等価な剛性を持つ様な線状構造物に置換する必要がある。この剛性が等価剛性と呼ばれているが、最近の研究によると、シールドトンネル周辺の地盤の特性により、等価剛性が変化することが示されている。このことはシールドトンネルと周辺地盤の相互作用が従来考えられていたものより複雑であることを表している。ここでは有限要素法を用い、シールドトンネルの軸方向の等価剛性が継手部付近の地盤の性質やトンネルの諸元によりどのように変化するかについて数値シミュレーションを行ったので報告する。

* 正会員 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科

** 正会員 (株)熊谷組 技術開発本部シールド技術部

2. シールドトンネルの等価剛性

通常、力学的に不連続な構造体であるシールドトンネルを一様な剛性を持つはりに置換して、弾性床の上のはりとみなして解析を行っている。図-1は軸方向圧縮、及び引張の場合の軸剛性を示している。対象区間として、継手部を中央にはさんだ1リング区間を考える。

図-2には地中の線状構造物の地震応答解析に際して通常使用されている数学モデルが示されている。本研究で検討対象としているのは前述のように、地盤とトンネルを結ぶばね k である。このばね k は、周辺の土の力学的性質を表すものでなければならない。図-2ではばね k は互いに関連することなく独立にトンネルに結ばれている。しかしさらに細かくみるならば、これらのばねは完全に独立ではなく、互いにセグメントとその周辺地盤との相互関係により結ばれている。シールドトンネルはセグメント部の剛性が継手部の剛性に対し著しく大きい為、変形が継手部に集中し、軸方向に不連続な変形をしようとする。その結果、シールドトンネル継手部付近の地盤は、局部的にみると全体的な場合とは逆にセグメントの変形に拘束される形となる。すなわちトンネル継手部のごく近傍の地盤は、継手部の伸縮により生ずる局部的ではあるが大きな変形を受けて、場合によってはトンネル壁との接触面で相対的なすべりを生じたり、あるいは亀裂を発生することが考えられる。

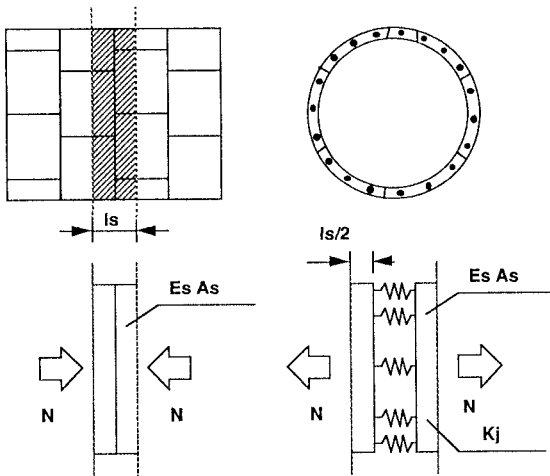


Fig. 1 Equivalent rigidity model

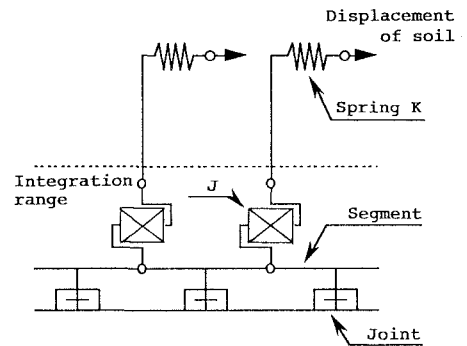


Fig. 3 Interaction of soil and segment

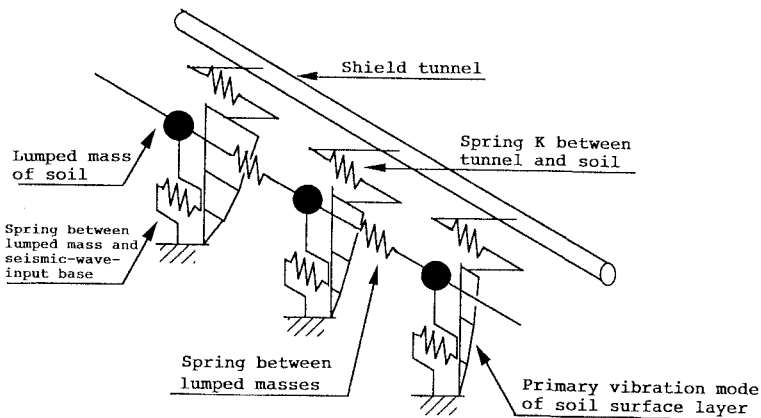


Fig. 2 Lumped mass model

このような複雑な地盤とトンネルとの関係は継手の存在により生じられる挙動である。これには裏込め材料の性質、地震時のリング継手部付近の土の挙動、トンネル壁面での裏込め材とその周辺の土との関係が含まれる。

これらの要因をそれぞれ別に考慮して地震応答計算を実施することは事実上不可能であるが、特に大地震時に、これらの要因がどのようにトンネルの挙動に影響を与えるかを検討することは必要であろう。図-3は従来のkばねに加えて、トンネルと周辺地盤との間に相互作用の領域を設けて、上述の要因による影響を求め、これをトンネルの等価剛性に含める考え方を示したものである。図中jは継手部の存在により生ずる地盤とトンネルとの相互作用（相対的なすべり、地盤の亀裂）を表す。

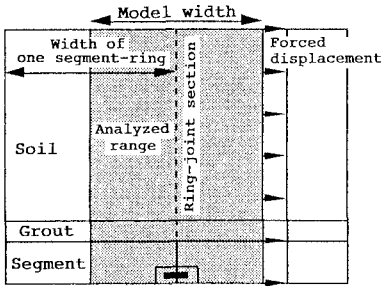


Fig. 4 Analyzed range

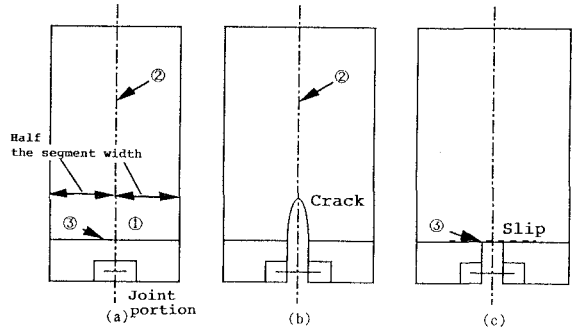


Fig. 5 Soil behavior surrounding joint portion

3. 数値解析

有限要素法を適用して軸対称モデルにより数値解析を行う。リング継手を中心に1リング区間を取り出してその両端で地盤とセグメントにそれぞれ同量の地盤の引張ひずみに対応する軸方向強制変位を与えると、セグメントに接触する地盤がセグメントを拘束し、トンネルの見かけのばね定数が変化し、地盤の影響を考慮した等価剛性を求めることができる。等価剛性の算出方法としては、セグメントの端面に作用する力がセグメント～セグメント間ばね～セグメントのばね系を代表する断面力であると考え、この断面力と強制変位量とによって、この系のばね定数を計算できる。この考え方のもとで、地盤の弾性係数、土被り、トンネル径などの関係要因をパラメータとして、地盤のひずみレベルを変化させて等価剛性を算定し、この値をトンネルのみの場合の等価剛性と比較してその比を求め、これを等価剛性比とする。従ってトンネルのみの等価剛性に各地盤条件下での等価剛性比を乗ずれば、それぞれのケースでの等価剛性の値が計算できる。

3-1. 解析モデル

解析対象範囲を図-4に示す。モデルが左右対称なのでモデルの右半分を採用している。拘束条件はモデルの右側を、鉛直・水平両方向自由とし、矢印の方向に強制変位を与える。モデルの中心線上、即ちリング継手断面で鉛直方向自由、水平方向固定とする。

地盤、裏込め材、セグメント本体部については、軸対称アイソパラメトリック要素を使用する。リング継手は継手板とボルトよりなるものとし、これを直列ばねで表すことにして、はり要素を使用する。

地盤、セグメントの端部に一樣な強制変位を与えた場合、継手板とボルトからなる継手部分に対し、セグメントの剛性のはるかに大きいために、セグメントはほぼ剛体変位をし、継手部に変形が集中する。しかし地盤は一樣に変形しようとするため、図-5 (b) のように双方の接触で地盤が降伏して引張亀裂が生じるか、図-5 (c) のように地盤とセグメントの接触面上ですべりを起こすことが予想されるため、亀裂、す

ベリの想定される面上にジョイント要素を設ける。強制変位を一定増分ごとに増加して作用させ、ジョイントに接している地盤要素の応力状態を算定し、初期応力を考慮した地盤要素の応力が引張になったとき亀裂が発生すると考える。また、ジョイントのせん断強度をセグメント外面に垂直に作用する応力と摩擦係数から計算し、ジョイントのせん断応力がそれを越えた場合すべりが発生すると考える。亀裂、すべりが発生したら、ジョイントの剛性を1/100 に低下させる。

3-2. 地盤のひずみ依存性

トンネル周辺地盤のひずみ依存性については、Hardin-Drnevich により求められたせん断弾性係数低減比～せん断ひずみ振幅の関係を適用する。解析方法としてはすべての地盤要素について初期弾性係数を設定しておき、各載荷ステップ毎に地盤要素のせん断応力、せん断ひずみを求め、応力～ひずみ曲線上にのるように繰り返し計算を行う。載荷ステップは25μきざみとする。

3-3. 継手部の非線形性

セグメントのリング継手部は継手板、ボルト、座金、ナットで構成されているものとし、トンネル軸方向に引張力が作用した場合には継手部を各構成材料から算定されるばねの直列ばね系とみなすことにする。地震時にトンネル軸方向引張力が作用した場合には、ばね定数の値は次の3段階を考慮する。

段階1：ボルト及びその周辺部で継手板が離間せず継手板は弾性状態

段階2：ボルト及びその周辺部で継手板が離間して継手板は弾性状態

段階3：ボルト及びその周辺部で継手板が離間して継手板は塑性状態

各段階でのばね定数は次のように移行すると考える。

段階1⇒段階2：継手部発生軸力がプレストレスを越えたとき

段階2⇒段階3：継手部変位が継手板降伏応力発生時の値を越えたとき

ボルトの締めつけ力は許容応力の50%を考える。

3-4. 解析諸元

地下鉄単線断面、外径7.0m、桁高0.3m、リング間ボルト21本のセグメントを基本として想定する。セグメント本体は設計基準強度：420kgf/cm²、弾性係数：3.50×10⁵kgf/cm²、ポアソン比：0.167 とする。継手板やボルト等の鋼材に関しては、弾性係数：2.10×10⁶kgf/cm²とする。

解析対象地盤としては、シールドトンネルが構築される地盤、主として沖積層、洪積層を想定する。解析は静的解析とし、地震時に地盤に発生すると考えられるひずみを強制変位に換算しモデルに作用させる。

今回、解析にあたって考慮したパラメーターは、1.地盤の弾性係数、2.トンネル径、3.土被り高さ、4.継手部のばね定数、の4種類である。等価剛性に対する影響度は、地盤よりも裏込め注入材のほうが大きいことがわかっているが²⁾、裏込め材は地盤と同程度以上の強度を持つものが望ましいとされているため、双方の弾性係数は等しいと考える。地盤と裏込め材のポアソン比はそれぞれ0.49、0.2 とした。強制変位による地盤のひずみは1mあたり1mm の変形、1000μまでを考えた。自重による初期応力算出時の地盤の単位体積重量とポアソン比はそれぞれ1.8tf/m³、0.45とした。モデル構造図を図-6に示す。

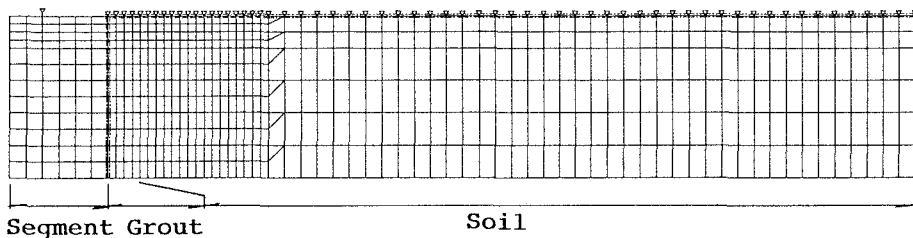


Fig. 6 Configuration of the model

等価剛性算出時に変化させるパラメーターを表-1に示す。

Table 1 Parameters Taken in This Study

1.Young's Modulus of Soil	E (kgf/cm ²)	1000, 2000, 3000, 5000
2.Diameter of Tunnel	D (m)	5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0
3.Earth Covering	H (m)	10.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0
4.Rigidity of Joint	R (×10 ⁶ kgf/cm)	23.04, 11.52, 4.61, 2.30

4. 解析結果

図-7に地盤の弾性係数が1000kgf/cm²の条件の下でひずみを200μごとに増加した場合の変位及び降伏要素を示す。点線が変形前の状態、実線が変形後の状態である。*印は亀裂が、×印はすべりが発生したジョイント要素を示す。地盤要素内の数字はせん断ひずみの大きさを示し、0は100μ以上1000μ未満、1以上はひずみの千単位の値である。

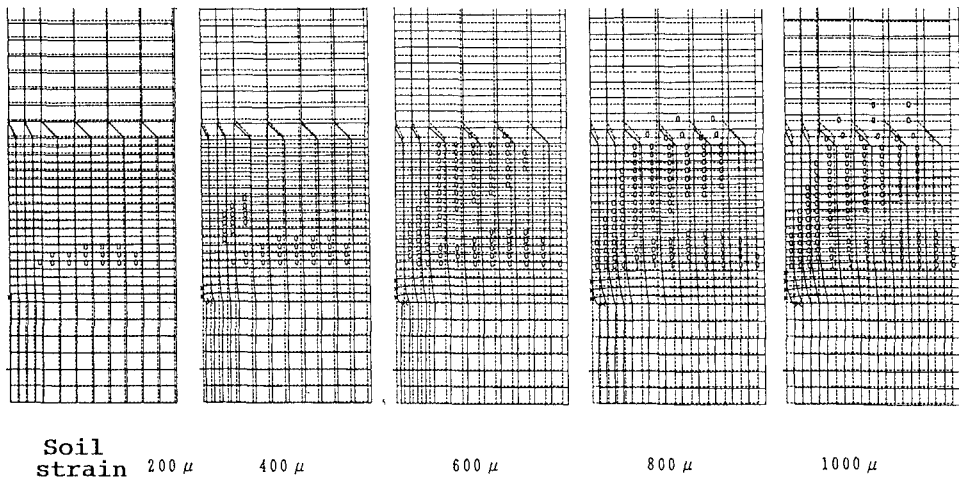


Fig. 7 Behavior of the soil surrounding the segments

5. 考察

図-8に等価剛性比と地盤ひずみの関係を示す。継手部の剛性が一定の(a),(b),(c)の各ケースでは、地盤ひずみが増加するにつれて等価剛性比も上昇する。この傾向は地盤ひずみが500μ前後までであり、地盤ひずみが200μ程度で継手板が降伏することにより継手部のばね定数が低減し、セグメントを拘束する地盤や裏込め材の影響度が高まったためと考えられる。その後地盤ひずみが増加すると、継手部付近のセグメント周辺部に亀裂やすべりが発生し、セグメントに対する周辺部分の拘束は徐々に低下し、等価剛性比も漸減する。これに対し継手部の剛性を低減させた(d)のケースでは、等価剛性比の上昇はみられず、地盤ひずみが100μの時に等価剛性比が最大となり、以後地盤ひずみの増加に伴い等価剛性比は減少する。これは(d)のケースでは、可とう継手の設置を想定して継手板が降伏しない条件で計算しているためだと思われる。

まとめると以下のようなになる。

①. 地盤の弾性係数、トンネル径、土被りの値が大きくなるとトンネルの等価剛性比が増加する。今回の計算ケースの範囲内に限って言えば、地盤ひずみ500μ時の等価剛性比の差は、地盤の弾性係数による影響は約10%、トンネル径による影響は約9%、土被りによる影響は約4%である。値としては1.05~1.25の範囲をとる。

②. 継手部の剛性を低減させるとトンネルの等価剛性比が増大する。これは地盤の弾性係数が大きいと顕著であり、地盤の弾性係数が 1000kgf/cm^2 と 3000kgf/cm^2 の場合、地盤ひずみ 500μ 時の等価剛性比の最大差は約20%である。値としては1.10~1.65の範囲をとるが、差が大きいため実設計への適用はより詳細な検討が必要であると思われる。

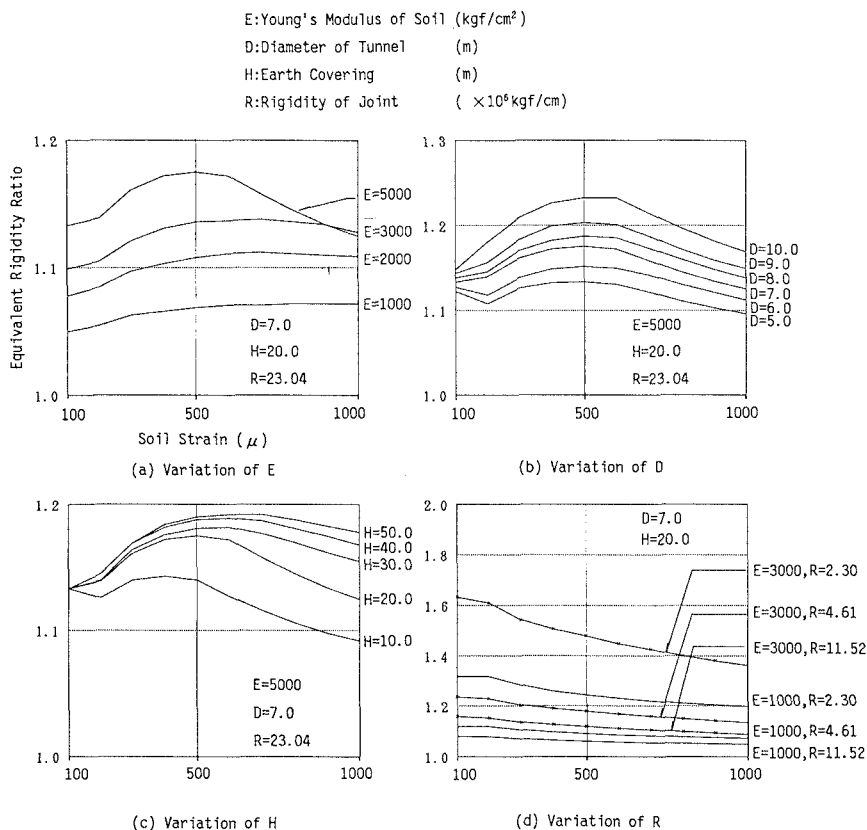


Fig. 8 Relationship between Equivalent Rigidity and Soil Strain

6. 参考文献

- 1) 田村重四郎・鈴木 猛康・野口 利雄: シールドトンネル 継手部周辺地盤が等価剛性に与える影響について、土木学会第45回年次学術講演会、pp.1222 ~1223, 1990.9.
- 2) 田村重四郎・野口 利雄: 周辺地盤の影響を考慮したシールドトンネルの等価剛性について、地下空間利用シンポジウム 1990、pp.55 ~60, 1990.12.
- 3) Choshiro TAMURA・Toshio NOGUCHI: Influence of Rigidity of Soil Surrounding Shield Tunnel Upon Equivalent Rigidity of the Tunnel in Axial Direction, THIRD U.S. CONFERENCE ON LIFELINE EARTHQUAKE ENGINEERING, pp.1130~1139, 1991.8.