

良質地盤におけるトンネル構造の設計法に 関する実験的検討

Experimental examination about the method of designing the tunnel structure in the
good ground condition

岡田範彦¹⁾・真下英人²⁾・石村利明³⁾

Norihiko Okada, Hideto Mashimo and Toshiaki Ishimura

- 1) 正会員 修士(工学) 独立行政法人土木研究所 基礎道路技術研究グループ(トンネル) 交流研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:okada55@pwri.go.jp
- 2) 正会員 博士(工学) 独立行政法人土木研究所 基礎道路技術研究グループ(トンネル)
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
- 3) 正会員 独立行政法人土木研究所 基礎道路技術研究グループ(トンネル)
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

Two-dimensional model test was carried out to clarify the impact on the sectional force of segment by the difference of tunnel structure and ground characteristics in good ground condition. The numerical analyses in two-dimensional elastic FEM and frame modeling were also carried out on the basis of the results of model test. The effect of reducing sectional force was confirmed by performing multi-hinge joint structure from the results of both model test and numerical analysis. The result of frame analysis was almost equivalent to the one of FEM analysis by setting the coefficient of ground reaction appropriately in frame analysis referring to FEM.

Key Words : multi-hinge, model test, finite element method analysis, coefficient of ground reaction

1. はじめに

これまでシールド工法による大深度下における、道路トンネルのような大断面トンネルでの実績はなく、大深度地下トンネルの覆工設計に際して必要となる設計荷重や諸定数の設定方法が確立されていないのが現状である。また、大深度地下では自立性の高い比較的良質な地盤となるため、従来の軟弱地盤等で採用されてきたセグメントの添接効果を期待した千鳥組みによるトンネル構造に代わり、地山の強度を生かした合理的な覆工構造の採用も考えられる。

本報告では、良質地盤を対象としてトンネル構造および地盤特性の違いがセグメント本体に発生する断面力に与える影響を二次元載荷模型実験により検証した。また、実験結果について二次元弾性FEM解析および骨組み解析による再現を試み、骨組み解析における地盤反力係数の設定手法に関して考察を行

った。

2. 二次元載荷模型実験および二次元弾性解析

(1) 載荷装置および模型の概要

トンネル構造および地盤特性の異なる複数の条件下で二次元載荷模型実験を実施した。二次元載荷装置の概要図を図-1に示す。当該装置の側面は載荷板となっており、外側に設置されている計12基の油圧ジャッキにより4方向からの載荷が可能な構造である。当該実験では、鉛直方向、水平方向の載荷重の比率を変化させ、鉛直方向の載荷圧が 300kN/m^2 となるまで荷重制御方式による段階載荷を実施した。

実験に用いたトンネル模型は、外径330mm(肉厚12mm)、長さ300mmの鋼製の円筒形模型(剛性一様構造)、および60°ごとにヒンジ構造の継手を設けた鋼製の多ヒンジ継手構造模型の2種類であり、

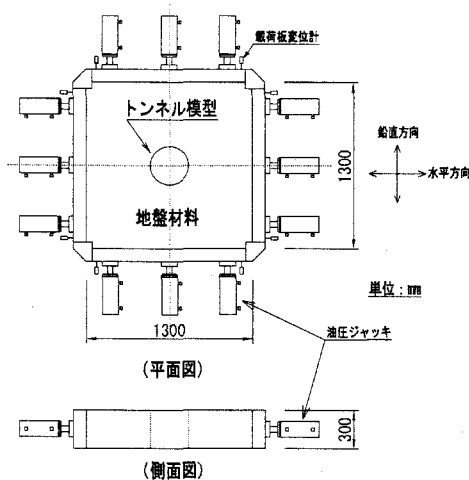


図-1 二次元載荷装置概要図

載荷装置の中央に設置した。各々の模型には、トンネル模型の発生断面力、作用荷重、および変形の把握を目的とし、所定の位置にひずみゲージ・変位計を設置している。図-2に計測機器設置概要図を示す。

(2) 模型地盤の仕様

地盤材料は乾燥状態の豊浦標準砂および洪積粘性土を模擬した人工地盤（材料：ソイルセメント）を使用した。砂地盤は1層あたり5cmの砂を搬入し表面を均した後、ハンドバイブレーターを用いた転圧を行う作業を6層繰り返し、相対密度 $Dr = 80\%$ の地盤を作成した。また、人工地盤は実験準備段階で実施した一軸圧縮試験結果から、養生期間を3日間に設定した。模型地盤の諸元を表-1に、 $1m^3$ 当りの人工地盤の配合を表-2にそれぞれ示す。（表中の変形係数は実験前に行った力学試験結果による値）。本実験は、トンネル模型の構造および側方土圧係数を変化させて実施するものとし、実施した実験ケースを表-3に示す。

(3) 二次元弾性FEM解析の概要

表-3に示した各実験ケースに関して、二次元弾性FEM解析によるシミュレーションを行い、解析による実験結果の再現を試みた。当該解析は、トンネル模型を梁要素、地盤を弾性体としてモデル化している。表-4に解析条件、図-3に解析メッシュ図をそれぞれ示す。解析に用いる地盤の変形係数 E および側方土圧係数 λ は、模型実験における鉛直載荷圧～模型地盤ひずみ（載荷板の変位を載荷装置幅（1.3m）で除することで算出）関係および鉛直載荷圧と水平載荷圧の比からそれぞれの値を設定するものとした。

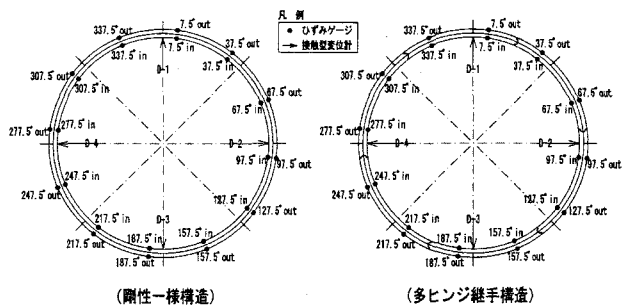


図-2 計測機器設置概要図

表-1 模型地盤の諸元

地盤材料	豊浦標準砂	人工地盤 (ソイルセメント)
単位体積重量 (kN/m^3)	15.87	—
相対密度(%)	80%	—
変形係数 (MN/m^2)	8.5	45.1～71.4 (養生期間 3 日)

表-2 人工地盤の配合 ($1m^3$ 当り)

材 料	数 量
水 (kg)	600.5
セメント (kg)	286.3
クレーサンド (kg)	794.7
流動化剤 (%)	19.4

表-3 実験ケース

	地盤材料	模型種別	側方土圧係数 λ
CASE1	豊浦 標準砂	円筒形	0.45
CASE2		多ヒンジ	0.45
CASE3			0.1
CASE4			1.0
CASE5	人工地盤	円筒形	0.45
CASE6		多ヒンジ	0.45

表-4 解析用物性値

	地 盤		鋼 材 (トンネル模型)
	砂地盤	人工地盤	
変形係数 E (kN/m^2)	鉛直載荷圧～地盤ひずみ 関係より設定		2.1×10^8
ポアソン比	0.3	0.33	0.29

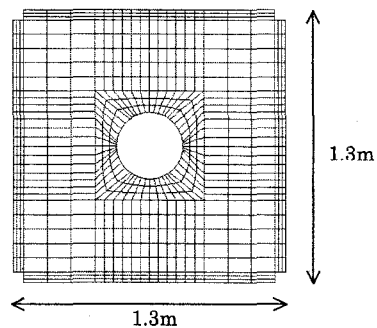


図-3 解析メッシュ図

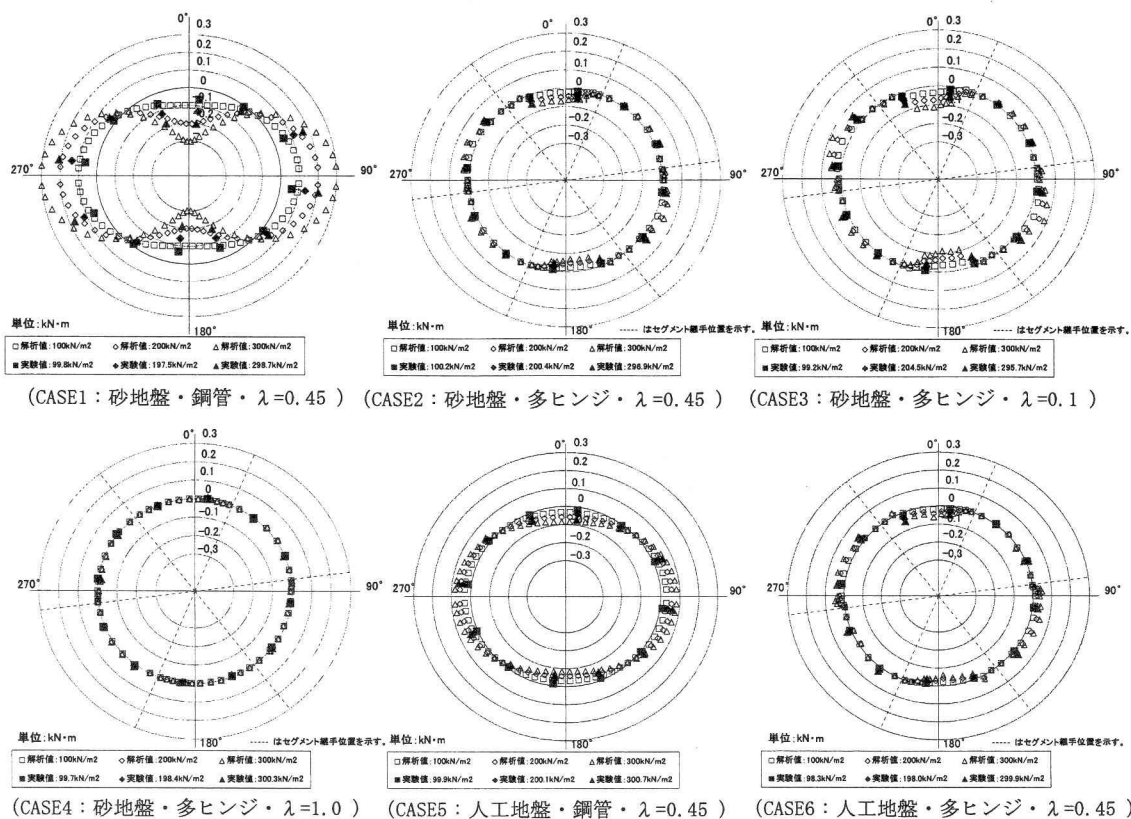


図-6 曲げモーメント分布比較図

(4) 実験値と解析結果の比較検討

図-6はCASE1～6の鉛直载荷圧100・200・300kN/m²の各段階における模型の発生曲げモーメント分布を模型実験結果とFEM解析結果で比較したものである。CASE1において実験値(白抜き記号)と解析値(塗り潰し記号)に若干の差は見られるものの、いずれのケースも実験値と解析値は概ね一致していることがわかる。また、地盤条件・载荷条件ともに同一条件であるCASE1とCASE2(砂地盤)において実験値の最大曲げモーメントを比較すると、CASE2の曲げモーメントはCASE1の約24%の値に低減されている。次にCASE2～4の曲げモーメント分布図に着目すると、側方土圧係数が0.1、0.45、1.0と大きく異なる条件であるが、いずれも0.1kN・m以下の曲げモーメントしか発生しておらず、CASE間の曲げモーメントに大きな差は見られていない。この結果から、多ヒンジ継手構造では側方土圧係数 λ の変化にあまり依存せず断面力を抑制できるものと思われる。地盤材料に人工地盤を用いたCASE5とCASE6において実験値の最大曲げモーメントを比較すると、CASE6の曲げモーメントはCASE5の約72%となり、砂地盤と比較すると断面力の低減が小さい。

この理由としては、人工地盤が非常に硬質であったため、地盤自体が载荷圧に対して抵抗し、模型への荷重伝達が少なくなったために模型に発生する曲げモーメントが抑制されたことが挙げられる。しかしながら、砂地盤・人工地盤で断面力の低減割合の大小はあるものの、多ヒンジ継手構造の断面力抑制効果が見られており、人工地盤のような硬質地盤においても多ヒンジ継手構造にすることによる発生曲げモーメントの抑制効果があるものと思われる。

図-7は同様の比較を模型の内空変位に関して行ったものである。砂地盤で载荷条件が同一であるCASE1とCASE2の最大内空変位量を実験値で比較すると、CASE2はCASE1に対して鉛直方向で約1.8倍、水平方向で約3.2倍の変形が見られた。同様の比較を人工地盤で载荷条件が同一であるCASE5とCASE6で行うと、CASE6はCASE5に対して鉛直方向で約2.3倍、水平方向で約2.1倍の変形が見られた。

また、内空変位に関する解析による再現性に着目すると、CASE2、CASE3では実験値と解析値に若干の差が見られている。これは、実験の初期段階において鉛直方向、水平方向の载荷圧がそれぞれの方向で均等にかからず、模型全体が鉛直方向に移動して

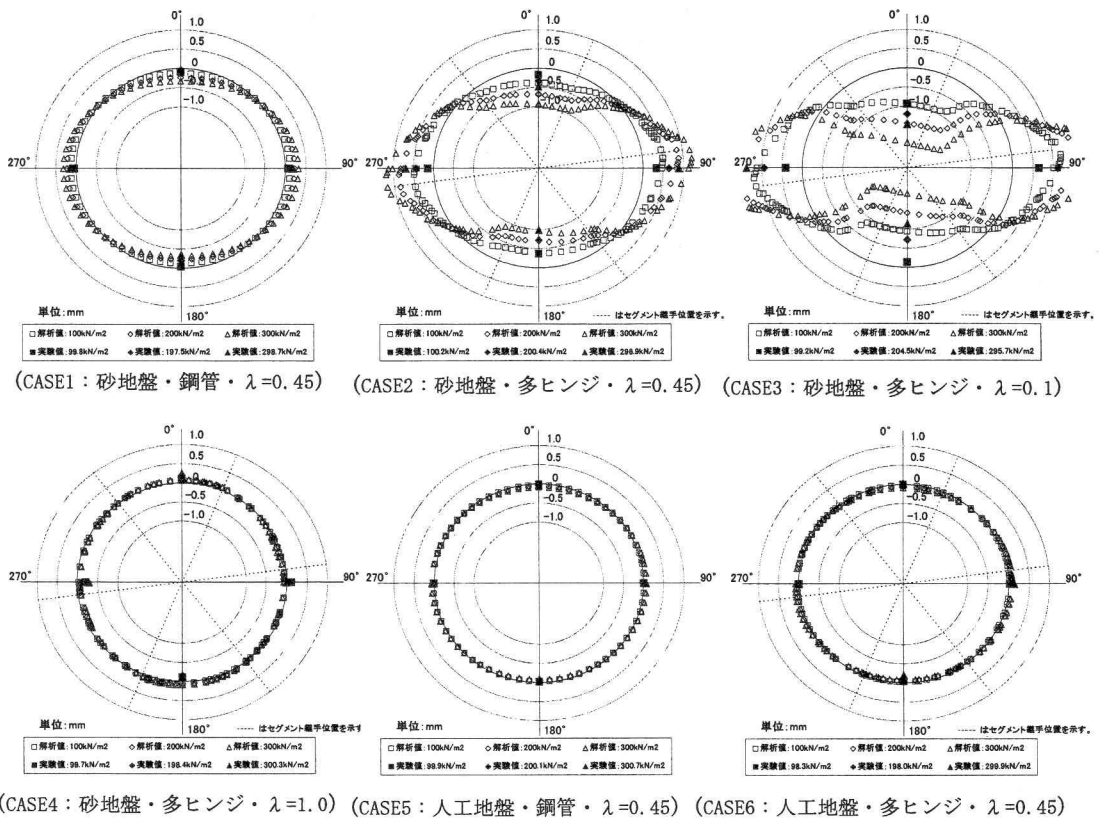


図-7 内空変位分布比較図

しまったために生じた差であると考えられる。この2ケースにおける値に若干の差は見られたものの、全体的に実験値と解析値は概ね一致しており、模型変位にも一定の精度での再現性が得られた。これより、断面力・内空変位の両者において実験結果と解析結果が概ね一致していることから、実験時の鉛直載荷圧～地盤ひずみ関係、鉛直載荷圧と水平載荷圧の比から設定した地盤の変形係数 E と側方土圧係数 λ を用いた二次元弾性FEM解析により、一定の精度で模型実験結果を再現できた。

3. 骨組み解析による検討

本節では、現在のセグメント設計において用いられている骨組み解析（フレーム解析）により前節のCASE1～CASE6までの各ケースに関するシミュレーションを行い、骨組み解析でトンネル挙動を検討する際の、地盤反力係数の設定手法に関する考察を行った。

(1) 骨組み解析の概要

図-8に骨組み解析モデルを示す。当該解析には、

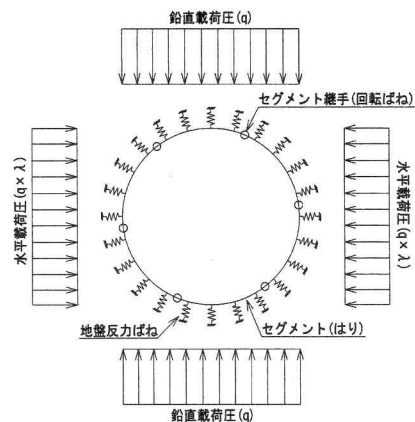
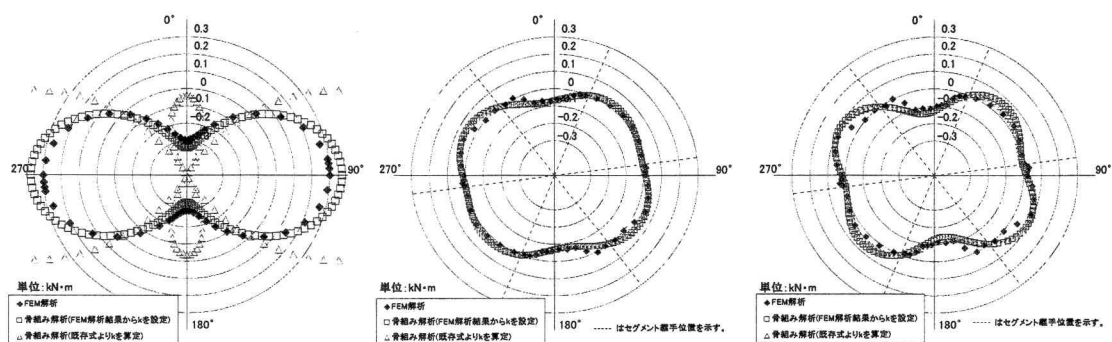
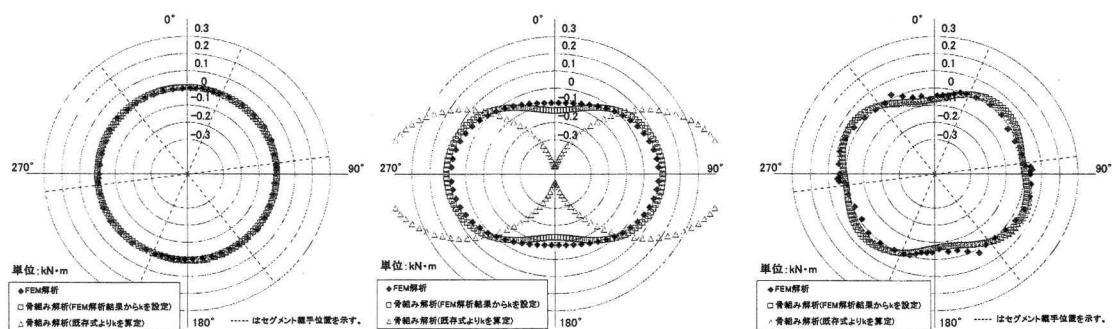


図-8 骨組み解析モデル

セグメントを直線梁、セグメントピース間の継手を回転ばね（回転ばね定数を剛性一様構造では無限大、多ヒンジ継手構造ではゼロとしている）、トンネル周囲の地盤を地盤ばねでモデル化したはりばねモデルを使用した。また、セグメント設計において骨組み解析を行う場合、トンネルが地盤側に変位した場合（受働側）に限り地盤ばねで支持され、トンネル内空側に変形した際（主働側）には地盤ばねによる



(CASE1: 砂地盤・鋼管・ $\lambda=0.45$) (CASE2: 砂地盤・多ヒンジ・ $\lambda=0.45$) (CASE3: 砂地盤・多ヒンジ・ $\lambda=0.1$)



(CASE4: 砂地盤・多ヒンジ・ $\lambda=1.0$) (CASE5: 人工地盤・鋼管・ $\lambda=0.45$) (CASE6: 人工地盤・多ヒンジ・ $\lambda=0.45$)

図-9 曲げモーメント分布比較図(FEM解析と骨組み解析)

支持を考慮しないものとしているが、当該解析ではこの主働側の地盤ばねを考慮した解析を実施するものとした。ここで地盤ばね定数は、前節の二次元FEM解析結果から得られるトンネル法線方向の発生応力をその箇所のトンネル内空変位で除した値とし、受働側の地盤ばねとしては 90° 、 270° における値、主働側の地盤ばねとしては 0° 、 90° における値をそれぞれ設定した。

また、現在、実設計に用いられている地盤反力係数 k の算定式のうち、「トンネル標準示方書 開削工法編・同解説¹⁾」では、トンネル本体の鉛直方向地盤反力係数を下式により算定している。

$$k_v = 0.5\alpha E_0 B_v^{-3/4} \dots \dots \text{式 (1)}$$

ただし、 α ：変形係数推定法に応じた係数
($\alpha=1$ とする)

E ：地盤の変形係数 (kN/m^2)

B_v ：載荷幅 (m)

本節では、表-3に示した各ケースの実験結果から得られた地盤の変形係数 E を式(1)に代入して算出される地盤反力係数 k (kN/m^3)を用いた骨組み解析も実施するものとした。

外力条件は模型実験における荷重条件を想定し、鉛直方向に 300kN/m^2 、水平方向に(鉛直載荷圧 300kN/m^2) $\times$ (側方土圧係数 λ)の載荷圧を作用させるものとした。

(2)解析結果

図-9は各ケースのトンネルの発生曲げモーメント分布を二次元弾性FEM解析結果と骨組み解析結果の両手法で比較したものである。二次元FEM解析結果から地盤反力係数を設定した骨組み解析結果(図中の□)は、二次元FEM解析結果(図中の◆)と概ね一致している。一方、式(1)から設定した地盤反力係数を用いて行った骨組み解析結果(図中の△)は、CASE2～4、CASE6の多ヒンジ継手構造では地盤反力係数の違いがトンネルに発生する曲げモーメントにあまり影響を及ぼさない傾向が見られたため概ね一致したが、CASE1・CASE5の剛性一様構造における解析結果では、二次元FEM解析結果と大きな差が見られる結果となった。これより、前節で述べた多ヒンジ継手構造にすることによる断面力の抑制効果は、骨組み解析においても同様の結果が得られることが確認できた。また、骨組み解析において主働側の地盤ばねについても考慮し、二次元FEM解析

結果から得られたトンネル法線方向の発生応力とその箇所のトンネル内空変位量から得られる地盤反力係数の値を用いることにより、二次元FEM解析結果とほぼ同等の結果を得ることができた。

4. おわりに

本研究では、良質地盤を対象としたトンネル構造や地盤条件の異なるケースでの二次元模型載荷実験を実施し、実験結果を二次元弾性FEM解析、骨組み解析によりシミュレーションすることで、トンネル構造の違いが発生断面力に及ぼす影響に関して検討した。

本研究により得られた知見は以下の通りである。

- ① 模型実験において多ヒンジ継手構造にした場合、剛性一様構造と比較して発生断面力が抑制される結果が得られた。二次元弾性FEM解析、骨組み解析によって模型実験をシミュレートした結果、概ね良い一致が見られたことから、多ヒンジ継手構造にすることによる断面力の抑制効果が実験・解析の両面から確認された。
- ② 主働側の地盤ばねを考慮し、二次元FEM解析結果から得られたトンネル法線方向の発生応力とその箇所のトンネル内空変位量から得られる地盤反力係数を用いた骨組み解析、および現在の設計で用いられている算定式を用いて地盤反力係数を設定した骨組み解析を実施した結果、後者の結果は実験結果と大きな差が現れる場合があるのに対し、前者は実験結果における曲げモーメント分布と概ね一致した。これより、二次元FEM解析を用いて骨組み解析における地盤反力係数を適切に設定することで、骨組み解析により二次元FEM解析結果とほぼ同等の結果を得ることができることが確認された。

今後の課題としては、より合理的な設計手法を確立するために、現在の設計で用いられている骨組み解析によりセグメント設計を行う際に、地盤反力係数 k を簡易なモデルを用いて適切に評価できるような手法を確立する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書〔開削工法編〕・同解説，1996.3