

シールド工用セグメントの設計における 全周地盤ばねモデルの適用性

木村 定雄¹・神田 大²・南木 聡明³・小泉 淳⁴

¹正会員 工博 金沢工業大学 環境系土木工学科 (〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

²正会員 工修 日本鉄道建設公団 九州新幹線建設局水俣鉄道建設所 (〒867-0035 熊本県水俣市月浦字前田 54-162)

³学生会員 早稲田大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

⁴正会員 工博 早稲田大学 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

本論文は洪積地盤中に構築されたシールドトンネルの計測結果に基づき、セグメントの設計法として全周地盤ばねモデルによる計算法が有用であることを述べたものである。セグメントの挙動は、それに作用する土水圧およびそれに生じる断面力を計測して把握した。一方、すでに筆者らは自立性の高い地盤中のトンネルの覆工設計で用いる荷重系-構造系の相互作用モデルとして、全周地盤ばねモデルが合理的であることを提案している。そこで、このモデルを用いて各種の要因を与えたセグメントの挙動に関する感度解析を行い、その結果と計測結果とを定量的に比較して、本モデルの実務設計への適用性を検討した。その結果、全周地盤ばねモデルがセグメントの挙動を概ね表現できることを明らかにした。

Key Words: shield tunnel, design of segmental lining, earth pressure, ground reaction, in-situ measurements

1. はじめに

わが国におけるシールド工法は、経済の高度成長時代を背景にして、主に沖積平野上に広がる大都市部の中浅深度地盤におけるインフラ整備のためのトンネル構築法として急速に発展してきた。最近では、都市の急激な過密化により、ライフライン等の地下構造物が中浅深度地盤に輻輳し、今後新たに建設されるトンネル構造物は洪積地盤や第三紀の固結した地盤などの大深度地盤中に構築される傾向にある。このような状況の中で、現在のシールドトンネルの施工技術は、近年の目覚ましい進歩により、高水圧などの大深度地盤に特有な環境条件をある程度克服できるようになってきており、土被りが50m以上となる施工事例もいくつか報告されている¹⁾。

一方、シールドトンネル覆工の設計技術は、名古屋市高速鉄道の覚王山隧道²⁾や東京都下水道局の石神井川下幹線³⁾などで採用された考え方が1969年に制定された「シールド工法指針」⁴⁾や1973年に制定された「シールド工用標準セグメント」⁵⁾などの規準

類⁶⁾に反映され、その後「シールド工法指針」は「トンネル標準示方書(シールド編)・同解説」に格上げされ、「シールド工用標準セグメント」とともに数度の改訂を経て今日に至っている。しかしながら、その設計の考え方の基本は当初のものから大幅に変わることはなく、主に中浅深度の軟弱な地盤を対象とした設計法となっているのが実状である⁷⁾。

現行の覆工設計法はこのような軟弱な地盤を主な対象として、その簡便性やトンネルの安全性をとくに重視した荷重系および覆工の構造モデルを採用している。これがいわゆる慣用計算法⁸⁾である。慣用計算法はトンネルの上方や側方に位置する地盤をすべて荷重評価の対象として考え、地山安定の極限平衡論に基づくTerzaghiの緩み土圧⁹⁾などの土圧理論から覆工に作用する土圧を求め、トンネル覆工の変形に伴う地盤との相互作用はWinklerの考え方に従う抵抗土圧のみで評価している。また一次覆工であるセグメントリングは、剛性一様な円環とみなし、個々のセグメント継手やリング継手を簡略化して取り扱っている。

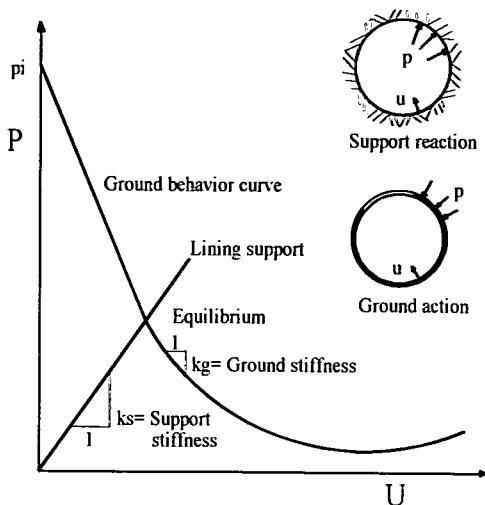


図-1 地山特性曲線と相互作用

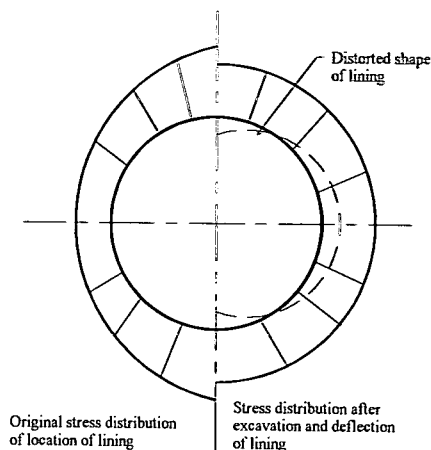


図-2 相互作用による応力再配分

しかしながら、自立性の高い地盤中に構築された最近のシールドトンネルの現場計測結果によると、覆工に作用する土圧は前述の土圧理論から求めたものに比べて相当に小さいという報告もあり^{10)~13)}、自立性が高くある程度の土被り（トンネル外径の2~3倍以上）を有する地盤の場合には、土被りや土の物性など、その地盤条件に応じて地盤の支持効果を生かした合理的かつ経済的な覆工の設計法を確立することが望まれている。テールボイドの発生による周辺地盤の乱れや裏込め注入の影響^{14),15)}など、施工に伴う不確定要因の影響も重要であると思われるが、覆工と周辺地盤との相互作用を適切に評価することにより、地盤の支持効果を生かした合理的でかつ覆工設計の実務に適した荷重や構造モデルが定められるものと考えられる。

これまで、セグメント継手やリング継手の剛性を詳細に評価するなど、構造モデルの合理化に関する研究は、わが国において相当に進められてきている^{16)~24)}。しかしながら、シールドトンネルの覆工とそれをとり囲む地盤との相互作用の問題は、国内では数例の研究事例^{25)~29)}をみる程度である。地盤と覆工との相互作用の概念は図-1³⁰⁾および図-2³¹⁾に示すとおりである。図-1は覆工の周方向の任意の部位における地盤と覆工の力のやりとりを概念的に示したものである。地盤中に空洞を掘削することによって初期の地盤内応力がその変形とともに解放される。一方、空洞に覆工を巻き立てることによって地盤の変形を拘束することから、解放される地盤内応力はある段階で覆工による拘束力と釣り合い静的に安定する。この安定状態に至る過程で地盤と覆工との間

に相互作用が生じる。図-2は覆工の全周にわたる相互作用を概念的に示したものであり、この相互作用は地盤や覆工の剛性の影響を受けるものと考えられる。このような地盤と覆工との相互作用に関する研究は、比較的地盤が硬質で良好な欧州諸国を中心とする研究者らによって、主に二次元弾性理論に基づいてなされてきた^{32)~37)}。これらの研究成果によると、荷重、地盤や覆工の剛性およびトンネルの形状寸法等の条件などを定めることによって、地盤と覆工との相互作用を単純化するとともに、覆工に生じる断面力や変形量の計算を簡便化している。また、二次元弾性理論に基づく覆工断面力の計算結果は、覆工に生じる曲げモーメントが小さく軸力が卓越する傾向にあり、設計の結果として得られる覆工の仕様はわが国のそれと比べて相当に軽減されたものになる。しかしその一方で、二次元弾性理論に基づく断面力算定法は地盤の有する受動的性質と主動的性質とを等価に取り扱っているため、地盤の性質によっては危険側の設計結果を与える可能性もある。

以上の観点から、筆者らはこれまでに地盤の特性や覆工の剛性などに影響される地盤の支持効果を覆工の変形に伴う相互作用として位置づけ、これを覆工設計に用いる荷重系—構造系の中で合理的に評価する手法として、全周地盤ばねモデルによる計算法を提案した^{38),39)}。また、全周地盤ばねモデルの適用にあたってとくに重要となる地盤と覆工との相互作用を表現する地盤ばね定数の評価方法についても、模型実験や二次元弾性FEM解析により詳細に検討を加えてきた^{40)~47)}。

本論文はこれらの検討結果を踏まえた上で、自立

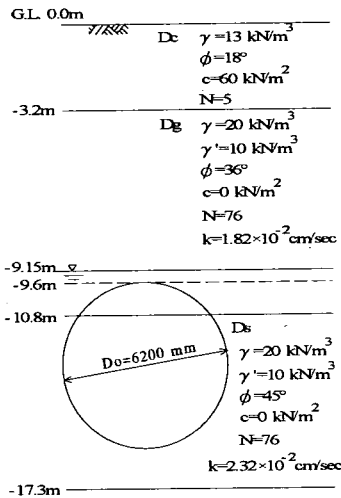
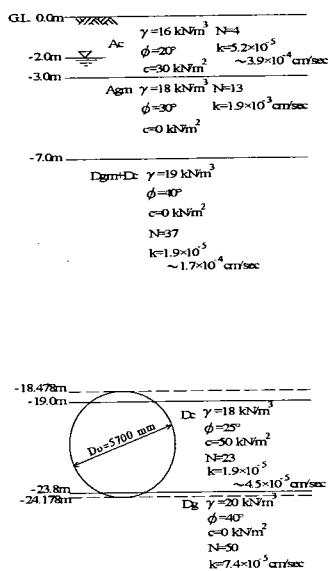
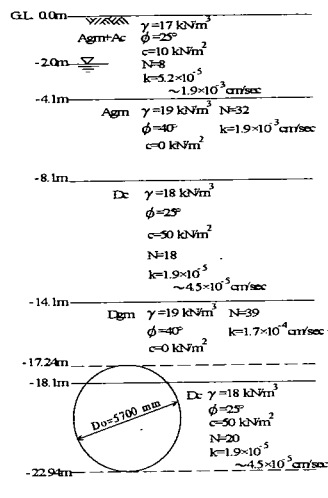


図-3 計測断面の土質概要(洪積砂質土)



a) A断面



b) B断面

図-4 計測断面の土質概要(洪積粘性土)

性の高い洪積地盤中に構築されたシールドトンネルの現場計測結果に基づき、全周地盤ばねモデルの実務設計への適用性を検討したものである。

2. 現場計測の事例の概要

(1) 洪積砂質土地盤中の計測事例^{(48)~(50)}

現場計測されたトンネルは外径6200mmの共同溝である。一次覆工は鉄筋コンクリートの平板形セグメント(厚さ275mm, 幅1000mm)であり、トンネル横断面内の経時的な挙動を把握することを目的として、千鳥組された連続する2リング分に計測断面が設けられた。計測項目はセグメントリングの半径方向に作用した土水圧(土圧計で計測された全土圧であり、有効土圧と区別して土水圧と呼ぶ)、水圧、セグメントリングの横断面内に生じた曲げモーメントおよび軸力である。ここでは、計測断面のセグメントリングが組み立てられてから、すべての計測値が安定し一定となった90日後のデータを用いて、長期的なトンネルの挙動を評価する。図-3は計測断面の土質概要を示したものである。土質は洪積世の粘性土層、砂礫層および砂層から構成されており、ボーリング調査や各種試験の結果から得られた土の物性は、図-3中に示すとおりである。また、トンネルが位置する土質の変形係数は、孔内水平載荷試験の結果から、 $E_{Ds} = 192 \text{ MN/m}^2$ 程度と推定した($E_{Ds} = 4E_m$, E_{Ds} :トンネルが位置する砂層の変形係数, E_m :トンネルの位置する土質の試験から求まる変形係数)。なお、セグメ

ントリングへの作用荷重に影響を与えようと考えられる裏込め注入は、同時注入方式が採用され、最大 100 kN/m^2 (土圧計による値)の圧力で行われている。また、土圧計で得られたトンネル半径方向の最大圧力はセグメントリングがテールを脱出する際に計測された 120 kN/m^2 である。

(2) 洪積粘性土地盤中の計測事例^{(11),(12),(52)}

この工事例は4本の鉄道単線トンネル($Do = 5700 \text{ mm}$)が併設して施工されたものである。このうち、1本目に施工されたトンネルの一次覆工は、コルゲート形ダクタイトルセグメントであり、その高さは250mm, 幅は1000mmである。これには2断面(A断面, B断面)に計測断面が設けられ各種の計測がなされた。計測項目は、セグメントリングの半径方向に作用した土水圧、セグメントリングに生じた曲げモーメントおよび軸力である。ここでは、単一のトンネル挙動を検討するために、これらの計測されたデータのうち、1本目のトンネルのセグメントリングが構築され、2本目のシールドの施工がそれに影響を与える直前で、すべての計測値がある程度一定となった時点(計測リングが組み立てられてから約10日後)のデータを用いてトンネルの挙動を評価する。

図-4a), b)はA断面およびB断面の土質概要を示したものである。土質は沖積世の粘性土層、礫層および洪積世の粘性土層などから構成されており、ボーリングの調査結果等から得られた土の物性はそれらの図中に示したとおりである。また、トンネルが位置する土質の変形係数は孔内水平載荷試験の結果から

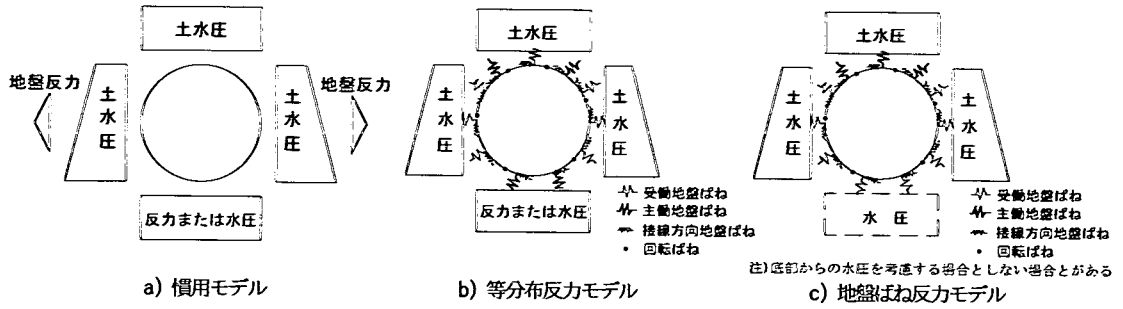


図-5 代表的な荷重系・構造系・相互作用モデルの概要

ら、 $E_{Dc}=60.8\text{MN/m}^2$ 程度と推定した($E_{Dc}=4E_m$, E_{Dc} :トンネルが位置する粘性土層の変形係数)。なお、裏込め注入は、同時注入方式により行われ、その吐出圧は 300kN/m^2 である。

3. 各種要因に基づく感度解析の考え方

(1) 本論文で述べる全周地盤ばねモデルの概要

セグメントリングの断面力の算定における地盤と覆工との相互作用の取扱い方には種々の方法がある⁴⁵⁾。ここでは筆者らが提案している全周地盤ばねモデルを中心にしてそれらの考え方を述べる。

図-5(a), b), c)は断面力算定に用いる荷重系・構造系の相互作用のモデルを示したものであり、地盤と覆工との相互作用の評価方法(モデル化)が異なる代表例である。図-5(a)に示したモデルは現行の規準類⁹⁾に示され、設計の実務に多用されている慣用モデルである。これに対し、全周地盤ばねモデルは地盤と覆工との相互作用を、セグメントリングの全周にわたって配した地盤ばねを用いて評価するモデルであり、鉛直方向荷重の取扱いの相違により、図-5(b)および図-5(c)に示した2つのモデルがある。前者(図-5(b))は現行のセグメント設計に用いられている荷重の考え方に従うモデルであり、トンネルの上方または下方からの荷重に釣り合うように等分布の地盤反力をトンネル下部または上部に作用させるモデル(以下、等分布反力モデルと呼ぶ)である。後者(図-5(c))はトンネルの上方または下方からの荷重に対し、トンネルの形状から定まる極座標系に従う地盤ばねを用いて鉛直方向の地盤反力を評価するモデル(以下、地盤ばね反力モデルと呼ぶ)である。

等分布反力モデルではトンネルに作用させる上下方向の荷重が釣り合うため、トンネルの剛体的な移動は生じない。このため、地盤反力としては横断面内の半径方向の変形に伴う相互作用のみを評価すればよく、Winklerの仮定に従う地盤ばね(以下、受働

地盤ばねと呼ぶ)のばね定数、およびトンネルがその内空側に変位する場合の地盤の主働的な挙動を評価する地盤ばね(以下、主働地盤ばねと呼ぶ)のばね定数を適切に評価することが必要となる。また、横断面内のみの変形が地盤反力の主体をなす等分布反力モデルにおいては、トンネルの接線方向の地盤ばねはその影響が小さく無視できる⁵³⁾。

一方、地盤ばね反力モデルでは上下方向の荷重が釣り合うようにトンネルは横断面内の変形とともに剛体的な移動も起こす。この場合、トンネルの剛体的な移動に伴ってセグメントリングの接線方向の地盤ばねの影響が生じることから、軸力の大きさにある程度の影響を与える⁴¹⁾。

なお、図-5(b)のモデルにおいて、主働地盤ばねを考慮せず、Winklerの仮定に従う受働地盤ばねのみを考慮したモデルを以下、部分地盤ばねモデルと呼ぶ。

また、図-5中に示した各種の構造モデルの取扱い方は、それぞれ慣用モデルでは剛性一様円環、また等分布反力モデルおよび地盤ばね反力モデルでは、はりばねモデル²⁰⁾としている。

(2) 感度解析の影響要因とその水準の設定の考え方

感度解析に用いた影響要因とその水準を表-1に示す。以下にそれぞれの影響要因とその水準を設定した基本的な考え方を述べる。

a) 荷重系

荷重系は現行の規準類^{9), 54)}に示されるそれを基本として設定した。鉛直荷重は全土被り土圧、Terzaghiの緩み土圧および水圧のみを影響要因の水準として設定した。Terzaghiの緩み土圧を算定するにあたっては、トンネルの上方に位置する土層を詳細にモデル化した多層地盤の場合の算定式⁵⁴⁾を適用した。また、洪積砂質土地盤および洪積粘性土地盤の両工事例は道路下深くの工事であるため上載荷重は無視した。水平荷重は砂質土地盤の場合には土水分離として、粘性土地盤の場合には土水一体として鉛直荷重

表-1 感度解析に用いた影響要因とその水準の設定の考え方

影響要因		水 準
荷重系	鉛直荷重	全土被り土圧, Terzaghi の緩み土圧, 水圧のみ
	水平荷重	側方土圧係数 λ , 水圧のみ
構造系 および 相互作用 モデル の組合せ	構造系	剛性一様リング: 慣用モデルの場合 はりばねモデル: 全周地盤ばねモデルおよび (2リング千鳥組モデル, 図6参照) 部分地盤ばねモデルの場合
	相互作用モデル および 底部地盤反力の考え方	三角形分布の地盤反力: 慣用モデルの場合 部分地盤ばねモデル: はりばねモデルの場合 全周地盤ばねモデル: はりばねモデルの場合 ただし, 部分地盤ばねモデルでは等分布反力モデル のみ, 全周地盤ばねモデルでは等分布反力モデルと 地盤ばね反力モデル(底部からの水圧を考慮する場合 および考慮しない場合)の両モデル
	地盤ばね 定数	
	受働地盤ばね定数 K_{rc}	$K_{rc} = \frac{3E}{R(1+\nu)(5-6\nu)}$
	主働地盤ばね定数 K_{ri}	$K_{ri} = K_{rc}, K_{rc}/2, 0$
	接線方向地盤ばね定数 K_t	$K_t = K_{rc}, K_{rc}/3, 0$

に側方土圧係数を乗じて求めるものとし, 当該工事の実設計で用いられた側方土圧係数の ± 0.1 の範囲を基本としてそれを設定した。水圧は自然水位の静水圧とした。以上の考え方に基づいた荷重の算定結果は表-2および表-3a), b)に示すとおりである。

b) 構造系および相互作用モデル

構造系の水準の設定にあたっては, 単に覆工構造のみを評価するだけではなく, 地盤と覆工との相互作用の影響, すなわち相互作用モデルの設定に伴って生じる荷重の影響も考慮する必要がある。そこで便宜上, 影響要因を構造系と相互作用モデルに分けて考え, それぞれの水準を設定した。なお, 覆工構造となるセグメントリングの諸元は表-4および表-5に示すとおりとした。両表中に示したセグメント継手の回転ばね定数およびリング継手のせん断ばね定数は, 図-6に示したはりばねモデルに用いる各種の継手のばね定数である。回転ばね定数はセグメント継手の純曲げ試験から求めた値である。せん断ばね定数はリング継手のせん断試験, または類似するセグメントの過去に実施された試験結果⁵⁾を参考にして定めた値である。一方, 慣用モデルの場合には曲げ剛性の有効率および曲げモーメントの伝達率がそれぞれ1および0の完全剛性一様リングとした。なお, 表-5中のコルゲート形ダクタイルセグメントの断面二次モーメントの算定にあたっては, 主桁やスキンプレートのほかに, セグメントの背面に打設されたコンクリートも考慮している。

相互作用モデルの水準は構造系との組合せから定まるものと考え, 表-1中に示すように設定した。

c) 各種の地盤ばね定数

各種の地盤ばねの要因とその水準は表-1中に示し

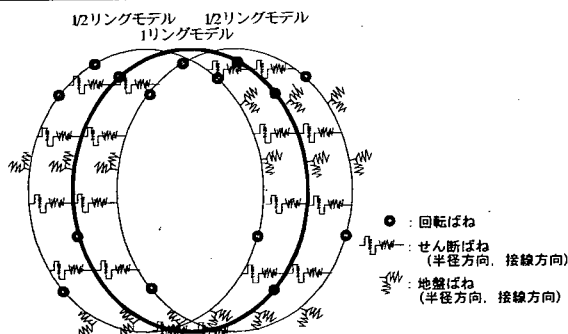


図-6 はりばねモデル(2リング千鳥組)の概要

たとおりである。受働地盤ばね定数 K_{rc} はトンネルが位置する土質の調査試験結果を参考にして, 表中に示した式を適用して求めた^{32), 45)}。主働地盤ばね定数 K_{ri} および接線方向の地盤ばね定数 K_t は筆者らの研究成果⁴⁵⁾に基づき K_{rc} に関連づけて, それぞれ3種類の水準を設定した。なお, 慣用モデルにおける地盤反力は受働地盤ばね定数 K_{rc} を地盤反力係数とみなし, これに計算から求まるトンネルのスプリングライン位置の半径方向変位量を乗じて求めた。表-6および表-7はこのようにして求めた地盤ばね定数をまとめて示したものである。

(3) 感度解析による各種影響要因の評価の考え方

前述した影響要因とその水準を用いた感度解析を行い, 実際のシールドトンネルの挙動を表現できる荷重系-構造系と相互作用モデルおよび地盤ばね定数とを選定する。図-7はそれらを選定する流れを示したものである。この流れは影響の度合いが大きいと考えられるものから順にその影響要因を評価し, 水準を選定する考え方を示したものである。

表-2 洪積砂質土地盤における荷重の算定結果 (単位kN/m)

		全土被り土圧			Terzaghiの緩み土圧			水圧のみ
		側方土圧係数入			側方土圧係数入			
		0.35	0.45	0.55	0.35	0.45	0.55	
頂部鉛直荷重	土圧 p_{e1}	165.1	165.1	165.1	80.7	80.7	80.7	-
	水圧 p_{w1}	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
底部鉛直荷重	p_1	170	170	170	85.2	85.2	85.2	4.5
	p_2	170	170	170	85.2	85.2	85.2	66.5
	p_{2**}	0	0	0	0	0	0	-
	p_{2***}	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5	-
	p_2	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5	-
頂部水平荷重	土圧 q_{e1}	58.3	74.9	91.6	28.7	36.9	45.1	-
	水圧 q_{w1}	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9
	q_1	64.2	80.8	97.4	34.6	42.8	51.0	5.9
底部水平荷重	土圧 q_{e2}	79.0	102.0	124.0	49.5	63.6	77.7	-
	水圧 q_{w2}	65.1	65.1	65.1	65.1	65.1	65.1	65.1
	q_2	144	167	189	115	129	143	65.1

注1) 鉛直方向地盤反力は底部に作用
 注2) *: 慣用モデルおよび等分布反力モデルの場合
 **: 地盤ばね反力モデルで底部水圧を考慮しない場合
 ***: 地盤ばね反力モデルで底部水圧を考慮する場合

表-3a) 洪積粘性土地盤(A断面)における荷重の算定結果 (単位kN/m)

		全土被り土圧					Terzaghiの緩み土圧				
		側方土圧係数入					側方土圧係数入				
		0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
頂部鉛直荷重	p_1	338	338	338	338	338	218	218	218	218	218
	p_2	338	338	338	338	338	218	218	218	218	218
底部鉛直荷重	p_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	p_{2**}	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222
	p_2	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222
頂部水平荷重	q_1	136	170	204	238	272	88	110	132	154	176
底部水平荷重	q_2	176	220	264	308	352	128	160	191	223	255

注1) 鉛直方向地盤反力は底部に作用
 注2) *: 慣用モデルおよび等分布反力モデルの場合
 **: 地盤ばね反力モデルで底部水圧を考慮しない場合
 ***: 地盤ばね反力モデルで底部水圧を考慮する場合

表-3b) 洪積粘性土地盤(B断面)における荷重の算定結果 (単位kN/m)

		全土被り土圧					Terzaghiの緩み土圧				
		側方土圧係数入					側方土圧係数入				
		0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
頂部鉛直荷重	p_1	313	313	313	313	313	209	209	209	209	209
	p_{1**}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	p_1	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
底部鉛直荷重	p_2	313	313	313	313	313	209	209	209	209	209
頂部水平荷重	q_1	126	158	189	221	253	75	94	113	131	150
底部水平荷重	q_2	166	207	249	290	332	115	143	172	201	229

注1) 鉛直方向地盤反力は頂部に作用
 注2) *: 慣用モデルおよび等分布反力モデルの場合
 **: 地盤ばね反力モデルで頂部水圧を考慮しない場合
 ***: 地盤ばね反力モデルで頂部水圧を考慮する場合

表-4 鉄筋コンクリートゲージの諸元(洪積砂質土地盤)

主断面	外径(mm)	6200
	図心半径(mm)	2962.5
	厚さ(mm)	275
	幅(mm)	1000
	断面積(m ²)	0.275
	断面二次モーメント(m ⁴)	1.733 × 10 ³
	弾性係数(kN/mm ²)	32
	単位長重量(kN/m)	7.15
セグメント継手	回転ばね定数(MN/m/rad) 正曲げ・負曲げ	9.06
	せん断ばね定数(MN/m) 半径方向・接線方向	50

表-5 コンクリートゲージの諸元(洪積粘性土地盤)

主断面	外径(mm)	5700
	図心半径(mm)	2729
	厚さ(mm)	250
	幅(mm)	1000
	換算断面積(m ²)	0.3052
	換算断面二次モーメント(m ⁴)	2.254 × 10 ³
	換算弾性係数(kN/mm ²)	24
	単位長重量(kN/m)	5.47
セグメント継手	回転ばね定数(MN/m/rad) 正曲げ・負曲げ	42
	せん断ばね定数(MN/m) 半径方向・接線方向	55

表-6 地盤ばね定数(洪積砂質土地盤)

地盤の変形係数・地盤ばね定数		備考	
変形係数 E_{Dc} (MN/m ²)	192	$E_{Dc} = 4E_m$	
地盤ばね定数 (MN/m ³)	受働地盤ばね定数 K_{rc}	46.3	$K_{rc} = 3E/\{R(1+\nu)(5-6\nu)\}$
		46.3	$K_{rc} = K_{rc}$
		23.2	$K_{rc} = K_{rc}/2$
	接線方向地盤ばね定数 K_t	0	$K_t = 0$
		46.3	$K_t = K_{rc}$
		15.4	$K_t = K_{rc}/3$
0	$K_t = 0$		

表-7 地盤ばね定数(洪積粘性土地盤)

地盤の変形係数・地盤ばね定数		備考	
変形係数 E_{Dc} (MN/m ²)	60.8	$E_{Dc} = 4E_m$	
地盤ばね定数 (MN/m ³)	受働地盤ばね定数 K_{rc}	15.9	$K_{rc} = 3E/\{R(1+\nu)(5-6\nu)\}$
		15.9	$K_{rc} = K_{rc}$
		7.95	$K_{rc} = K_{rc}/2$
	接線方向地盤ばね定数 K_t	0	$K_t = 0$
		15.9	$K_t = K_{rc}$
		5.30	$K_t = K_{rc}/3$
0	$K_t = 0$		

(4) 計測結果と解析結果との適合性の評価手法

これまでの研究事例を見ると、現場計測の結果と解析結果とを定性的に比較した事例はあるものの^{56)~58)}、それらの適合性を定量的に取り扱った事例はほとんど見あたらない⁵⁹⁾。これは適合性の評価指標となるセグメントに作用する土水圧やセグメントに生じる断面力などの計測値や解析値の分布を関数として取り扱うことができないためである。そこで、計測結果と各種の要因に基づく感度解析結果とを定量的に比較する手法について検討し、両者の適合性を評価することを試みた^{46),60)}。

計測値と解析値とを比較する概念を図-8に示す。この図に示したように、計測値はトンネル横断面内の限られたいくつかの計測点でしか得られない。そこでまず、解析値の分布に対して特異点となる計測値がないこと、および解析値が計測値に対して偏った方向に分布していないことを目視により定性的に確認する。次に、計測値と解析値との定量的な差を求める。セグメントリングの各計測点における計測値と解析値とをそれぞれ m_i および a_i 、また計測点の総数を N とすると、セグメントリングの全周にわたる計測値と解析値との平均的な差の分散は式(1)で表される。したがって、式(1)中の s^2 を便宜上、分散と呼び、 s^2 の値が小さいほど適合性が高いものと判

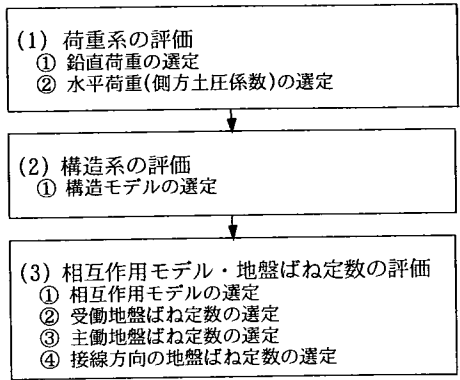


図-7 感度解析による影響要因の評価の流れ

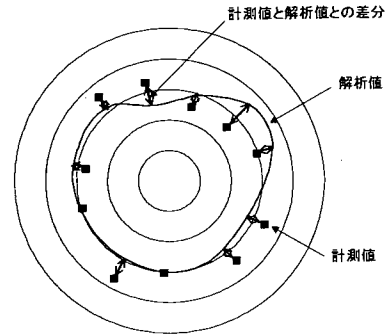


図-8 計測値と解析値との差の定量的評価の概念

断することとした。

$$s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - a_i)^2 \quad (1)$$

適合性の評価指標は、セグメントリングに作用する半径方向の土水圧、セグメントリングに生じる曲げモーメントおよび軸力とした。ここで、土水圧はセグメントリングの力学的挙動が確定するための外的要因であり、曲げモーメントおよび軸力はその外的要因による応答である。

なお、土圧計で計測されたトンネル半径方向の土水圧は、セグメントリングが組み立てられた直後の値を初期値としているため、地盤と覆工との相互作用を受けた後の値を意味している。したがって、土水圧を指標としたときの解析値は、鉛直方向と水平方向との荷重をトンネル半径方向の合応力に換算し、さらにその合応力に相互作用による応力を極座標を用いて重ね合わせた値とした。また、曲げモーメントや軸力の計測値は千鳥組された2リングのセグメント継手位置の対称性を考慮して、鉛直中心線に対して構造的に対称となる点の計測値を平均して求めた。

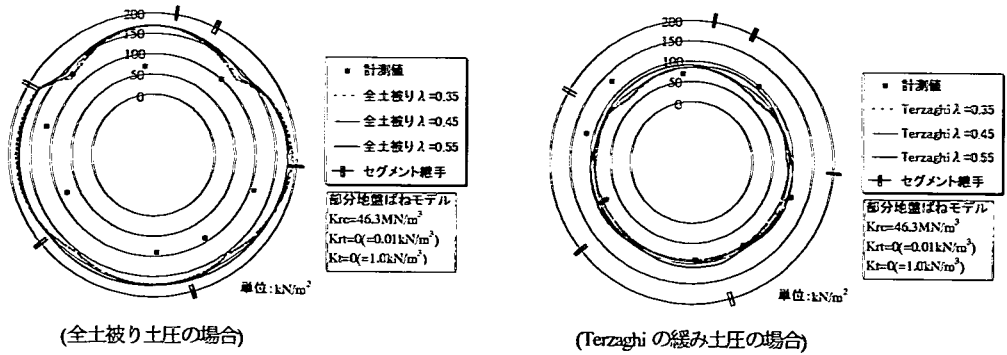


図-9a) 洪積砂質土地盤の土水圧分布図の例

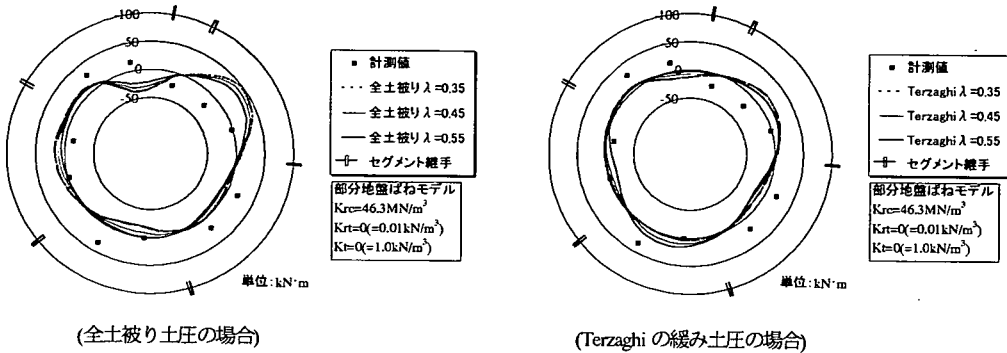


図-9b) 洪積砂質土地盤の曲げモーメント図の例

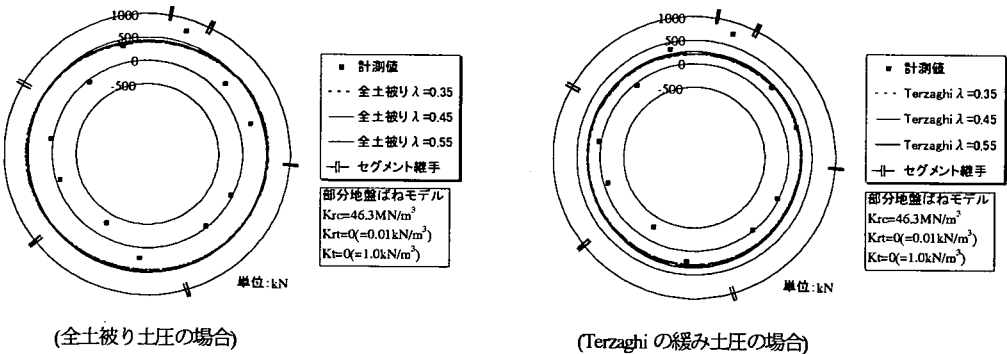


図-9c) 洪積砂質土地盤の軸力図の例

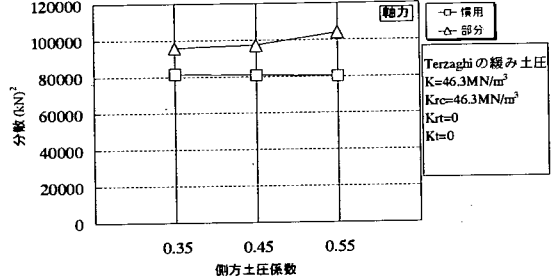
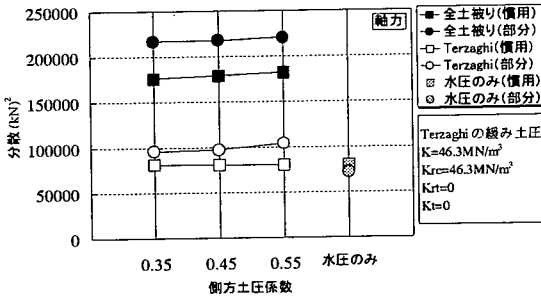
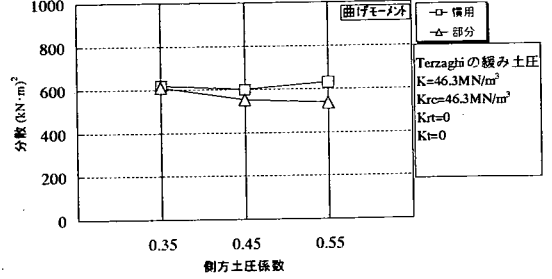
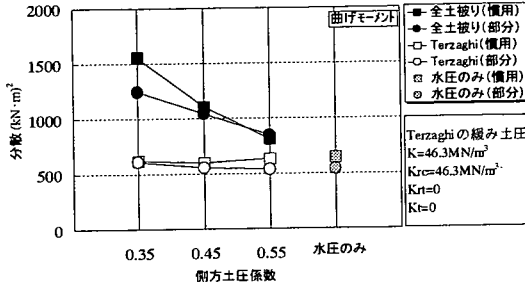
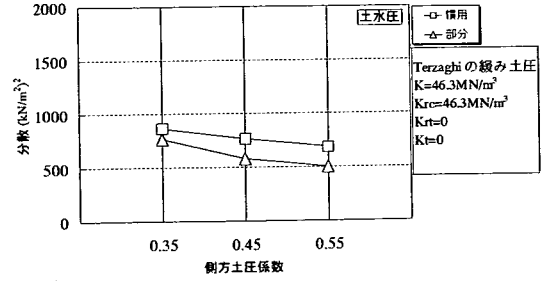
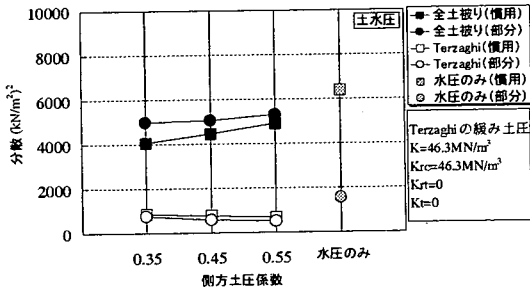
4. 計測結果と感度解析結果との比較および荷重系一構造系, 相互作用モデルの評価とその考察

(1) 洪積砂質土地盤の計測結果とその感度解析結果

a) 荷重系の評価

荷重系の評価では各種の地盤ばねの影響が複雑に混在するのを避けるため, ここでは構造系とその相互作用モデルとして, 慣用モデルとはりばねモデル(部分地盤ばねモデル)の解析結果を用いて検討した. 図-9a), b), c)はその計測値と解析値とを比較し

た例である. これらの図を見ると, 鉛直荷重として全土被り土圧を採用した場合は, 両者の適合性が劣ることは明らかである. 一方, 水平荷重を表す側方土圧係数を明確にすることは困難である. そこで, 次に前述した分散を用いた方法により計測値と解析値との適合性を評価した. 図-10a), b)はその結果を示したものである. この結果を見ると, 土水圧, 曲げモーメントおよび軸力のすべての指標において, Terzaghiの緩み土圧で, かつ側方土圧係数が0.55の場合の分散が小さくなっていることがわかる. このこ



a) 鉛直荷重の評価

b) 水平荷重の評価

図-10 荷重系の評価

とは、相互作用モデルの種類にほとんどよらない。したがって、荷重系の評価では、鉛直荷重はTerzaghiの緩み土圧に水圧を加えたものを、水平荷重は土水分離の考え方で側方土圧係数を0.55にしたものを選定した。

b) 構造系の評価

次に、慣用モデルおよび全周地盤ばねモデルによる解析結果も加えて、構造モデルの適合性を評価した。図-11はその結果を示したものである。各種の地盤ばねのばね定数は図中に示したとおりである。土水圧および曲げモーメントを指標とした場合、はりばねモデルを用いた方が慣用モデルを用いた方よりもセグメントリングの挙動を表現しているようである。一方、軸力を指標とする場合を見ると、慣用モデルを用いた方が分散が小さくなっている。過去に実施された計測事例の実状をみると、鉄筋コンクリートセグメントでは、トンネル坑内の温度変化などの影響を受けて計測される軸ひずみの精度が劣る

こと、計測される軸ひずみの大きさに対して軸剛性が大きく誤差が1μで約10kNの軸力となることなどの理由から、軸力の計測値は精度が劣ることが知られている⁶¹⁾。したがって、適合性の評価にあたっては主に土水圧と曲げモーメントとを指標として着目することとした。この結果、構造モデルとしては、はりばねモデルを用いる方が適切であると判断した。

c) 相互作用モデルと地盤ばね定数の評価

まず、相互作用モデルについて検討した。図-12は適合性評価の結果を示したものである。図-12に示した結果は全周地盤ばねモデルを基本としたものであり、底部地盤反力の評価方法が異なる等分布反力モデルの場合と地盤ばね反力モデル(底部水圧あり)の場合とに分けて示してある。これらの図中の横軸は主働地盤ばね定数 K_n と受働地盤ばね定数 K_{rc} の比であり、等分布反力モデルにおける $K_n/K_{rc} = 0$ の値は部分地盤ばねモデルの結果を表している。土水圧を指標とした場合、等分布反力モデルの方が地盤

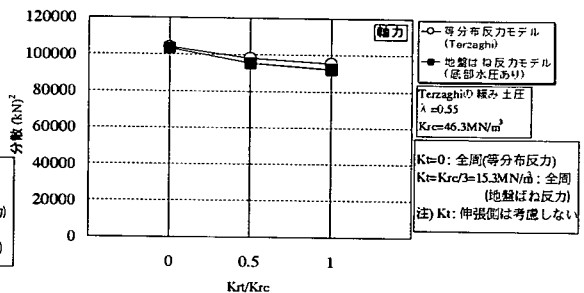
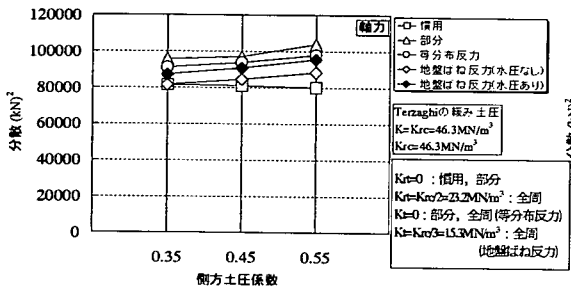
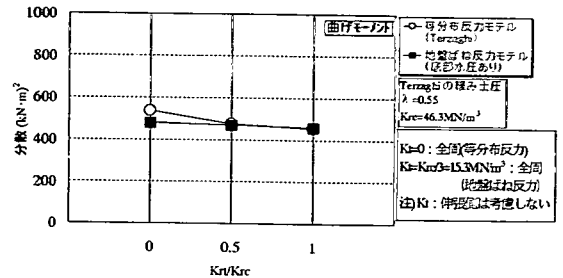
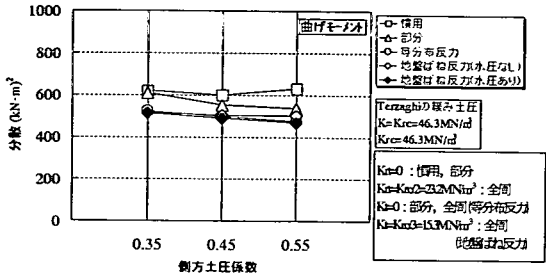
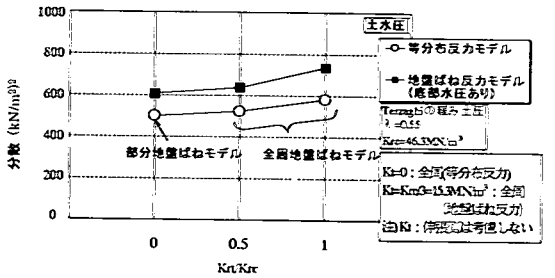
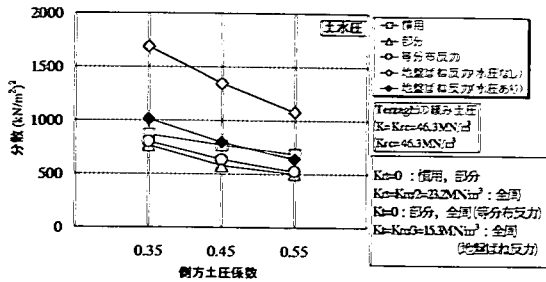


図-11 構造モデルの評価

図-12 相互作用モデルの評価

ばね反力モデルよりも分散が小さい。一方、曲げモーメントを指標とした場合、両モデルとも同程度に分散が小さくなっている。また、等分布反力モデルに着目すると、土水圧を指標とした場合には $K_t/K_{rc} = 0$ の分散が小さく、曲げモーメントを指標とした場合には $K_t/K_{rc} = 1$ の分散が小さくなる傾向がある。このため、相互作用モデルの適合性の評価にあたっては、接線方向の地盤ばね定数 K_t の影響をもあわせて検討するのが望ましいと考えた。

図-13は横軸に接線方向の地盤ばね定数 K_t と受働地盤ばね定数 K_{rc} の比をとり、 K_t の影響を表したものである。これらの図を見ると、土水圧を指標とした場合のみ地盤ばね反力モデルの結果が K_t の影響を受けて変化しており、他の結果はその影響をほとんど受けていないことがわかる。

以上のことから総合的に判断すると、相互作用モデルとしては、全周地盤ばねモデル(等分布反力モデル、地盤ばね反力モデル)や部分地盤ばねモデル(等分布反力モデル)では、どのような相互作用モデルの組合せを用いても同程度にトンネル挙動を表現でき

るものと考えられる。また主動地盤ばね定数 K_a および接線方向の地盤ばね定数 K_t は、受働地盤ばね定数 K_{rc} との関連で、 $K_a = 1/2 \cdot K_{rc}$ および $K_t = 1/3 \cdot K_{rc}$ としても、セグメントの実用上の設計において大きな差異はないと考えられる。

d) 荷重系、構造系および相互作用モデルの設計上の取扱いに関する考察

まず、荷重の設定について考察する。現行の規準類では、地盤の N 値に関連づけて側方土圧係数 λ および地盤反力係数 k (受働地盤ばね定数と等価) を設定している。図-3に示した D₁ 層の N 値は 76 であり、これを現行の規準⁶²⁾に照らし合わせると、土の種類は土水分離の”非常によく締まった砂質土”に分類され、この場合の λ と k の設計用値の範囲はそれぞれ、0.35~0.45 および 30~50 MN/m³ となる。一方、適合性の評価結果によると、鉛直荷重は Terzaghi の緩み土圧、水平荷重は土水分離で側方土圧係数が 0.55、地盤反力係数 k が 46.3 MN/m³ の場合に適合性が高い。したがって、現行の規準では水平荷重を小さめに設定しており、曲げモーメントに対して安全側の荷重

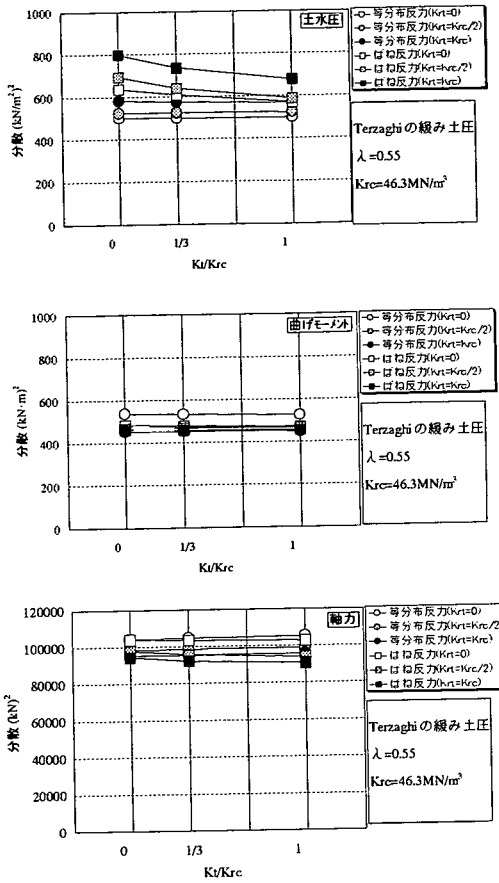


図-13 地盤ばね定数の評価

を設定していることになる。
 次に、構造系および相互作用モデルの評価について考察する。全周地盤ばねモデルでは、地盤を線形なばねにモデル化して、地盤と覆工との相互作用によって生じる土圧の変化を評価している。したがって、主動地盤ばねの伸張応力の作用により水圧までも低減することは考えていない。すなわち、主動地盤ばねの作用効果はトンネルが受ける有効土圧の範囲のみを考えている。そこで、適合性の高い解析条件において、相互作用によるトンネル半径方向の土圧と計算上の有効土圧とを比較して、地盤ばねの作用範囲を確認することとした。図-14はその結果を示したものである。この結果から、主動地盤ばねによる伸張応力は有効土圧の範囲内であり、全周地盤ばねモデルにおいても相互作用の適用範囲に矛盾が生じていないことがわかる。

(2) 洪積粘性土地盤の計測結果とその感度解析結果

a) 荷重系の評価

荷重系の評価では洪積砂質土地盤の場合と同様に、慣用モデルとはりーばねモデル(部分地盤ばねモデ

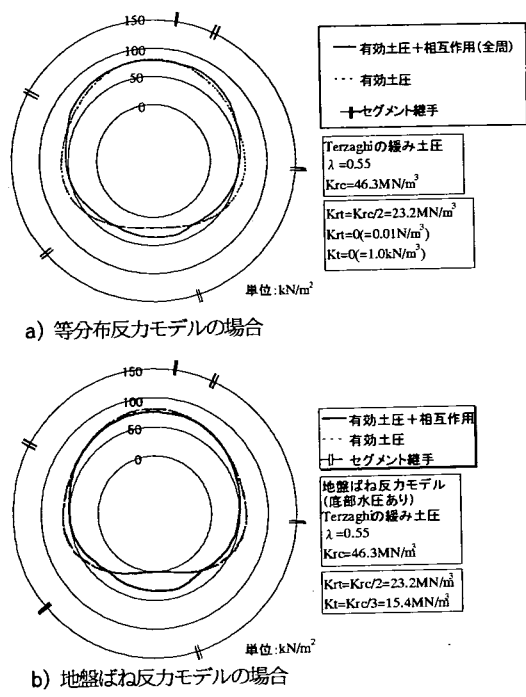
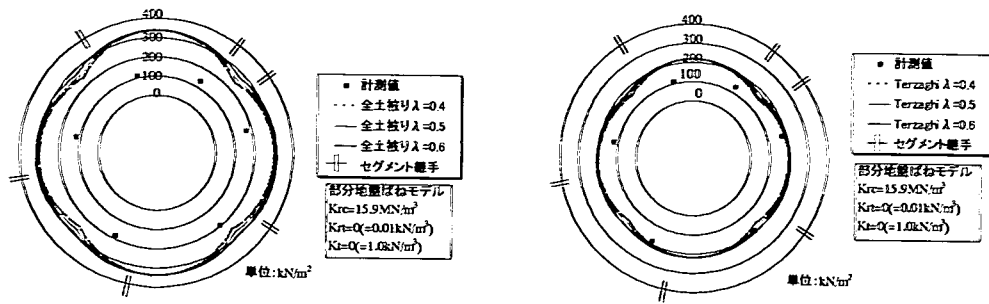
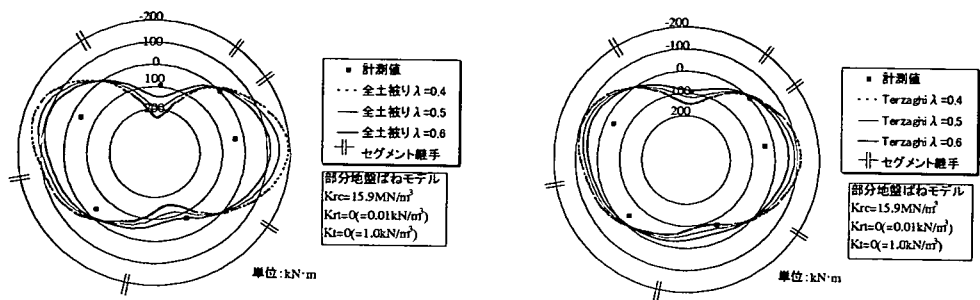


図-14 有効土圧と相互作用による応力との関係

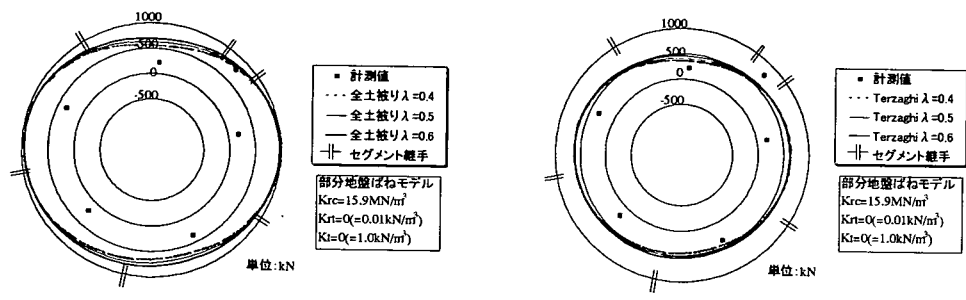
ルの解析結果を用いた。計測値と解析値を比較した結果の例を図-15a), b), c)に示す。これらの結果はA断面のものであり、B断面についてもこれとほぼ同様の結果が得られている。これらの結果によると、鉛直荷重として全土被り土圧を採用した場合は適合性が劣っていることがわかる。一方、側方土圧係数の選定は、洪積砂質土地盤の場合と同様に明確にできない。次に、前述の方法により鉛直荷重と水平荷重の適合性を検討した結果を図-16a), b)に示す。鉛直荷重はA断面とB断面ともにすべての指標においてTerzaghiの緩み土圧を採用した場合、または水圧のみを採用した場合の分散が小さい。水平荷重は土水圧を指標とした場合、Terzaghiの緩み土圧を鉛直荷重とすると、A断面とB断面ともに側方土圧係数の影響は小さくなる。一方、曲げモーメントを指標とした場合には、A断面とB断面ともに側方土圧係数が大きくなるほど分散が小さくなっている。そこで、Terzaghiの緩み土圧で側方土圧係数が0.6よりも大きい0.7および0.8の場合についても検討を加えた。図-17a), b)はそれらの結果を示したものである。土水圧を指標とした場合には側方土圧係数が小さいほど、また、曲げモーメントを指標とした場合にはそれが大きいほど、分散が小さくなる傾向がある。また軸力を指標とした場合にはA断面とB断面とで相反する傾向が見られる。したがって、これらの結果



(全土被り土圧の場合) (Terzaghi の緩み土圧の場合)
 図-15a) 洪積砂質土地盤の土水圧分布図(A断面)の例



(全土被り土圧の場合) (Terzaghi の緩み土圧の場合)
 図-15b) 洪積砂質土地盤の曲げモーメント図(A断面)の例



(全土被り土圧の場合) (Terzaghi の緩み土圧の場合)
 図-15c) 洪積砂質土地盤の軸力図(A断面)の例

を総合的に考え、鉛直荷重は Terzaghi の緩み土圧、水平荷重は土水一体の考え方を採用し側方土圧係数を0.6としたものを選定した。

b) 構造系の評価

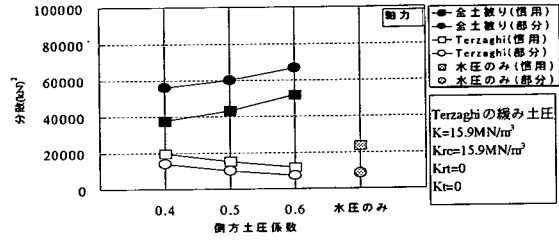
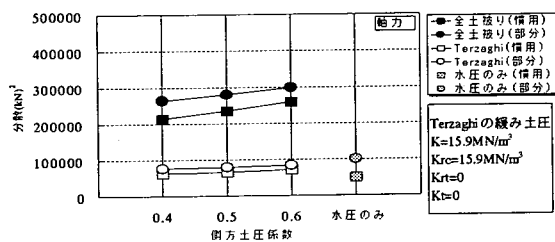
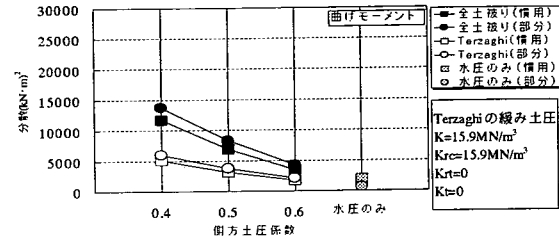
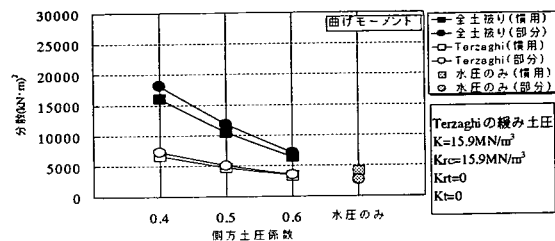
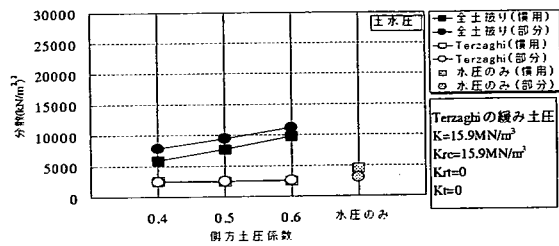
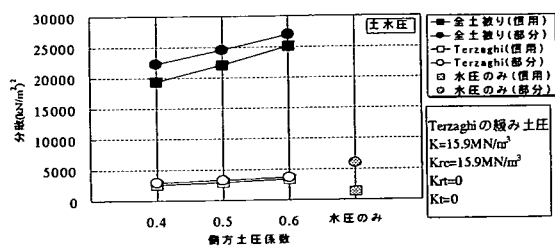
構造モデルの適合性を検討した結果を図-18a), b) に示す。各種の地盤ばね定数は図中に示したとおりである。底部からの水圧を考慮しない地盤ばね反力モデルを除くと、それ以外の構造系と相互作用モデルの組合せの結果は、すべての指標において同様な傾向を示している。

次に、側方土圧係数が0.6の場合にとくに着目する

と、どの構造系と相互作用モデルの組合せも、すべての指標における分散が小さい。したがって、以降の検討では、各種の地盤ばね定数を変化させることで相互作用の影響を詳細にモデル化できる、はりばねモデルを用いて計測値と解析値の適合性を評価することとした。

c) 相互作用モデルと地盤ばね定数の評価

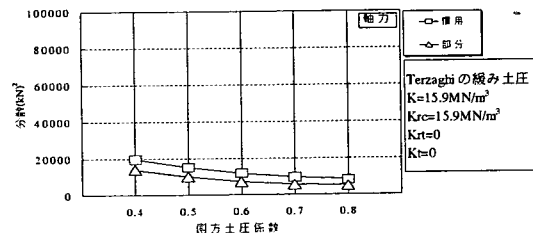
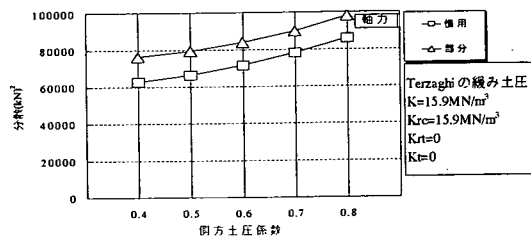
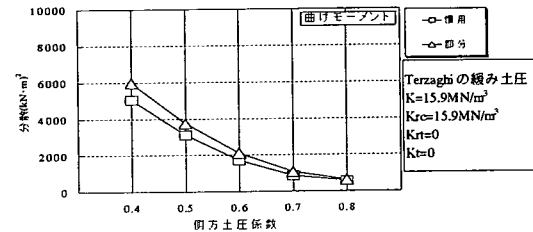
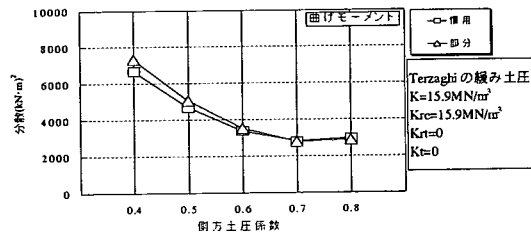
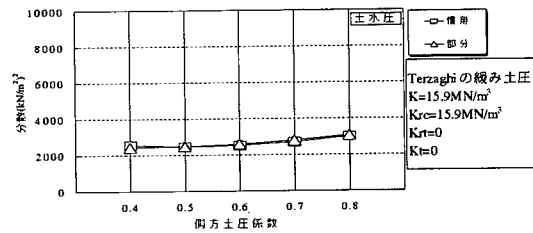
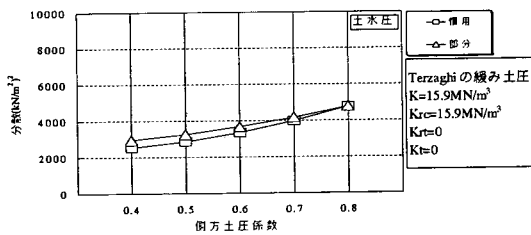
まず、相互作用モデルについて検討した。図-19a), b)は適合性の評価結果を示したものである。図中の結果は全周地盤ばねモデルを基本として示したものであり、底部地盤反力の評価方法が異なる等分布反



a) A断面

b) B断面

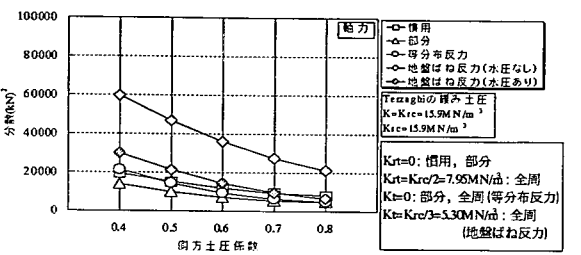
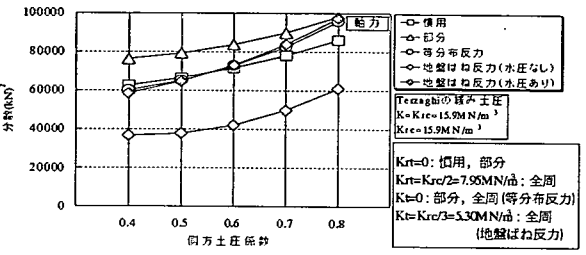
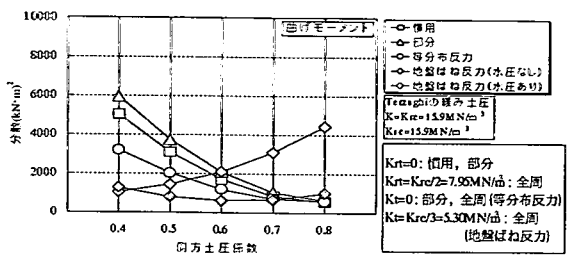
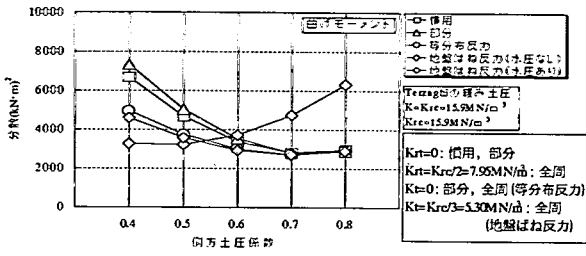
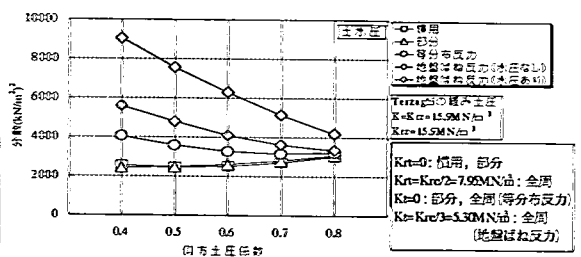
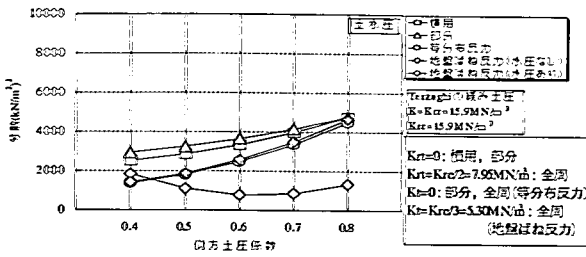
図-16 鉛直荷重の評価



a) A断面

b) B断面

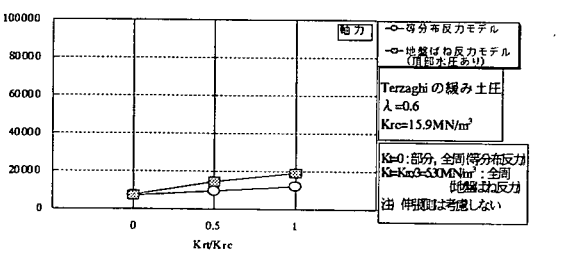
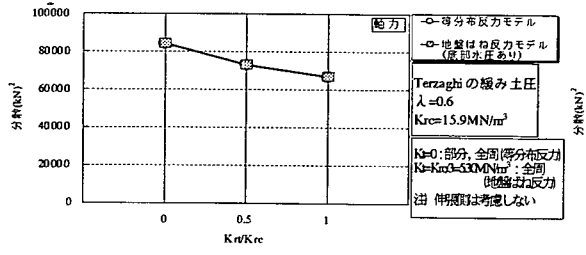
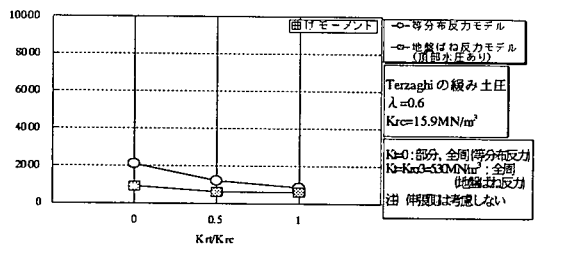
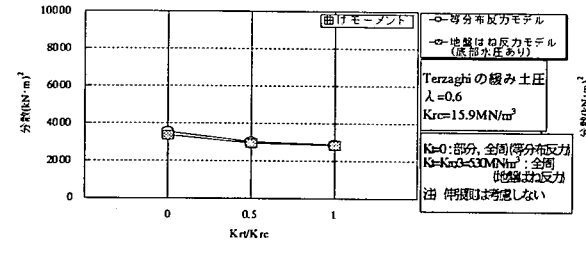
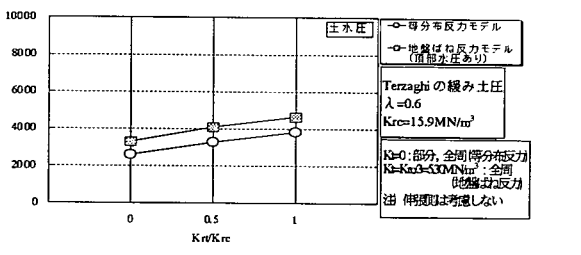
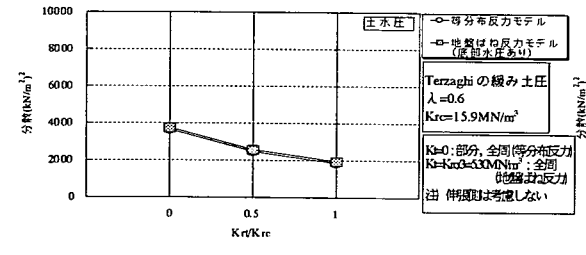
図-17 水平荷重の評価



a) A断面

b) B断面

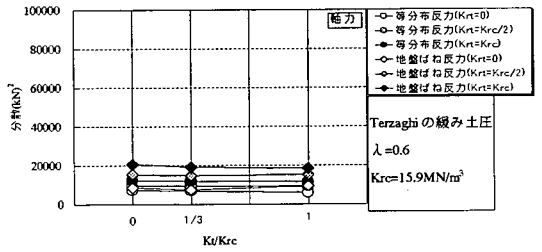
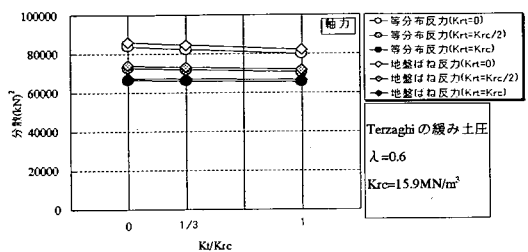
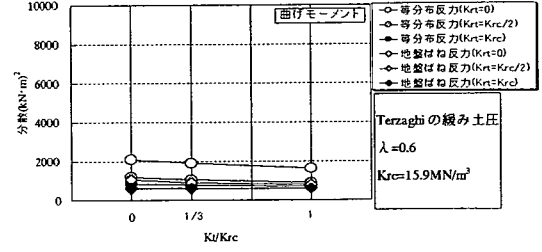
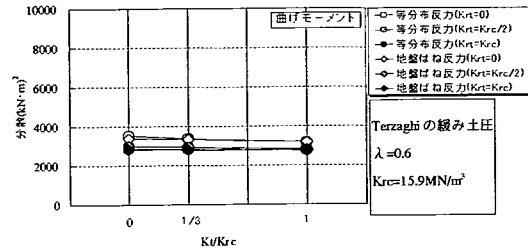
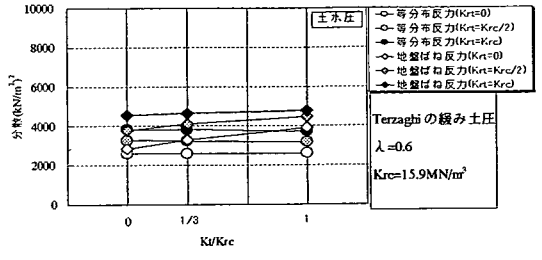
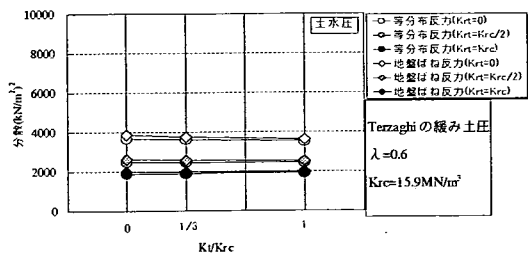
図-18 構造モデルの評価



a) A断面

b) B断面

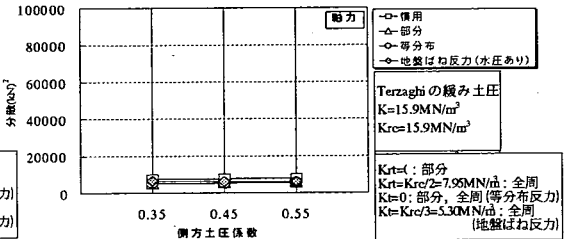
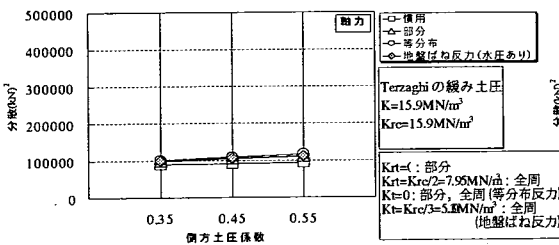
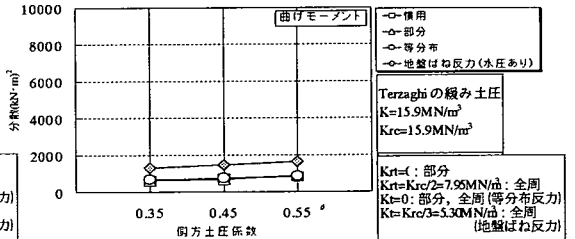
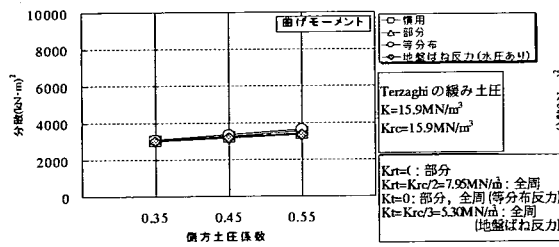
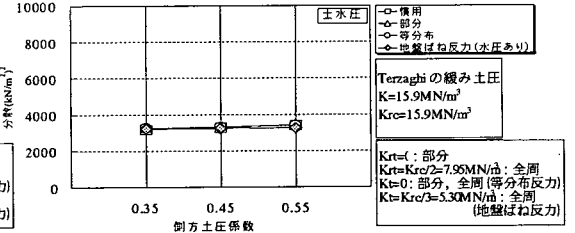
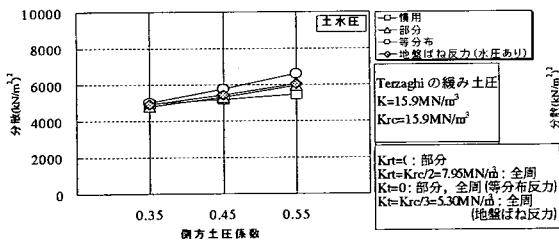
図-19 相互作用モデルの評価



a) A断面

b) B断面

図-20 地盤ばね定数の評価



a) A断面

b) B断面

図-21 土水分離の条件による荷重の検討

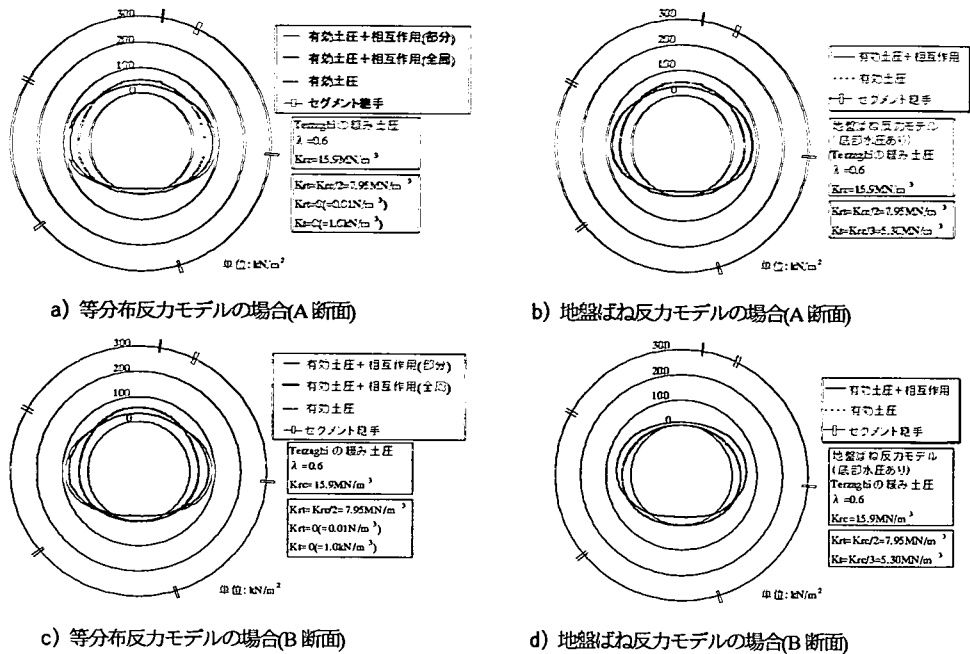


図-22 有効応力と相互作用による応力との関係

カモデルの場合と地盤ばね反力モデル(底部水圧あり)の場合とに分けて示してある。また、これらの図中の横軸は図-12と同じである。土水圧および軸力を指標とした場合、A断面では K_{ri} が大きいほど分散が小さく、B断面では K_{ri} が小さいほど分散が小さくなる傾向がある。一方、曲げモーメントを指標とした場合、 K_{ri} の変化に伴う影響は小さい。このため、相互作用モデルの適合性の評価にあたっては、接線方向の地盤ばね定数 K_{ri} の影響をもあわせて検討するのが望ましいと考えた。

図-20a), b)は横軸に接線方向の地盤ばね定数 K_{ri} と受働地盤ばね定数 K_{re} の比をとり、 K_{ri} の影響を表したものである。これらの図を見ると、すべての相互作用モデルにおいて、 K_{ri} の影響は小さく、その影響は無視できるものと考えられる。

以上のことから総合的に判断すると、相互作用モデルとしては、全周地盤ばねモデル(等分布反力モデル、地盤ばね反力モデル)や部分地盤ばねモデル(等分布反力モデル)では、どのような相互作用モデルの組合せを用いても同程度にトンネル挙動を表現できるものと考えられる。また主働地盤ばね定数 K_{re} および接線方向の地盤ばね定数 K_{ri} は、洪積粘性土地盤の場合においても洪積砂質土地盤の場合と同様に、受働地盤ばね定数 K_{re} に関連づけて $K_{ri} = 1/2 \cdot K_{re}$ および $K_{ri} = 1/3 \cdot K_{re}$ と設定しても、セグメントの実用上の設計において大きな差異はないと考えられる。

d) 荷重系、構造系および相互作用モデルの設計上の取扱いに関する考察

まず、荷重系について考察する。現場計測結果と感度解析結果との適合性の評価結果によると、鉛直荷重にはTerzaghiの緩み土圧を採用し、水平荷重は土水一体と考え、側方土圧係数を0.6とした場合が適合性が高い。ここではさらに、水平荷重の考え方について考察を加える。前述した感度解析ではD_c層の透水係数の値($1.9 \sim 4.5 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$)から判断して、土水一体と考えて水平荷重を算定している。一方、A断面およびB断面においてトンネルの位置するD_c層のN値は20程度である(図-4参照)。これを現行の規準⁶²⁾に照らし合わせると、土水分離の“硬い粘性土”に分類される。そこで、土水分離を前提として現場計測から求めた水圧と側方土圧係数から求めた水平土圧とを用いて感度解析を行った。その結果は図-21に示すとおりである。図中の横軸は側方土圧係数であり、その値は現行の規準の範囲を基本にして定めたものである。この結果から、すべての指標において、相互作用モデルの違いによる分散の差は小さい。また土水分離の場合の側方土圧係数の影響は小さい。したがって、荷重状態は有効土圧に対して水圧が卓越する状態になっているものと考えられる。

次に、相互作用による応力の範囲について考察する。適合性の高い解析条件において、相互作用によるトンネル半径方向の土圧と計算上の有効土圧とを比較したものが、図-22a)~d)である。これらを見る

と、等分布反力モデルの場合および地盤ばね反力モデルの場合ともに、トンネルの底部で主動地盤ばねによる伸張応力が有効土圧以上に作用し、水圧分までも差し引いて計算していることがわかる。底部の水圧(約200~220 kN/m²)に対して、差し引いた応力は最大で約20~30kN/m²と水圧の10~15%ではあるが、相互作用モデルにおける主動地盤ばねの作用効果の範囲を考えると疑問がある。一方、実際の施工では、セグメントリングはシールドの掘進に伴いシールドのテールから地盤中に出ると同時に裏込め注入の影響を受ける。一般に裏込め注入圧は切羽の水圧に100~300kN/m²を加えた程度の値であり、本工事の裏込め注入圧は吐出圧でも300kN/m²である。このような条件を考慮すると、本来作用すると思われる土水圧以上に裏込め注入圧が作用し、見かけの土水圧が上昇した結果、計算から求めた設計土圧を越えるような伸張応力を考慮できる可能性があると考えられる。したがって、有効土圧に比べて水圧が卓越するような荷重条件下では、全周地盤ばねモデルで用いられる主動地盤ばねの設定を十分慎重に行い、相互作用による応力の大きさを吟味する必要がある。

(3) 相互作用モデルの違いがセグメント設計の結果に与える影響の検討

以上の検討により、従来から用いられてきた考え方でセグメントの設計荷重を算定すれば、構造系と相互作用モデルの組合せが異なるとしても、それらがトンネルの挙動に大きな影響を与えないことがわかった。ここではさらに、これらの適合性の評価結果を前提として、相互作用モデルの違いがセグメントの設計用断面力に与える影響について考える。

図-23a)~d)は前述の検討を踏まえ、各種の荷重系・構造系と相互作用モデルの組合せで計算された最大断面力を示したものである。なお、この最大断面力がセグメントの設計用断面力となる。この結果によると、洪積砂質土地盤および洪積粘性土地盤の両者ともに、相互作用モデルとして全周地盤ばねモデル(等分布反力モデルや地盤ばね反力モデル)を用いると、最大曲げモーメントが現在多用されている慣用モデルや部分地盤ばねモデルの約70%~50%と小さくなる。また等分布反力モデルにおいて、主動地盤ばね定数の値が大きくなるほど最大曲げモーメントの値が小さくなる。

以上のことから、自立性の高い地盤中のシールドトンネルのセグメントの設計において、全周地盤ばねモデルを採用すれば、セグメントリングの仕様の軽減やトンネル断面の縮径が可能となり、経済化が

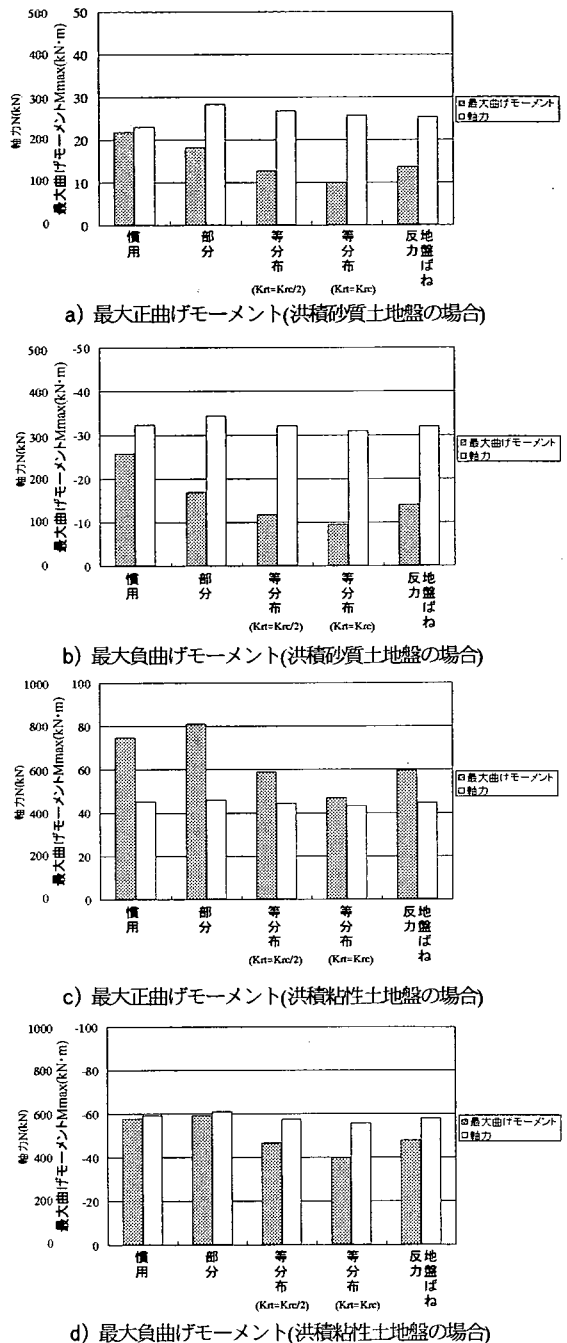


図-23 荷重系・構造・相互作用モデルの最大断面力

図れるものと考えられる。

5. まとめ

洪積地盤中に施工されたシールドトンネルに限られた計測データの分析とその解析結果から得られた結論をまとめれば、以下のとおりである。

①洪積砂質土地盤中に構築されたシールドトンネルの現場計測結果とその感度解析結果とを比較した結果、現行の規準に示される荷重系、構造系として、はりばねモデル、相互作用モデルとして部分地盤ばねモデルや全周地盤ばねモデルを用いれば、セグメントリングの挙動を概ね表現できる。

②洪積粘性土地盤中に構築されたシールドトンネルの現場計測結果とその感度解析結果とを比較検討した結果から、基本的に洪積砂質土地盤の場合と同様な結果が得られた。また、トンネルの深度が大きくなり水圧が卓越するような場合には、全周地盤ばねモデルに用いられる主動地盤ばねによる伸張力が有効土圧以上に作用し、水圧の一部までも低減してしまうことが確認された。このため、全周地盤ばねモデルの適用にあたってはこのことに十分注意する必要がある。

③トンネルの周辺地盤の受働的な特性や主動的な特性を、受働地盤ばねや主動地盤ばねにモデル化した全周地盤ばねモデルにおいて、これらのばね定数を同値とした場合には、覆工に生じる最大曲げモーメントは小さく計算され、危険側の設計結果となる可能性がある。また主動地盤ばねを考慮しない場合(部分地盤ばねモデルを採用した場合)には、最大曲げモーメントは大きく計算され、安全側の設計結果となる。この場合、地盤がとくに良好であるならば過剰な設計結果となる。

以上の結論を踏まえ、全周地盤ばねモデルを適用する際の留意点を示すと以下のとおりである。

適用地盤：全周地盤ばねモデルを覆工の断面力算定に適用する際の対象となる地盤は、N値が砂質土地盤では30以上、粘性土地盤では20以上となるような自立性の高い地盤でかつ土破りが少なくとも2D以上⁶³⁾となる場合と考えられる。ただし、トンネルの周辺地盤が礫分を多く含み、シールドの掘進によって局所的な地盤の乱れから、地山の大きな崩壊を招くことが懸念されるような場合などでは、N値のみからの判断だけではなく、地盤の自立性を土質調査の結果を基に総合的に判断することが重要である。

施工の留意点：シールドトンネルの施工において、切羽の乱れ、シールド機と周辺地盤との摩擦による地盤の乱れ、テールボイドの発生や過剰な裏込注入による地盤の乱れなど、トンネルの周辺地盤の初期状態が大きく変化したり、塑性変形が発生したりするのを極力小さくするような掘進管理を行うことが前提となる。

断面力算定上の留意事項：主荷重の算定は現行の規準類に示される方法に従うものとする。全周地盤ばねモデルにおける底部地盤反力の評価は等分布反力

モデルを基本として取り扱う。地盤と覆工との相互作用を評価する地盤ばねのうち、受働地盤ばねのばね定数は、孔内水平載荷試験、一軸圧縮強度試験、標準貫入試験などの土質試験結果から求まる地盤の変形係数を用いて、本研究で示した方法⁴⁵⁾によって算定する。主動地盤ばねのばね定数は孔内水平載荷試験において、除荷圧と地盤の変形量との関係を求め、地盤の除荷時の変形係数から本研究で示した方法⁴⁵⁾を用いて算定することが望ましい。ただし、土質調査試験の実施が困難な場合や試験による土の物性値の推定精度が劣る場合には、主動地盤ばね定数を受働地盤ばね定数の半分程度もしくは1/3程度とするのも一つの方法である。全周地盤ばねモデルを用いた覆工の断面力算定の結果において、大深度で高水圧が作用する条件下では、主動側の伸張力が過剰に水圧分までをも差し引くような結果となる場合があり、このようなケースでは主動地盤ばね定数を低減するなど、主動地盤ばねの取扱いには十分注意する必要がある。

上述した全周地盤ばねモデルの適用の考え方は、覆工に作用する主荷重に対して安全性を確保する観点からその取扱いを示したものである。このため、施工時荷重や地震の影響および近接施工の影響など、従荷重や特殊荷重については考慮していない。したがって、これらの荷重については、別途検討を行い、トンネルの総合的な安全性を確保する観点から覆工設計を行うことが重要である。

以上、自立性の高い地盤における全周地盤ばねモデルの適用について、現状の知見をもとにその適用方法を提案した。今後、自立性の高い地盤や大深度地盤中に構築されるシールドトンネルで数多くの現場計測を行い、その挙動をさらに詳細に把握するとともに、施工時荷重の影響や近接施工の影響など、トンネル覆工に求められる性能をより明確にした上で、さらに合理的な覆工の設計法が確立されることが望まれる。

参考文献

- 1) 例えば、小泉 淳：大深度地下利用に関する技術的課題，土木学会論文集，No.588/VI-38，pp.1-20，1998.3.
- 2) 高見 敬一，近藤 茂，中道 祐，渡辺 晴朗：名古屋市高速度鉄道のシールド工法について，土木学会 第1回トンネル工学シンポジウム，pp.65-85，1962.6.
- 3) 東京都下水道局：石神井川下幹線その9工事(シールド工法)報告書，1963.
- 4) 土木学会：シールド工法設計，1969.
- 5) 土木学会・日本下水道協会共編：シールド工用標準セグメント，1973.
- 6) 例えば、国鉄建設局 構造物設計事務所編：シールドトンネ

- ルの設計施工指針(案), 日本鉄道施設協会, 1977.12.
- 7) Domon, T., Kimura, S., Koizumi, T. and Nishimura, K.: Development of design methods for Japanese modern tunnels through the past to the future, AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress, Volume II, pp.131-136, 2000.9.
 - 8) 例えば, 土木学会: トンネル標準設計書(シールド工法編)・同解説, pp.76-81, 1996.7.
 - 9) Terzaghi, K.: Theoretical Soil Mechanics, pp. 66-76, pp.182-215, 1943.
 - 10) 例えば, 新堀 敏彦, 清水 満: 10年後のセグメント応力測定結果, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.2, pp.79-82, 1992.10.
 - 11) 小山 幸則, 岡野 法之, 清水 満, 藤木 育雄, 米島 賢二: 洪積地盤におけるシールドトンネルの現地計測結果と考察, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.5, pp.385-390, 1995.11.
 - 12) 例えば, 山口 巖, 山崎 宗治, 福島 健一, 小林 隆, 杉嶋 敏夫: 併設シールドの影響予測解析と実際の挙動, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.5, pp.39-46, 1995.11.
 - 13) 土木学会 トンネル工学委員会 技術小委員会 トンネル荷重部会: トンネルに作用する荷重の評価, NATMとシールドの境界領域におけるトンネル荷重に関する研究中間報告会資料, pp.25-34, 1999.11.
 - 14) 小山 幸則, 清水 満, 佐藤 豊, 岡本 達也, 梶原 健次郎: シールドトンネルの裏込め注入実験, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.3, pp.245-250, 1993.11.
 - 15) 小山 幸則, 清水 満, 佐藤 豊, 岡本 達也, 梶原 健次郎: 裏込め注入がシールドトンネルと周辺地盤に与える影響, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.4, pp.79-86, 1994.11.
 - 16) 例えば, 山本 稔, 遠藤 浩三, 福井 正憲: 多ヒンジ系セグメントリングの設計計算法, 土木学会論文集, No.150, pp.9-26, 1968.2.
 - 17) 久保 慶三郎, 結城 皓暁: シールドセグメントの応力に対する継手剛性の影響, 土木学会論文集, No.150, pp.27-34, 1968.2.
 - 18) 結城 皓暁: 継手の剛性と組み方を考慮したシールドセグメントの解析, 土木学会論文報告集, No.176, pp.13-22, 1970.4.
 - 19) 河田 博之, 植野 利之, 土井 博己, 山本 博之: セグメントの継手剛性に関する実験とその考察(3), 国鉄建設局 構造物設計事務所, 構造物設計資料, No.50, pp.25-30, 1977.6.
 - 20) 村上 博智, 小泉 淳: シールドセグメントリングの耐荷機構について, 土木学会論文報告集, No.272, pp.103-115, 1978.4.
 - 21) 村上 博智, 小泉 淳: シールド工用セグメントのセグメント継手の挙動について, 土木学会論文報告集, No.296, pp.73-86, 1980.4.
 - 22) 半谷 哲夫, 河田 博之, 小山 幸則: 新しいセグメント設計手法の開発, トンネルと地下, Vol.18, No.6, pp.17-26, 1987.6.
 - 23) 堀地 紀行, 平嶋 政治, 松下 芳亮, 石井 恒生: トンネル軸方向の剛性を考慮したシールドトンネルの断面力解析法, 土木学会論文集, No.406/III-11, pp.195-204, 1989.6.
 - 24) 小山 幸則, 松本 吉雄, 稲垣 利治: シールドセグメント継手試験と継手ばね定数の検討, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.4, pp.187-192, 1994.11.
 - 25) 例えば, 東田 淳, 三笠 正人: 弾性論による埋設管の土圧の検討, 土木学会論文集, No.376/III-6, pp.181-190, 1986.12.
 - 26) 小山 幸則, 清水 満, 佐藤 豊: トンネルと地盤の相互作用の設計上の取扱いに関する一考察, 土木学会論文集, No.511/III-30, pp.99-107, 1995.3.
 - 27) 木山 英郎, 藤村 尚, 西村 強, 池添 保雄: 初期地盤の変形を考慮した円形ライニングの2次元弾性解-地山支保力の定量化へのアプローチ-, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp.91-98, 1998.3.
 - 28) 木村 宏: 地山特性に視点を置いたシールドトンネルと山岳トンネルの統一的设计・施工の理念, 第27回土質工学研究発表会, pp.2093-2096, 1992.
 - 29) 杉嶋 敏夫: シールドトンネルの地盤-覆工連成解析と設計手法に関する研究, 京都大学博士学位論文, 2000.9.
 - 30) Einstein, H. H.: Simplified Analysis for Tunnel Supports, Proc. ASCE, GT4., p.500, 1979.
 - 31) Peck, R. B.: Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground, "Proceedings", 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, Mexico, State-of-the-Art, Vol.1, pp.225-290, 1969.
 - 32) Muir Wood, A. M.: The Circular Tunnel in Elastic Ground, GEOTECHNIQUE 25, LONDON, No.1, pp.115-127, 1975.5.
 - 33) Curtis, D. J.: Discussion on 30 above, GEOTECHNIQUE 26, No.1, pp.231-237, 1976.
 - 34) Einstein, H. H. and Schwartz, W.: Simplified Analysis for Tunnel Supports, Proc. ASCE, GT4., pp.499-518, 1979.4.
 - 35) Duddeck, H.: Empfehlungen zur berechnung von tunneln im lockergestein, DIE BAUTECHNIK, pp.349-356, 1980.10.
 - 36) Ahrens, H., Lindner, E. and Lux, K.: Zur Dimensionierung von Tunnelausbauten nach den "Empfehlungen zur berechnung von tunneln im lockergestein (1980)", DIE BAUTECHNIK, pp.260-273, 1982.8.
 - 37) Ahrens, H., Lindner, E. and Lux, K.: Zur Dimensionierung von Tunnelausbauten nach den "Empfehlungen zur berechnung von tunneln im lockergestein (1980)", DIE BAUTECHNIK, pp.303-311, 1982.9.
 - 38) 木村 定雄, 五十嵐 龍, 小泉 淳: トンネル覆工に作用する土圧と覆工変形の相互作用に関する模型実験, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.4, pp.47-54, 1994.11.
 - 39) 木村 定雄, 野本 雅昭, 小泉 淳: シールドトンネル覆工の合理的な設計法に関する一考察, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.5, pp.373-378, 1995.11.
 - 40) 木村 定雄, 野本 雅昭, 渡邊 誠司, 小泉 淳: トンネル覆工に作用する土圧と覆工変形の相互作用に関する模型実験 - 相互作用を評価する地盤ばねについて -, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.5, pp.71-78, 1995.11.
 - 41) 木村 定雄, 渡邊 誠司, 小泉 淳: 全周地盤ばねモデルを用いたセグメント設計の合理化に関する研究, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.6, pp.339-344, 1996.11.
 - 42) 木村 定雄, 渡邊 誠司, 金子 幸夫, 小泉 淳: シールドトンネルの合理的な設計法に関する研究 - 洪積粘性土地盤中の

- 現場計測結果に基づく全周地盤ばねモデルの適用に関する一考察, 土木学会第52回年次学術講演会, III-B107, 1997.9.
- 43) 三浦 啓二, 佐藤 栄一, 木村 定雄, 小泉 淳: シールドトンネルの合理的な設計法に関する研究-全周地盤ばねモデルにおける主働的地盤ばね定数の評価に関する一考察-, 土木学会第52回年次学術講演会, III-B108, 1997.9.
- 44) 神田 大, 三浦 啓二, 木村 定雄, 小泉 淳: シールドトンネルの合理的な設計法に関する研究-主働的地盤ばね定数の評価方法に関する一考察-, 土木学会第53回年次学術講演会, III-B184, 1998.10.
- 45) 木村 定雄, 小泉 淳: 地盤と覆工の相互作用を考慮したシールドトンネルの設計法について, 土木学会論文集, No.624/III-47, pp.123-134, 1999.6.
- 46) 神田 大, 木村 定雄, 小泉 淳: 洪積砂質地盤中のシールドトンネルの現場計測結果に基づく全周地盤ばねモデルの適用性に関する考察, 土木学会第54回年次学術講演会, III-B91, 1999.9.
- 47) 南木 聡明, 神田 大, 木村 定雄, 小泉 淳: 洪積地盤中の現場計測結果に基づく全周地盤ばねモデルの適用性の定量的評価, 土木学会第55回年次学術講演会概要集, III-B156, 2000.9.
- 48) 平山 国弘, 草薙 俊郎, 桐谷 祥治: 洪積砂質地盤中のシールドトンネルのセグメント計測(1), 土木学会第53回年次学術講演会, III-B191, 1998.10.
- 49) 西本 浩二, 田村 一雄, 木村 定雄, 中井 定寿: 洪積砂質地盤中のシールドトンネルのセグメント計測(2), 土木学会第53回年次学術講演会, III-B192, 1998.10.
- 50) 木村 定雄, 大日方 尚巳, 齋木 公嗣良, 田中 一成: 洪積砂質地盤中のシールドトンネルのセグメント計測(3), 土木学会第53回年次学術講演会, III-B193, 1998.10.
- 51) 浅賀 博, 井戸 澄夫, 古川 衛, 近藤 哲也, 松下 惇次: 地下鉄4号線超近接移行シールドの設計について, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.3, pp.87-94, 1993.11.
- 52) 山口 巖, 山崎 系治, 小林 隆, 松下 惇次, 宮田 弘之介, 杉嶋 敏夫: 4本併設シールドの地盤-トンネル挙動分析と併設シールドの設計・施工への応用に関する研究, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.47-62, 1997.
- 53) 前掲 36), 37), 41)
- 54) 土木学会: セグメントの設計, トンネル・ライブラリー第6号, pp.13-17, 1994.6.
- 55) 小山 幸則, 松本 吉雄, 稲垣 利治: シールドセグメント継手試験と継手ばね定数の検討, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.4, pp.187-192, 1994.11.
- 56) 例えば, 松本 嘉司, 小山 幸則, 松本 吉雄, 菊入 崇, 小林 宏基: 現場計測データに基づくシールドトンネルの設計法に関する研究, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.3, pp.275-280, 1993.11.
- 57) 橋本 正, 長屋 淳一, 太田 擴, 塩谷 智弘, 杉原 和彦: 実測値に基づくシールドトンネルの設計土圧に関する一提案, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.7, p.p.291-296, 1997.11.
- 58) 有泉 毅, 岡留 考一, 長屋 淳一: シールド洞道に働く荷重計測結果とその分析について, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.8, pp.367-372, 1998.11.
- 59) 例えば, 真下 英人, 石村 利明, 酒寄 健之: 粘性土地盤中のシールドトンネルの作用土圧に関する研究, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.6, p.p.333-338, 1996.11.
- 60) 南木 聡明, 神田 大, 木村 定雄, 小泉 淳: 洪積地盤中の現場計測結果に基づく全周地盤ばねモデルの適用性の定量的評価, 土木学会第55回年次学術講演会, III-B156, 2000.9.
- 61) 例えば, 前掲 48), 58)
- 62) 例えば, 土木学会: トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説, p.44, 1996.7.
- 63) Terzaghi, K.: Theoretical soil mechanics, Jhon Wiley and Sons, p.71, 1943.

(2001.11.22 受付)

APPLICABILITY OF THE BEAM-SPRING MODEL WITH GROUND SPRINGS SET ALL AROUND THE LINING TO DESIGN OF SHIELD TUNNEL LINING BY COMPARISON OF IN-SITU MEASUREMENTS AND THE SENSITIVITY ANALYSIS

Sadao KIMURA, Hiroshi KANDA, Toshiaki NANMOKU and Atsushi KOIZUMI

It has been already suggested that the Beam-Spring Model, in which ground springs set all around the tunnel lining, is the most rational design method of shield tunnel lining constructed in hard and strong ground. Using the design model, some sensitivity analysis with several kinds of factors are carried out. Applicability of the model to actual design of tunnel lining is investigated by comparing the result of the analyses and the in-situ measurements. Consequently, it reveals that this design model is able to simulate the behavior of shield tunnel lining and also execute both safeness and economizing for shield tunnel lining.