

海底トンネルの健全性に関する基礎的研究

丹生和宏¹・西藤潤²・田村武³

¹学生会員 京都大学大学院工学研究科 学生 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C)
E-mail: niu@basewall.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院工学研究科 助教 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C)

³フェロー会員 京都大学大学院工学研究科 教授 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C)

現在、代表的な海底トンネルの1つである青函トンネルでは、トンネル内湧水量が減少する傾向にある。この傾向が続くと、トンネル周辺の水圧分布が変化し、トンネルに大きな負荷がかかるおそれがある。そこで、本研究では、数値解析を用いて、トンネル覆工背面に作用する水圧が覆工の応力状態に与える影響について調べ、健全性の評価を試みた。数値解析においては、覆工背面での水圧上昇により覆工と周辺地盤が剥離することもあり、解析の結果、覆工と周辺地盤の間で剥離が生じる場合、一度に広範囲で剥離が生じることが示された。

Key Words : undersea tunnel, FEM, seepage analysis, soundness evaluation

1. 緒言

現在、青函トンネルは青森県と北海道を結ぶ在来線の唯一の鉄道トンネルとして供用中であり、将来は新青森 - 新函館間を結ぶ北海道新幹線の一部としても使用されることが決定している。また、トンネル内には通信網も敷設されており、その安全性や機能性を維持することは、社会的経済的に非常に重要な課題である。

一般に海底トンネルの施工および維持管理においては、トンネル周辺に作用する大きな水圧と、膨大な浸透水が1つの重要な問題となる。なかでも、本研究の対象とする青函トンネルは、海面下240mに位置し、最大 $2.4 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ もの非常に大きな水圧が作用する。そのため、安全性を確保するため常に細心の注意が払われている。青函トンネルの施工時には、大きな圧力と膨大な量の浸透水の対策として、トンネル周辺地山の透水性を低下させるため薬液を注入する方法が取られた。現在は維持管理の一環として湧水量を継続的に測定しており、透水環境の変化によって坑内湧水量が供用開始から2～3割減少しているという報告がなされている¹⁾。仮に、透水性が低下し続けたとすると、トンネル周辺地盤の有効応力が減少するため、トンネル覆工に作用する軸力が低下する恐れがある。トンネル覆工は軸力を発揮することで安定を保つ構造物であり、健全なトンネルの維持管理をする上で透水性は重要な指標である。透水性が著しく低下した場合、トンネル覆工と周辺地盤の間に剥離が生じることも考えられる。剥離が生じると、軸力が低下した状態で覆工に曲げが作用するため、非常に危険な状態となる。そこで、本研

究では、透水性の低下が及ぼす影響について調べ、剥離の可能性まで考慮した数値解析により、トンネル周辺で起こる現象の予測を試みた。なお、海底トンネルに関する研究は過去にも行われているが¹⁾²⁾³⁾、剥離を考慮したモデル化によって健全性評価を行った研究事例は見受けられない。

2. 有限要素法による定式化

解析は、簡単のため、トンネル覆工および周辺地盤を等方線形弾性体と想定し、二次元平面ひずみ状態を考える。解析では間隙水圧分布の影響を考慮し、計算を行う。まず系全体の水圧分布を求め、得られた水圧を用いて変位の解析を行う。なお、水圧は変位に影響を与えるが、その逆は考えない。

(1) 浸透流の計算

全水頭の支配方程式は、連続式

$$v_{i,i} = 0 \quad (\text{in } D) \quad (1)$$

と Darcy 則

$$v_i = -kh_{,i} \quad (\text{in } D) \quad (2)$$

から次のように計算できる。

$$kh_{,ii} = 0 \quad (\text{in } D) \quad (3)$$

ここで v_i は間隙水の流速、 k は透水係数、 h は全水頭である。下付き添字 $_{,i}$ は x_i に関する偏微分を意味する。 D は解析対象領域である。1つの項に繰り返し現れる添字は総和規約を適用する。式(3)は Laplace 方程式で

あり、有限要素法を用いて全水頭を求めることが可能である。間隙水圧 p は全水頭 h から次の関係式

$$h = \frac{p}{\rho g} + z \quad (\text{in } D) \quad (4)$$

より導出できる。 ρ は海水の密度、 g は重力加速度、 z は位置水頭である。

(2) 変形の計算

間隙水圧 p が作用すると、全応力 σ_{ij} は有効応力 σ'_{ij} を用いて以下のように書ける。

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + p\delta_{ij} \quad (\text{in } D) \quad (5)$$

物体力を無視した場合、全応力の力のつりあい式から次のような関係が得られる。

$$\sigma_{ij,j} = \sigma'_{ij,j} + p_{,i} = 0 \quad (\text{in } D) \quad (6)$$

なお、物体力は初期状態の応力とつりあっているため、次章で示すように、増分計算を行う場合は上式のように物体力を含まないつりあい式を用いて計算を行う。

つりあい式 (6) に変位境界上で $\bar{u}_i = 0$ となるような仮想変位 $\bar{u}_i$ を乗じて領域内で積分を行うと次式を得る。

$$\int_D (\sigma'_{ij,j} + p_{,i}) \bar{u}_i dS = 0 \quad (7)$$

上式に対し、発散定理を用いると次式を得る。

$$\int_D \sigma'_{ij} \bar{\varepsilon}_{ij} dS = - \int_D p \bar{\varepsilon}_{kk} dS + \int_{S_1} \bar{t}_i \bar{u}_i ds + \int_{S_1} p m_i \bar{u}_i ds \quad (8)$$

ここで、 $\bar{t}_i$ は応力境界 S_1 上に作用するトラクション、 ε_{ij} はひずみでそれぞれ次式のように定義される。

$$t_i = \sigma_{ji} n_j \quad (9)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (10)$$

式 (8) を離散化し、仮想変位を消去すると以下の式を得る。

$$K u = f - L p \quad (11)$$

ここで、 u 、 f 、 p はいずれも節点上での値であり、それぞれ変位、外力、圧力を離散化したベクトルである。ここに K はいわゆる全体剛性行列であり、 L は水圧にかかる係数行列である。水圧 p は前節で示した浸透流計算から得られた水圧を用いて解析を行う。すなわち、式 (11) 右辺は既知量である。なお、水圧は変位による影響を受けない。

(3) トンネル覆工と周辺地盤との剥離

トンネル覆工と周辺地盤をひとつの連続体として捉え、数値解析では覆工と地盤の間に引っ張りが作用する可能性がある。しかし、実際の現象では覆工と地盤の間に引っ張りは生じない。そこで、数値計算においても引っ張りが生じないようにするため、覆工と地

盤の要素が共有している節点に引っ張りが生じた場合、その節点を 2 つに剥離させてその引っ張りを打ち消すように力を作用させ、再度変形解析を行った。圧縮が作用する節点はそのまま 1 つの節点として計算を行う。

3. 解析の流れ

海底トンネルで湧水量が減少するとトンネル覆工背面に作用する水圧が増加する可能性がある。このことを考慮して、覆工背面に作用する水圧の大きさを変化させ、それに応じて覆工の応力状態がどのように変化するかを調べた。一連の解析において、以下の 4 段階に分けて、それぞれ増分計算を行う。

- (a) 掘削時 (図-1 参照)
- (b) 覆工完成直後 (図-2 参照)
- (c) 覆工完成後長期間経過時 (現在) (図-3 参照)
- (d) 覆工と地山の境界面での剥離 (図-4 参照)

(1) 解析の流れ

各 Step における解析手法は以下の通りである。

a) Step 1：掘削時

初期状態において有効応力 σ'_0 、静水圧 p_0 が地盤に作用しているとき、掘削によって有効応力、水圧がそれぞれ α, β の割合で解放されるものとする。 α, β は、トンネル建設過程において生じる有効応力と間隙水圧の変化を表現するために用いる係数であり、本研究ではそれぞれ有効応力解放率、水圧解放率と呼ぶこととする。

この掘削時の応力状態 (図-1 左) は、線形弾性の仮定より初期状態 (図-1 中央) と増分形式 1 (図-1 右) の重ね合わせで表現できる。初期状態は容易に得られるため、増分形式の計算を数値的に行えば、掘削時の応力状態が得られる。なお、これ以降の Step においても増分計算を行うが、最初の初期状態で物体力を考慮するため、各 Step の数値計算において物体力を考慮する必要はない。

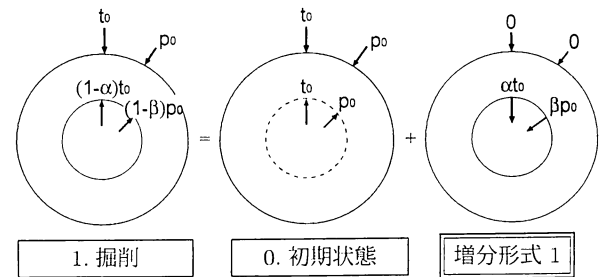


図-1 Step 1：掘削

b) Step 2：覆工完成直後

覆工の完成直後には、覆工内壁の有効応力、覆工背面の水圧をともに 0 と設定しながら、残留している有効応力 $(1 - \alpha)\sigma'_0$ および水圧 $(1 - \beta)p_0$ を除荷させる。完成直後の応力状態（図-2 左）は、掘削時の応力状態（図-2 中央）と増分形式 2（図-2 右）から得られる。掘削時の応力状態は前の Step で得られており、増分形式を解くことで完成直後の応力状態が得られる。

c) Step 3：覆工完成後長期間経過時

施工後長期間経過し、その間に周辺地盤の目詰まり等により周辺地盤の透水性が低下することを想定し、覆工背面に γp_0 の水圧が回復する状況を考える。係数 γ は、トンネル完成後から長期間経過後に覆工背面に作用する水圧の大きさを表す係数である。本研究では、 γ を覆工背面水圧係数と呼ぶこととする。覆工周辺の地盤に目詰まりが生じトンネル周辺の透水係数が低下し周辺地盤に水圧が作用したり、トンネルに流入する水に対して排水機能が低下したりすると、この γ 値が上昇する。このときの応力状態（図-3 左）は、Step 2 で得られた覆工完成直後の応力状態（図-3 中央）と増分形式 3（図-3 右）の重ね合わせで得られる。

d) Step 4：覆工と地山の境界面での剥離

Step 3 で得られた結果において、覆工と周辺地盤の間に引っ張りが生じた場合、前章で示したようにこれらを分離させて再計算を行う。この分離は剥離をモデル化したものである。剥離が生じた場合には、発生している引っ張りの有効応力による節点力を剥離が生じた節点に逆向きに作用させる。力のつり合いを考慮し、地盤に作用させる向きと逆向きに同じ大きさの力を作用させる。最終的に剥離が発生したときの応力状態（図-4 左）は、Step 3 で得られた応力状態（図-4 中央）と増分形式 4（図-4 右）の重ね合わせで得られる。なお、このステップにおいては、浸透流解析は行わず、変形解析のみを行う。また、覆工の上端部と地盤の共有する節点では剥離は生じないものとする。これは、仮に全周で剥離が生じたとしても、浮力により覆工の上端部と地盤が再度接触すると考えられるためである。

4. 解析結果

本研究では、図-5 のようなモデルを用いて解析を行った。問題を簡易化するため、覆工形状は円形とした。解析領域は対称性から右半分のみを考え、図-6 のように左右をスライダー支持、上部を自由表面、下部を固定とする仮想的な境界を設定した。モデルの大きさは、青函トンネルをイメージし、覆工半径 5.7m、覆工厚 0.7m とし、解析領域は縦 60m、横 50m とした。解析に用いたメッシュを図-6 に示す。節点数 1380、要素数 1305

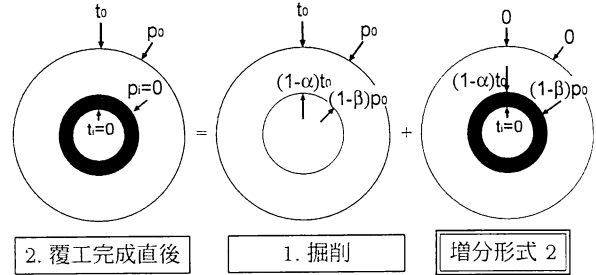


図-2 Step 2：覆工完成直後

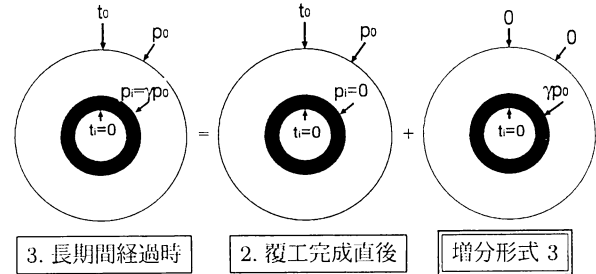


図-3 Step 3：現在

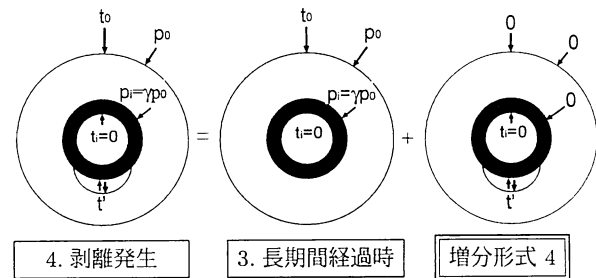


図-4 Step 4：剥離発生

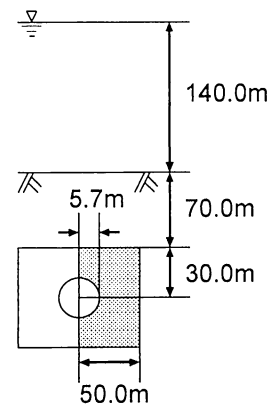


図-5 解析領域

であり、内側から 4 層（要素数 180）が覆工に相当する。

本研究で用いた物性値¹⁾⁴⁾⁵⁾を表 1 に、境界条件を表 2 に示す。表 2 については、それぞれのステップで解析を行う増分形式の境界条件を示している。本研究では、注入域を特別に設けず、地盤内の透水係数は一定と仮

定した．初期応力の静止土圧係数は $K_0 = 1.0$ とした．

本研究では，(1) $\alpha=0.5$, $\beta=0.5$ のケース，(2) $\alpha=0.75$, $\beta=0.75$ のケース，(3) $\alpha=1.0$, $\beta=1.0$ のケースの 3 ケースについて考える．それぞれのケースに対して覆工背面水圧係数 γ を 0.0 から 1.0 まで 0.1 刻みで 11 個のパターンの解析を行った．

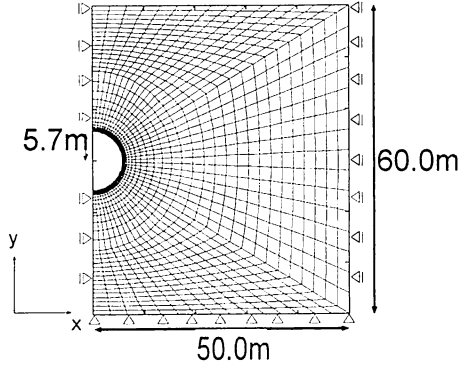


図-6 解析に用いた有限要素メッシュ

表-1 物性値

覆工半径 r_i [m]	5.7
覆工厚 D [m]	0.7
地山の単位体積重量 γ_g [kN/m ³]	26.1
海水の単位体積重量 γ_w [kN/m ³]	9.8
覆工のヤング率 E_l [kN/m ²]	3.0×10^7
地山のヤング率 E_g [kN/m ²]	3.0×10^5
覆工のポアソン比 ν_l	0.20
地山のポアソン比 ν_g	0.33
静水圧 p_0 [kN/m ²]	2.4×10^3

表-2 各ステップでの境界条件

Step		浸透流解析	変形解析
Step 1	掘削面	$-\beta p_0$	$\alpha t_0 + \beta p_0$
	—	—	—
Step 2	地盤外側	0	0
	覆工内壁	0	0
Step 3	覆工背面	$-(1-\beta)p_0$	$(1-\alpha)t_0 + (1-\beta)p_0$
	地盤外側	0	0
Step 4	覆工内壁	0	0
	覆工背面	γp_0	0
Step 4	地盤外側	0	0
	覆工背面	0	$-t'_i$

(1) $\alpha=0.5$, $\beta=0.5$ の場合

掘削時に初期応力および初期水圧が 50% ずつ解放された場合，覆工完成後長期間経過時において，覆工背面水圧係数 $\gamma = 0.8$ を超えると剥離が生じるおそれがあることが明らかとなった．覆工の上下で剥離していないのは，変位境界条件によるものと考えられる．また， $\gamma = 1.0$ ，つまり覆工背面での水圧が静水圧に等しくなると上端部を除く全周で剥離が生じている．図-7，図-8 における黒丸は， $\gamma = 0.8, \gamma = 1.0$ における剥離発生箇所を示しており，また圧縮応力を正としている．Step 3 と Step 4 における覆工内壁付近および外壁付近の最大主応力および最小主応力をそれぞれ図-9～図-12 に示す．横軸が水平となす角度，縦軸が主応力を表している．4 つの図から剥離を考慮することで覆工の応力状態が劇的に変化しており，剥離を考慮した解析の重要性が示せた．

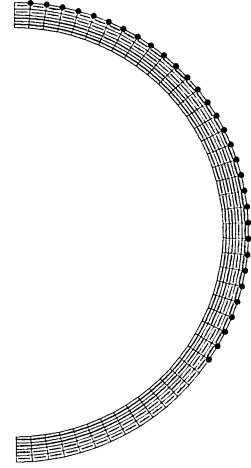


図-7 $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$, $\gamma = 0.8$ の場合の覆工の主応力図

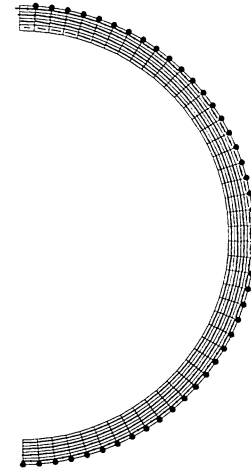


図-8 $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$, $\gamma = 1.0$ の場合の覆工の主応力図

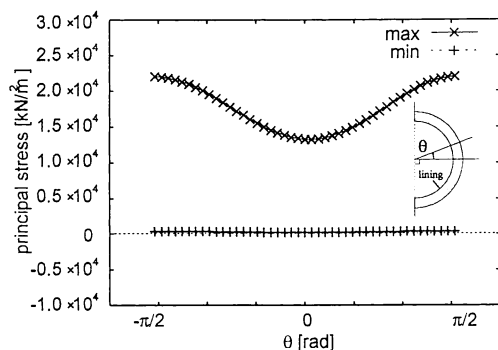


図-9 剥離を考慮しない場合の覆工内壁付近の最大主応力および最小主応力の分布 ($\alpha=0.5$, $\beta=0.5$, $\gamma=1.0$)

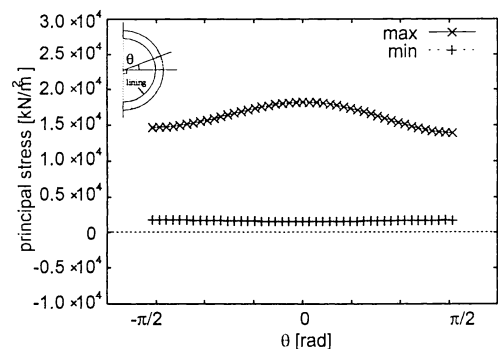


図-10 剥離を考慮しない場合の覆工外壁付近の最大主応力および最小主応力の分布 ($\alpha=0.5$, $\beta=0.5$, $\gamma=1.0$)

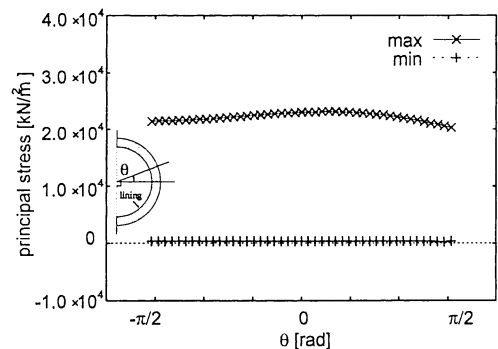


図-11 剥離を考慮した場合の覆工内壁付近の最大主応力および最小主応力の分布 ($\alpha=0.5$, $\beta=0.5$, $\gamma=1.0$)

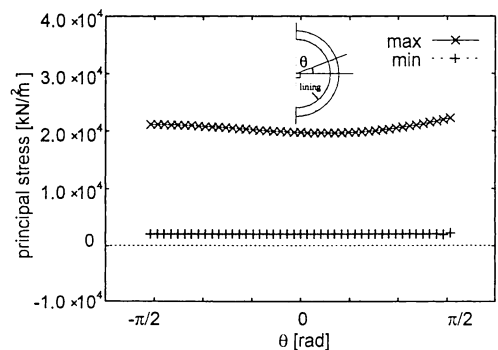


図-12 剥離を考慮した場合の覆工外壁付近の最大主応力および最小主応力の分布 ($\alpha=0.5$, $\beta=0.5$, $\gamma=1.0$)

(2) $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.75$ の場合

掘削時に初期応力および初期水圧が75%ずつ解放された場合、覆工背面水圧係数 $\gamma = 0.4$ を超えると剥離が生じ、 γ が0.5以上の場合には上端部を除く全周で剥離するという結果が得られた。 $\gamma = 0.4$ および $\gamma = 1.0$ の解析結果を図-13、図-14に示す。(1) $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ のケースと比較して、早い段階から剥離が生じ始めている。これは、応力や水圧が解放される割合が大きいため、Step 2において覆工背面の有効応力がケース(1)よりも小さくなることと原因であると考えられる。Step 3とStep 4における覆工内壁付近および外壁付近の最大主応力および最小主応力をそれぞれ図-15～図-18に示す。

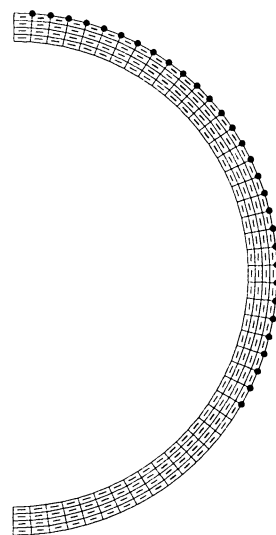


図-13 $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.75$, $\gamma = 0.4$ の場合の覆工の主応力図

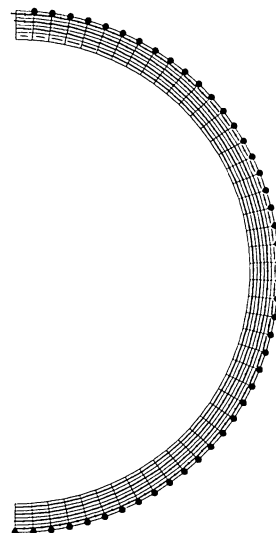


図-14 $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.75$, $\gamma = 1.0$ の場合の覆工の主応力図

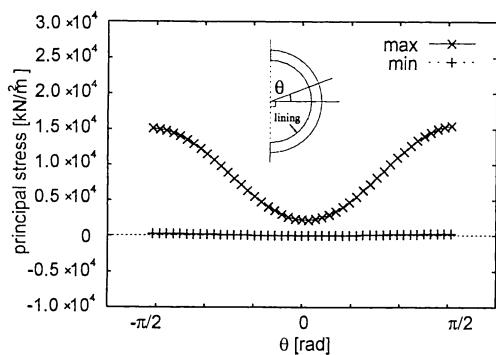


図-15 剥離を考慮しない場合の覆工内壁付近の最大主応力および最小主応力の分布 ($\alpha=0.75$, $\beta=0.75$, $\gamma=1.0$)

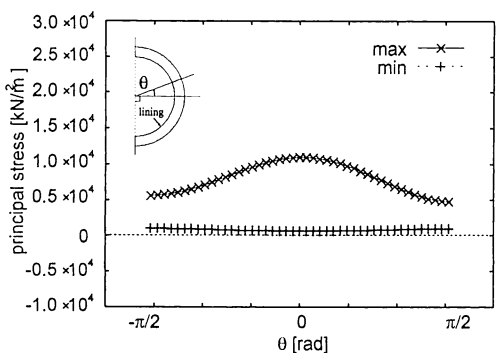


図-16 剥離を考慮しない場合の覆工外壁付近の最大主応力および最小主応力の分布 ($\alpha=0.75$, $\beta=0.75$, $\gamma=1.0$)

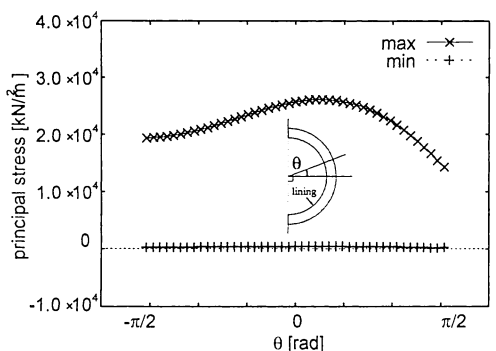


図-17 剥離を考慮した場合の覆工内壁付近の最大主応力および最小主応力の分布 ($\alpha=0.75$, $\beta=0.75$, $\gamma=1.0$)

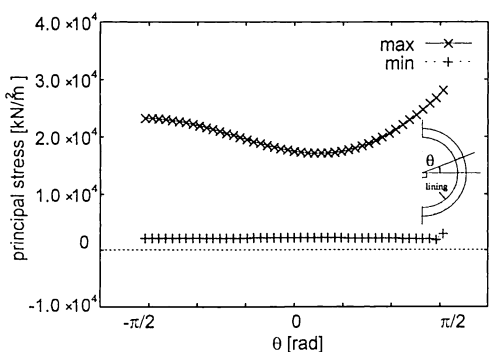


図-18 剥離を考慮した場合の覆工外壁付近の最大主応力および最小主応力の分布 ($\alpha=0.75$, $\beta=0.75$, $\gamma=1.0$)

(3) $\alpha = 1.0$, $\beta = 1.0$ の場合

掘削時に初期応力および初期水圧が完全に解放された場合、 $\gamma = 0.1$ のとき、つまり覆工背面での水圧が小さい場合であっても上端部を除く全周で剥離が生じるおそれがあることが分かった。これは、前 2 ケースに比べ、Step 2 での覆工背面の有効応力が非常に小さくなっていることが原因であると考えられる。剥離の様子を図-19、図-20 に示す。覆工内壁付近での主応力を図-21～図-24 に示す。

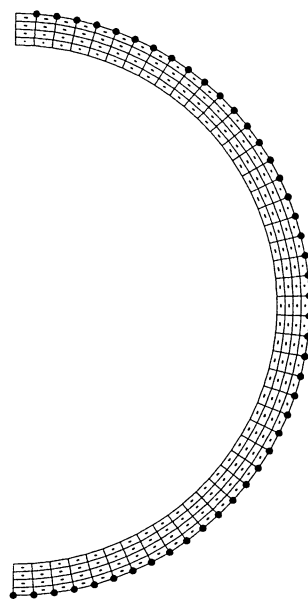


図-19 $\alpha = 1.0$, $\beta = 1.0$, $\gamma = 0.1$ の場合の覆工の主応力図

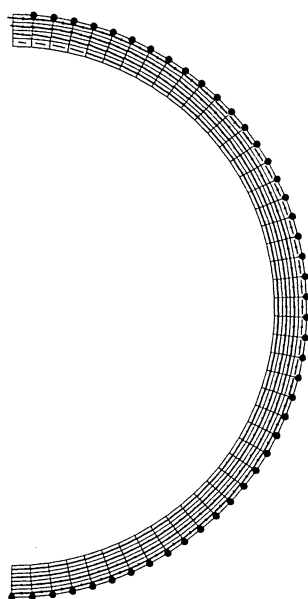


図-20 $\alpha = 1.0$, $\beta = 1.0$, $\gamma = 1.0$ の場合の覆工の主応力図

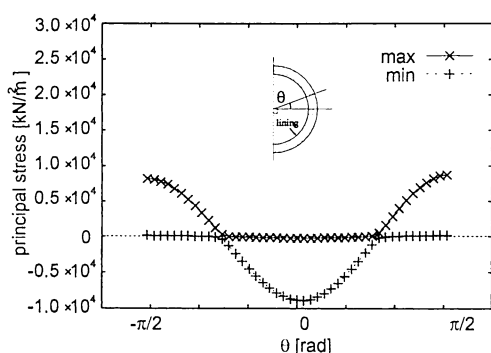


図-21 剥離を考慮しない場合の覆工内壁付近の最大主応力および最小主応力の分布 ($\alpha=1.0$, $\beta=1.0$, $\gamma=1.0$)

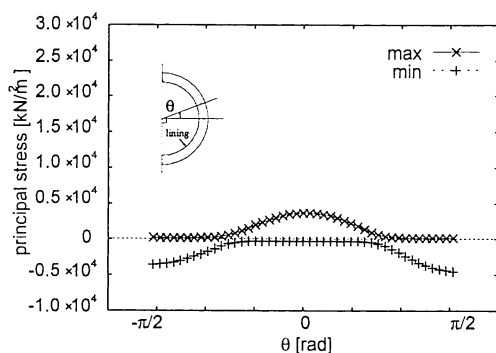


図-22 剥離を考慮しない場合の覆工外壁付近の最大主応力および最小主応力の分布 ($\alpha=1.0$, $\beta=1.0$, $\gamma=1.0$)

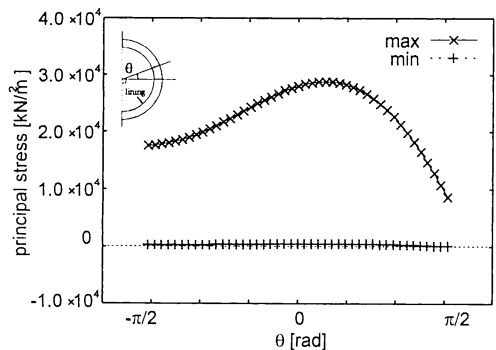


図-23 剥離を考慮した場合の覆工内壁付近の最大主応力および最小主応力の分布 ($\alpha=1.0$, $\beta=1.0$, $\gamma=1.0$)

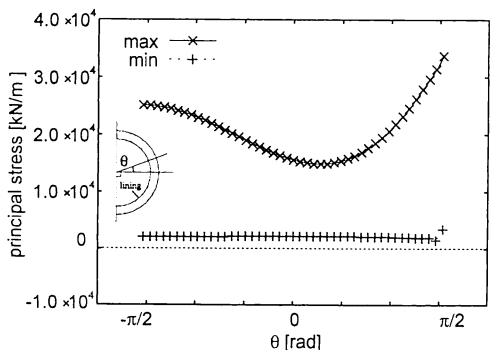


図-24 剥離を考慮した場合の覆工外壁付近の最大主応力および最小主応力の分布 ($\alpha=1.0$, $\beta=1.0$, $\gamma=1.0$)

5. 結言

本研究は、掘削段階から覆工と地盤の境界面で剥離が生じるまでを有効応力解放率、水圧解放率および覆工背面水圧係数を用いて各段階毎に解析し、算出した覆工に発生する有効応力および覆工と地盤の境界面での剥離発生の有無から、海底トンネルの健全性を評価しようと試みたものである。健全性の判断として、覆工に引張りの応力が生じる場合、そして覆工と地盤での剥離が発生した場合を危険側とみなした。以下に本研究で得られた結論について記す。

- 有効応力解放率 α および水圧解放率 β が大きいほど、つまり掘削時に初期応力および静水圧が解放される割合が大きいほど剥離が生じやすい。
- 覆工背面水圧係数 γ の値が大きくなる、つまり、覆工背面での水圧が大きくなるにつれて剥離が生じやすくなる。
- 剥離が発生しても覆工には引張り応力は生じていないため、覆工自体に問題は生じていないと考えられる。
- 剥離が発生する場合、一度に広範囲で発生し、全周で剥離が生じる可能性があることが明らかとなった。全周で剥離が生じる場合、覆工は浮力により再度地盤と接触すると予想される。また、覆工背面で空洞が生じると、それまで覆工を支えていた地盤による支持が得られず、トンネルは不安定な状態になると考えられる。

本研究ではモデルを簡易化したため、定性的な評価に留まった。今後はより現実に近いモデルを対象とし定量的な評価を行う予定である。具体的には、注入域とそうでない地山を区別し、透水係数や Young 率の変化を領域ごとに定めた場合について、考慮したいと考えている。また、覆工の形状や解析領域についても検討が必要である。

参考文献

- 1) 日本鉄道建設公団,(財) 防災研究協会：青函トンネル海底部のトンネル内空断面測定結果の解析および評価(その2) 報告書, 1995.
- 2) 足立紀尚, 田村武：高圧湧水下のトンネル工における水抜孔の効果と注入域の適正規模, 土木学会論文報告集, 第280号, pp.87-98, 1978.
- 3) 土谷幸彦, 倉川哲志, 工藤健, 小西真治, 小島芳之, 東畑郁生：海底トンネルの覆工の長期挙動と評価に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.3, pp.825-834, 2004
- 4) 大滝三夫：青函トンネルにおける一等水準測量, 国土地理院時報, 2005.
- 5) 小林和夫：コンクリート構造工学, 森北出版株式会社, 1994.
- 6) 田村武：連続体力学入門, 朝倉書店, 2000.

A fundamental study on the evaluation of soundness of the undersea tunnel

Kazuhiro NIU, Jun SAITO and Takeshi TAMURA

The amount of seepage water measured in Seikan Tunnel, which is a typical undersea tunnel, has been decreasing. It makes the water pressure just behind the lining change and the high water pressure might act the lining. An elastic finite element analysis was done in this study to evaluate the soundness of the undersea tunnel using a simple model for the lining and the surrounding ground. Particularly the detachment between the lining and the ground was considered in the analysis. As a result, it was confirmed that the tremendous amount of tensile stress associated with bending occurs in the lining when the high water pressure directly acts the lining.