

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360223

研究課題名（和文）

海底トンネルの力学的健全性評価法に関する研究

研究課題名（英文）

Soundness evaluation of lining concrete of the undersea tunnel

研究代表者

西藤 潤 (SAITO JUN)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40456801

研究成果の概要（和文）：

海底トンネル周辺の水圧分布がトンネルの健全性に及ぼす影響を調べるため、掘削から供用開始後までの諸条件をモデル化した有限要素法の開発を行った。それに基づいて解析を行った結果、間隙水圧上昇によって、覆工と地盤の間に剥離が発生しうることを確認した。また、トンネルの周辺地盤の透水性が低下すると、水圧や塑性域などは変化するが、覆工の健全性には大きな影響を与えないという結論を得た。

研究成果の概要（英文）：

We develop a new finite element method which can simulate the mechanical behavior of an undersea tunnel in order to evaluate the soundness of its lining concrete. Results of numerical analysis show that lining and ground can be detached by the increase of the water pressure. We also confirm that the decrease of the seepage water can lead the change of water pressure or expansion of plastic zone, but it has little bad influence on the soundness of lining concrete.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|------------|
| 2009年度 | 4,400,000 | 1,320,000 | 5,720,000 |
| 2010年度 | 3,330,000 | 990,000 | 4,290,000 |
| 2011年度 | 2,100,000 | 630,000 | 2,730,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 9,830,000 | 2,940,000 | 12,740,000 |

研究分野：地盤工学

科研費の分科・細目：

キーワード：海底トンネル，補助工法，注入工法，浸透流，模型実験，連成解析，トンネルの健全性，覆工

1. 研究開始当初の背景

一般に海底トンネルにおいては、その施工および維持管理について、膨大な量の湧水とそれに伴うトンネル周辺に作用する大きな間隙水圧の対策が最大の課題となる。とくに、青函トンネルは海面下約 240m に位置し、最大約 2400kPa もの間隙水圧が作用する。青

函トンネルの地山は新第三紀中新世で、固結度の低い凝灰岩類の薄層を挟在する砂質泥岩からなる軟弱地盤となっている。そのため、掘削およびトンネル施工時には、膨大な量の湧水と大きな間隙水圧の対策として薬液注入工法が採用された。間隙水圧はこの注入域の外周に作用し、この領域を浸透した湧水は

覆工背面で導水され、覆工自体には直接間隙水圧が作用しないような設計となっている。

青函トンネル全体の湧水量は、1988年から2005年にかけて約18%、青函トンネルの本坑(海底部)では1989年から2005年にかけて約23%の湧水量の減少が報告されている。トンネルの維持管理という観点では、湧水量の低下は好ましいことである。

浸透する水量が減少している要因の1つとしてとして、水みちの目詰まりなどによるトンネル周辺での透水性の低下が考えられる。透水性の低下はトンネル周辺の間隙水圧分布に影響しているため、前述したように覆工には直接間隙水圧が作用しない設計になっているものの、場合によっては周辺の間隙水圧がトンネルの健全性に悪影響を及ぼす可能性もある。

2. 研究の目的

青函トンネルに代表される海底トンネルでは施工時および供用時にかかわらず、地下水すなわち海水の浸透対策が最大の課題である。そのため青函トンネルの貫通に最大の貢献した技術は「注入」であった。すなわち、セメント系薬液をトンネル周辺に大量に注入することによって、地盤の透水係数を小さくし湧水を軽減できたことが、青函トンネル完成の最大の要因である。注入により周辺地盤の透水係数を元の値の数%程度にまで小さくすることによって、トンネル内に流入する湧水量は大幅に軽減する。ところが注入工法が、完成した海底トンネルの力学的安定性に関して大きな課題を残すことはあまり知られていない。それは、透水係数の小さい領域をトンネル周辺に配置すると、海面からの深さに対応する静水圧に近い大きな水圧がトンネルの近くにまで押し寄せることである。そしてトンネル覆工背面に流れ込む湧水は、水圧の勾配と透水係数の積の大きさで確定する。勾配は小さいが、透水係数が大きいため湧水は多量となるトンネル周辺に透水係数の小さい注入域を設けると、注入域の外径のところまで海面からの深さに匹敵する静水圧が到達する。トンネル背後の領域での動水勾配は大きくなるが透水係数が十分に小さいので湧水は少なくなる。しかしいずれにしても、大きな水圧の領域がトンネルに近づくため、注入は力学的な観点からは覆工の健全性を阻害するおそれがある。

青函トンネルの湧水量が減少している現状を考えると、周辺地盤の透水係数の減少が懸念される。そのため、上述の理由により、トンネルの健全性の評価が不可欠となっている。そこで、主に数値解析を用いて現象の解明や健全性の評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 海底トンネル周辺に生じている現象の解明

注入、トンネル掘削、覆工構築そして完成時から現状までの各ステージにおいて、地盤内にどのような状況が生じているかを明らかにする。そのために、海底トンネルの境界条件の変化を適切にモデル化した土水連成の有限要素法を開発する。

(2) 数値解析による現象のモデル化

上記の現象を数値計算上でモデル化する。ここで数値計算は「数値実験」の意味がある。実際のトンネルで生じている現象は確定的でない。いくつかの仮説のもとに数値的にケーススタディを繰り返し、実情を探らねばならない。青函トンネルの場合、長期間にわたって計測されている湧水量がデータとして存在するため、これを活用し、大局的あるいは局所的な透水係数の変化を予想する。

(3) 海底トンネルの健全度の評価法の確立

海底トンネルにとってもっとも好ましくない状態は、トンネル覆工背後まで静水圧が達することである。このような状況のもとでトンネル覆工がどのように挙動するかは未知の問題であるが、いずれにしてもトンネル構造にとってもっとも危険である。この状態をもっとも危険なレベルとし、いくつかの健全度レベルを設ける。湧水量とともに計測可能なトンネル周辺の水圧測定結果をもとに、上記の数値解析を通して健全度レベルを判断する。

(4) 健全度に対する対策方法の提案

健全度が推定されたあとに、必要に応じた対策を施さねばならない。多くの時間とコストのかからず、かつ、長期的な観点から合理的な対策を提案する。

4. 研究成果

(1) 海底トンネルの力学モデルの確立

青函トンネルの場合はトンネル掘削に先立ち、湧水量を減少させるために、薬液注入が行われる。その後、掘削、覆工構築でトンネルが完成したあと、数十年単位で維持管理される。これらのプロセスを土水連成の有限要素法において表現できるようモデル化した。

(2) 力学モデルによる解析解と数値解の比較

上で求められた力学モデルの検証と応用を目的として、それらの解析解と数値解を求めた。解析解は、軸対称2次元問題としてモデル化した。弾性モデルに限らず、弾塑性モデルでも軸対称のもとでは一定の範囲で解析解が得られる。それにより、得られた理論解と軸対称有限要素法のプログラムを比較し、精度を検討した。また、2次元平面ひずみ弾

塑性有限要素法と浸透流解析用有限要素法を同時に用いて、上記の力学モデルによるより現実的な数値解を求めた。比較の結果、解析解と数値解は良好な一致を示し、妥当性を核にすることができた。

(3) 間隙水圧上昇による覆工と地盤の剥離に関する考察

地下水圧上昇にともなうトンネルの安定性あるいは不安定性を解析的に確認した。地下水圧が上昇すると、有効応力が減少する傾向をもち、地盤とトンネル覆工に引張応力が発生する可能性を数値解析により示した。

数値解析では、掘削時の応力解放率や本研究で独自に設定した水圧の解放率（掘削途中と掘削完了時に作用する水圧の比）の値を変え、覆工背面に対して作用する地盤の土圧を調べた。その結果、次の3つのことを明らかにした。1. 有効応力解放率および水圧解放率が大きいほど、つまり掘削時に初期応力及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。2. 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。3. 剥離が発生すると、その部分に大きな曲げが発生するため、覆工に大きな引っ張り応力が生じ、トンネルは不安定な状態になる。そのため、覆工背面での導水機能の保持が重要であると考えられる。

(4) 浸透力の影響を検証する実験

海底トンネル周辺の地盤は常時、海水の浸透による浸透力を物体力として受ける。その浸透力の変化について調べるため、模型地盤に透水性の高い砂と低い砂で作った2次元トンネル模型を設置し、地盤変形時における水圧変化を計測した。そして、測定結果を2次元有限要素法による数値解析結果と比較した。比較の結果、定性的に良好な一致を示した。

(5) 海底トンネルの現状推測と健全性評価

湧水量が変化する場合を網羅的に抽出し、トンネル周辺の間隙水圧の測定値が与えられた場合、どのような状態で湧水量が減少しているか数値解析により調べた。その結果、いずれのケースでも、現在の青函トンネルの健全性は保たれているという結論を得た。

数値解析では、揚水量低下を鑑み、経年とともにトンネル周辺地盤の透水性を低下させるモデルを考えた。透水性低下の要因として、以下に示す3つのケースを想定した。

すなわち、1. 注入域の一部における透水性の低下するケース（覆工に向かって流れ込む海水に含まれる細粒分が注入域の覆工背面側から非注入域側へ向かって目詰まりを起こし、注入域の一部で透水性が低下する）、2. 非注入域の一部における透水性の低下する

ケース（覆工に向かって流れ込む海水に含まれる細粒分が注入域と非注入域の境界から外側に向かって目詰まりを起こし、非注入域の一部で透水性が低下するケース、3. 注入域の全体における透水性の低下するケース（掘削時の止水のため注入された薬液と海水が化学変化を起こした結果、注入域全体で一様に透水性が低下する）である。

解析の結果、以下のことが秋から担った。注入域の一部での透水性が低下するケース1では、透水性の低下に伴い覆工周辺の間隙水圧が上昇することを確認した。しかし透水性低下領域がある程度まで広がると、透水性が低下する領域では、間隙水圧はあまり変化しないことが分かった。また、間隙水圧が増加しているときは、有効応力の減少により塑性領域が広がる。図1はこのケースにおける水圧の変化を表している。横軸は、水平方向におけるトンネルからの離隔を表している。図2は、覆工の応力状態を表している。図1から、経年とともに水圧が上昇している様子が分かる。一方で、図2から応力状態は破線で示される破壊線からは遠く、覆工は健全であることが分かる。

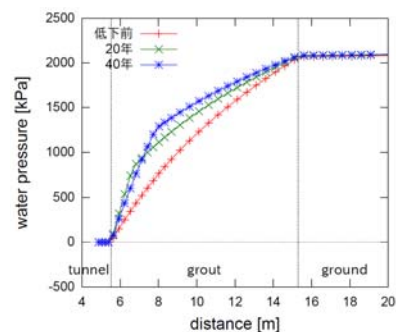


図1 トンネル周辺地盤の水圧変化

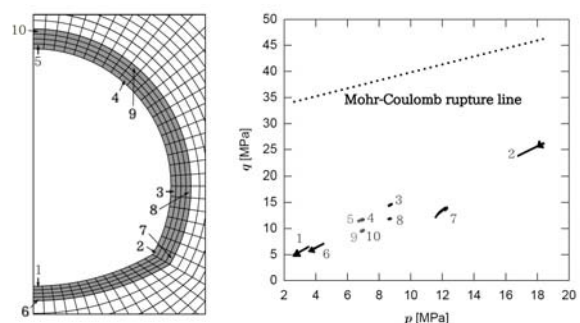


図2 覆工の応力状態

非注入域の一部での透水性低下を想定したケース2では、透水性の低下に伴い、透水性低下領域の外周に大きな間隙水圧が作用し、その結果注入域における間隙水圧が低下することを確認した。また、注入域の間隙水

圧が低下し、有効応力が上昇するため、塑性域にあったものが弾性域に移行するケースもあった。このケースは、注入域が拡大するような現象であり、安全側に作用すると言える。注入域の全体で一様に透水性が低下したモデルを考えるケース3では、注入域全体で透水性が一様に低下すると注入域の間隙水圧は上昇するが、わずかずつであるので、有効応力の変化はほとんどない。

以上3つのケースの数値計算結果より、湧水量の減少によってトンネル覆工に関しては健全性に問題は生じないという結論が得られた。本研究の成果は、時間に依存した周辺地盤の透水性低下を考慮した解析により、海底トンネルの健全性を評価できた点にある。本研究で透水性を低下させたのは1つの考えであり、湧水量減少の原因をすべて考慮できた訳ではない。排水機能の低下などもその原因となりうるであろう。また、覆工や地盤のモデル化、境界条件の設定、強度や剛性といった物性値など検討すべき点は残されている。他にも、トンネルの経時劣化による強度低下なども考慮する必要がある、今後の課題としたい。

海底トンネルが崩壊したという事例はこれまでにない。しかし、これは海底トンネルが安定したトンネルであるということを意味するものではない。実際、特定の状況を想定すれば、きわめて不安定な海底トンネルの状況が再現できる。問題は、現在のトンネルがそのような特定の危険な状況に近づいているのか、あるいは、そうでないのかの判定方法である。この部分について本研究で明らかにした。しかし、海底トンネルが崩壊したとしても、その後に連鎖的に崩壊が継続するのか、あるいは、収束するのかの判定法もさらに重要である。この問題は本研究では直接には扱っていない。しかし、海底トンネルを支保（覆工）と周辺地山からなる複合構造ととらえ、そこに地下水である海水の影響を、力学モデルを通して導入したことの意義は大きいといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 23 件）

- ① 日下敦, 砂金伸治, 真下英人, 角湯克典, 山岳トンネルの地震時挙動に関する計測, 査読無, 2011, pp. 147-151
- ② 三木俊介, 西藤潤, 小林俊一, 三次元剛塑性境界値問題における混合型解法の開発, 土木学会論文集A2 (応用力学) 特集号, 査読有, Vol. 67, 2011, pp. I_241-I_250
- ③ 西藤潤, 丹生和宏, 岸田潔, 深沢成年, 湧水量が低下する海底トンネルの力学

的安全性に関する基礎的研究, 土木学会論文集F1 (トンネル工学) 特集号, 査読有, 2011, pp. I_25-I_32

- ④ 丹生和宏, 西藤潤, 田村武, 海底トンネルの健全性に関する基礎的研究, トンネル工学論文集, 査読有, vol. 19, 2009, pp. 21-28

〔学会発表〕（計 25 件）

- ① 丹生和宏, 西藤潤, 田村武, トンネル周辺の水圧分布の変化を考慮した海底トンネルの健全度評価に関する研究, 土木学会第 64 回年次学術講演会, 2009 年 09 月 2 日, 福岡
- ② 丹生和宏, 西藤潤, 田村武, 海底トンネルの力学的健全性評価に関する基礎的研究, 第 58 回理論応用力学講演会, 2009 年 6 月 10 日, 東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西藤 潤 (SAITO JUN)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40456801

(2) 研究分担者

岸田 潔 (KISHIDA KIYOSHI)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20243066

建山 和由 (TATEYAMA KAZUYOSHI)

立命館大学 理工学部 ・ 教授

研究者番号：10179731

真下 英人 (MASHIMO HIDETO)

独立行政法人土木研究所 ・ 基礎道路技術

研究グループ ・ グループ長

研究者番号：80355875

小林 俊一 (KOBAYASHI SHUNICHI)

金沢大学環境デザイン学系 ・ 准教授

研究者番号：10243065