

シールドトンネルの施工時荷重の照査方法 に関する一提案

吉本正浩¹・阿南健一²・大塚正博³

¹正会員 修 (工) 東京電力 (株) (〒108-0023 東京都港区芝浦4-19-1)

E-mail:yoshimoto.m@tepeco.co.jp

²正会員 博 (工) 東電設計 (株) (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

E-mail:jana@tepsco.co.jp

³フェロー会員 博 (工) 東京電力 (株) (〒170-0013 東京都千代田区内幸町1-1-3)

E-mail: ootsuka.masahiro@tepeco.co.jp

本論文は、シールドトンネルの設計に限界状態設計法を適用するための施工時荷重状態の考え方を示している。既往の施工記録の分析によれば、施工時におけるジャッキ推力とテールシール圧とがセグメントに損傷を与える可能性が高い。このうち、ジャッキ推力の影響はセグメントの組立状態に不陸がない場合とある場合とに分け、不陸がない場合は模型実験結果より照査方法を示した。不陸がある場合は、実工事の不陸の程度と模型実験の損傷性状との比較により設計上の考え方を示した。テールシール圧の影響は、実現場の荷重計測記録より荷重の特性値を算定した。そして、これをもとにした構造計算により、テールシール圧の影響によるセグメントの損傷状態を推定し、この損傷の防止のための設計上の考え方を示した。

Key Words : shield tunnel, limit state design method, the load acting on segments during tunneling, the force of jack driving, brush pressure from tail seal

1. はじめに

現在、土木学会ではシールドトンネルの覆工に限界状態設計法を導入することが検討されている¹⁾。シールドトンネルに作用する荷重には、常時の土水圧以外に地震時の影響や施工時の荷重などがある。この設計に限界状態設計法を適用する主な利点は、トンネルの構造合理化と設計の信頼性向上である。言い換えれば、必要最小限のトンネル構造を設計した上で、そのトンネルは各荷重条件に対しどの程度安全であるのかを明確にできるようになる²⁾。

筆者らは、電力設備建設のコスト縮減ならびに信頼性向上を目的にシールドトンネルの覆工設計に限界状態設計法の適用を検討している。本論文は、シールドトンネルの施工時の荷重状態に着目した検討内容をまとめたものである。

現存するシールド工事用の設計基準類では、施工時の荷重を受けるRCセグメントの品質確認項目は、

表-1 施工時の荷重状態に対する既往の確認内容

| セグメントの品質検査 | | セグメントの設計 |
|--------------|--------------|--------------------|
| ジャッキ推力 試験 | 吊手金具引抜 試験 | ジャッキ推力作用 時の応力照査 |

表-1 に示すものが主なものである³⁾。そして、従来この検査や設計に合格したセグメントを用いていれば致命的となる損傷を受けることは少なかった。この理由は、通常の土水圧に対し許容応力度法で設計したセグメントの構造は、施工時の荷重に対して余裕があったためと推測される。一方、シールドトンネルに限界状態設計法を適用する場合は、通常の土水圧に対するセグメントの構造が、許容応力度法の設計結果と異なる可能性もある。そして、もしも構造が簡素化された場合、いままで問題にならなかった施工時の荷重がセグメントに損傷を与える可能性

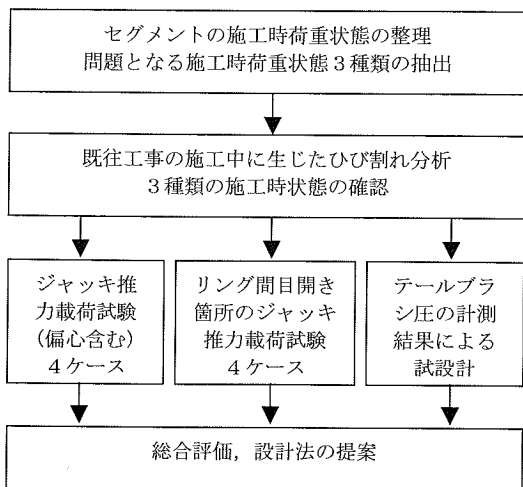


図-1 検討フロー

表-2 セグメントに問題が発生する可能性がある施工時の荷重状態

| | ジャッキ推力 (偏心含む) | リング間目開き箇所のジャッキ推力 | テールシール圧 |
|------|---|---|---|
| 荷重状態 | ジャッキ推力がセグメントに作用する状態、ジャッキに偏心があると偏心による曲げが作用する | 隣接するリングに目開きによる不陸が生じた状態で、セグメントにジャッキ推力が作用する | 曲線部の掘進時などマシンのテールエンドクリアランスが小さい箇所セグメントにテールシール圧が作用する |
| 説明図 | | | |

があるので、本検討を実施することが必要になる。

なお本論文は、RCセグメントより構成される中小規模のシールドトンネルを対象にしている。これは、本論文の内容が、内径 3m~7m 程度の地中送電用のシールドトンネルの工事実績や载荷試験に基づいているためである。本論文の構成を図-1 に示す。

2. 既往工事の施工中に生じた損傷の分析

シールド工事の施工時の状態には、運搬時、組立時、マシン掘進時、裏込め注入時および曲線部施工時などがある。筆者らは、表-2 に示す3種類の施工時の荷重状態がセグメントに損傷を生じさせる可能性の高いものと考えている^{4),5)}。本章では、実際

表-3 施工時の損傷データを分析したシールド工事一覧

| 工事名 | 巨長 (m) | 外径 (mm) | セグメント厚(mm) | 装備推力 (kN) | 計測数 (ring) |
|-----|--------|---------|------------|-----------|------------|
| ① | 1,283 | 4,100 | 200 | 1,500×12本 | 284 |
| ② | 1,738 | 7,270 | 350 | 2,000×24本 | 297 |
| ③ | 965 | 5,000 | 275 | 1,500×16本 | 20 |
| ④ | 2,527 | 5,100 | 275 | 1,500×16本 | 137 |
| 合計 | | | | | 738 |

表-4 各工事件名のひび割れ発生リング数および発生率

| 工事名 | 計測数 (ring) | ひび割れ有 (ring) | ひび割れ発生率 |
|-----|------------|--------------|---------|
| ① | 284 | 175 | 61.6% |
| ② | 297 | 177 | 59.6% |
| ③ | 20 | 17 | 85.0% |
| ④ | 137 | 41 | 29.9% |

の工事において、これらの施工時の荷重状態によりセグメントに損傷が生じているか否かを検証する。

表-3 は、施工時の損傷を分析するシールド工事の実績一覧であり、本論文は、トンネル外径 4,100mm~7,270mm、セグメント厚さ 200mm~350mm のシールド工事のデータをもとにしている。

表-4 は、各工事件名の施工時のひび割れ発生リング数および発生率である。なお、このような施工時のひび割れ調査は、問題のある区間のみで実施されるため相対的に発生率は高くなっている。

(1) ひび割れ発生傾向と施工時荷重状態

図-2 は表-2 に示した3種類の施工時荷重状態からセグメントの主な損傷を想定したものである。以下で、これらの損傷が発生する可能性を分析する。

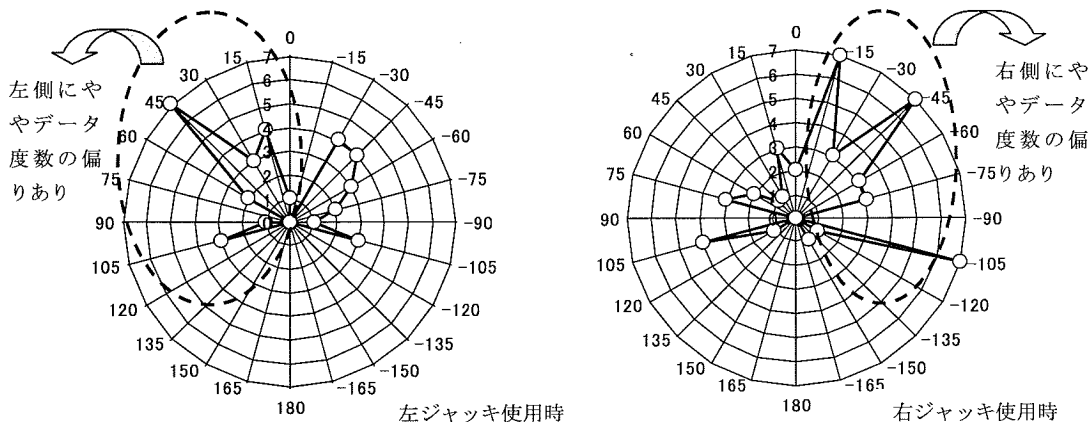


図-3 「目開き箇所」のジャッキ推力による損傷」が想定される施工時荷重状態でのひび割れ度数分布

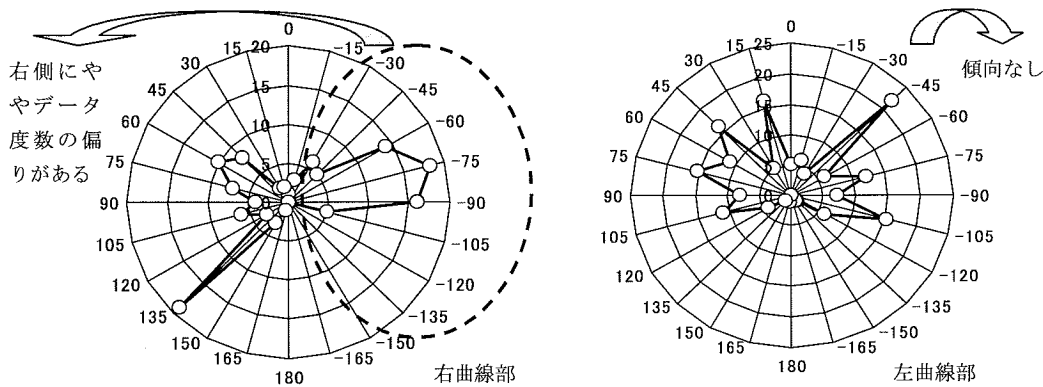


図-4 「テールシール圧」が想定される施工時荷重状態でのひび割れ度数分布

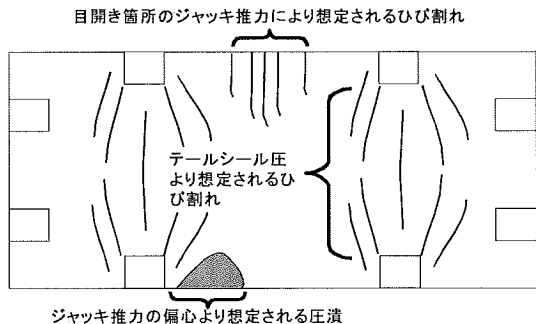


図-2 表-2 に示す3種類の施工時荷重状態から想定されるセグメントの主な損傷

a) ジャッキ推力 (偏心を含む)

偏心を含むジャッキ推力より想定される損傷は、圧壊や欠けであるが、全調査データにはこのような損傷は生じていない。

b) リング間目開き箇所のジャッキ推力

図-3 はジャッキ片押し時のひび割れの傾向である。この図ではトンネル円周方向に15度間隔で、ひび割れの発生度数を整理している。また、半径方

向の目盛りが発生度数となっている。この施工時の荷重状態では、リング間目開き箇所のジャッキ推力による損傷が想定されるが、ジャッキ作用方向と同じ方向のひび割れ発生件数がやや顕著な傾向にある。

c) テールシール圧

図-4 はテールシール圧による損傷が想定される施工条件である曲線部でのひび割れの傾向である。この図では、右曲線部の施工時の場合にはテールエンドクリアランスが小さい方向のひび割れ発生件数がやや顕著な傾向にあることがわかる。

(2) まとめ

既往のシールド工事より得られたひび割れの実績より、「リング間目開き箇所のジャッキ推力」および「テールシール圧」が想定される施工時の状態に、ひび割れが発生する傾向にあることがわかった。したがって、これらの荷重状態を施工時荷重の照査の検討対象にする。また、「ジャッキ推力 (偏心を含む)」は、実績として圧壊等の損傷例はなかったが、最も発生頻度の高い施工時の荷重状態であるため検討対象にする。

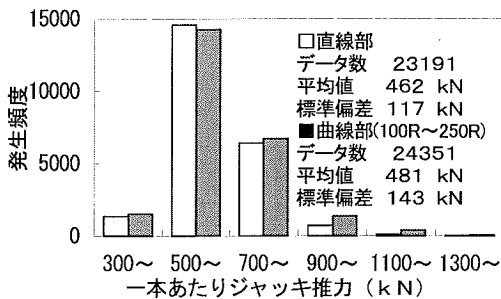


図-5 中口径シールドのジャッキ推力の実績例(表-3①工事)

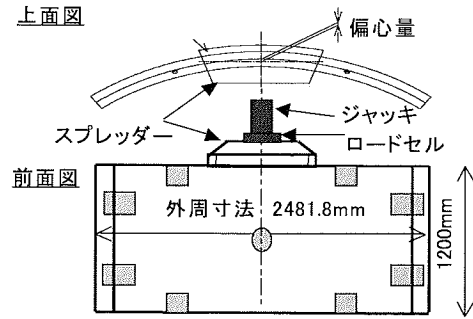


図-6 ジャッキ推力载荷試験の概要図

表-5 ジャッキ推力载荷試験の供試体および試験結果の一覧表

| ケース No. | 1 | 2 | 3 |
|------------|---------|------------------------------|---------------------------------|
| 偏心量 | 45 (mm) | 10 (mm) | 45 (mm) |
| 供試体仕様 | 厚さ | 200 (mm) | |
| | 配筋量 | 主鉄筋 D10×6, 配力鉄筋 D6@300 | |
| 材料試験結果 | 圧縮強度 | 71.2 (N/mm ²) | 69.3 (N/mm ²) |
| | 割裂強度 | 3.46 (N/mm ²) | 3.22 (N/mm ²) |
| | 弾性係数 | 38,000 (N/mm ²) | 42,900 (N/mm ²) |
| ジャッキ推力試験結果 | ひび割れ荷重 | 3,000 (kN) | 2,700 (kN) |
| | ひび割れ箇所 | 内側注入パイプ付近の割裂ひび割れ (No.1~3 共通) | |
| | 圧壊時の荷重 | 4,800 (kN) | ジャッキ容量の 5,000kN で破壊しないので荷重を終了した |
| | 圧壊した箇所 | スプレッダー接触部 (セグメントの内側) | 2,111 (kN) |

3. ジャッキ推力に対する各施工時状態

本章では、ジャッキ推力によりセグメントに生じる応力や変形の状態を実物大のセグメントピースを用いて载荷試験を行い検討する。なお、载荷試験に使用するセグメントの厚さは次の2種類としている。

- ・セグメント厚さ 200mm (二次覆工省略の最小値)
- ・セグメント厚さ 125mm (文献3) の実績最小値)

(1) 施工時のジャッキ推力の大きさ

本章の検討にあたり、実際のシールド工事でのジャッキ推力の大きさの実態を把握する必要がある。

図-5 は表-3①工事での1本あたりのジャッキ推力の実績値を線形毎に示したものである。これらの値は掘進中の総推力を使用ジャッキ本数で除して求めた。この工事の1本あたりの装備推力は 1500kN である。図-5 より平均推力は平面線形に大差がなく 462~481kN 程度である。また、最大推力は直線部 1400kN、曲線部 1430kN であったが、900kN 以上の推力は曲線部の方がやや発生頻度が高いとわかる。

以上より、実際の工事でのジャッキ推力の大きさは、最大推力が装備推力程度、平均推力が装備推力の半分以下と考えて以下の検討を行うことにする。

(2) ジャッキ推力に対する载荷試験

まず、目開きがない状態に、偏心したジャッキ推力が作用する場合のセグメントの損傷を検討する。

a) 試験概要

表-5 は载荷試験の一覧表である。供試体のパラメータはセグメント厚さと偏心量である。偏心量は、一般的な 10mm と径が 3m~7m 程度のシールドマシンのテールクリアランスを考慮した 45mm にした。この 45mm はジャッキ偏心量の最大値と考えている。図-6 は载荷試験の概要図である。载荷に使用するスプレッダーは実際の工事と同形状であり、セグメントの弧の内側へ偏心させている。

b) 試験結果

表-5 には载荷試験結果も併せて示しているが、ジャッキ推力により発生するセグメントの損傷は、偏心の大小に拘わらず、次の2種類であるとわかる。

- ①ジャッキ推力による割裂ひびわれ
- ②スプレッダー接触部のコンクリートの圧壊

なお、中小規模のシールド工事で①②のような損傷が発生する可能性は小さい。これは、この規模での1本あたりのジャッキ装備推力は、通常 1,500kN 以下であり、①②の損傷発生荷重より大きな推力がセグメントに作用する可能性が小さいからである。

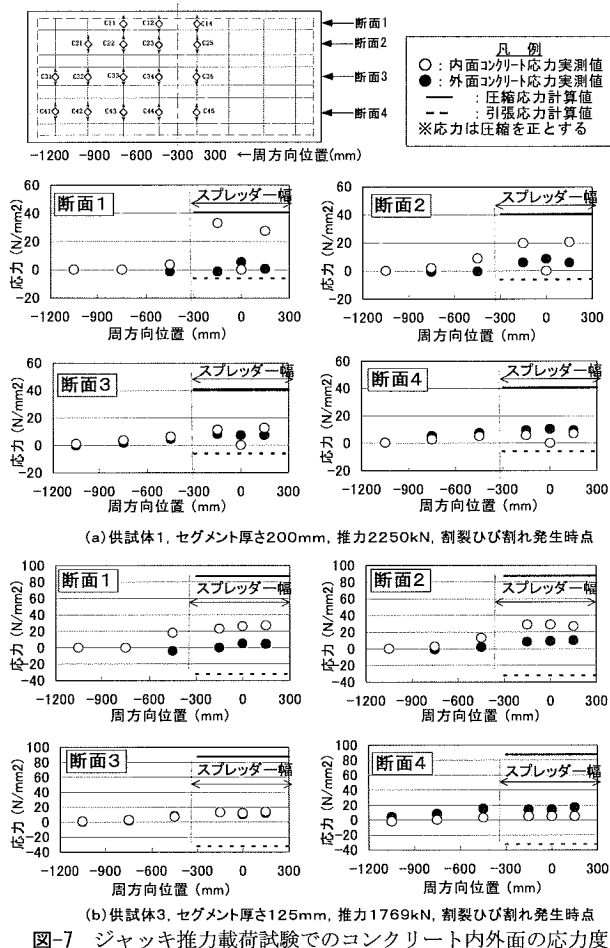


図-7 ジャッキ推力載荷試験でのコンクリート内外面の応力度

c) 限界状態設計法への提案

表-5より, 偏心したジャッキ推力が作用する場合に, セグメントに損傷が発生する可能性は小さいことがわかった. しかし, 圧壊などの損傷は一旦発生すると問題があるので以下に照査方法を検討する.

図-7は, No.1とNo.3供試体の割裂ひび割れ発生時点におけるコンクリート内外面の曲げ応力度である. これより, 偏心曲げの影響は, セグメントが厚い方がより顕著である. また, 支圧および曲げ応力はスプレッダー直下が最も高く, 下方にいくほどセグメントの円周方向へ分散していることがわかる.

ジャッキ推力作用時のコンクリート応力の算定は, 一般にセグメントをスプレッダー幅の矩形の梁にモデル化した式(1)で行われている⁶⁾.

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{P \cdot e}{Z} \quad (1)$$

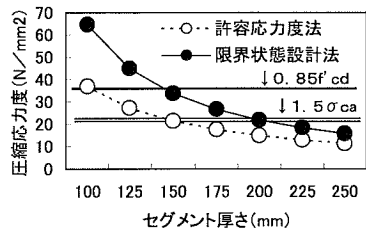
ここに, σ : コンクリート応力, P : ジャッキ推力, A : スプレッダー接面積, e : ジャッキ偏心量, Z : スプレッダー接面積に対する断面係数である.

表-6 ジャッキ推力(偏心含む)の照査方法

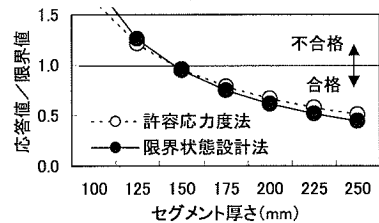
| 設計法 | 応力の算定方法 | 限界値 |
|---------|----------------------|---------------------|
| 限界状態設計法 | ジャッキ偏心量は想定される最大値を用いる | コンクリートの設計基準強度の85% |
| 許容応力度法 | ジャッキ偏心量は10mmとする | コンクリートの許容圧縮応力度の1.5倍 |

表-7 試算の条件

| | 許容応力度法 | 限界状態設計法 |
|------------|---------------------|-----------------------|
| ジャッキ装備推力 | | 1,500kN |
| スプレッダー-接面積 | | 650mm |
| 限界値 | 24N/mm ² | 35.7N/mm ² |
| 偏心量 | 10mm | 30mm |



(a) 応力レベルの比較



(b) 照査結果の比較

図-8 許容応力度法と限界状態設計法との比較

図-7には式(1)より算定した曲げ応力度も示す. 試験結果との比較より, 式(1)は厚さ200mmの応力を断面1で精度よく算定しているが, 厚さ125mmの応力は安全側に算定する傾向にあるとわかる. この理由は, 今回の試験が円弧状のセグメントに対して内側へジャッキを偏心させているため, ジャッキ作用位置での偏心量45mmがスプレッダーの端部では20mm程度になることが一つの要因であると考えられる. 以上より, ジャッキ推力作用時のコンクリート応力の算定に式(1)を用いてよいと考えられる.

表-6は, 式(1)を用いたジャッキ推力(偏心を含む)の照査方法を限界状態設計法として提案したものである. 表-6には比較用に許容応力度法での照査方法も示す. 両者の違いは, 偏心量の設定方法と限界値であるが, 限界状態設計法は偏心量を最大にして最大応力値を求めコンクリートの限界圧縮応力度以下になるように照査する⁷⁾. つまり, 限界状態設計法の照査では, 偏心量が施工条件を考慮して決定すべき重要なパラメータである.

表-8 既往のシールド工事のリング間目開き量の実績値

| リング間継手の種類 | 地盤条件 | 内径 (mm) | 桁高 (mm) | 分割数 | リング間目開き量 (竣工時) | | | |
|-----------|-------|---------|---------|-----|----------------|----------|-----------|-------------------|
| | | | | | データ数 | 平均値 (mm) | 標準偏差 (mm) | データの抽出位置 |
| 鋼製ボックス | 洪積砂粘土 | 4400 | 275 | 6 | 476 | 0.44 | 0.61 | R200部：0, 3, 6, 9時 |
| ワンパス継手1 | 洪積砂 | 3200 | 200 | 6 | 304 | 1.10 | 0.37 | 曲線部：2, 10時 |
| ワンパス継手2 | 洪積砂 | 3100 | 200 | 6 | 326 | 0.50 | 0.67 | R100部：3, 9時 |
| ほぞ継手 | 洪積砂粘土 | 4300 | 250 | 6 | 207 | 1.16 | 0.44 | R280, R300：K周辺 |

表-9 ジャッキ推力载荷試験供試体一覧表

| No. | セグメント厚さ | 主鉄筋量 | 用心鉄筋量 | 配力鉄筋量 |
|-----|----------|-------------|-------|--------------|
| 1 | 125 (mm) | D10×4+D13×2 | D13×2 | D6 @300mm |
| 2 | | D10×4+D13×4 | D13×2 | |
| 3 | 200 (mm) | D10×6 | D10×2 | |

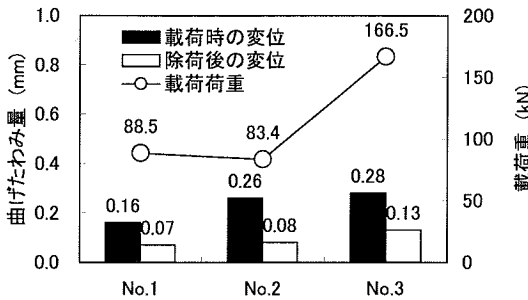


図-10 ひび割れ発生時点の荷重と変位

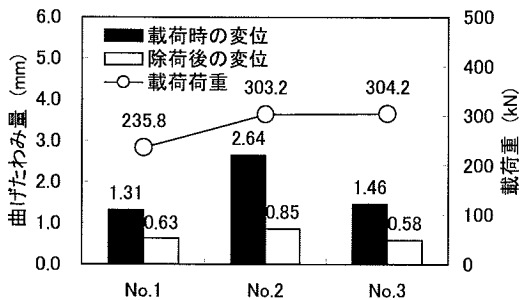


図-11 主鉄筋1本降伏時の荷重と変位

図-8 は、表-7 に示す条件での両者の照査結果の比較である。これより、限界状態設計法で偏心量 30mm 程度を考慮した場合に両者がほぼ同程度の結果になることがわかる。そして、ジャッキ推力試験で用いた 45mm のように 30mm よりも大きな偏心量を設定すると、限界状態設計法では許容応力度設計法よりも厳しい照査結果になるとわかる。

(3) リング間目開きでのジャッキ推力载荷試験

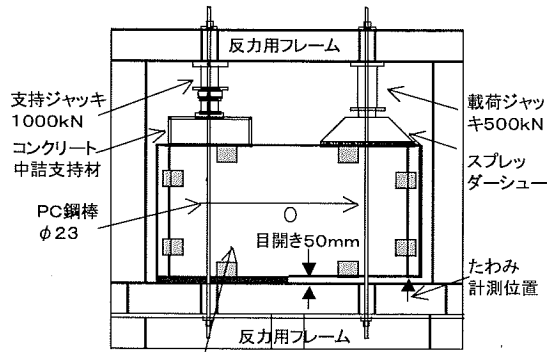
次に、隣接するセグメントに目開きがある条件で、ジャッキ推力により生じる損傷を検討する。

a) リング間目開き量の大きさ

本節の検討にあたり、実際の工事でのリング間目開き量の大きさを考える。表-8 は、既往の工事の竣工検査で計測されたリング間目開き量の実績値である。これらは、最もリング間目開き量が大きいと検定された平面線形区間とセグメントの円周方向位置より抽出したものである。表-8 より、リング間目開き量は曲線部が大きく、その平均値は 0.5mm～1.0mm 程度とわかる。そして、その平均値とばらつきはリング継手の形式によって異なっている。

b) 試験概要

図-9 は载荷試験の概要図である。この試験の目開き量は十分大きな値である 50mm にしている。この理由は、この载荷支持条件では目開きが小さいと



供試体 (RCセグメント、幅1200mm、外周2482mm)

図-9 リング間目開きでのジャッキ推力载荷試験

供試体が一面せん断破壊する可能性があるが、実際のシールド工事では、セグメント相互の干渉によりそのようなせん断破壊はあり得ないためである。

表-9 は供試体の一覧表である。供試体のパラメータは、セグメント厚さと主鉄筋量である。主鉄筋量はセグメント厚 200mm の場合に構造細目の最小値である D10×6 本(引張鉄筋比 0.2%)にしている⁸⁾。

c) 試験結果

この試験では、各供試体共に、まずセグメントにひび割れが発生し、次に主鉄筋が降伏した。

図-10 は、ひび割れ発生時点に着目した各供試体

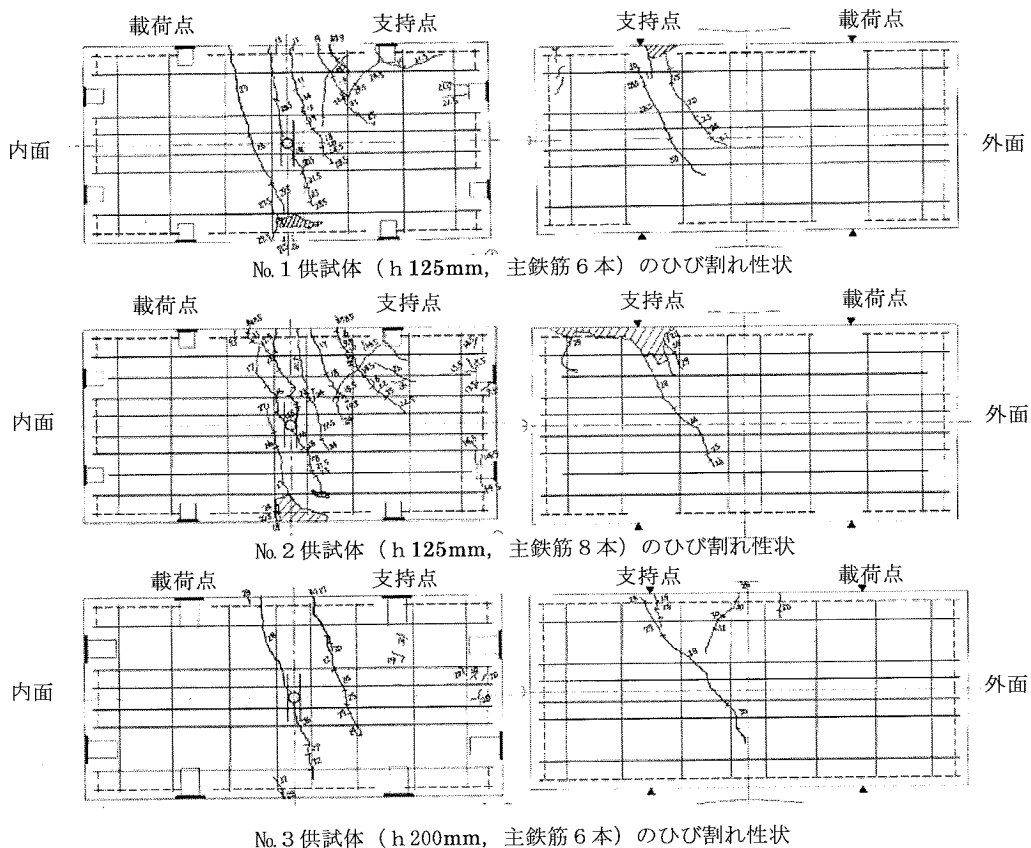


図-13 最終破壊時の各供試体のひび割れ状況図

の荷重と変位である。なお、変位は供試体先端部のものである。これより、ひび割れ発生荷重はセグメント厚さにほぼ比例していることがわかる。一方で、鉄筋は降伏していないにもかかわらず、除荷後の変位は、0.1mm程度は残留していることもわかる。

図-11 は、主鉄筋の1本が降伏した時点に着目した各供試体の荷重と変位である。これより降伏荷重はセグメントが厚いか主鉄筋本数が多いと大きな傾向にあり、降伏変位は主鉄筋本数が多いと大きな傾向にある。つまり、この荷重状態での降伏以降の耐荷変形性状は、セグメント厚さ以外に、主鉄筋本数にも影響を受けていると考えられる。この根拠として、図-12 は荷重荷重を主鉄筋が分担する傾向を調べたものである。図-12(a)はひび割れ発生時点に、(b)は主鉄筋の1本が降伏した時点に着目して整理している。なお、この図での主鉄筋の分担力とは、内外面の主鉄筋が分担する力の平均値であり、引張が正である。これより次の2つの傾向を得る。

- ・ひび割れ発生までの主鉄筋の力の分担は本数によらずコンクリートが全断面有効である

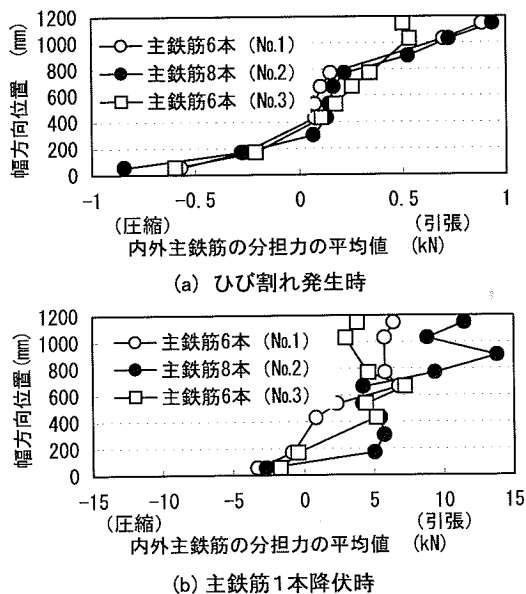


図-12 荷重時の主鉄筋の荷重分担傾向

表-10 既往の平均的な工事実績と今回の試験結果との比較

| 着目点 | | 試験結果 | 実績値 | 比較 | 備考 |
|------------|----|------------------------|-------------|--------------|---|
| ひび割れ発生について | 荷重 | h 200mm : 167 kN | 450kN ※1 | ひび割れ発生の可能性は大 | ※1 : 中小規模のシールド工のジャッキ推力平均(図-5 参照). ※2 : リング間目開き量の実績を考慮(表-8 参照). |
| | | h 125mm : 83~89 kN | | | |
| | 変位 | h 200mm : 0.28 mm | 1.0mm ※2 | 変形の可能性は大 | |
| | | h 125mm : 0.16~0.26 mm | | | |
| 主鉄筋の降伏について | 荷重 | h 200mm : 304 kN | 450kN ※1 | 鉄筋降伏の可能性は大 | |
| | | h 125mm : 256~303 kN | | | |
| | 変位 | h 200mm : 1.46 mm | 1.0mm ※2 | 降伏変形する可能性は小 | |
| | | h 125mm : 1.31~2.64 mm | | | |

・ひび割れ発生後は主鉄筋本数で力の分担が異なり本数が多い方が大きな力を分担する

図-13 は最終破壊時の各供試体のひび割れ状況図である。主鉄筋本数が多いNo.2 は最もひび割れが分散していることがわかる。また、同じ主鉄筋本数であるNo.1 とNo.3 では、鉄筋量が小さいNo.3 供試体の方がひび割れは分散せずに集中している。一方、図-14 は主鉄筋の1本が降伏した時点に着目した各供試体の最大ひび割れ幅である。No.2 が最もひび割れ幅が小さく、No.3 のひび割れ幅が大きい。この傾向は除荷後も同じである。これらの傾向より、主鉄筋本数や鉄筋量の大小は、ひび割れの分散の程度や最大ひび割れ幅の大小に影響することがわかる。

なお、図-13 のひび割れ性状より、セグメントの内外面でひび割れ方向が逆転しているため供試体にはねじれがみられ、このねじれによりひび割れが内面に集中していることがわかる。つまり、今回の載荷試験では、供試体がねじれていることになるが、これは円弧型のセグメントを片持ち梁として載荷したためである。しかし、実際のシールドトンネル工事では、セグメントはリングに閉合された状態でジャッキ推力を受けるため、今回の試験のようなねじれは生じにくいと考えられる。

d) セグメント設計上の留意点の考察

設計上の留意点を考える上で、今回の試験結果にはねじれが生じているため変形量が実際のシールド工事よりも大きくなる傾向にあると考えられる。この前提でセグメントの設計上の留意点を考察する。

まず、セグメント厚さについては、厚さが異なるNo.1 とNo.3 の試験結果を比較することで、次の傾向があることがわかる。

- ①セグメントが厚い方がひび割れ荷重および主鉄筋の降伏荷重は高くなる
- ②セグメントが厚く鉄筋量が小さい方がひび割れが分散せずに集中しひび割れ幅が大きくなる

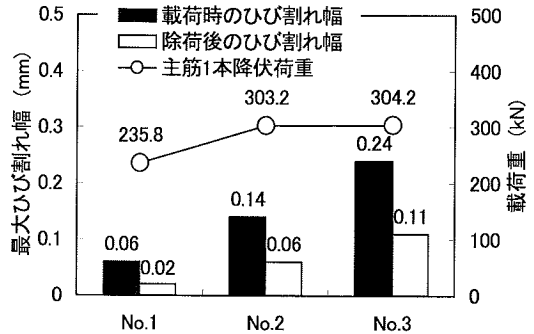


図-14 主鉄筋1本降伏時の最大ひび割れ幅

次に、主鉄筋の本数については、鉄筋本数が異なるNo.1 とNo.2 との試験結果を比較することで次の傾向があることがわかる。

- ①鉄筋本数は、ひび割れの発生荷重には影響しない
- ②鉄筋本数が多いと主鉄筋の降伏荷重および変位は大きくなる
- ③鉄筋本数が多いとひび割れが分散する

e) 施工上の留意点の考察

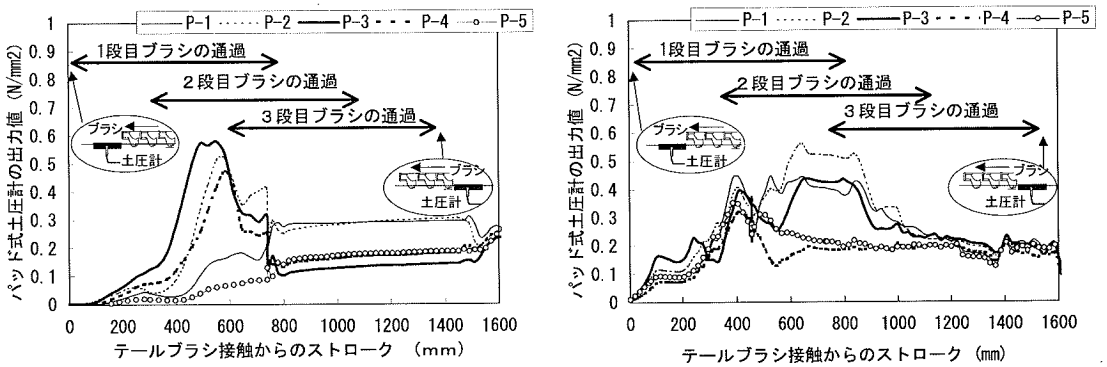
今回得られた試験結果を既往の工事実績と比較することで、セグメントの損傷を防ぐための施工上の留意点を考察する。

表-10 はリング間目開き箇所にジャッキ推力が作用する状態での既往工事実績と今回の試験結果との比較である。中小規模のシールド工のジャッキ推力 450kN と試験結果の荷重とを比較すると、セグメント厚さに関わりなく、ひび割れおよび鉄筋降伏ともに十分発生する荷重環境にある。一方、リング目開きの実績の平均値を 1mm と仮定して、これと試験結果の変位とを比較すると、セグメント厚さに関わりなく、ひび割れは生じやすいが、鉄筋は降伏しにくい変形環境にあることがわかる。

以上より、この施工時荷重状態では、ひび割れは生じやすいが、鉄筋は降伏しにくい施工環境である。そして、ひび割れの発生頻度はセグメント組立て精度に大きく影響を受けると考えられる。

表-11 テールシール圧の現場計測の概要

| 地盤条件 | 沖積粘性土（軟らかい粘性土） | 洪積粘性土（硬い粘性土） |
|------|---|--|
| 諸条件 | トンネル恒長： 1, 862 m, トンネル外径： 3. 95 m, セグメント厚さ： 275 mm, 計測深度（土被り）： 21. 6 m, 計測位置の線形条件： 曲線区間の終点付近 テールブラシ： 3段 テールグリス： 6箇所×2段（テールブラシ間充填） | トンネル恒長： 2, 528 m, トンネル外径： 4. 95 m, セグメント厚さ： 275 mm, 計測深度（土被り）： 12. 6 m, 計測位置の線形条件： 直線（蛇行あり） テールブラシ： 3段 テールグリス： 5箇所×2段（テールブラシ間充填） |
| 計測図 | <p>パッド式土圧計配置図</p> | <p>パッド式土圧計配置図</p> |



(a) 沖積粘性土

(b) 洪積粘性土

図-15 テール通過時における作用圧力の経距離変化

4. テールシール圧による施工時状態

(1) テールシール圧の現場計測実績

a) 計測概要

テールシール圧は、2つの現場にて計測した実績がある⁹⁾。表-11は、現場計測を行った2現場の概要である。なお、テールシール圧は曲線部の施工時に大きくなると考えられるが、この計測は長期の土水圧の計測が本来の目的であったため、直線部に近い平面線形条件下で計測している。

荷重を計測するパッド式土圧計の受圧面寸法は、トンネル軸方向 600mm×円周方向 350mmである。また、各マシンのテールブラシは3段であり、ブラシ間にはテールグリスが充填されている。

b) 現場計測結果

図-15は、計測断面をマシンテール部が通過する時の作用圧力の経時変化である。これより作用

圧力は、テールシール接触により増加し、3段あるテールシールのうちの2段が土圧計に載っている状態ではほぼ最大値となっている。また、この作用圧力の分布形状は、円周方向の計測位置により異なっているが、この偏った圧力はテールシール離脱後には等方的になっていることがわかる。

これらの結果を参考に、このテールシール接触から離脱までに計測された作用圧力をテールシール圧と定義する。

(2) テールシール圧による施工時状態の検討

前節より、テールシール圧は偏った作用圧力となることがわかった。一方、現場計測を実施した計測断面付近のセグメントにはテールシール圧によるセグメントの損傷はみられなかった。これは計測断面のセグメント厚さが 275mmと比較的厚かったため損傷に対して十分安全であったためと考えられる。

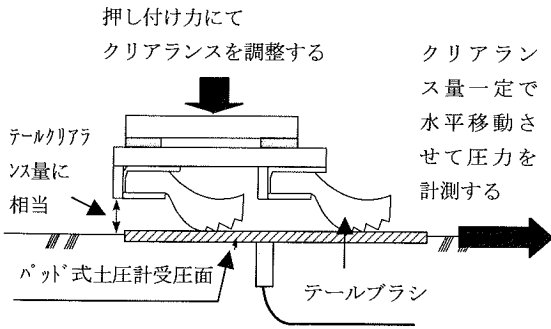


図-16 テールブラシの要素試験

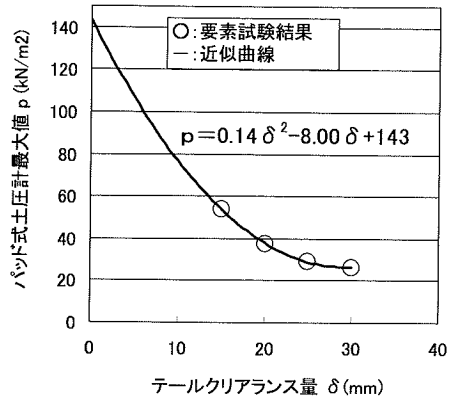


図-17 クリアランスとブラシ圧の関係

表-12(a) 沖積粘性土の現場のテールシール圧の特性値

| 土圧計 No. | 位置※ (度) | グリス圧 (kN/m ²) | クリアランス量 (mm) | ブラシ圧 (kN/m ²) | 特性値 (kN/m ²) |
|---------|---------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|
| P-1 | 125.5 | 129.0 | 47.3 | 26.7 | 155.7 |
| P-2 | 193.0 | 462.0 | 7.3 | 92.2 | 554.2 |
| P-3 | 260.5 | 548.0 | 0.0 | 143.1 | 691.1 |
| P-4 | 328.0 | 388.0 | 22.3 | 33.1 | 421.1 |
| P-5 | 33.5 | 41.0 | 52.7 | 26.7 | 67.7 |

※天端を0度とし、右周りを正としたときの角度

表-12(b) 洪積粘性土の現場のテールシール圧の特性値

| 土圧計 No. | 位置※ (度) | グリス圧 (kN/m ²) | クリアランス量 (mm) | ブラシ圧 (kN/m ²) | 特性値 (kN/m ²) |
|---------|---------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|
| P-1 | 54.5 | 419.0 | 21.6 | 34.3 | 453.3 |
| P-2 | 122.0 | 531.0 | 0.0 | 143.1 | 674.1 |
| P-3 | 189.5 | 403.0 | 14.6 | 55.5 | 458.5 |
| P-4 | 257.0 | 153.0 | 48.3 | 26.7 | 179.7 |
| P-5 | 324.5 | 198.0 | 58.7 | 26.7 | 224.7 |

※天端を0度とし、右周りを正としたときの角度

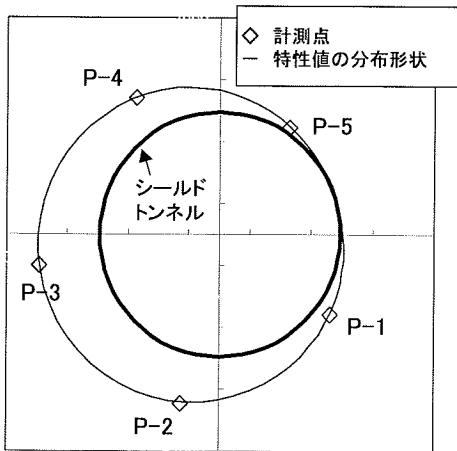


図-18(a) 沖積粘性土の現場のテールシール圧の特性値の形状

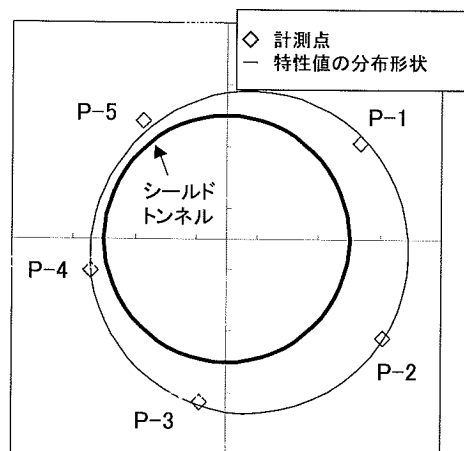


図-18(b) 洪積粘性土の現場のテールシール圧の特性値の形状

本節では、2箇所の現場計測より得られたテールシール圧を用いてセグメントを試設計し、セグメントに生じる可能性がある損傷について検討する。

a) テールシール圧の特性値

試算に用いるテールシール圧の特性値は、セグメントに作用する条件が最も厳しい状態を想定して設定する。ここで、計測断面の平面線形は直線であるため、特性値はテールシール位置のクリアランス量を0mmに仮定して計測結果を補正する必要がある。この補正にあたり、筆者らはテールシール圧をブラシ圧とグリス圧との和と仮定する。なお、ブラシ圧

とはテールブラシの押し付け圧力であり、グリス圧とはテールグリスの圧力である。

まず、ブラシ圧を設定するため、図-16に示す要素試験を行っている。この要素試験には、現場と同種のパッド式土圧計およびテールブラシを用いている。図-17はこの試験結果であり、ブラシ圧の最大値は、クリアランス量0mmのときのブラシ圧を曲線近似して求める。

次に、グリス圧は現場で計測されたクリアランス量よりブラシ圧を推定し、これをテールシール圧の計測結果より減じて求める。

表-13 テールシール圧の構造解析条件表

| 地盤条件 | | 沖積粘性土 | 洪積粘性土 |
|---------------------------|-----|---------|---------|
| トンネル外径(mm) | | 3,650 | 4,650 |
| セグメント幅(mm) | | 1,200 | 1,200 |
| セグメント厚さ(mm) | | 125 | 125 |
| テールシール幅(mm) | | 772 | 825 |
| 鉄筋量 | | D13×8 | D13×8 |
| セグメント分割数 | | 6 | 6 |
| 回転ばね定数 (kN・m/rad/ring) | 正曲げ | 4,050 | 4,050 |
| | 負曲げ | 788 | 788 |
| せん断ばね定数(kN/m) | | 100,000 | 100,000 |

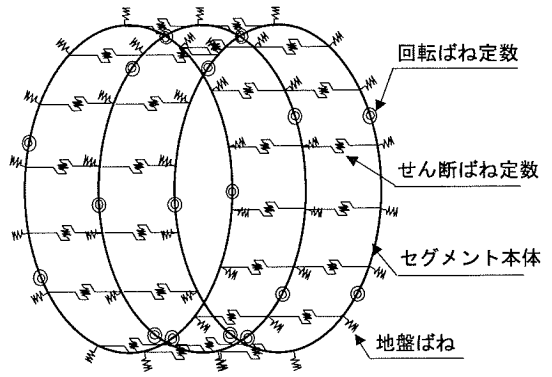


図-19 はりばねモデルの説明図(3リング千鳥)

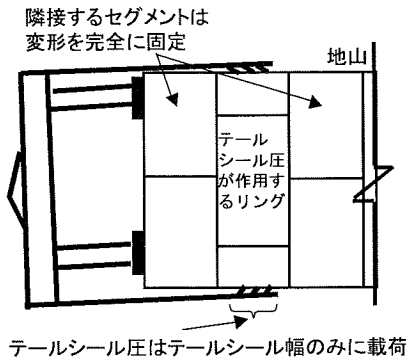
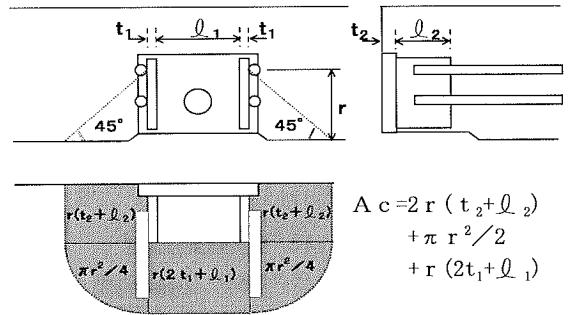


図-20 トンネル軸方向の境界条件の説明図



$$A_c = 2r(t_2 + l_2) + \pi r^2 / 2 + r(2t_1 + l_1)$$

図-21 1継手あたりの破壊面の投影面積

表-14 試設計の照査項目および限界値

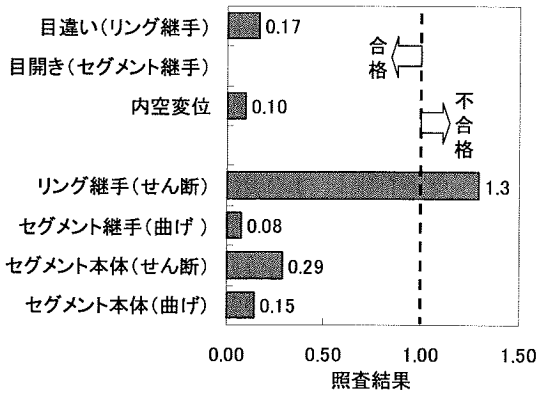
| 構造性能 | 部位 | 照査項目 | 限界値 |
|------|----------|------------|--|
| 耐荷性能 | 主断面 | 曲げモーメント・軸力 | 降伏断面耐力 |
| | | せん断力 | 常時せん断耐力 (0.7Vcd) |
| | セグメント継手部 | 曲げモーメント・軸力 | 降伏断面耐力 |
| 変形性能 | リング継手部 | せん断力 | 常時せん断耐力 (リング継手部のコンクリートのせん断耐力 $Q_{uc} \times 0.7$) |
| | 覆工体 | リング変形量 | 許容変形量 (D/150) |
| | | 継手部 | 目開き |
| | | 目違い | 許容目違い量 (3mm) |

テールシール圧の特性値は、これらのグリス圧とブラシ圧との和が最大になるように重ね合わせる。こうして算定した各計測現場のテールシール圧の特性値を表-12 と図-18 に示す。これらよりブラシ圧とグリス圧は共に偏圧であり、テールシール圧の約 8 割がグリス圧になる。このテールシール圧が偏圧になる現象は文献 10)にも報告がある。また、グリス圧が偏圧になる現象の説明は、文献 11)が参考になるが、グリスは流体ではあるが粘性があるため、液体のように瞬時に移動ができないので、マシンテール部で偏圧が生じるものと考えられる。

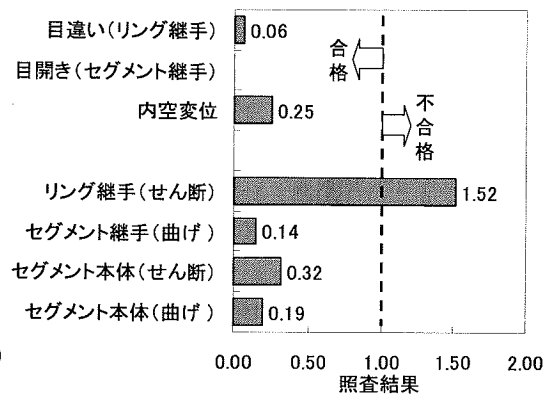
b) 試設計条件

構造解析は図-19 に示すシールドトンネルを横断方向にモデル化したはりばねモデル計算法を用いる。解析条件を表-13 に、モデルの境界条件を図-20 に示す。試設計の前提条件を次に示す。

- ・トンネル径は各計測現場の条件に合わせる
- ・テールシール圧はセグメント幅に対するテールシール幅を考慮した線荷重を中央リングに作用させる
- ・テールシール圧が作用するリングに隣接するリングの境界条件は完全固定とする

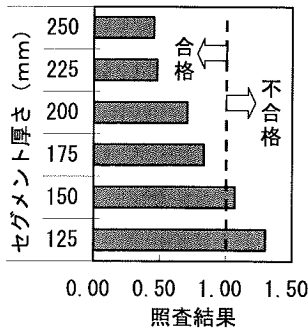


(a) 沖積粘性土ケースの照査結果

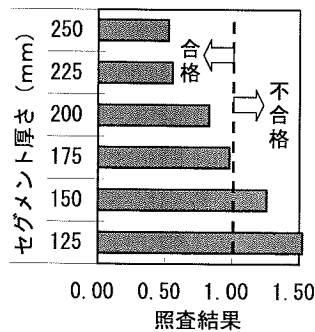


(b) 洪積粘性土ケースの照査結果

図-22 テールシール圧の特性値を用いたセグメント試設計の照査結果



(a) 沖積粘性土ケースの照査結果



(b) 洪積粘性土ケースの照査結果

図-23 各セグメント厚さを変えたリング継手せん断耐力の照査結果

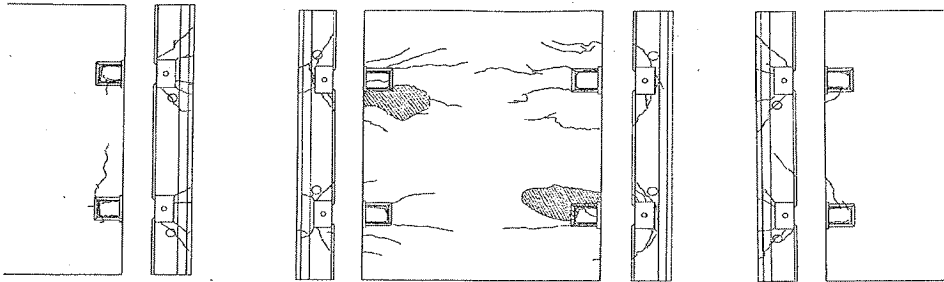


図-24 継手せん断試験でのリング継手のせん断破壊時の損傷状況(鋼製ボックス継手)

- ・セグメントは実績の最小厚さ 125mm にする
- ・継手ボルト M22 の鋼製ボックスタイプ継手にする
- ・鉄筋量は引張鉄筋比 1% を目安に配筋する
- ・回転ばね定数の算定は村上小泉の式に従う¹²⁾
- ・せん断ばね定数はジャッキ推力の影響があると仮定し 100MN/m の定数にする

c) 照査項目と限界値

表-14 は、試設計の照査項目および限界値である。これらの限界値は、施工時のセグメントの損傷を降伏耐力以内に止めるという前提で定めている。なお、

これらの限界値の算定方法は、文献 1) に従っている。ただし、リング継手部のコンクリートのせん断耐力は、次に示す式(2)にて算定している。

$$Q_{uc} = \sigma_{tk} \cdot A_c \quad (2)$$

ここに、 Q_{uc} ：継手部のコンクリートせん断耐力、 σ_{tk} ：コンクリートの引張強度、 A_c ：図-21 に示す 1 継手あたりの破壊面の投影面積である。

d) 試設計結果および考察

図-22 は試設計の照査結果であり、グラフ横軸の照査結果が 1.0 を超えると照査は不合格である。

図-22 より、沖積粘性土および洪積粘性土の両ケース共にリング継手の常時せん断耐力の照査が不合格になっており、この破壊モードに関する損傷が先行することが予想できる。

一方、図-23 はセグメント厚さと継手の構造諸元を変化させて、リング継手の常時せん断力が照査に合格するセグメント厚さを試算した結果である。

図-23 より沖積粘性土および洪積粘性土の両ケースとも、セグメント厚さが 175mm 程度以上あれば、リング継手せん断力の照査に合格するとわかる。

図-24 は、鋼製ボックス継手を用いた継手せん断試験においてリング継手がせん断破壊した時のスケッチ図である。これより、テールシール圧により、リング継手部に生じる損傷は、継手周りを始点にしたトンネル軸方向へのひび割れと予想できる。

(4) まとめ

本章では、2つの現場計測結果よりテールシール圧の特性値を作成し、鋼製ボックス継手を用いたセグメントにどのような損傷が生じる可能性があるかを検討した。この結果、中小規模のシールド工事について、次のことがわかった。

- ①テールシール圧により発生する損傷は、リング継手周りのせん断破壊に関連するひび割れになる可能性が高い
- ②現場計測と類似な施工条件の場合、セグメント厚さ 175mm 以上でテールシール圧の照査に合格する

つまり、今回の現場計測よりも大きなテールシール圧が発生すると予想される施工条件の場合やセグメント厚さを 175mm 程度以下とする場合には、設計時点でのテールシール圧の照査が必要になると考えられる。この具体的な照査方法として本稿に示した方法を提案するが、更なる一般化が必要である。一般化にあたっての課題を以下に示す。

- ①今回の試設計でのテールシール圧は、ブラシ圧とグリス圧との和と仮定したが、施工条件毎に異なるグリスの給脂方法やテールブラシの種類を考慮した定量的な設定方法を定める必要がある。
- ②今回の検討では、せん断力（本体、リング継手）を安全側に評価するために境界条件を厳しく設定した。簡易なモデルとしてはこれでもよいが、トンネル軸方向の3次元状態のモデル化など精度の高い構造解析方法を検討する必要がある。

5. 結 論

本論文では、中小規模のシールドトンネルを対象に施工時の荷重状態を検討し、以下の結論を得た。

- ①施工時の荷重状態のうちジャッキ推力とテールシール圧は、セグメント厚さが薄くなるとセグメントに損傷を与える可能性が高い。
- ②隣接セグメントに目開きがない場合のジャッキ推力（偏心あり）の影響は式(1)にて安全側に照査できる。
- ③目開きがある場合のジャッキ推力によるセグメントの損傷は、ひび割れ発生に関してはセグメント厚さが、ひび割れの本数や幅には主鉄筋本数や鉄筋量が影響する。また、鉄筋の降伏に関してはセグメント厚さと主鉄筋本数とが影響する。そして、これらの損傷の発生頻度はセグメント組立精度の影響を受ける。
- ④鋼製ボックス継手を用いたセグメントに過大なテールシール圧が作用する場合の損傷は、リング間せん断力の発生に伴うひび割れになる可能性が高い。

6. おわりに

近年、比較的荷重状態が明確な土木構造物を対象とした設計に限界状態設計法を適用する事例が増えてきた。しかし、シールドトンネルは、施工時から供用時までの荷重が連続して作用する構造物であり、施工時の荷重状態には、未だ解明できていない部分が多い。したがって、筆者らはシールドトンネルの設計に限界状態設計法を適用するための最も重要かつ難解な課題として、施工時の荷重状態に対する構造物の安全性をどのように担保すべきかと考え、本論文のような検討を行った。

本論文の検討内容では、あらゆる施工時の荷重状態に対して明確な設計方法を提案するまでには至っていない。この主な理由は、施工時の荷重状態とはシールドの施工技術そのものであり、施工時の損傷は施工管理の方法に大きく左右されるためである。しかしながら、筆者らは、本論文を契機に今後も施工時の計測記録を収集し、より信頼性の高い施工時荷重の照査方法を指向する所存である。

施工時の荷重状態を明らかにすることで、今後の我が国のシールドトンネルが、より高品質かつ経済的に建設されることを念願する次第である。

謝辞：本論文の検討にあたり、多大な御指導と御助言を頂いた東京都立大学 山本稔名誉教授、早稲田大学 小泉淳教授、(財)地域地盤環境研究所 小山幸則所長をはじめとする建設会社やコンサルタントの方々に、末筆ながら誌面を借りて心から謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) (社)土木学会：トンネルへの限界状態設計法の適用，トンネルライブラリー，第11号，pp. 1-2, 2001.5.
- 2) 吉本正浩：地中送電用立坑ならびに開削トンネルの性能照査型設計法，電力土木，No.303，pp. 12-21, 2003.1.
- 3) (社)土木学会，(社)日本下水道協会：シールド工用標準セグメント，pp. 29-30, 2001.7.
- 4) 大塚正博，山崎剛，高瀬正司：地中送電用シールドトンネルにみる深部地下施工の課題と対策，地下空間シンポジウム論文・報告集，第8巻，2003.1.
- 5) 小山幸則，小西真治，P. S. Jovanovic，橋本正：シールドトンネルに施工時荷重が及ぼす影響，トンネルと地下，第33巻8号，pp. 35-43, 2002.8.
- 6) (社)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. 65-66, 1994.6.
- 7) (社)土木学会：開削トンネルの耐震設計，トンネルライブラリー，第9号，pp. 128, 1998.10.
- 8) 大野弘城，秋葉芳明：RCセグメントの鉄筋量低減に関する研究，第56回土木学会年次学術講演会，VI-030, 2001.10.
- 9) 有泉毅，岡留孝一，五十嵐寛昌，長屋淳一：シールド洞道に働く施工時荷重に関する分析，トンネル工学研究・論文集，第9巻，pp. 271-276, 1999.11.
- 10) 小嶋清伍，橋本正，長屋淳一：地下河川トンネルにおける覆工作用土圧の現場計測，トンネル工学研究論文・報告集，第12巻，pp. 501-506, 2002.11.
- 11) 中村益美，松浦將行，沢里能雄：大深度シールドトンネルの施工時荷重とその対策，トンネルと地下，第34巻1号，pp. 35-41, 2003.1.
- 12) 村上博智，小泉淳：シールド工用セグメント継手の挙動について，土木学会論文報告集，第296号，pp. 73-86, 1980.4.

(2003. 6. 13 受付)

THE CHECK METHOD OF THE LOAD ACTING ON SEGMENTS DURING TUNNELING

Masahiro YOSHIMOTO, Kenichi ANAN and Masahiro OOTSUKA

This paper shows check methods of the load acting on segments during tunneling to apply limit state design method to shield tunnels. According to construction records, it has turned out that a possibility that force of jack driving and brush pressure from tail seal will damage segment is high.

So this paper shows the check methods of segments against force of jack driving by the result of model experiments and real construction data. On the other hand, this paper defines the brush pressure from tail seal by load measurement records of real spots. The damages are estimated by calculation of segments against this brush pressure, and we've gotten the view of preventing from those damages.