

# オランダのシールドトンネル工事におけるリスク低減のための計測結果の利用と契約形態

シールドトンネル，現場計測，軟弱地盤

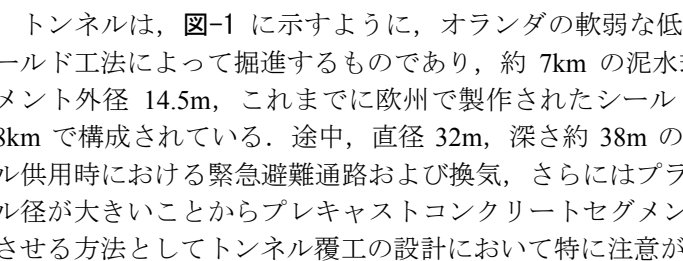
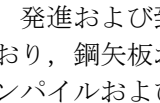
地域 地盤 環境 研究所 国際会員 橋本 正  
地域 地盤 環境 研究所 国際会員 ○田中 誠  
地域 地盤 環境 研究所 正会員 譽田孝宏  
GeoDelft H. Brinkman  
Holland Railconsult P. S. Jovanovic

## 1. はじめに

現在オランダでは、高速鉄道 HSL (High Speed Line) やアムステルダム地下鉄南北線をはじめとする多くのトンネルが建設されている。ここでは、HSL の代表的なシールドトンネルであるグリーンハート (Groene Hart) トンネルを例に挙げ、新技術を利用するための発注方式や設計施工一括契約方式を紹介し、受発注者間でどのようにリスクを分配しているのかについて述べる。また、調査および計測の結果が、どのように実施工で反映されているのか、建設リスクの低減に対してどのように活用されているのかについて説明する。

## 2. Groene Hart トンネルの概要

Groene Hart トンネルは、アムステルダムとパリとを結ぶ HSL の路線にあるシールドトンネルである。この路線には、最高速度 300km/h の高速列車が運転される予定である。

トンネルは、に示すように、オランダの軟弱な低地、いわゆる「グリーンハート」の下を泥水式シールド工法によって掘進するものであり、約 7km の泥水式シールドトンネル部(シールド外径 14.9m, セグメント外径 14.5m, これまでに欧州で製作されたシールドマシンでは最大径, 参照)を含む全長約 8km で構成されている。途中、直径 32m, 深さ約 38m の立坑が 3 本設置されているが、これらは、トンネル供用時における緊急避難通路および換気、さらにはプラントの設定場所に利用される予定である。トンネル径が大きいことからプレキャストコンクリートセグメントの厚さを 0.6m としているなど、リスクを低減させる方法としてトンネル覆工の設計において特に注意が払われた。

発進および到達立坑部(アプローチ部)は、長さ 540m の掘削区間と 200m のボックス区間から構成されており、鋼矢板および 1 段目切梁と水中コンクリート床版を支保工とし、PC パイルを揚圧力対応のテンションパイルおよび基礎杭として活用する水中掘削工法を用いて建設された。

Groene Hart トンネルの周辺地盤は、地表面に地下水位が達している特徴を有しており、上部には緩い砂層の上に、層厚 10~15m のPEAT 層(密度 1100~1300kg/m<sup>3</sup>)および完新世の海成粘土であるヴェストラント (Westland) 層が堆積している。これらの土層は、これまでの種々の建設工事において、トラブルに見舞われやすい土層として認識されている。下部には、GL-25~30m の位置にトヴェンテ (Twente) 層およびウルク (Urk) 層がある。これらの土層は、相対密度 10~60% の細砂層から構成されており、攪乱に伴って流動化しやすいことから、地盤沈下を引き起こしやすい土層であると言える。

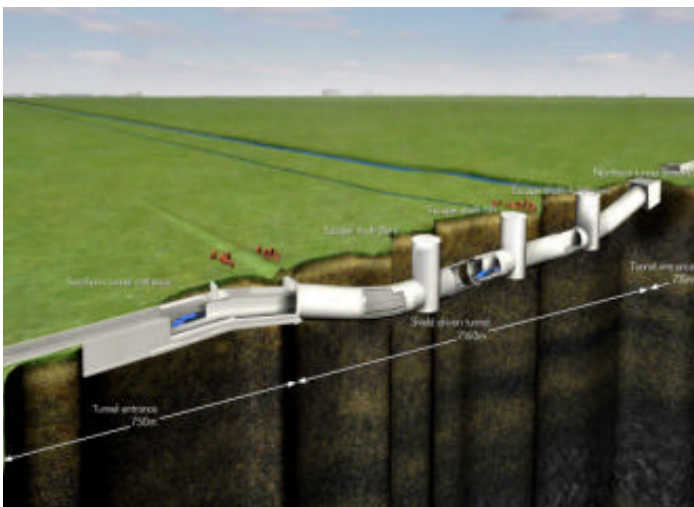


図-1 Groene Hart トンネル概念



写真-1 シールドマシンの全景

Effective usage of site investigation and measurement techniques and introduction of novel technologies in the Netherlands : Tadashi HASHIMOTO, Makoto TANAKA & Takahiro KONDA (Geo-Research Institute), H. Brinkman (GeoDelft), P. S. Jovanovic (Holland Railconsult)

HSL プロジェクトは、国家と民間企業の共同で進められ、1991 年以来、主要なインフラプロジェクトについて法令に基づく手続きを終えた。1997 年 4 月末にオランダ国会の第一院によって高速鉄道計画が承認されたことを受け、ルートの詳細な選定が開始された。ルート選定に関しては、地元住民、関係する地方や州および国の当局ならびに政府機関によって綿密に協議された。また、運輸大臣がルート決定を受諾する一方で、州議会によるヒアリング活動がおこなわれた。地元住民、企業、機関および社会は、ある期間中に異議を申し立て、それを公式に提出することが可能であったが、1999 年 8 月に州議会が州の意思を決定した時点で、トンネル建設開始のための公的障害はなくなり、ルート選定は最終的に確定した。

### 3. 発注・契約方式

#### (a) 概要

Groene Hart トンネル工事の発注者は、オランダの運輸・水利管理省 (Ministry of Transport and Water Management) の高速鉄道南線プロジェクト機構 (Project Organization High Speed Line South) である。契約手続きは 1998 年 9 月に始まったが、契約情報、経過の記録および一般仕様書といった従来の公告はなく、略式・公開のシンポジウムに国内外の建設業者が出席して、率直な討論がおこなわれることによって進められた。これは、多額の費用を要するシールドトンネルを施工する上での最適解を市場に求めるためであった。

入札前の 1999 年 6 月に開始された第 2 回の交渉を経て、1999 年 11 月 1 日にオランダ国内の企業連合が本工事を落札し、設計施工一括方式の契約に調印した。発注者～受注者間で、技術的問題、リスク、費用および工期に関する真剣な説明と技術的議論が完全公開の上で交わされ、企業連合が発注者と「提携」した結果、中央隔壁を有する革新的な複線単円シールドトンネルが採用され、受発注者ともに大きな利点を得た。

#### (b) 発注体制

高速鉄道南線プロジェクト機構は、100km におよぶ高速鉄道の建設作業の成功を保証する責任を負っている。そこでは、運輸・水利管理省および住宅・国土計画・環境省 (Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment) の責任のもと、オランダ鉄道施設管理機関 (NS-RIB, Dutch Railways Rail Infrastructure Management) および民間コンサルタント 2 社が共同で業務をおこなっている。このうち、高速鉄道南線プロジェクト機構の Groene Hart トンネルシールド掘進プロジェクト室は、次の業務をおこなっている。

- ・プロジェクトの設計および建設、包括的な技術的装置の準備および誘導
- ・業務遂行のために必要な諸条件(土地の購入、地下ケーブルや埋設管、許可など)の確立
- ・地元住民およびトンネルの設計および建設に関わる当局とのコミュニケーション活動
- ・完成後 5～10 年までの期間における(追加の)維持管理計画の準備

契約は次のプロセスを経て締結された。

- |             |           |
|-------------|-----------|
| 1. 入札資格段階   | 6. 条件提示   |
| 2. 協議への招致   | 7. 評価段階   |
| 3. 協議段階     | 8. 交渉への招致 |
| 4. 条件提示への招致 | 9. 交渉段階   |
| 5. 条件提示段階   | 10. 落札    |

#### (c) 設計施工一括契約の基礎

設計施工一括契約に関する思想の主な論点は、受発注者間におけるリスクの分配にある。オランダの大規模トンネルプロジェクトに対して初めて設計施工一括契約方式を適用しようという着想は、価格相応性に立脚した透明性に基づいている。これは、図-2 に示すように、プロジェクト期間中に発生した全ての設計変更に対する発注者の責任が減少し、受注者の責任が増加することを意味する。一方、リスク評価については、従来の契約方式であれば発注者と受注者の責任は同等であったものの、設計施工一括契約では発注者の代わりに受注者が主要な部分を担うことになった。

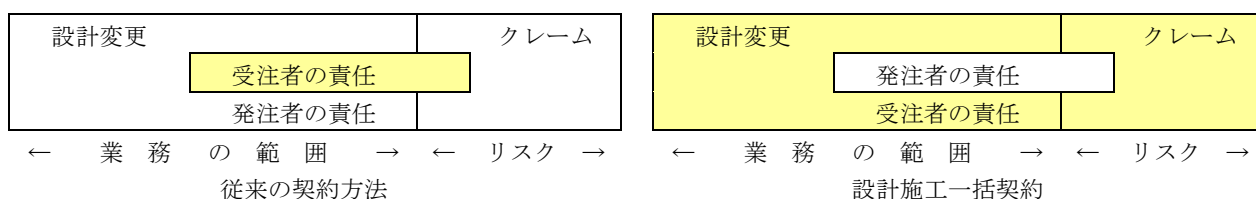


図-2 従来の契約方法と設計施工一括契約方法における受発注者の責任

#### (d) 設計施工一括契約の各段階

協議段階では、発注者が用意した参照設計に沿った形で受注者が設計案を提案するよう、発注者の意図や契約手続きに関する基本的な内容を明確に表示することが重要であった。発注者が作成した基本書類は、受注者からの提案に対する評価方法を記載した入札ガイドライン、プロジェクトの詳細プログラムを記述した契約書草案、および参照設計で構成されていた。受注者には、発注者が提示した参照設計および契約書草案に基づいて、自社独自の提案を提出できるという利点があった。

受注者からの提案に対する発注者の評価は、参照設計と規制措置との間に存在する相違に関するリスクプロファイル(リスク因子)の定義に基づいていた。受注者は、要求されるプログラムに関して「…しない限り満たさない」および「…すれば満たす」という文言で表現されたリスク分担(条件)という、クレームがない場合の報奨金を受け取ることができた。

落札基準は、施工および維持管理(15年/25年)に対する価格提示に基づいていた。発生土がリサイクル可能であること、リスクプロファイルが低いこと、および受容できる品質評価計画に沿った革新的要素を含めて、工期を短縮して建設に伴う不便を最小とするという基準が、発注者によって追加された。

「…しない限り満たさない」および「…すれば満たす」という規制措置に関する多くの問題を議論し解決することを可能にするため、受注者のみならず発注者にとっても交渉は重要である。交渉段階では、受注者にとって最終提示時に考慮しなければならないことを明確にする前提条件やリスクが議論された。

落札は、リスクプロファイル、リスク分担、交渉段階において合意した規制措置、および建設段階における品質保証を考慮し、設計時に適切に順応できた受注者に対して与えられた。もちろん、発注者以外で品質保証をおこなうことが主目標であり、受注者がプログラムの要求を満たすよう、発注者は管理しなければならない。これは、問題が生じた後に受注者が対策を講じることを回避しようというプロジェクトのリスク管理に基づいている。つまり、「事前に予測しておいてリスクを回避すること」が、「問題が生じた後に対処すること」よりも優先されることを意味している。

#### (e) リスク管理プロセス

オーストラリアのリスク管理規格<sup>1)</sup>は、リスク管理の一般的な基準として認められている。これは、ほとんど全てのプロジェクトやそのプロセスにおいて適用しうる包括的なリスク管理として広く用いられている一般的な方法<sup>2)</sup>であり、図-3に示される8段階から構成されている。

Groene Hart トンネル工事において、この種のリスク管理が適用されているが、不都合なリスクの削除あるいは最小化をおこなうために必要な手続きの実行および物理的な変更が含まれている。リスク管理は、リスクのプロセスに関する再調査およびプロジェクト進行中および終了後の関連書類の再調査を含む。

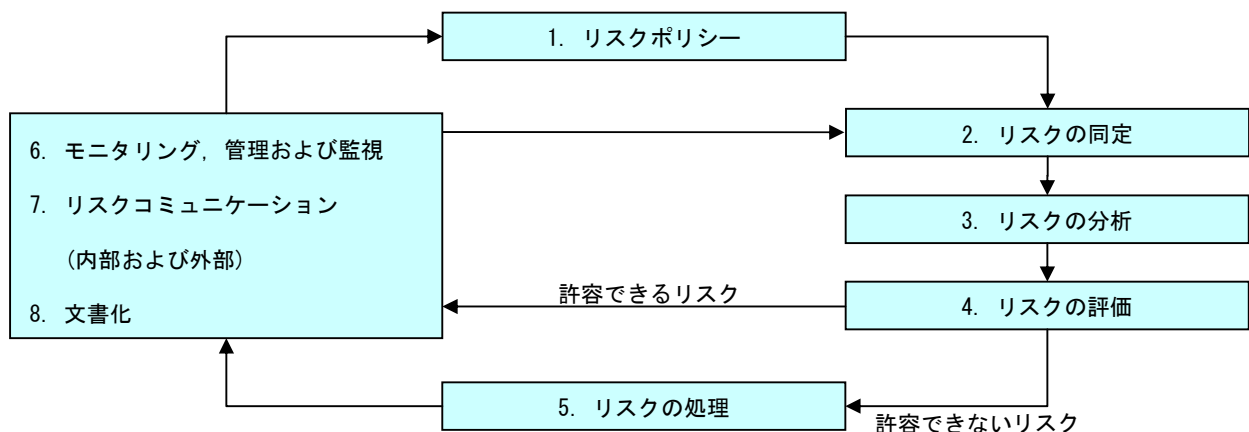


図-3 包括的リスク管理プロセス

リスクポリシーは、他の管理システムとの関係や相互作用および受容可能なリスクの基準といったリスク管理がおこなわれる背景を考慮している。リスクの同定は、何が起こるのか、またそれがどのようにして、何が原因となって発生するのか、といった内容から実施される。リスクを同定する段階では、受注者がリスク同定ファイルに追加するように求めると予測される内容を、発注者はリストアップすることになる。リスクレベルの定義に基づいたリスクが発生する可能性やその結果を含めて、潜在的なリスクを管理することを目的に、受注者はリスクの分析を実施することになる。リスクポリシーを背景にリスクを算出するよう議論できる主要なリスクおよびそれらの優先度を確立するためには、リスクの評価が大変重要である。

リスク評価の結果，そのリスクが許容可能であることが示されれば，リスクの発生プロセスは，モニタリングや管理および監視によって追跡され，その結果を受けて前段階で定義されたパラメータを見直すことになる．許容不可能なリスクが生じた場合には，次段階としてリスクの処理に移る．これは，実現可能なリスク削減手段の決定が，リスク発生の可能性や結果を避けるために選択されることを意味する．リスクの処理は，技術的，経済的および行政的な手段の評価，リスクポリシーに対する残存リスクの評価，解決方法の選択およびその実行について考慮しなければならない．また，移転されるリスクは，条件が満たされることを確認するため，監視および再考されなければならない．リスクのループを閉じるため，これらのプロセスの最終段階では，モニタリングや管理および監視，リスク評価の確認ならびにリスク同定へ回帰するための処理が実施される．内部および外部のリスクコミュニケーション内容については，発注者がいつでも閲覧可能な受注者のリスク書類に記録される(図-4 および図-5 参照)．

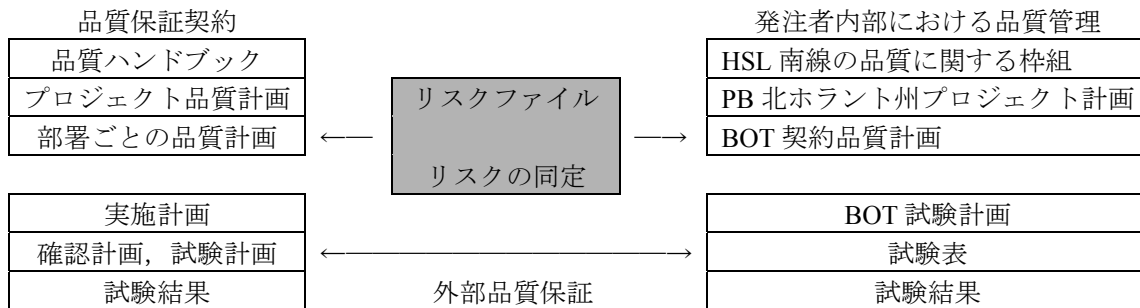


図-4 プロジェクト管理

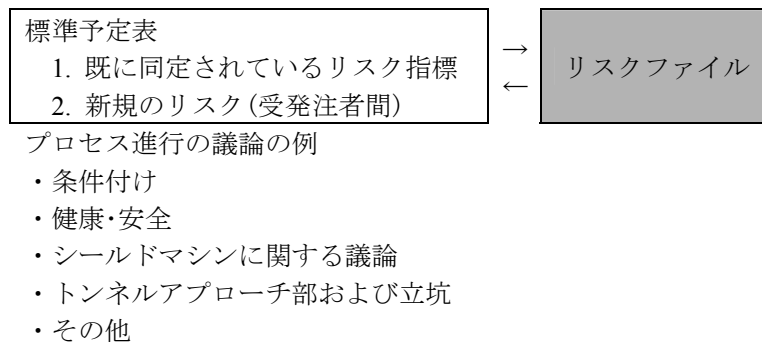


図-5 プロセス進行の議論

#### 4. 過去の事例の反省

オランダでは，Groene Hart トンネルに先立って同様に軟弱地盤をシールド掘進した例として，第二ハイネノールト(Second Heinenoord)トンネル(セグメント外径 8.35m)およびボトレック(Botlek)トンネル(セグメント外径 9.5m)がある．これら2つのプロジェクトにおいては，写真-2 に示すように，Kセグメント近くの覆工がジャッキ推力により破損している．

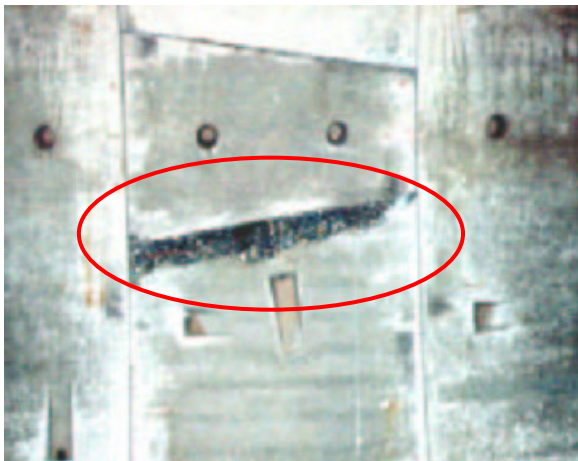


写真-2 Kセグメント近くの覆工破損状況

ITA のトンネル覆工設計推奨事項<sup>3)</sup>において指定されている覆工設計上の仮定に基づけば、観測事象が仮定事項と互いに整合しないことは明らかである。Groene Hart トンネルにおいても、ITA の仮定事項のうち下記のものとは再検討された。

- ・計画・設計・施工・供用の各段階のうち、供用段階は標準な段階で、施工段階は代表的な段階ではない。
- ・トンネル構造体は線形弾性である。
- ・セグメントにおける応力配分は平面ひずみ状態のもとで与えられる。
- ・荷重は全て載荷される(土圧のみ)。
- ・主たる地圧支持物は支保工である。

Second Heinenoord トンネルや Botlek トンネルにおける観測、計測結果および三次元構造解析から、上記の仮定が正しくないことは明らかである。トンネル覆工応力は、セグメントリングが組立てられ、土圧や裏込め注入圧などが作用することによって発生するが、トンネル覆工の内空変位が進行するに従って、覆工断面力(曲げモーメント、軸力およびせん断力)は変動する。また、施工中に計測されるトンネル覆工応力は、供用開始後の想定値を超える場合もある。トンネル覆工リング変形の多くは、テール通過後、特に K セグメントの近くにおいて、ジャッキ推力が集中し、応力が三次元的に配分されることによって生じる。

これらの経験から、Groene Hart トンネルの施工にあたっては、三次元 FEM(有限要素法)解析をおこなって覆工に発生する応力を求め、リスク管理をおこなうことになった。

## 5. 設計思想

トンネル覆工の変形は、覆工剛性が同じであれば、軟弱地盤において大きく、硬質地盤において小さくなる。しかし、1 リングあたりのセグメント数、K セグメントの種類、セグメント接合方法およびシール材の材質および配置、ジャッキ本数およびジャッキ推力載荷位置、裏込め注入材の種類およびセグメントリングの組立精度等により、変形パターンは変化する。これらを完全に評価することは非常に困難であり、品質低下や、補修・維持のための費用増といったリスクを避けるためには、受容できるリスクレベルを設定し、3. (e) で述べたリスク管理プロセスを経る必要がある。

一方、トンネル構造物は、機能性、遮水性、耐久性、安定性、強度および信頼性といった基本的な要求を満たさなければならない。例えば、トンネル内空変形が許容値を超えた場合には、機能性が失われる場合がある。これに対して、トンネル覆工に作用する裏込め注入圧やジャッキ推力が一様でなかったり、セグメントリングの組立精度が低い等の理由により、トンネル断面は一樣に変形するとは限らない。その場合は、セグメント接合部のずれた場所で応力集中が生じ、隣接するセグメントが損傷したり、構造物の耐久性や安定性が損なわれたり、維持管理費用の増大や寿命の短縮につながる場合がある。地盤や構造物の諸条件が事前に把握できれば、例えば、三次元 FEM 解析によってトンネルの断面変形やセグメントの損傷を予測することができる<sup>4)</sup>。ただし、設計段階でこれらを完全に予測することは不可能であるため、トンネル覆工挙動のメカニズムを理解し、有害な変形をリスクと捉えてリスクプロファイルを作成し、施工の早期段階で変形を抑えるための手段を講じるべきであることを、受発注者ともに認識しておく必要がある。

このようなトンネル断面変形の問題に対処するため、受発注者の共通理解のもと、実物大実証実験や三次元 FEM 解析によって変形を予測するとともに、実施工においても有害な変形やセグメントの損傷を低減するよう、ジャッキ載荷点の位置を求めたり、変位計測の費用を惜しまずにセグメント設置や組立の管理を高精度化したりするという対応をおこなった。

構造設計に関しては、トンネル覆工の変形量が終局許容変形量に到達する荷重、すなわち終局荷重を設計基準に取り入れていることから、トンネル覆工の設計解は唯一ではない。例えば施工中、トンネル構造物とは別の支保工にも荷重を受け持たせるといった発想があってもよい。覆工に生じる有害な変形を抑制するためには、セグメントリングの組立精度を高めること、最大ジャッキ推力に応じて裏込め注入圧や裏込め注入材の配合を制御することも重要である。

ジャッキの配置は、図-8 に示す 2 通りの考え方があり、新しいセグメントを置く位置を考えれば、1 つのセグメントのうち 2 箇所(4 等分点)に 2 つのジャッキを配置した方が、1 つのセグメントの中央と両端に 3 つのジャッキを配置するよりも安全であることは明らかである。前者のようにジャッキを配置した場合、セグメント組立時には、ジャッキを図の 2 列目中央の 2 つのセグメントから 1 つずつ外せばいいだけで、閉合しているセグメントには常にジャッキ推力が作用していることになる。一方、後者のようにジャッキを配置した場合、セグメント組立の際に図の 2 列目中央の 2 つのセグメントのそれぞれの中央および接合部から計 3 つのジャッキを外さなければならない。セグメント端部にジャッキ推力が集中することから、接合部が盛り上がり、そこに新しいセグメントを挿入すると、そのセグメントが破損する恐れがある。

考慮されるべき評価項目は、採用可能な手段の範囲および期待されるリスクプロファイルにおいて、ある複数の選択肢同士の費用の比較に関する。トンネル覆工を厚くしたり鉄筋を増やしたりするなどの構造的に強化するための費用増加分が、構造強化しなかった場合の構造物の長期的維持管理費用の増加分と比較して常に小さくなるように選択される。トンネルの延長距離が長い場合、覆工を厚くしたり鉄筋を増やしたりすることが不利になることが多いが、地山が軟弱であれば必ずしもそうではない。個々の場合について分析が必要である。さらに、プロジェクトの準備段階の早期においては、リスクプロファイルが低くなるよう、工期、品質および費用との兼ね合いを考慮して、適切なバランスを見出さなければならない。このためには、正しい設計ツール、さらに施工中には高度な計測システムを利用しなければならない。問題の本質を知れば、トンネル覆工の挙動をある程度予測することができるとともに、必要な対策を立てることができる。

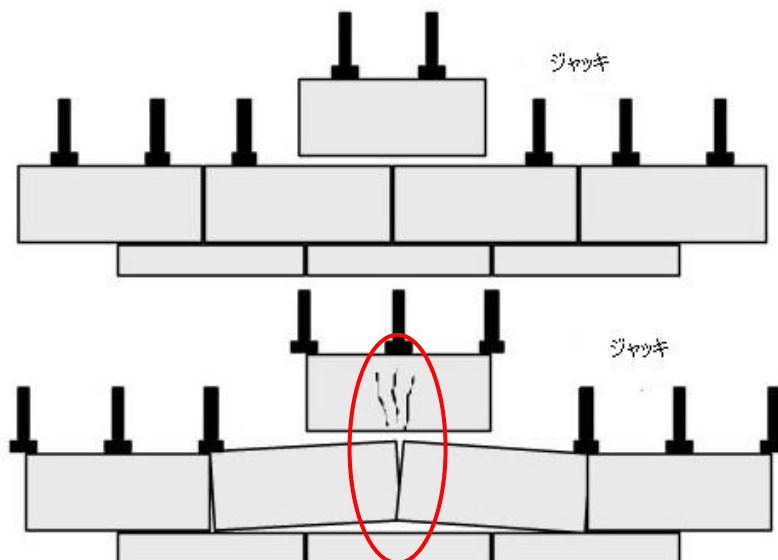


図-8 トンネル覆工組立時における不具合例

## 6. 裏込め注入圧の計測

オランダでは、軟弱地盤中に長大なシールドトンネルを施工した経験が浅く、シールドトンネル工事において裏込め注入に関する計測の重要性が認識されたのは最近になってからである。Groene Hart トンネルの工事において、地山の過度の変形を抑止するために、管理・計測すべき項目の1つとして、裏込め注入圧が選定された。裏込め注入圧を計測する理由として、次のようなものが挙げられている。

- ・トンネル覆工に作用する荷重の1つとして重要である。
- ・地表面鉛直変位量を解析するための境界条件として必要である。
- ・裏込め注入のメカニズムが明らかになっていない。

Groene Hart トンネルの工事では、掘削中にテール通過直後に Bingham 流動が生じるため、裏込め注入圧がトンネル覆工作用圧を支配すること、切羽から後方に発生する浮力がトンネル構造物にせん断応力を生じさせることから、これらを評価するために裏込め注入圧の計測が欠かせないと認識されるに至った。

## 参考文献

- 1) Blom, C. B. M., Jovanovic, P. S. and Oudejans, W. L.: Recommendations for tunnel lining design in soft soil, *Proceedings of the 16th Conference of IABSE, Structural Engineering for Meeting Urban Transportation Challenges*, Lucerne, Switzerland, 2000.
- 2) Leendertze, W. & Jovanovic, P. S.: Experiences with design construct contract of the "Green Heart" tunnel, the Netherlands, *Conference Proceedings of NATM 2002*, Seattle, USA, 2002.
- 3) Blom, C. B. M. and Jovanovic, P. S.: Requirements for tunnel design in soft soil, *Proceedings of the Conference on Long Road and Rail Tunnels*, Basel, Switzerland, 1999.
- 4) Bakker, K. J., Leendertze, W. L., Jovanovic, P. S. and Oosterhout, G. P. C. van: Stresses and strains in segmented lining, evaluation of monitoring and numerical analyses, *Conference Proceedings, TC 28 Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Soil*, Tokyo, Japan, 1999.