

# シールド部分同時施工法「ロスゼロ工法」の開発

## Development of a Tunneling System for Simultaneous Cutting and Segment Assembly

西 明 良<sup>※1</sup>  
Akira Nishi

北 浦 健<sup>※2</sup>  
Ken Kitaura

寺澤 正人<sup>※3</sup>  
Masato Terazawa

### 【要旨】

シールドの高速化は、近年増加する長距離工事や大深度工事に対応するため不可欠になっている。しかし、単なる作業の高速化は設備コストの上昇や危険作業の増加を招く。そのためシールド掘進とセグメント組立を同時に行う同時施工法が注目されている。本稿は、より経済的に高速化を図る部分同時施工法「ロスゼロ工法」の概要と施工例について紹介する。ロスゼロ工法は一般的なシールド機のジャッキ圧力を制御することにより同時施工を実現した。経済性と施工性に優れた高速施工法である。

【キーワード】 シールド 高速化 同時施工 セグメント組立 圧力制御

### 1. はじめに

昨今の社会情勢よりシールド工法は建設コストの縮減が重要な課題になっている。工事の長距離化は、シールド機械費、立坑築造費を削減できるため年々進んでいる。高速化は、長距離化に伴い工期が長くなることから必然的に求められるが、施工者にとっても工事コストを縮減できるため有用な技術となる。シールド工法の施工サイクルは、掘進とセグメント組立にかかる時間が大半を占め、これらの高速化が不可欠である。しかし、単なる作業の高速化は機械の能力アップによる設備コストの上昇や危険作業の増加を招き、掘進と組立を同時に行う同時施工法が注目されている。当社ではコスト縮減に重点をおいた高速施工法「ロスゼロ工法」を開発し、実用化を進めている。本工法は軸方向挿入式セグメントの挿入代を推進する時間に一部のセグメントを組み立てる。これによりシールド機の本体構造やセグメントには一切手を加えることなく、安価な同時施工を可能にした。

本稿では採用した中央環状新宿線SJ33工区、SJ34工区（本町シールド）の施工例をもとに、技術の概要と有効性について述べる。

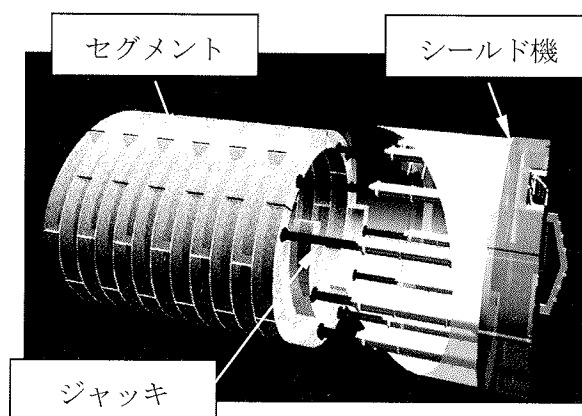


図-1 シールド工法

### 2. シールド工法とは

シールド工法は、円筒状のシールド機を推進させながら地山を掘削し、後方の空間に複数のピースからなるセグメントを組み立ててトンネルを構築する。シールド機は、円周上に配置されたシールドジャッキを既設セグメントに押し当てて推進するが、このとき適切な作動ジャッキを選択してトンネルの方向を制御しなければならない。1リング分（0.8～1.6m）を推進した後、伸張したジャッキを一旦引き戻し、その空間にセグメントピースを挿入して組立を行う。同時施工はこのシールド掘進とセグメント組立を同時に行うことにより高速化を図るものである。

1. 土木本部 機電部 2. 関東土木支店 本町シールド作業所 3. 土木本部 土木設計部

### 3. 部分同時施工法の提案

#### 3.1 工法の概要

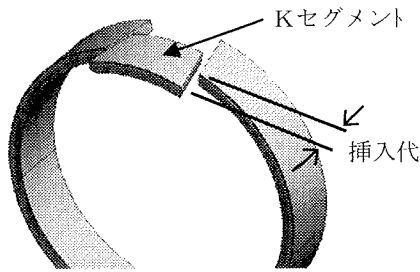


図-2 軸方向挿入式セグメント

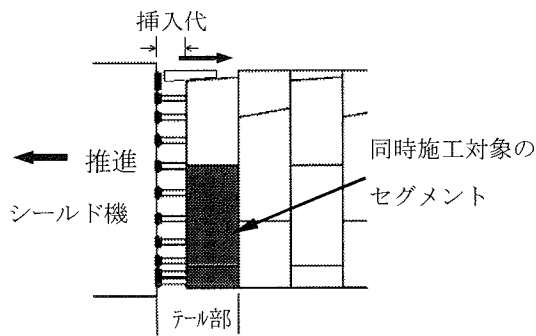


図-3 テール部の挿入代

同時施工ではセグメントを組立ながら推進する機構上、ジャッキの伸縮長には1リング分のセグメント幅に加え、さらに推進する分が必要になる。そのため、機長を長くした特殊シールド機が採用される。しかし、図-2に示す軸方向挿入式セグメントの場合、最後に組み立てるセグメント（Kセグメント）をトンネルの軸方向から挿入する構造になっており、この挿入代を利用することで同時施工が可能である。本工法はこれに着目し、この挿入代を推進する時間に部分的な同時施工を行う。（ロスゼロ工法は、この挿入代を有効活用し、ロスをなくすという意味から命名した）

図-4は通常の施工フローと本工法の施工フローとの比較である。通常では掘進完了後、セグメントの組立に作業を移行するが、本工法では掘進の途中から組立を開始する。この部分的な同時施工により施工サイクルの短縮がはかれる。

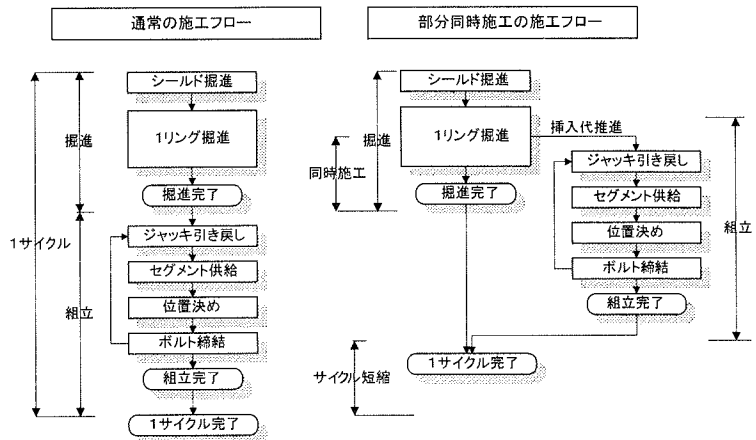


図-4 通常フローとの比較

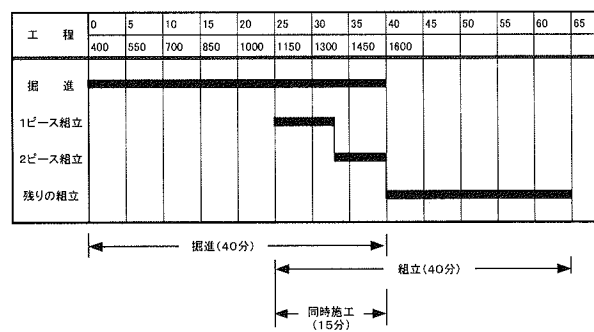
#### 3.2 施工サイクルの短縮効果

表-1および表-2に一般的な施工条件における効果を示した。

表-1 施工条件

セグメント幅	1200mm
挿入代	400mm
掘進速度	30mm/min
セグメント分割数	6
掘進・組立時間	各40分
挿入代推進時間	13.3分
ジャッキ引戻時間	1.7分

表-2 工程短縮の効果



$$\begin{aligned} \text{同時施工時間} &= \text{挿入代推進時間} + \text{ジャッキ引戻時間} \\ &= 13.3\text{分} + 1.7\text{分} = 15\text{分} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{工程短縮の効果} &= \text{同時施工時間} / \text{掘進・組立時間} \\ &= 15\text{分} / (40\text{分} \times 2) = 18.8\% \end{aligned}$$

同時施工による作業効率の低下を20%とすると15%のサイクル短縮効果が得られる。

### 3.3 技術的な課題

同時施工を行うには以下の課題を解決しなければならない。

- ① シールド機が蛇行し、トンネルの線形精度が低下する
- ② 掘進速度が変動し、地表面に悪影響を及ぼす
- ③ 偏ったジャッキ荷重がセグメントにかかり、覆工品質が低下する

図-5は、下部のセグメントを組み立てる同時施工例である。組立範囲のジャッキを停止することにより推力のバランスが崩れ、シールド機は掘進方向（この場合下へ）を変える。これを防ぐため軸対象のジャッキを同時に停止することになり、ジャッキ本数の大幅な減少と偏りが生じ、掘進速度と切羽圧力が不安定になる。

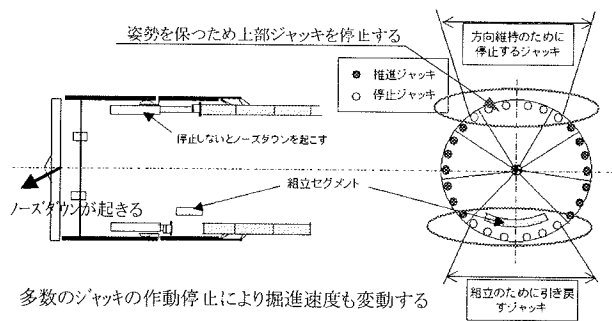


図-5 同時施工の課題

## 4. ロスゼロ工法の開発

### 4.1 解決の手段

本工法では個々のジャッキ圧力をコンピュータ制御することにより解決を図った。ジャッキ推力の偏りや掘進速度の変動を抑え、的確な方向にシールド機を誘導することができる。（図-6）

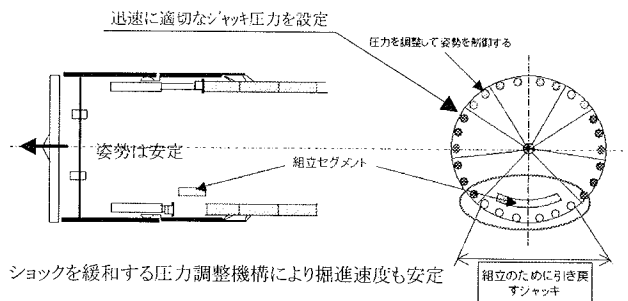


図-6 ジャッキ制御による解決方法

- ① ジャッキの圧力制御により欠損ジャッキの不足モーメントを補い、シールド機の姿勢を自動制御する。
- ② モーメントを一定に保ちながらジャッキの圧力を緩やかに変更する過程を設け、ジャッキ変更時に生じる掘進速度、姿勢の変動を抑制する。

### 4.2 圧力制御の方法

ジャッキの制御には当社で開発した圧力制御技術を適用した。この方式は、各ジャッキの圧力を無段階に調整して任意に推力を設定し、シールド機の姿勢を制御する。既に35件の実績があり確立された技術である。図-7は圧力制御の概念図を示したものである。θ方向を最大値とし、rに比例した勾配の推力分布を定義して各ジャッキの推力を調整する。

$$P_i = 1 + \left\{ \frac{(\phi_i - \theta) + 1}{2} - 1 \right\} \times r$$

i: ジャッキ番号

φi: ジャッキの取付角度

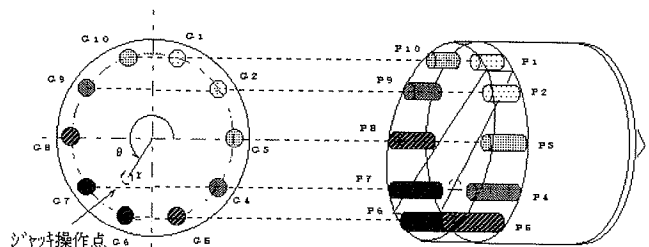


図-7 圧力制御の概念図

推力分布の方向と勾配を変えることによりシールド機の姿勢を自在にコントロールすることができる。図-8は姿勢とジャッキ操作点の関係を示したものである。ジャッキ操作点のr、θは、目標方向に対する水平、鉛直方向の姿勢偏差θx、θyから求まる。

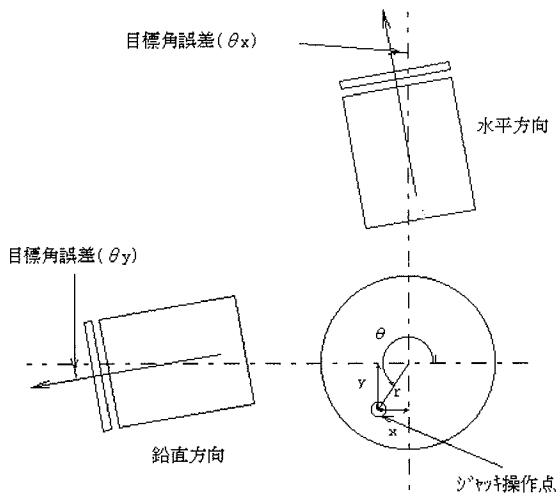


図-8 姿勢とジャッキ操作点の関係

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right)$$

ただし

$$x = Bx(\theta x + Tx \int \theta x dt)$$

$$y = By(\theta y + Ty \int \theta y dt)$$

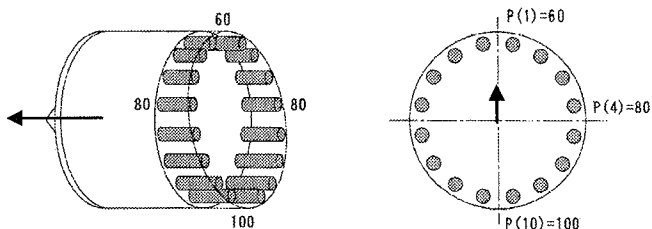
(Bx, By:比例定数)

(Tx, Ty:積分定数)

#### 4.3 同時施工における制御方法

同時施工では以下のような制御を行う。

図-9の制御過程C1はセグメント組立前の通常掘進時のジャッキ制御状況である。推力の割合は最下部100%、左右80%、上部60%とやや上向きのモーメントでシールド機が直進していると仮定する。

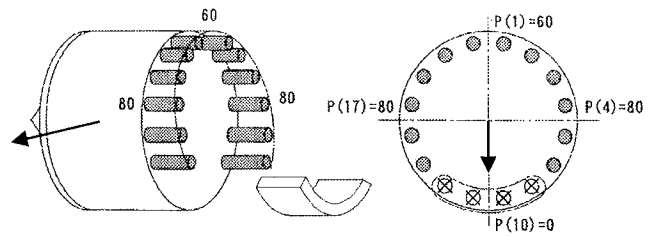


やや上向きモーメントで安定して直進

図-9 制御過程C1

図-10の制御過程C2はセグメント組立範囲のジャッキを停止した状況である。ジャッキの停止に

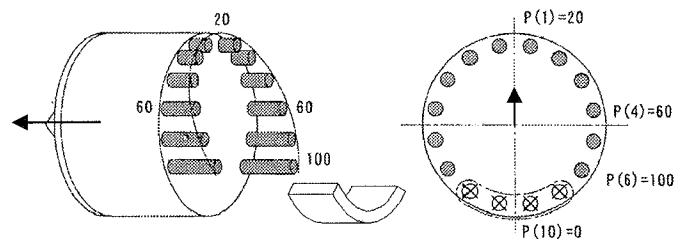
より推力バランスが崩れ、モーメントが下向きに変わる。これによりシールド機は徐々に下方方向に掘進する。



下向きモーメントとなりノーズダウンを起こす

図-10 制御過程C2

図-11の制御過程C3は下向きになったモーメントを修正するため推力割合を下部100%、左右60%、上部20%に変更した状況である。これによりジャッキモーメントはC1と同等となり、シールド機は再び直進することができる。



上向きモーメントとなり姿勢が保持される

図-11 制御過程C3

#### 4.4 安定化処理

前項の制御過程C1からC2, C3に移る過程においてジャッキモーメントが変化するためシールド機の姿勢が不安定になる。そこでジャッキ変更前にモーメントを一定に保ちながら圧力を緩やかに下げる圧力調整過程を設けた。図-12は、制御過程C1における推力分布とジャッキモーメントM1を示し、図-13は、制御過程C3における推力分布とジャッキモーメントM2を示したものである。前項で説明したとおりここでM1とM2は一致する。図-14は、C1からC3に移行するときの圧力の変更過程を示したものである。停止するジャッキ群の減圧とそれ以外の推進ジャッキ群の加圧を同一時間で

うことによりジャッキモーメントを変化させることなく推力バランスを円滑に変更することができる。

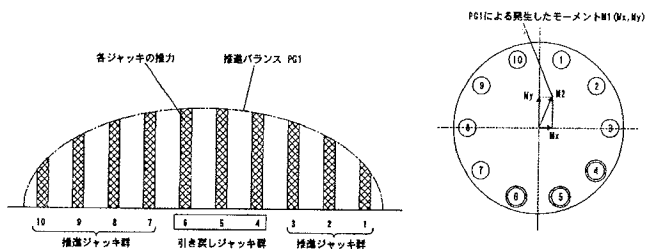


図-12 制御過程C1の推力分布

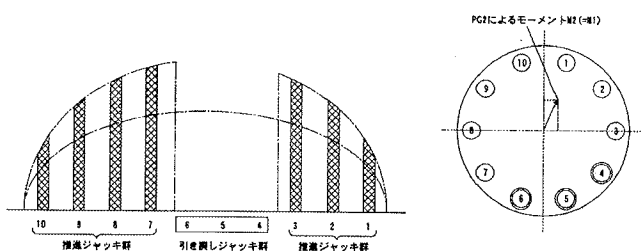


図-13 制御過程C3の推力分布

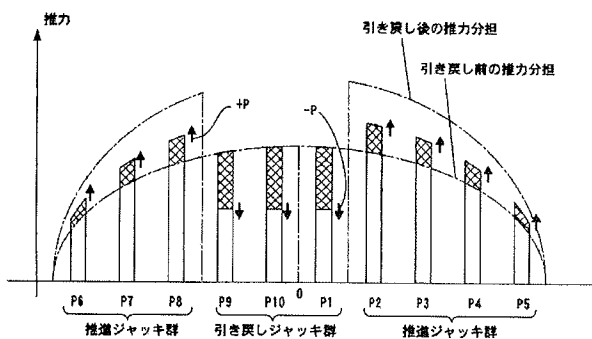


図-14 圧力調整過程

## 5. 実証工事

### 5.1 適用工事の概要

工事件名：SJ33工区・SJ34工区(1)トンネル工事  
 発注者：首都高速道路(株)  
 工法：泥水加圧シールド工法，外径：φ11.56m  
 施工延長：内回り750m，外回り750m  
 装備推力：3500kN×36本=126000kN  
 土質：砂礫，砂  
 セグメント：幅1500mm，9分割，RC，DC，ST  
 同時施工：3ピース  
 実施時期：平成16年5月～平成17年1月

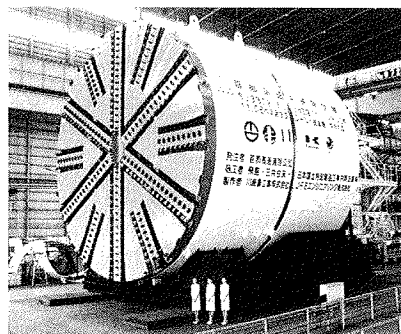


図-15 適用したシールド機

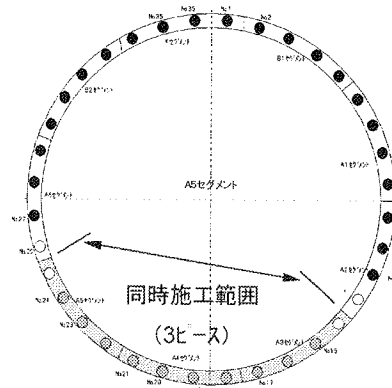


図-16 同時施工の範囲

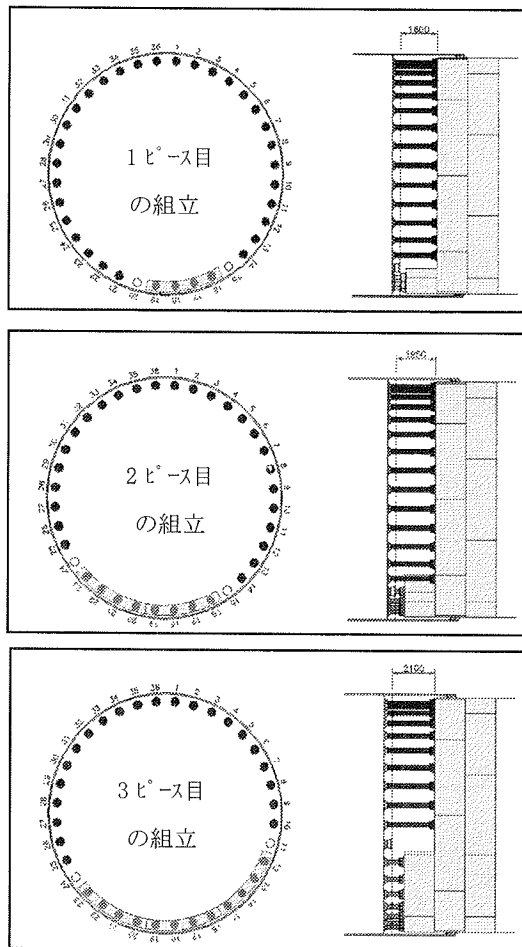


図-17 組立手順

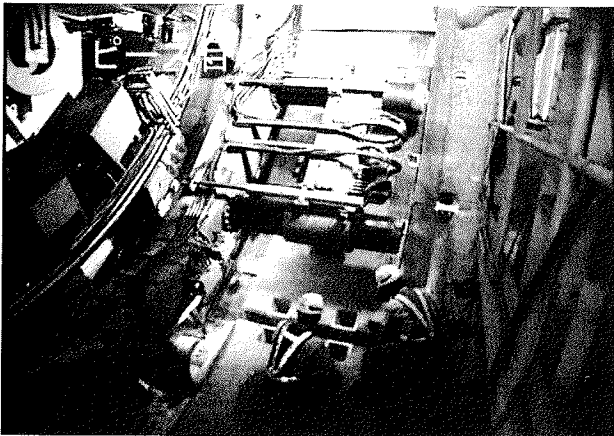


図-18 施工状況（組立状況）

## 5.2 サイクル短縮の効果

表-3に外回り区間750mにおける実施率およびサイクル短縮の効果を示した。実施率は72%，それを考慮した全体の施工サイクルの短縮効果は11.3%であった。

表-3 工程短縮の効果

種類	実施率 (%)	掘進時間 (分/R)	組立時間 (分/R)	短縮時間 (分/R)	サイクル短縮効果 (%)
RC		150	98	38	15.3
DC		120	73	28	14.5
ST		150	94	42	17.2
平均	72				15.7

施工サイクル短縮の効果：11.3%

## 5.3 セグメントへの影響

本工法の適用には、ジャッキ推力によるセグメントへの影響の把握が不可欠である。これには当社で開発した「3次元セグメント応力変形解析システム」を利用することができる。今回の実証工事ではセグメントへの影響度を把握し、さらに解析システムの検証を目的としてセグメントの歪計測を実施した。その結果、セグメントにひび割れ等の損傷を与えるような大きな負荷が加わっていないこと、また解析システムによる予測値と実測値に大きな差異がないことから解析システムが妥当なものであることを確認することができた。図-19は今回の施工時とは異なる過大なジャッキ推力を作用させた場合の応力分布図であるが、このように解析によりセグメントに与える影響（危険度）の予測を可能にすることで、本工法を安全に提案、また適用することができる。

## 6. おわりに

本工法は適用実績2件によりようやく実用化の目処が立ったところであるが、安定化処理技術の向上、システム操作性の向上等、解決しなければならない課題も残っている。特にセグメントへの影響については近年シールド推進による施工時荷重の影響が問題になっており、本工法による影響の把握と適用性の検証は不可欠である。今後はこれらの課題に取り組み一般のシールド工事をターゲットにした当社独

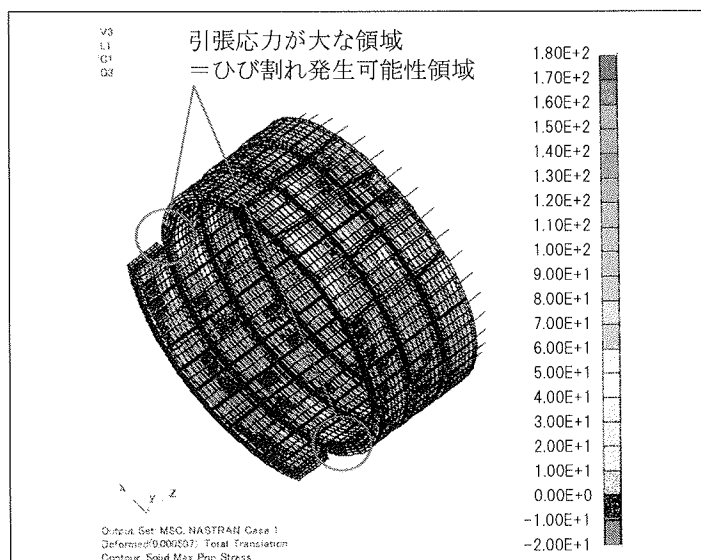


図-19 3次元解析システムによる応力予測分布

自の高速施工技術の確立に努めていきたい。最後に  
本工法の開発にあたりご指導，ご協力をいただいた  
本町シールド，堀川シールド各作業所の方々に深く  
感謝の意を表する次第である。

#### 【参考文献】

- 1) 西明良：圧力制御推進方式によるシールド大断面，大深  
度工事の施工，平成7年度建設機械と施工法シボジウ  
ム論文集，日本建設機械か協会
- 2) 西明良・神谷眞一：シールド部分同時施工法「ロセロ工  
法の開発」，土木建設技術シボジウム2005論文集，土  
木学会建設技術研究委員会

**Summary** Increase in the speed of shield tunneling is essential for meeting the recently increasing need for long-distance tunneling and deep tunneling. Since a mere increase in the speed of tunneling work can increase the equipment cost and hazardous work, tunneling by simultaneous cutting and segment assembly is attracting attention. This paper introduces a more economical system for partially simultaneous cutting and segment assembly together with examples of tunnels constructed by this method. This economical and easily practicable high-speed tunneling method was achieved by controlling the jacking pressure of common shield tunneling machines.

**【Keywords】** shield, rapid tunneling, simultaneous tunneling, segment assembly, pressure control