

万能型シールド工法の開発

—実験機による拡張面板荷重実験およびF E M計算結果の検証—

園村 俊一*¹

Keywords : replacement of cutterbit, water tight tunnel, mechanical extension/reduction type cutter face, deep underground excavation, long distance excavation

カッタビット交換, ウォータータイトトンネル, 拡張面板, 大深度, 長距離掘進

1. はじめに

近年、環境問題等により、地下水位に影響を与えず（ウォータータイト）に山岳トンネルを掘削することが要求されています。その対応工法として、切羽を密閉して掘削することが可能な岩盤シールド工法の適用が検討されています。この場合、地下水压下におけるディスクカッタの交換方法が問題となります。

また、平成13年4月に「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」が施行され、用地等の問題で30年以上凍結されていた東京外郭環状道路の練馬区大泉JCT～世田谷区東名JCT間約16kmが平成15年1月に、国土交通省と東京都の間で大深度地下で建設することが合意されました。以上の背景のもと大深度（高水压）地下における長距離掘進技術の開発が急がれるところです。

従来のシールド工法は、カッタヘッドにティースビットを装着し地盤を切削して掘進する工法で、都市部の未固結の軟弱地層から砂礫層で採用され、TBM（トンネルボーリングマシン）工法は、カッタヘッド面板にディスクカッタを装着し岩盤を圧砕して掘進する工法で、玉石を含む礫層や岩盤層で採用されていました。一般的に、シールドやTBM工事において、水压の作用するところでのカッタビットの交換方法は、あらかじめ、トンネル計画線上に交換用の立坑を築造して行う方法や圧気または薬液注入による地盤改良および地下水位を低減させる等の補助工法を用いてカッタ交換を行っていました。しかし、これらの方法は時間と費用がかかり、地盤改良では地下水や土壌に影響を及ぼす恐れがあり環境上の課題もあります。

これらの課題を解決するため、今般、高水压下においても、トンネル内の大気圧下で安全にカッタビットの交

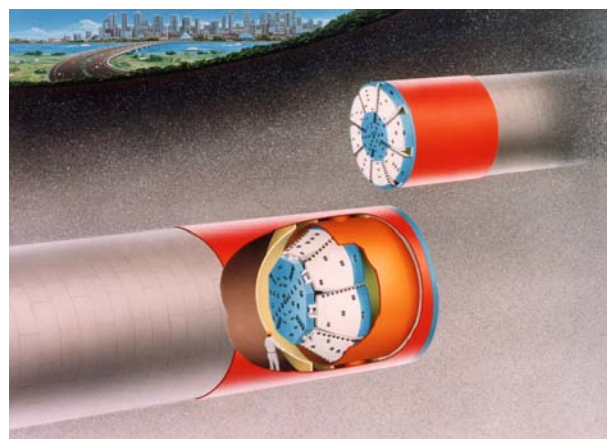


図-1 万能型シールド概念図

Conceptual diagram of All Around Type Shield Machine

換作業等が可能で、地質地盤にあわせたカッタビットを採用することにより、軟弱地盤から岩盤まで1台のマシンで掘削可能な「万能型シールド工法」を開発しました。

本書では、この万能型シールド工法のカッタビット交換機構を報告するとともに、当マシンにはカッタ面板にリンク支持式の拡張面板を採用しているため、掘進時に十分なカッタ剛性を確保する必要があり、その剛性を確保するため実施した面板荷重実験およびF E M構造解析結果について報告します。

2. 開発の概要

2.1 システムの概要

万能型シールド工法のカッタビット交換機構は、マシンフード部に球体機構を装備したもので、まずリンク式の面板を球体内部に縮小格納し、次に球体回転装置で、180度回転させ、カッタヘッドをトンネル内の大気圧側に転回すると共に、切羽側の水压を遮断してビット交換や面板補修等の作業を行う機構です。この機構は球体

*1 技術センター土木技術開発部地下空間開発室

シールド工法の一つである「クルン工法」を応用したものであり、クルン工法の伸縮スポークの代わりにカッタ面板にリンク支持式の拡張面板を採用しています。

カッタヘッドに面板を採用することにより、岩盤掘削用のディスクカッタの配置が可能となります。ゆえに、万能型シールド工法は、軟弱地盤層から岩盤層まで掘削対象地盤に応じて最適なティースビット、あるいはディスクカッタを自在に装脱着可能な構造となっており、急激な地層の変化にも、またカッタビットの磨耗による交換に対しても、何時でも、何処でも、繰り返し対応可能な工法です。

2.2 カッタビット交換手順

図-2、図-3 にそれぞれ万能型シールドの掘進時とカッタビット交換時の状態を示します。

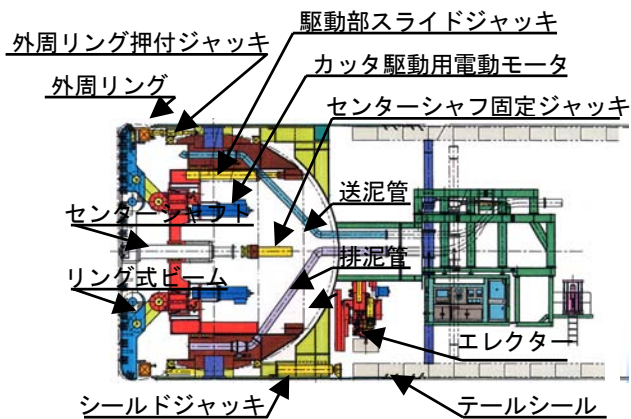


図-2 掘削時のカッタ面板
Digging

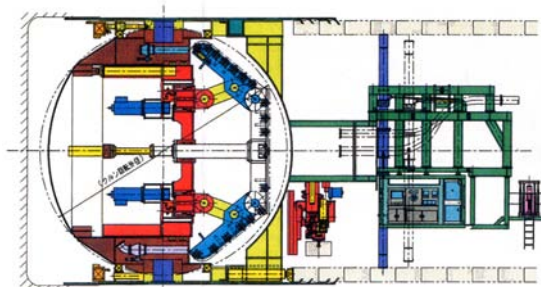
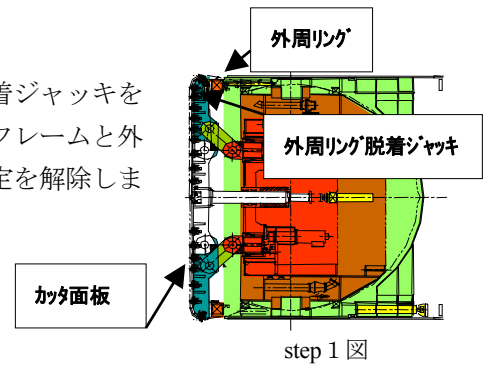


図-3 カッタビット交換時のカッタ面板
Displacement of cutter bit

以下にカッタ交換手順を示します。

step1

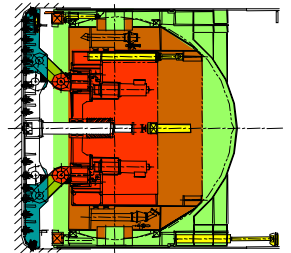
- ・外周リング脱着ジャッキを収縮しカッタフレームと外周リングの固定を解除します。



step 1 図

Step 2

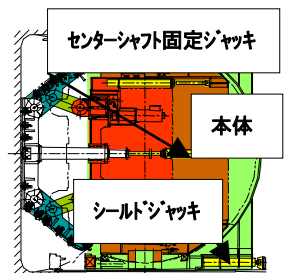
- ・外周リングを後方へ引込む。



step 2 図

Step 3

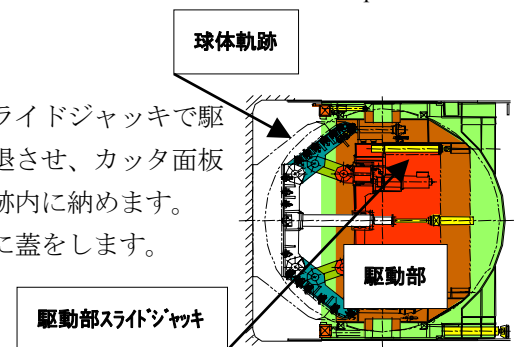
- ・センターシャフト固定ジャッキでカッタ中央部を固定しつつ、シールドジャッキで本体（内筒）を後退させます。
- ・面板が縮径します。



step 3 図

Step 4

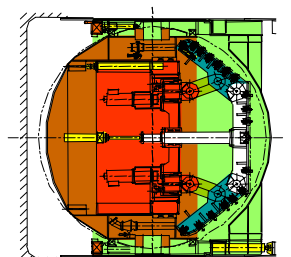
- ・駆動部スライドジャッキで駆動部を後退させ、カッタ面板を球体軌跡内に納めます。
- ・球体後部に蓋をします。



step 4 図

Step 5

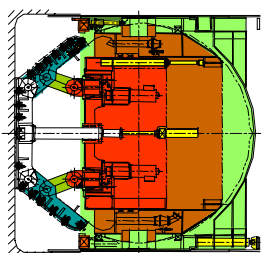
- ・球体を180度回転させます。
- ・カッタビットの交換を行います。



step 5 図

Step 6

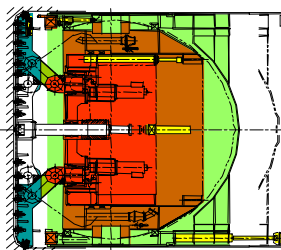
- ・カッタビット交換後、球体を180度回転させます。
- ・球体後部の蓋を外します。
- ・駆動部スライドジャッキで駆動部を前方に押し出します。



Step 6 図

Step 7

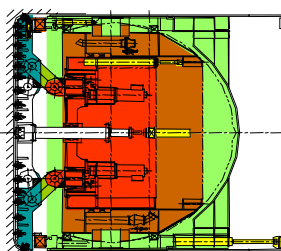
- ・センターシャフト固定ジャッキでカッタ中央部を固定しつつ、シールドジャッキで本体（内筒）を前進させます。
- ・面板が拡張します。



Step 7 図

Step 8

- ・外周リングを前方へ押出します。
- ・外周リング脱着ジャッキを伸長し、カッタフレームと外周リングを固定します。
- ・配管、配線等を行い掘進を開始します。



Step 8 図

2.3 万能型シールド工法の特長

1) 地盤に合ったカッタビットの選択は可能

球体シールド工法の採用で、軟弱地盤から岩盤まで地盤の変化に合わせたカッタビットを選択できます。カッタビット交換が何時でも、何処でも、繰り返し可能です。

2) 地下環境に優しい施工

カッタビット交換作業では、薬液注入等による地盤改良が不要であるため、地下水および土壌に対する影響がなく、また、地下水位低減を併用しないため、枯渇等の問題も生じません。

3) 作業の安全性と確実性が高い

カッタビット交換作業または、カッタフェースの補修作業はトンネル側（大気圧下）から安全に確実にできます。

4) 作業日数の大幅短縮

従来のカッタビット交換に必要であった地盤改良、あるいは立坑築造等補助工法が不要なため、地盤改良方式に比べ30%程度の工期短縮となります。

5) 長距離掘進ほど経済的

当万能型シールド工法は、カッタ交換のための立坑築造工事や地盤改良が不要なため、交換回数が増える長距離掘進ほど経済的な工法です。

表-1 に、代表的なトンネル掘進機の比較表を示します。表より、万能型シールドはシールドとTBMの利点を併せ持っていることがわかります。

表-1 トンネル掘進機の比較表
Compavison of Mechanical Shovel

検 討 項 目	クルンシールド機 (伸縮スポーク型)	T B M (オープン型)	万能型シールド機 (拡張面板型)
概 念 図			
適 用 地 山	軟弱地盤および未固結地盤	中硬岩、硬岩	軟弱地盤から硬岩まであらゆる地盤
ウォータータイト (水圧対応)	適用可能	適用不可	適用可能
構 造 と 特 徴	カッタ	・ティースビット（切削タイプ）	・ティースビット（切削タイプ）
		・ディスクカッタ（圧砕タイプ）	・ディスクカッタ（圧砕タイプ）
		・カッタ伸縮機構はスポーク部のみで対応している。	・面縮小機構はリンク方式により、拡張する機構。
	推 力	・面縮小機構はリンク方式により、拡張する機構。	・外周部を外周リングで面板を固定する
	反 力	・面縮小機構はリンク方式により、拡張する機構。	・面板全面にディスクカッタの取付けが可能。
排土方式	・セグメント	・スラストジャッキ	・シールドジャッキ
	・土圧式（中央部に面板なし） ・泥水式（中央部に面板あり）	・メイングリッパ+地山	・セグメント
		・ベルトコンベア方式	・泥水式

3. 実験機によるカット荷重実験および F E M 計算結果の検証

3.1 実験概要および実験目的

岩盤シールドにおいて、掘進中に地山反力によるカット面板の変位量分布が大きいと、カット面板に設置してある各々のディスクカットに切込み量の差異を生じ、一部のディスクカットに片あたりや変摩耗等が発生する恐れがあります。

カット面板の変位量分布を小さくするためには、カット面板を厚板構造にするか、補強リブを十分に設置するなどして、十分な剛性を確保する必要があります。また、万能型シールドはカット面板フレームに、リンク支持式の拡張面板を採用しているため、掘進時に十分なカット面板の剛性を確保する必要があります。

通常、鋼構造物に荷重が加わった時の内部応力、変位量は F E M により計算可能です。しかし、F E M 計算は構造物のメッシュによる要素分割数、分割位置により計算結果が異なります。そこで、万能型シールド実験機の面板に荷重を作用させ、ひずみセンサーでひずみを実測した結果と F E M 計算結果とを比較検討して、その F E M 計算モデルが妥当かどうか検証します。

その計算手法の検証に基づき、実機 F E M 計算モデルにおけるカット面板の応力、ひずみ量計算値を評価して、精度の高い実機面板設計に活用することを目的とします。

3.2 実験方法

図-4、写真-1、2 に示すように、実験機の面板 1 点にジャッキで集中荷重 10 トンを作用させ、図-5 に示す面板荷重測定ポイント位置（7 点）に 3 軸ひずみセンサーを貼付けて、ひずみ測定を行いました。

表-2 に今回行った実験ケースを示します。

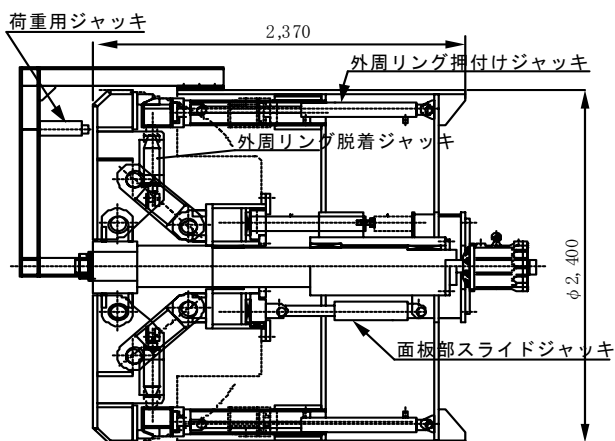


図-4 荷重実験機
Experimental apparatus

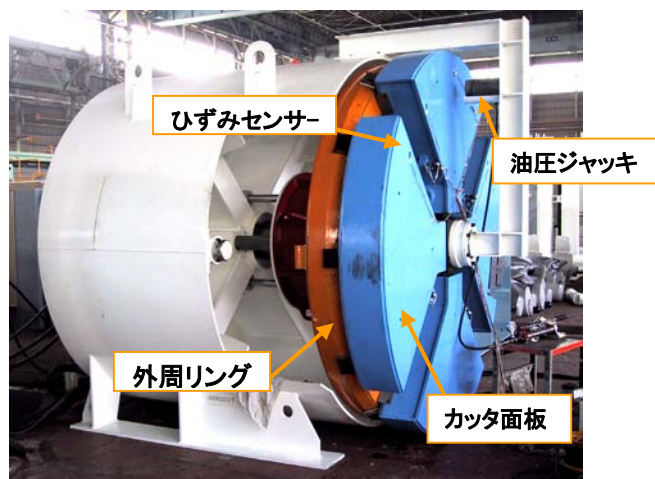


写真-1 荷重実験機
Experimental apparatus

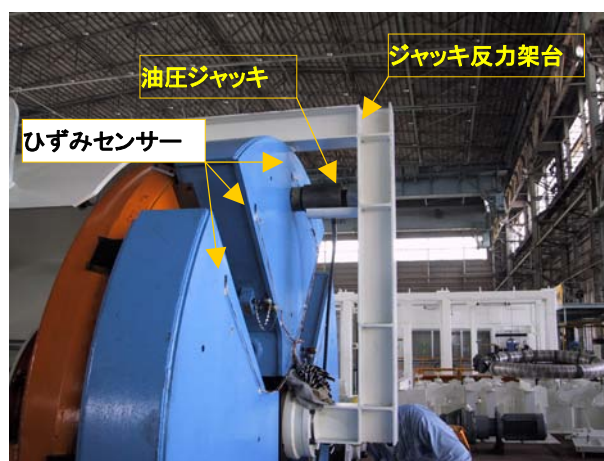


写真-2 荷重実験装置
Experimental apparatus



写真-3 荷重実験状況
Test setup

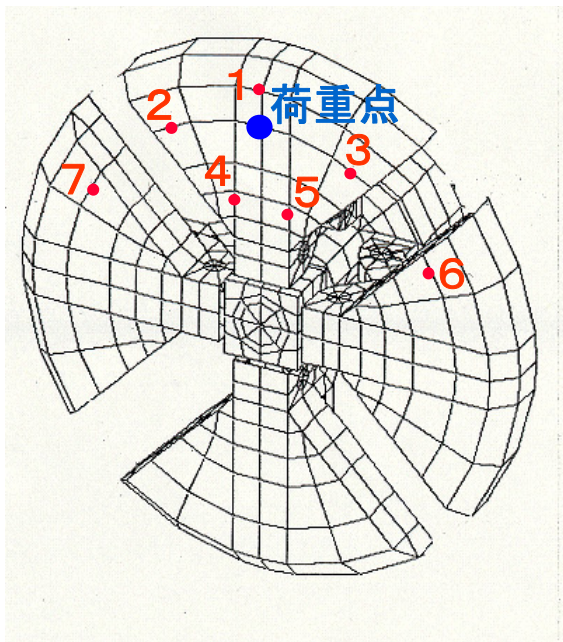


図-5 面板ひずみセンサー取付位置
Mounting location

表-2 荷重実験条件
Loading condition

Case	荷重値	荷重の作用点	外周リング有無
1	10ton	面板外周の	有り
2		中央部	無し

3.3 実験結果

各測定ポイントにおけるひずみセンサーの実測値より、下表に表すロゼット解析式により、各ポイントでの主応力(σ)を計算したものを表-4、表-5に表します。

表-3 ロゼット解析式

$$\sigma = E / (2 \times (1 - \nu^2)) \times ((1 + \nu) \times (\varepsilon_a + \varepsilon_c) \pm (1 - \nu) \times (2 \times (\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2)^{0.5})$$

σ : 応力 (kN/cm²)

E : 縦弾性係数 (kN/cm²)

ν : ポアソン比

ε a : x 方向変位置

ε b : y 方向変位置

ε c : z 方向変位置

表-4 実測値 (Case 1 : 外周リング有り)

Actual measurement value							
測点	1	2	3	4	5	6	7
ε a	-22	-12	-6	0	-9	-6	-15
ε b	-29	2	-11	-15	17	-2	-17
ε c	-4	-4	-4	9	20	-1	4
等価 応力	0.53	0.37	0.20	0.46	0.53	0.13	0.33

測定値 ε a、ε b、ε c は表示数値×10⁻⁶

表-5 実測値 (Case 2 : 外周リング無し)

Actual measurement value							
測点	1	2	3	4	5	6	7
ε a	-7	-1	-1	-8	-14	0	1
ε b	2	-1	3	-11	19	2	2
ε c	-1	4	4	19	27	1	1
等価 応力	0.21	0.08	0.09	0.45	0.68	0.04	0.04

FEM計算から得られた等価応力分布図に、今回の実験で得られた各ポイントでの応力実測値を記入した結果を図-6、図-7に示します。図-6は外周リングが有る場合、図-7は外周リングが無い場合です。図中の応力実測値の単位はkN/cm²です。

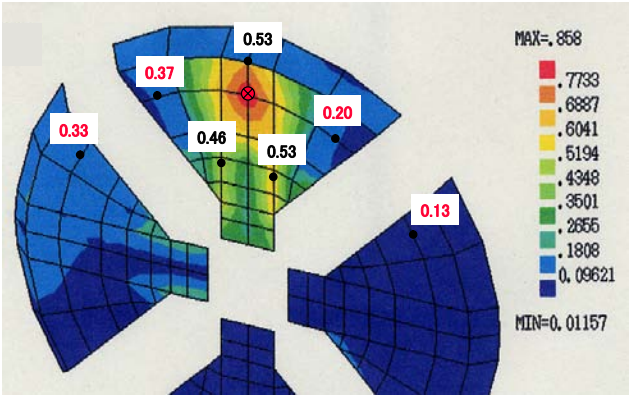


図-6 Case 1 等価応力分布図 (外周リング有り)
Distribution chart

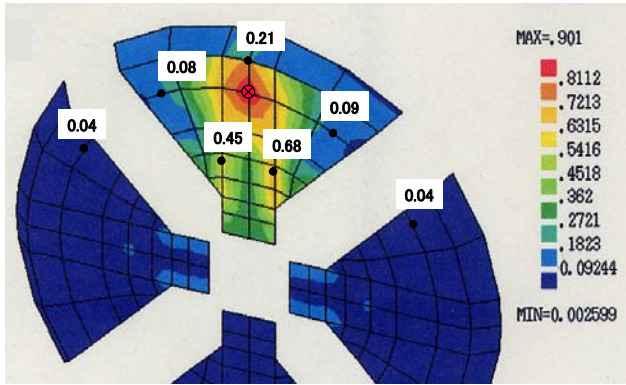


図-7 Case 2等価応力分布図（外周リング無し）
Distribution chart

図-8 に、表-4、表-5 に示した各計測ポイントでの応力実測値をグラフ化したものを示します。

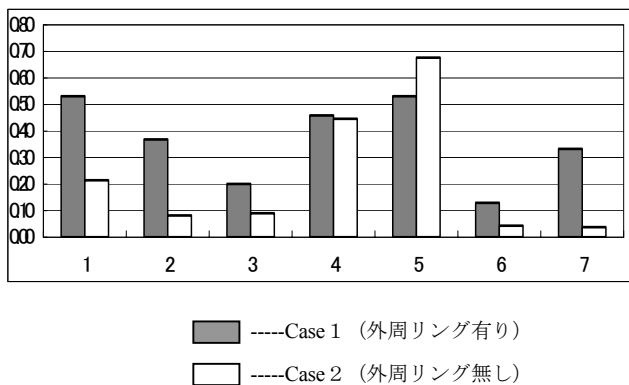


図-8 外周リング効果比較表
Comparative chart of ring effect

図-8 外周リング効果比較表より、外周リング有りの方が、応力最大値－最小値の差が小さいことが判ります。これは外周リングにより、面板が一体化したものと思われる。

3.4 実験考察

3.4.1 FEM計算モデルと実測値について

図-6、図-7 を比較しても、FEM計算モデルにおいては、外周リング有無の違いによる等価応力分布差はほとんどありません。しかし、図中に示した実測値では図-8 に示すように、カット面板左右部分（測定ポイント2、3）2～5倍程度の値となっています。外周リング無し（Case 2）においては、実測値とFEM計算モデルの等価応力図が非常に良い一致を示していることから、今回のFEM計算モデルでは外周リング有り（Case 1）の場

合の力の伝わり方について、現象を十分に表していないと考えられます。

これは外周リング有りの時のFEM計算モデルにおいて、カット面板と後方の外周リングとは脱着ジャッキ1点で固定されていると云う仮定であり、カット面板両端部分では両者は密着していないFEM計算モデルであるため、実測値と一致しない結果になったと考えられます。しかし、実験機においては、外周リングと扇形状の拡張面板とが外周全面で十分に密着してカット面板全体の剛性が増したことにより、荷重が面板両端部分に伝達され、応力分布領域が大きくなっていると考えられます。

以上のことにより、今回のFEM計算モデルに対し、外周リングがカット面板の外周全面で密着しているモデルに修正する必要があると考えられます。

3.4.2 外周リング効果について

図-8 に示すように、各ポイントにおける等価応力値は、Case 1（外周リング有り）の方が、Case 2（外周リング無し）より、バラツキが少なく、最大値は小さく、最小値は大きくなっています。

このことは、外周リングを設置することにより、カット面板の剛性が高まり、カット面板に負荷した荷重がカット面板全体に分散伝達されたものと考えられます。

4. まとめ

今回の荷重実験において、「万能型シールド」のカット面板の剛性を確保する目的で設置された「外周リング」の効果を確認しました。また、カット面板剛性を検証するFEM計算モデルの妥当性も確認することができました。ただし、外周リングの密着性についてはFEM計算モデルを修正する必要があります。

その一方で、この「万能型シールド工法」の開発を進める過程において、岩盤掘削時に振動（振動加速度3～4G、振動数50～150Hz）が発生することが判明しました。当万能型シールド機には、リンク支持方式の拡張面板を採用しているため、振動によるリンク部、およびヒンジ部への影響が懸念される新たな課題が生じました。

今後はその課題を解決するため、稼動中のTBM実機の振動測定を行い、その振動特性を基に今回の実験結果および、FEM計算モデル等を活用し、信頼性の高い「万能型シールド」のカット面板を提供します。