

1台で軟弱地盤から岩盤まで対応する 万能型シールドマシンの開発

—実験機による拡張面板荷重実験および FEM 計算結果の検証—

園村 俊一・中根 隆

従来、切羽の自立性に乏しく、地下水圧が作用するシールド工事や、ウォータータイトの TBM（トンネルボーリングマシン）工事におけるカッタビット等の交換方法は、中間立坑を築造して行うか、圧気や薬液注入による地盤改良、もしくは地下水位を低減させるような補助工法を用いて行うのが一般的である。

本報文でのべる万能型シールド工法とは泥水式シールドにおいて、上記のような補助工法を用いずに、軟弱地盤掘削用のティースビットから、岩盤掘削用のディスクカッタまで、地質の変化に応じて何時でも、何処でも、繰返しカッタビット交換を可能とする工法である。

キーワード：球体シールド，可動面板（拡張面板），ウォータータイトトンネル，カッタビット交換，大深度，高水圧，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る。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る。この場合、地下水圧下におけるディスクカッタの交換方法が課題となる。

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 16 km 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に建設することが合意された。

以上の背景のもと、大深度（高水圧）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ある。

従来のシールド工法は、カッタヘッドにティースビット等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 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る。

水圧の作用するところでのシールド工事や TBM 工事におけるカッタビット等の交換方法は、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か、圧気や薬液注入による地盤改良、もしくは地下水位を

低減させる等の補助工法を用いて行うのが一般的である。しかし、これらの方法は、時間を要し、費用も嵩み、また地下水枯渇等の環境問題が生じる等の課題がある。

これらの課題を解決するため、今般、高水圧下においても、トンネル側の大気圧下で安全にカッタビットの交換作業等が可能で、地質地盤に合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」(図-1)を開発した。本報文では、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方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

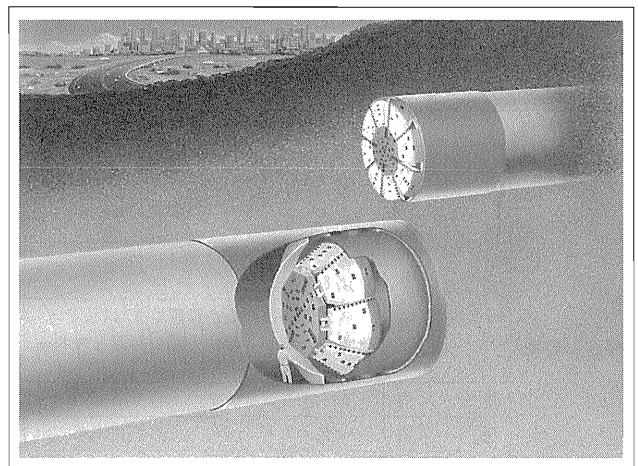


図-1 万能型シールド工法概念図

重実験および FEM 構造解析結果について報告する。

2. 開発の概要

(1) システムの概要

万能型シールド工法の Cutterhead 交換機構は、マシナード部に球体機構を装備したもので、まずリンク支持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 度回転させることにより、Cutterhead をトンネル内の大気圧側に回転すると共に、切羽側の水圧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ある。この機構は、球体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 Cutterhead 面板にリンク支持方式の縮小面板を採用したものである。

万能型シールド工法は、Cutterhead 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ーを装備することが可能となるため、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、ディスクカッターを選択することができる。即ち、自在に装脱着可能な構造であるため、Cutterhead の摩耗による交換に対しても、また急激な地層の変化にも繰返し対応可能な工法である。

(2) 万能型シールド工法の特長

万能型シールド工法の特長を以下にまとめる。

① 地盤に合った Cutterhead の選択が可能

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 Cutterhead を選択することができる。また、Cutterhead 交換が何時でも、何処でも、繰返し可能である。

② 地下環境に優しい施工

Cutterhead 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ない。

③ 作業の安全性と確実性が高い

Cutterhead 交換作業、または Cutterhead 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る。

④ 作業日数の大幅短縮

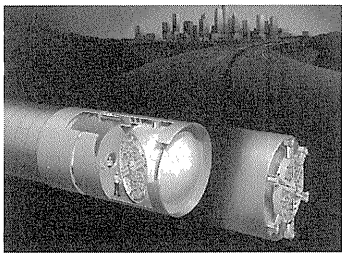
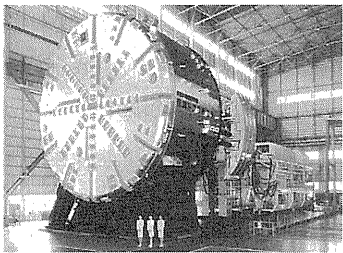
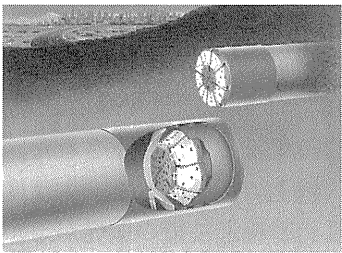
従来の Cutterhead 交換に必要であった地盤改良、

表-2 従来工法との比較（従来工法を 100% とした場合）

掘進距離		1 km	2 km	4 km	6 km
工事費	φ6.0 m	100.7%	96.8%	94.6%	98.5%
	φ12.0 m	101.7%	100.1%	93.6%	92.7%
Cutterhead 交換費	φ6.0 m	101.8%	87.7%	73.6%	80.8%
	φ12.0 m	103.5%	96.7%	72.2%	64.1%
掘削日数	φ6.0 m	71.6%	71.4%	71.4%	70.7%
	短縮月数	3.3 カ月	6.6 カ月	13.2 カ月	20.7
	φ12.0 m	60.2%	60.8%	60.5%	60.6%
	短縮月数	9.7 カ月	18.3 カ月	37.7 カ月	56.0 カ月

条件
 ・岩種：砂岩・粘板岩互層、・一軸圧縮強度：100 MPa
 ・Cutterhead 径：17 インチ
 ・Cutterhead 交換回数
 ① φ6.0 m：209 m/回、② φ12.0 m：111 m/回

表-1 トンネル掘進機比較表

検討項目	クルンシールド機（伸縮スポーク型）	TBM（オープン型）	万能型シールド機（縮小面板型）
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	Cutterhead	・ティースビット（切削タイプ） ・ディスクカッター（圧砕タイプ）	・ティースビット（切削タイプ） ・ディスクカッター（圧砕タイプ）
	推力	・シールドジャッキ	・スラストジャッキ
	反力	・セグメント	・メイングリッパ+地山
	排土方式	・土圧式（中央部に面板なし） ・泥水式（中央部に面板あり）	・ベルトコンベヤ方式

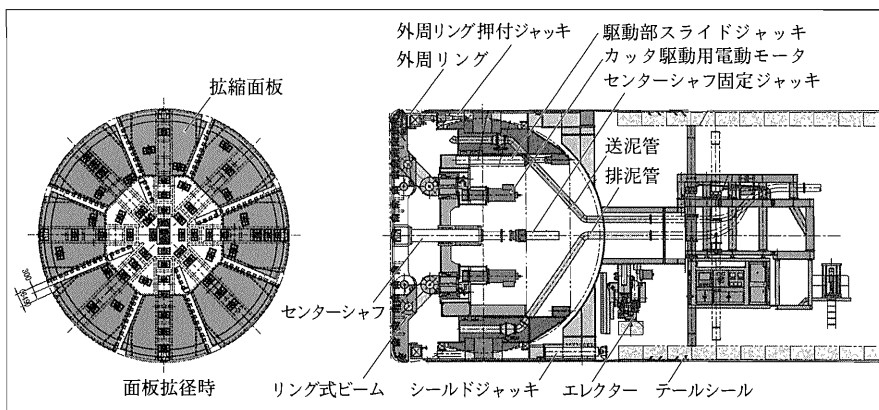


図-2 掘進時

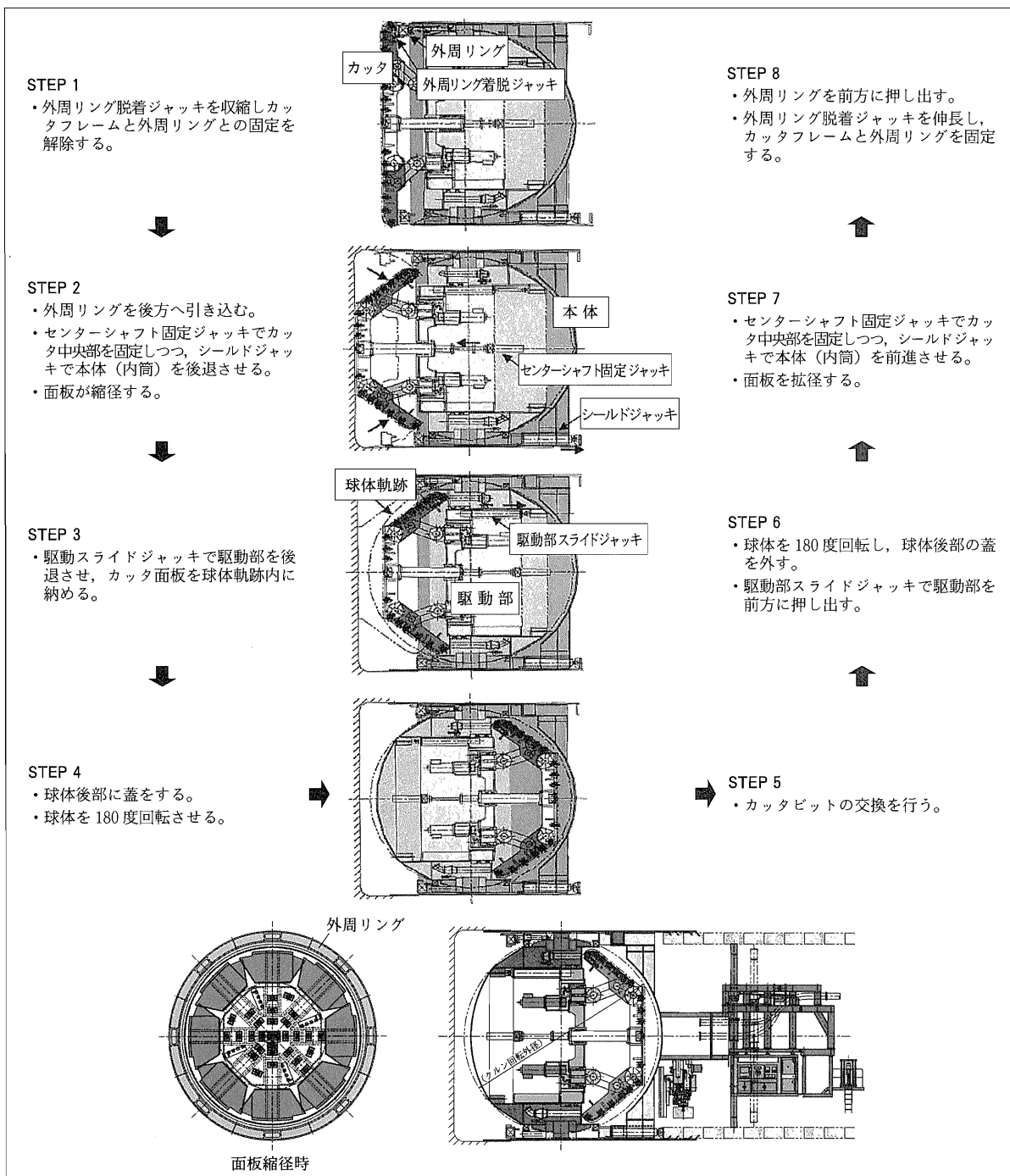


図-3 カッタビット交換時

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約 30% 程度の工期短縮となる。

⑤ 長距離掘進ほど経済的

当万能型シールド工法は、カッタビット交換のための立坑築造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ある。

表—1 に、代表的なトンネル掘進機の比較表を示す。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る。

表—2 に従来工法（薬液注入工法）との比較を掘削延長毎に工事費、カッタ交換費、作業日数に関して、マシン掘削径 φ6 m と φ12 m について表す。

(3) 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す。

3. 実験機によるカッタ面板荷重実験および FEM 計算結果の検証

(1) 実験概要および実験目的

岩盤用シールドにおいて、掘進中に地山反力によるカッタ面板の変位量分布が大きいと、カッタ面板に設置してある各々のディスクカッタに切込み量の差異を生じ、一部のディスクカッタに片あたりや偏摩耗等が発生するおそれがある。

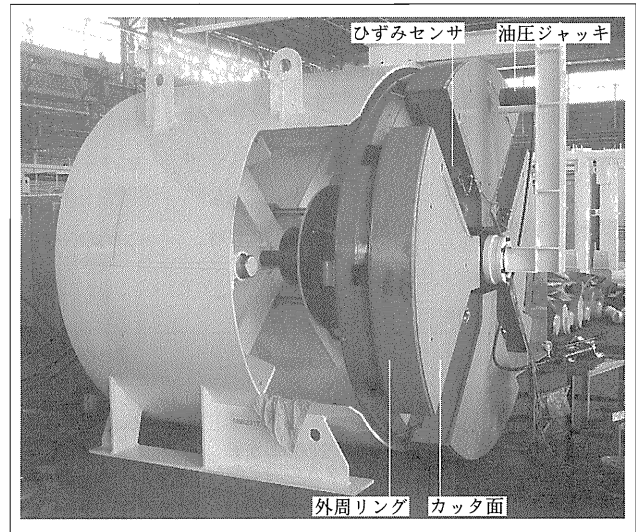
カッタ面板の変位量分布を小さくするためには、カッタ面板を厚板構造にするか、補強リブを設置するなどして十分な剛性を確保する必要がある。また、万能型シールドはカッタフレームにリンク支持式の拡縮面板を採用していることで、掘進時にカッタ剛性を確保するためのカッタ面板補強構造を検討する必要がある。

通常、鋼構造物に荷重が加わった時の内部応力、変位量は FEM により計算可能である。しかし、FEM 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る。そこで、万能型シールド動作実証実験機に荷重を作用させ、ひずみセンサでひずみを実測した結果と FEM 計算結果とを比較検討してその FEM 計算モデルが妥当かどうか検証した。その計算手法の検証に基づき、実機 FEM 計算モデルにおけるカッタ面板の応力、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する。

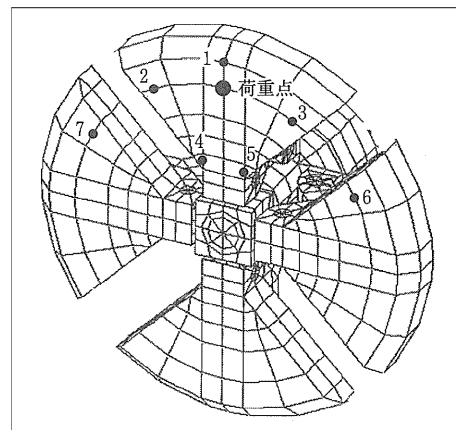
(2) 実験方法

図—4 に示すように、実証実験機の面板 1 点にジャッキで集中荷重 100 kN 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 軸ひずみセンサを貼付けて、ひずみ測定を行った。表—3 に今回行った実験のケースを示す。



図—4 荷重実験機



図—5 カッタ面板ひずみセンサ取付け位置

表—3 荷重実験条件

Case	荷重値	荷重の作用点	外周リング有無
1	100 kN	面板外周の中央部	有り
2			無し

(3) 実験結果

各測定ポイントにおけるひずみセンサの実測値より(1)式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。

$$\sigma = E/2(1-\nu^2) \left[(1+\nu)(\epsilon_a + \epsilon_c) \pm (1-\nu) \left\{ 2(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2 \right\}^{0.5} \right] \quad (1)$$

ただし σ: 応力, E: 縦弾性係数, ν: ポアソン比, ε_a: x 方向変位量, ε_b: y 方向変位量, ε_c: z 方向変位量

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 に示す。図—6、図—7 はそれぞ

れ、外周リング有りの場合と無しの場合である。図中の応力実測値の単位は 10 N/mm^2 である。

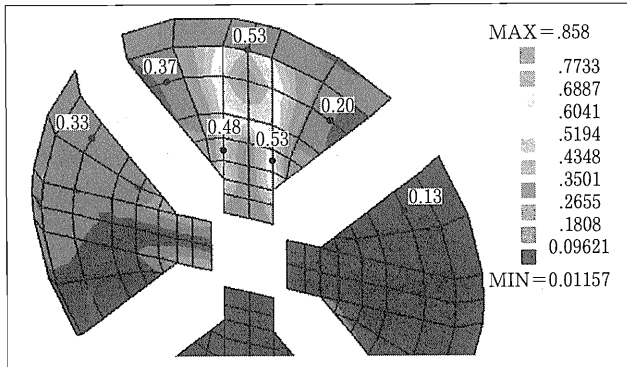


図-6 Case 1 等価応力分布図 (外周リング有り)

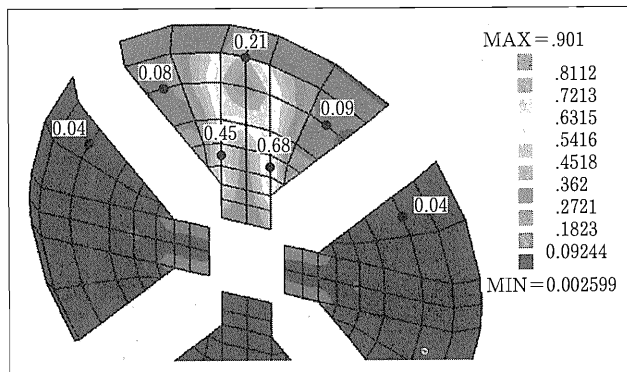


図-7 Case 2 等価応力分布図 (外周リング無し)

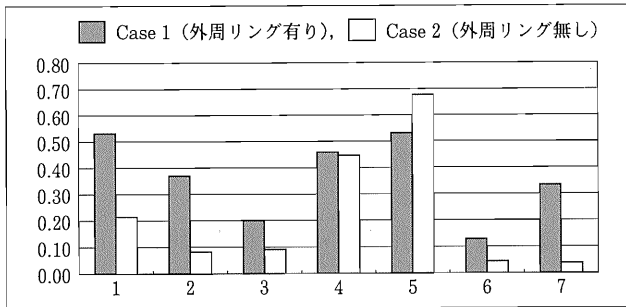


図-8 外周リング効果比較表

図-8 に図-6、図-7 で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す。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わかる。

(4) 実験考察

(a) FEM 計算モデルと実測値について

図-6、図-7 を比較しても、外周リング有無の違いによる等価応力分布図差はほとんどない。しかし、図中に示した実測値では、図-8 に示すように、カッタ面板左右部分 (計測ポイント 2, 3) で 2~5 倍程度の値となっている。外周リング無し (Case 2) においては実測値と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る。

これは外周リング有りの場合の FEM 計算モデルにおいて、カッタ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いう仮定であり、カッタ面板両端部分では両者は密着していない。しかし、実験機においては外周リングと扇形状のカッタ面板とが外周全面で十分に密着して、カッタ面板全体の剛性が増すことにより、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る。

以上のことにより、今回の FEM 計算モデルに対し、外周リングがカッタ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る

(b) 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、ばらつきが少なく、最大値は小さく、最小値は大きくなっている。

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

4. おわりに

今回の荷重実験において、「万能型シールド」のカッタ面板の剛性を確保する目的で設置された「外周リング」の効果を確認することができた。また、カッタ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た。ただし、外周リングと面板の密着性については、FEM 計算モデルを修正する必要がある。

今後は、今回の実験結果および FEM 計算モデルを活用し、リンク部を含めた信頼性の高い「万能型シールド」の面板を提供するものである。

JICMA

【筆者紹介】



園村 俊一 (そのむら しゅんいち)
大成建設株式会社
技術センター
土木技術開発部
地下空間開発室
次長



中根 隆 (なかね たかし)
石川島播磨重工業株式会社
鉄構事業部
油機・シールド設計部
油機・開発グループ
課長