

扁平型断面シールド工法の開発（その1）

—シールド工法と都市部山岳工法の境界領域を対象としたトンネル工法—

田中雅彦* 浅野 剛** 荒川賢治*

1. はじめに

大都市圏近郊に整備が予定されている放射・環状高速道路のトンネル区間は、平野部の軟弱な地盤から丘陵地の比較的硬質な地盤へと遷移する『シールド工法と都市部山岳工法の境界領域』に計画される場合が多く、シールド工法は工事費、山岳工法は地下水低下や地盤変状への影響等が課題となり、工法の選定には計画ルートの地質状況、周辺環境への影響を十分考慮した検討が必要である。

扁平型断面シールド工法は、地下水保全機能、地表面沈下抑制効果を有し、かつシールド工法と同等の施工速度および都市部山岳工法と同等の経済性を併せ持つ、『境界領域の低コスト・高速施工』を可能とする都市トンネル工法である。本工法は、石川島播磨重工業および石川島建材工業と共同で開発を進めている。

2. 工法の概要

本工法は、安定した施工速度を確保するため、シールド工法を基本工法としている。また、本工法の断面形状は、『シールド工法と都市部山岳工法の境界領域』の比較的硬質な地盤を対象に、セグメントの設計において応力的負荷の少ない条件設定が可能であることから、断面積が小さく経済的な山岳工法の標準的な断面に近い扁平形状を採用している。

シールド機は、従来の円形カッタのスポークから扁平側部の張出し掘削量に応じて伸縮するカッタ（以下から可変ビームカッタと称する）を装備し、一軸圧縮強度 $q_u=10.0\text{N/mm}^2$ 相当の硬質地盤を目標に扁平断面の掘削を可能とする構造（以下から扁平型シールド機と称する）である。図-1に可変ビームカッタを装備した扁平型シールド機の概要図を示す。

また、セグメントは以下のような特徴を持っており、

コストの低減および床版工の省力化・高速施工が可能な構造（以下から扁平型セグメントと称する）となっている。図-2に扁平型セグメントの概要図を示す。

- i. 一軸圧縮強度 $q_u=0.1\sim 10.0\text{N/mm}^2$ 相当の比較的硬質な地盤を対象にした覆工構造
- ii. ヒンジ継手と内部補強材を適用した薄肉構造
- iii. 床版および床版下部構造のプレキャスト化

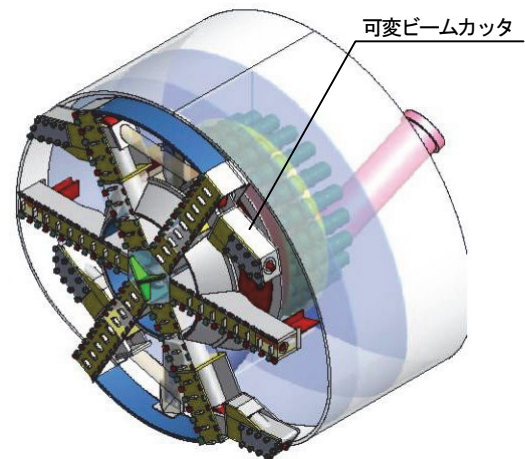


図-1 扁平型シールド機の概要

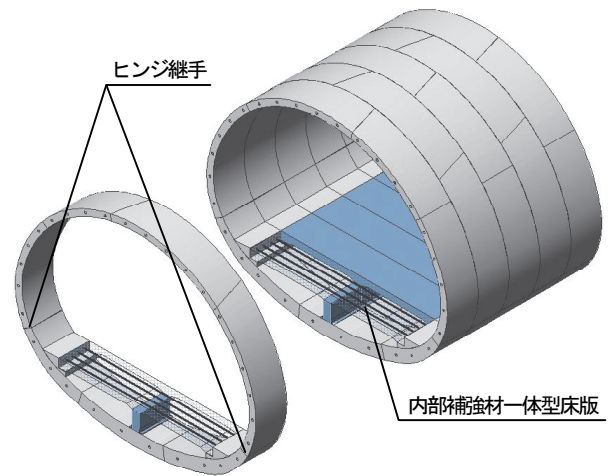


図-2 扁平型セグメントの概要

*技術本部土木部 **技術研究所

3. 扁平型セグメントの開発

3.1 断面形状の検討¹⁾

a. 前提条件の設定と検討内容

扁平型セグメントの形状は、山岳工法の標準的な断面(図-3)を基本としているものの、本断面形状をセグメントの設計に適用した場合、曲率半径が大きい

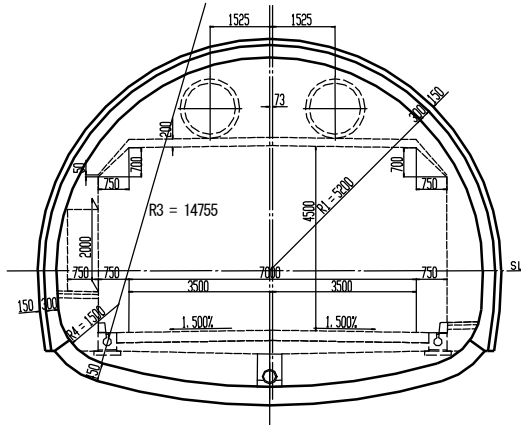


図-3 山岳工法 第1種第3級断面

インバート部から曲率半径の小さい下半側壁部において応力度が非常に大きくなる。本節ではセグメント開発の最初のステップとして、山岳工法の経済的な断面形状を確保しつつ、覆工応力度の低減を可能とする合理的な断面形状について検討を行った。

トンネル断面は、第1種第3級の2車線道路トンネルの建築限界を基本とする3つの外接円(アーチ、側壁部、インバート)で構成される形状とした。

表-1に各外接円の定義を示す。側壁部外接円は3つの外接円のうち曲率半径が最も小さく応力が集中すると考えられること、また道路トンネルの建築限界と接することから断面形状を特徴付ける円と位置付け、この円の曲率半径Rを断面形状のパラメータとしてセグメント応力度との関係を検証した。

R=3,000mmの場合の断面形状を図-4に示す。この場合の断面積は、同等の道路トンネルの建築限界を満

表-1 外接円の定義

外接円	設定条件
アーチ	縦流換気方式を基本として換気用ジェットファンの設置余裕代を考慮し、側壁部と接する円
側壁部	非常用設備空間と側溝底部に接し、外接円のアーチ及びインバートと接する円(曲率半径 R=1,500、2,000、2,500、3,000、3,500mmの5ケース)
インバート	側壁部と接する曲率半径 R=10,000mmの円

足する円形断面の約85%となっている。

また、本節では矩形や楕円形断面等のセグメントの応力軽減方法として知られている内部補強材の適用効果についても併せて検討した。

内部補強材は図-4に示すように引張抵抗部材として路盤下部レベルに水平方向に配置するものとした。

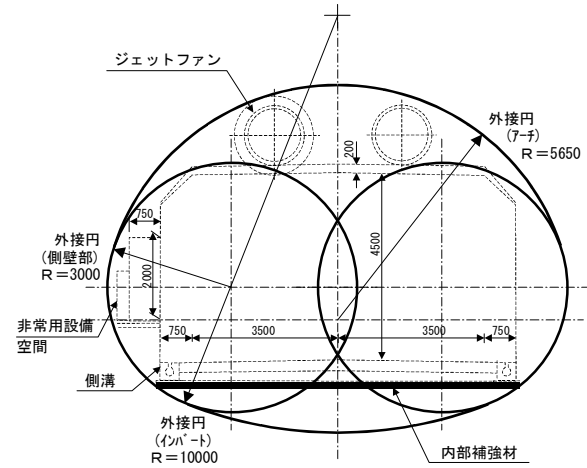


図-4 側壁部の曲率半径 R=3000 の断面形状の例

b. 計算条件

計算条件は、シールド工法と都市部山岳工法の両者が適用される洪積層や新第三紀の地盤を念頭において、一軸圧縮強度 $q_u=1.0\text{N/mm}^2$ 相当の比較的硬質な地盤を想定した。表-2に設定した条件を示す。設計荷重はゆるみ荷重とし、内部補強材はトラス要素として所定の位置に配置した。計算手法は慣用計算法を用いた。

c. 計算結果

R=3,000mmの場合のセグメント変位、軸力、せん断力、曲げモーメントの各分布を図-5に、R=3,000mmにおいて内部補強材を考慮した場合の結果を図-6に示す。

図-5より、インバート中央部では側壁部の水平方向の膨らみにもない大きな浮き上がり(鉛直方向 24.9mm)が発生しており、曲げモーメントも側壁部と

表-2 計算条件

項目	設定値
ゆるみ高さ	1D (D:トンネル幅)
地下水位	20m
地盤反力係数	100MN/m ³
側方土圧係数	0.4
土水の扱い	土水分離
地山の水中重量	10KN/m ³
内部補強材	H-250、750mmピッチ
セグメント厚さ	450mm

ともに大きくなっていることがわかる。

このことから断面形状がセグメント応力度におよぼす影響は、側壁部とインバート中央部の縁応力度を用いて比較するものとした。側壁部曲率半径 R の変化にともなうセグメント縁応力の変化を図-7に示し、結果を以下に要約する。

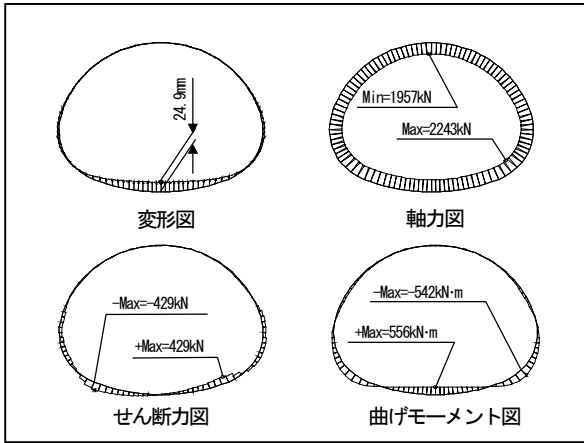


図-5 側壁部曲率半径 $R=3000$ の断面力 (内部補強材なし)

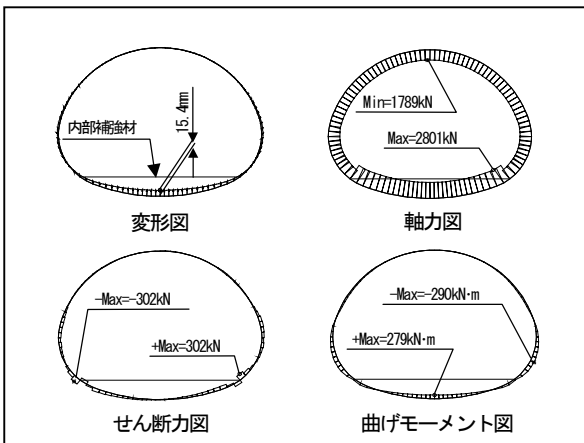


図-6 側壁部曲率半径 $R=3000$ の断面力 (内部補強材あり)

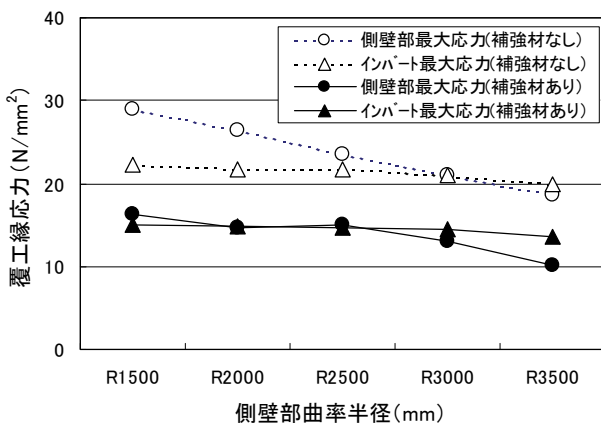


図-7 側壁部曲率半径と覆工縁応力度

(a) 内部補強材を設置しない場合

- i. 側壁部の縁応力度は R が大きくなるとともに減少する傾向を示し、インバートの縁応力度は R の大きさに関わらずほぼ一定となった。
- ii. 側壁部の縁応力度 $R=3,000\text{mm}$ でインバートの縁応力度と同等となることから、 $R=3,000\text{mm}$ が応力度の面からバランスの良い形状であると判断できる。

(b) 内部補強材の効果

- i. インバート浮き上がり量は、補強材を設置しない場合の約 60% に減少した。
- ii. 側壁部の縁応力度は、補強材を設置しない場合の約 55%~65% に減少した。
- iii. インバートの縁応力度は、補強材を設置しない場合の約 70% に減少し、減少率は R によらずほぼ一定であった。
- iv. 側壁部、インバートとも縁応力度の低減効果が大きく、断面形状の設定に関して応力度の面から制約が少なくなる。

3.2 扁平型セグメントの検討²⁾

a. 計算条件

計算条件を表-3に、前節での検討結果を考慮して想定した扁平型セグメントの試設計断面を図-8に示す。

セグメント厚さは、発生応力度が相対的に大きいインバート部を 600mm とし、アーチ部での最小厚さを 300mm とした。地盤反力係数は $k=10, 50, 100\text{MN/m}^3$ の3ケースとし、継手構造は完全千鳥組およびアーチ~インバート間(側壁部)ヒンジの2ケースを想定した。ヒンジ継手を設定した箇所ではトンネル軸方向に継ぎとなることから、継手構造の効果を確認するため、解析手法はリング間の影響を考慮したはりばねモデルとした。

表-3 計算条件

項目	設定値
ゆるみ高さ	1D (D:トンネル幅)
地下水位	20m
地盤反力係数	10、50、100MN/m ³
側方土圧係数	0.4
土水の扱い	土水分離
地山の水中重量	10KN/m ³
内部補強材	H-250、750mm ピッチ
セグメント厚さ	300~600mm
継手構造	完全千鳥組、上~下部間ヒンジ

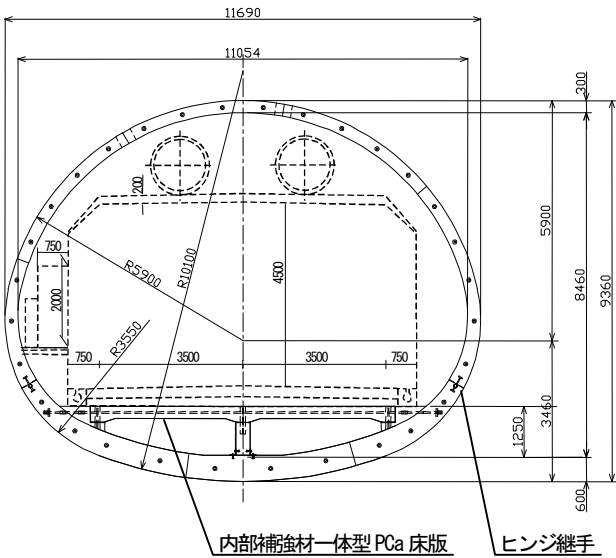


図-8 扁平型セグメント構造

b. 計算結果

(a) 扁平型セグメントの断面力軽減策①

継手構造を完全千鳥組とした場合の曲げモーメント分布を図-9に示す。本断面の上半部はモーメントが小さく桁高の薄肉化が可能であるが、インバート部に過大な正の曲げモーメントと斜め下方に過大な負の曲げモーメントが発生し、従来の RC セグメントの千鳥組構造では円形と比較し桁高・鉄筋量が増大することが確認できた。そこで、上半部の負の曲げモーメントの領域をできるだけ低減し、上半の広範囲の薄型化 (t=300mm) を図るため、側壁部をヒンジ構造とした (図-10 参照)。図より、上半部の負の曲げモーメントが大きく低減できていることが解る。

(b) 扁平型セグメントの断面力軽減策②

地盤反力が十分確保可能な地盤ではヒンジを有した構造でもインバートの断面力は過大とならない。しかし、地盤反力が十分確保出来ない領域や土圧が大きい領域ではインバート部の断面力が過大となり、覆工が成立しない状況となる。そこで前項の断面形状の検討

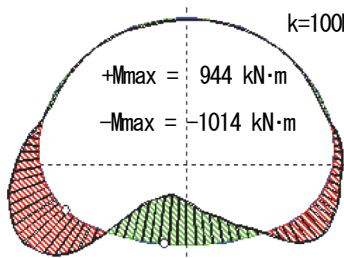


図-9 曲げモーメント (完全千鳥組構造)

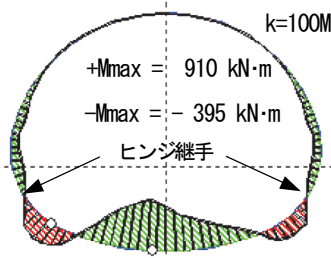


図-10 曲げモーメント (ヒンジ継手設定)

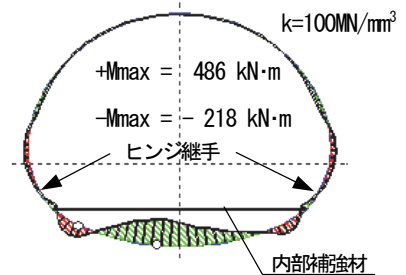


図-11 曲げモーメント (ヒンジ継手設定, 内部補強材設置)

において適用した内部補強材を PCa 床版と一体化し、発生断面力の低減効果を確認した (図-11 参照)。

c. セグメントの適用範囲の検討

扁平型セグメントは、地盤反力が十分確保できない地盤では断面力が非常に大きくなるため適用が困難である。そのためセグメントの適用範囲を把握することを目的に地盤反力をパラメータにした感度解析を実施した。

図-12 および図-13 は、下部セグメントの断面力による適用範囲をひびわれ性能曲線により判定した結果である。いずれも側壁部継手はヒンジ構造である。

補強部材なし (図-12 参照) では、地盤反力係数が 50MN/m³ 以上で適用可能となるが、50MN/m³ より低い場

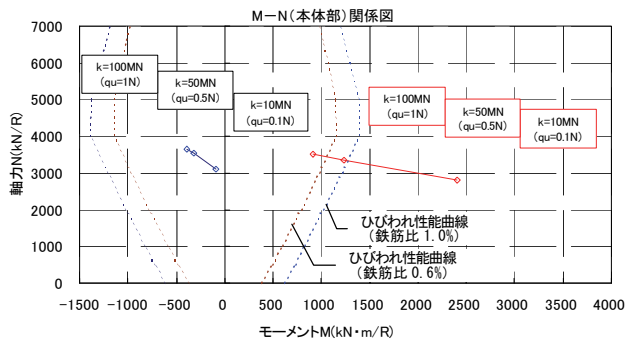


図-12 地盤反力をパラメータとした解析結果 (内部補強材なし)

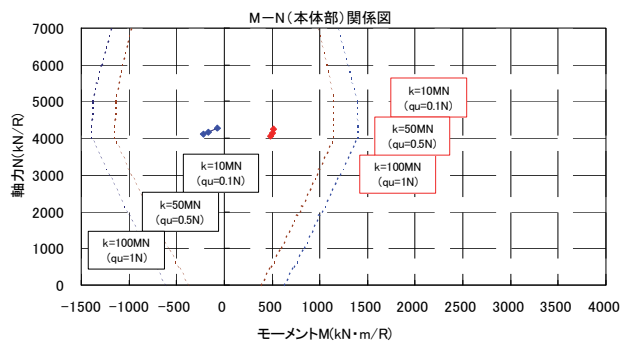


図-13 地盤反力をパラメータとした解析結果 (内部補強材あり)

合は正の曲げモーメントが増大し、 10MN/m^3 で適用困難となる。一方、補強部材あり（図-13 参照）では、変形量が著しく低減するため、 10MN/m^3 の比較的軟弱な地盤においても適用可能となることが確認できた。

4. 扁平型シールド機の開発³⁾

本工法は、シールド工法と都市部山岳工法の両者が適用される洪積層や新第三紀の地盤を念頭においており、主に以下に示す課題の解決を目標にシールド機の開発を進めている。

- i. 未切削部を残さないカッタ機構の開発
- ii. 上下非対象断面のシールド機の姿勢制御
- iii. $q_u=0.1\sim 10.0\text{N/mm}^2$ の広い範囲の地盤に対応する掘削機構

本項では、平成 17 年度に確認した i および ii について報告する。

4.1 カッタ機構の選定

扁平型断面の中心部は、円形カッタで硬質地盤を切削する方式を基本とし、残る側部の切削機構について検討した。表-4 に扁平型断面の切削が可能な主なカッタ機構の比較結果を示す。

多連カッタは、扁平断面側部の形状に合わせ複数のカッタを配置する機構であるが、未切削部が残る。

また、傾斜カッタはカッタを傾斜させて掘削断面を扁平にする方式であるが、多連カッタと同様に断面下部に複数のカッタが必要となる。

さらに、縦軸カッタは縦回転のカッタを配置し、

未切削部を少なくする機構であるが、主カッタ（円形カッタ）から隔壁までの距離が長く、切羽安定の信頼性が低い。

一方、可変ビームカッタは、扁平型断面側部を切削するカッタを主カッタのスポークに設置した伸縮ジャッキにより支持し、そのストローク量により張出し量を制御する機構となっており、構造がシンプルであるものの硬質地盤の切削性および伸縮制御に十分な検討が必要である。ただし、主カッタから隔壁までの距離は標準的なシールド機と同様に切羽安定への信頼性が高いと考えられる。

コストの面からは、縦軸カッタが要素試験に関わる開発費および機体重量に関わる製造費等で他の機構に比べて割高となる。

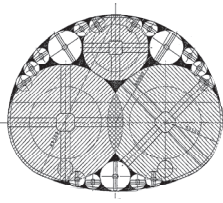
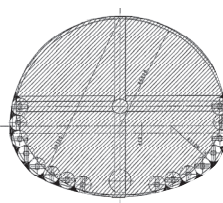
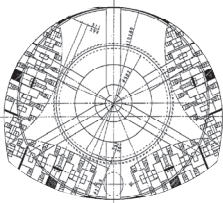
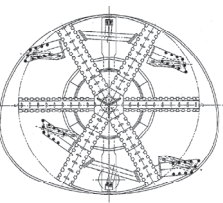
以上の比較より新規性があり、開発に関わる課題抽出が容易な点から『可変ビームカッタ』を本工法のカッタ機構として開発を進めることとした。

4.2 可変ビームカッタの特長

可変ビームカッタの特長を以下に示す。また、扁平型シールド機カッタ機構の構造図を図-14 に示す。

- i. スポーク間の角度と可変ビーム長の設定により、張出し量を任意に設定することができる。
- ii. 2本のスポークで荷重を受圧し、応力の発生を分散するため、強度の確保が可能である。
- iii. 可変ビームカッタのビットは、地山に対して常に一定方向に周動するため、玉石、礫等を主体とした地山に対しても切羽を乱すことが少なく、安定した掘削が可能である。

表-4 扁平型シールド機カッタ機構の比較

形式	多連カッタ	傾斜カッタ	縦軸カッタ	可変ビームカッタ
特長	断面全域に複数の径の異なる円形カッタを配置	カッタを傾斜し、断面下半部に複数の小円形カッタを配置	円形カッタの外側に4基の縦軸カッタ(トリミングカッタ)を配置	円形カッタのスポークに2基の伸縮式カッタ(可変ビームカッタ)を配置
形状図				
主な課題	・未切削部が残る	・未切削部が残る ・姿勢制御に検討を要する	・未切削部が残る ・円形カッタ～隔壁間が長い	・可変ビームカッタの伸縮制御、切削性能に検討を要する
コスト	○	○	△	○
評価	○	△	△	◎

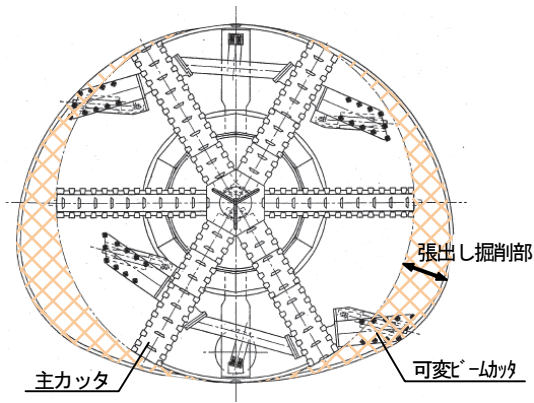


図-14 カッタ構造

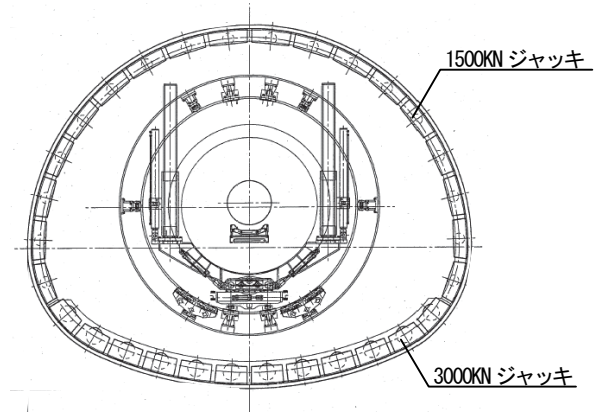


図-16 シールドジャッキ配置

4.3 姿勢制御の検討

扁平型シールド機は断面下半部に図心があるため、シールド機前面に作用する土水圧中心の高さおよびシールド機自重中心の位置は円形のシールド機に比べて低く、従来のシールドジャッキの均等配置では掘進中の姿勢制御に課題があると考えられた。

本工法は道路トンネルの施工を主なターゲットとしていることから曲線施工等の水平方向に関わる方向制御については従来のシールドジャッキの選定による対応が可能であると考えられるため、本開発では掘進中の機体の上下方向に関わるシールドジャッキの配置について検討した。

上下方向の姿勢制御に関わる主な荷重は、図-15に示すようにシールド機前面に作用する土水圧(P1)、シールド機自重(P2)、シールドジャッキ推力(P3)である。これら3つの荷重のバランスから推力を算定し、シールドジャッキを配置することにより(図-16参照)、機体の上下方向に関わる姿勢制御が可能と考えられる。

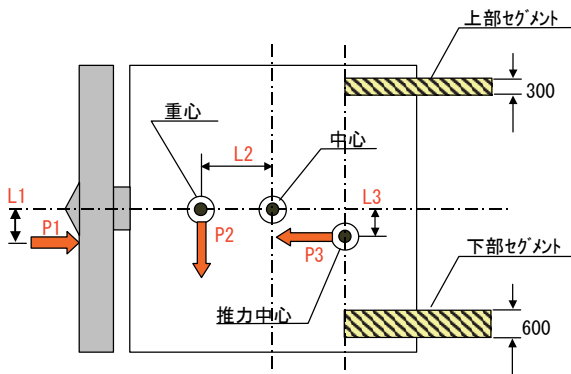


図-15 シールド機の荷重バランス

5. おわりに

扁平型断面シールド工法は、扁平型セグメントおよび扁平型シールド機の基本構造の検討により、実現可能な工法であることを確認した。

今後は本工法の信頼性を図るため、扁平型セグメントについては継手構造および強度確認試験等の実施、扁平型シールド機については可変ビームカッタの伸縮制御と硬質地盤の切削性能試験等を実施する計画である。

なお、経済性については、従来のシールド工法に比べて大幅な低減を目標としており、上記の試験結果を踏まえ、次号に詳細を報告する。

最後に、本開発は、首都大学東京 都市環境学部 西村和夫教授にご指導を賜り、ここに深く感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 田中雅彦、浅野剛、荒川賢治、「扁平型断面シールド工法の開発(その1:合理的な断面形状に関する検討)」平成18年度全国大会第61回年次学術講演会、土木学会(投稿中)
- 2) 橋口彰夫、橋本博英、田中雅彦、「扁平型断面シールド工法の開発(その2:扁平型セグメントの開発)」平成18年度全国大会第61回年次学術講演会、土木学会(投稿中)
- 3) 吉田譲、伊藤広幸、田中雅彦、「扁平型断面シールド工法の開発(その3:扁平型シールド機の開発)」平成18年度全国大会第61回年次学術講演会、土木学会(投稿中)