

チャンバー内掘削土の塑性流動性評価と 可視化ツールの開発

杉山 博一¹・島 厚夫²・原 忠²・小瀧 伸也²・渡邊 洋輔²

¹正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

E-mail: sugiyama.h@shimz.co.jp

²正会員 清水建設株式会社 土木事業本部 (〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1)

E-mail: a.shima@shimz.co.jp

土圧式シールドの切羽管理の一環として、チャンバー内掘削土の塑性流動性をリアルタイムに評価、可視化する技術が注目されている。筆者らは、切羽土圧データの中に攪拌翼等の接近に伴う土圧変動の大小が塑性流動性と相関関係にあることを明らかにした。また、そのデータからチャンバー内全体の塑性流動性を推定し、可視化するツールを開発した。このツールを実際の工事に適用して切羽管理に活用したところ、加泥材注入率やカット回転方向、切羽土圧の変化に伴って塑性流動性が変わり、それを表示できるツールであることを確認した。

Key Words : *earth pressure balanced shield, plastic fluidity of muck, muddy soil pressure, Fourier analysis*

1. はじめに

土圧式シールドにおいて切羽の安定を確保するためには、掘削土の塑性流動性、切羽土圧、掘削土量等の管理が重要である。近年、大断面トンネルでも土圧式シールドが採用されるようになったため、チャンバー内掘削土の塑性流動性を監視する技術の必要性が高まっている。

従来、チャンバー内掘削土の塑性流動性の管理方法は、スクリーコンベヤーから排土された土を目視や触診といった形で経験的な判断をするか、あるいはスランプ試験、ベーンせん断試験等により定量的に管理する方法をとってきた。しかし、排土された土だけでは大断面シールドのチャンバー内全体が塑性流動化しているかどうかを判断することは難しい。最近では、チャンバー内掘削土の塑性流動性を評価する方法として、直接的に掘削土のせん断抵抗を測定する方法などが提案されている。

土圧式シールドでは、切羽土圧の管理のために隔壁前面に土圧計を設置し、常時監視している。昨今、大断面シールドでは、土圧計を複数箇所に取り付けている場合が多く、チャンバー内全体の土圧分布を計測できるようになっている。筆者らは、これらの土圧データから塑性流動性を間接的に評価できるのではないかと発想し、ある工事の土圧データを試験的に分析したところ、攪拌翼の接近に伴う土圧変動が塑性流動性と関連している可能

性が高いことを明らかにした¹⁾。さらに、別の工事でデータ収集し、土圧データから計算した標準偏差やフーリエ解析から得られた振幅と塑性流動性の関係を検討した²⁾。また、添加材の種類や添加率を考慮した要素実験により、土圧データから計算した標準偏差やフーリエ解析から得られた振幅が塑性流動性と相関があることを確認した³⁾。これらの塑性流動性指標値は土圧計位置ごとの離散的な値であることから、チャンバー内の任意の位置での指標値を面的に推定する方法を考案し、可視化するツールを開発した⁴⁾。

本報告では、これまでの検討結果をまとめるとともに、可視化ツールの工事への適用結果を新たに報告する。

2. 泥土の塑性流動性評価方法

筆者らは、攪拌翼が土圧計近傍を通過する際の圧力変動が塑性流動性と関連しているのではないかと発想した。しかし、計測された土圧データには、図-1左に示すように、シールドジャッキ操作や、スクリーからの排土など、チャンバー内全体で同時に起こる圧力変動と、攪拌翼が土圧計近傍を通過する際の局所的な圧力変動が含まれていると考えた。

そこで、土圧データから全体的な変動を消去する方法

として、複数ある土圧計データの平均値を算出し、それぞれの土圧データから差し引くことで、局所的な変動だけを抽出することを試みた。以後、この計算された土圧を平均値からのずれという意味を込めて、偏差土圧と呼ぶ。偏差土圧には図-1右に示すように、攪拌翼の接近による影響（変動）が残ると考えた。この変動を定量化する方法として、標準偏差と、フーリエ解析する方法があると考えた。

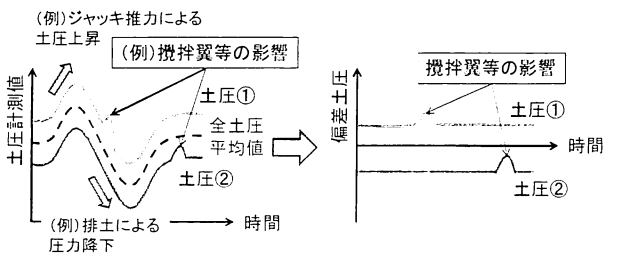


図-1 土圧データ（左）と偏差土圧（右）の概念図

(1) 標準偏差

偏差土圧の変動の大小を簡易に判定する方法として、ある時間範囲の偏差土圧データを用いて標準偏差を算定した。標準偏差が小さければ、変動が小さい、つまり軟らかい土であると判定し、標準偏差が大きければ、変動が大きく、硬い土であると判定できると考えた。

(2) フーリエ解析

図-2左側に示すように、偏差土圧には、攪拌翼やスポークが接近することによる周期的な変動（波）が含まれていると考えた。ある時間範囲の偏差土圧データを用いてフーリエ解析を行い、図-2右側に示すように攪拌翼が接近する周期付近の波の振幅（以後、フーリエ振幅と記す）が算定され、その大小により掘削土の塑性流動性を判定できると考えた。

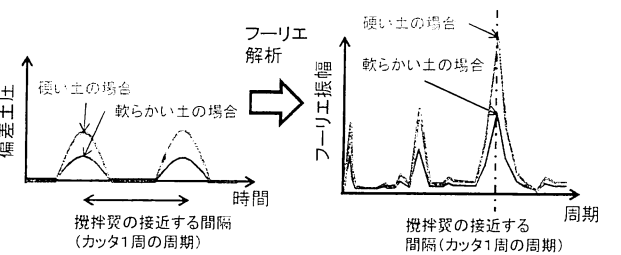


図-2 フーリエ解析の概念図

3. 塑性流動性評価方法の妥当性の確認

偏差土圧の標準偏差や、フーリエ振幅から間接的に塑性流動性を評価する方法の有効性を検証するため、さまざまな流動性の土を対象に要素実験を実施した。

実験では、圧力作用下のチャンバー内を模擬し、掘削

土を攪拌しながら土圧変動を計測できる土槽を用いて実験を行った。

(1) 実験装置

図-3に実験装置の模式図を示す。土槽部は内径60cm、高さ30cmであり、被圧下のチャンバー内を模擬できるように土槽側壁にプレッシャーバッグが取り付けられている。土槽中央部には攪拌棒を回転できる装置が取り付けられており、土槽底部にはφ5cmの攪拌棒が離隔5cmで土圧計の真上を通過するようになっている。実験では、さまざまな塑性流動状態の土を入れ、加圧下で攪拌した場合の攪拌棒の接近に伴う土圧変化を測定した。

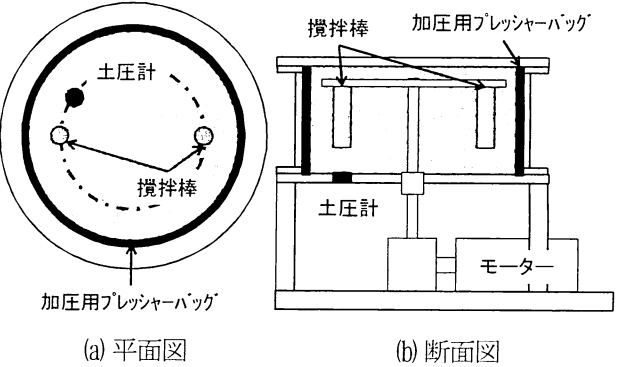


図-3 実験装置の模式図

(2) 実験方法と条件

実験条件を表-1に示す。コンクリート用細骨材に添加材（ベントナイトや気泡材）を加え、その添加率を変えることにより、塑性流動状態を変化させた。実験ケースは、ベントナイトで6ケース、気泡材で10ケースである。塑性流動性の良し悪しは、スランプや触感で判断した。本実験では、ベントナイトを加えた場合はスランプ5～8cm、気泡材を加えた場合はスランプ1.5～3cmが塑性流動性良好状態と判断した。作用圧は0～250kPaの範囲を25kPa間隔で変化させ、攪拌翼の回転速度は実際のシールド機の回転速度に合わせ4.9m/分と設定した。

表-1 実験条件

土試料	コンクリート用細骨材	
添加材	ベントナイト	気泡材
添加率 (%)	22.5～35	10～30
スランプ (cm)	3.8～12.0 (6 ケース)	0.7～12.8 (10 ケース)
触感で判定した理想的なスランプの範囲 (cm)	5～8	1.5～3
作用圧 (kPa)	0～250	0～100

(3) 実験結果

ベントナイトを22.5%添加し、作用圧を25kPa間隔で増加させたケースの土圧計測結果を図-4に示す。図から分かるとおり、攪拌翼が接近する周期で土圧が変動を繰り返している。また、図-5に図-4と同じケースで作用圧が200kPaの時のデータを用いてフーリエ解析した結果を示す。フーリエ振幅は攪拌翼の周期（4 rpm）である7.5秒と15秒付近にピークが表れており、攪拌翼による影響が抽出できていることが分かる。

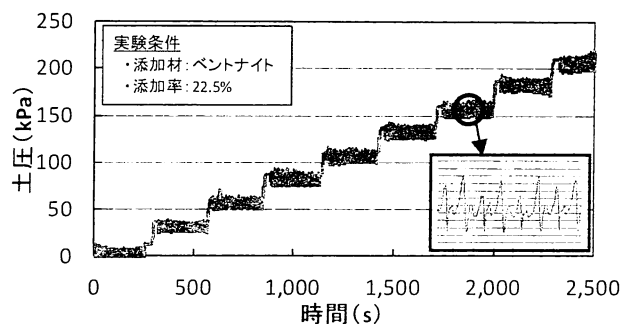


図-4 土圧計測値

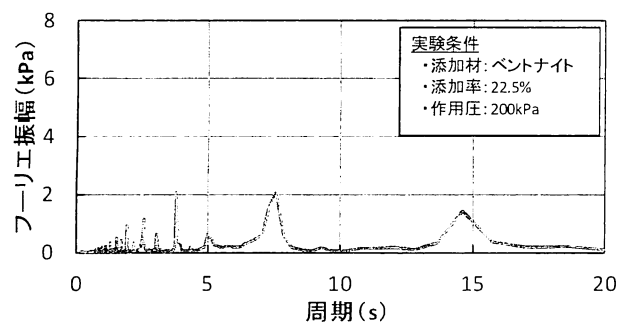


図-5 フーリエ解析結果（一例）

各ケースのそれぞれの圧力段階で標準偏差を算出し、スランプ（塑性流動性）との相関を求めた。図-6にベントナイト系添加材、図-7に気泡材を添加した場合の結果を示す。また、同様にフーリエ解析を行い、攪拌棒が近づく周期7.5secでのフーリエ振幅を抽出してスランプとの相関を求めた。図-8にベントナイト系添加材、図-9に気泡材を添加した場合の結果を示す。

実験結果より、スランプが小さく硬い土では、標準偏差とフーリエ振幅は大きくなり、スランプが大きく軟らかい土では標準偏差とフーリエ振幅が小さくなる傾向が分かる。また、作用圧が増加するほど、土の有効応力の増加に伴って硬くなり、標準偏差とフーリエ振幅が大きくなることも分かる。したがって、標準偏差とフーリエ振幅は、土の塑性流動性を判定するための指標として取り扱えることが分かる。

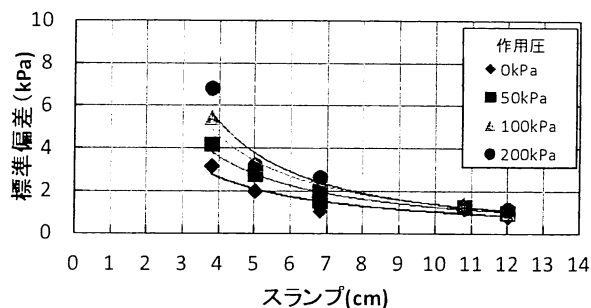


図-6 スランプと標準偏差の関係（ベントナイト系添加材）

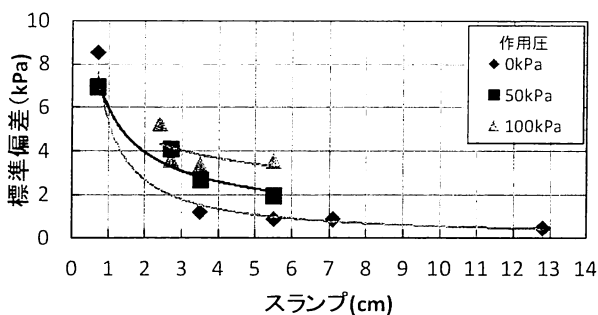


図-7 スランプと標準偏差の関係（気泡材）

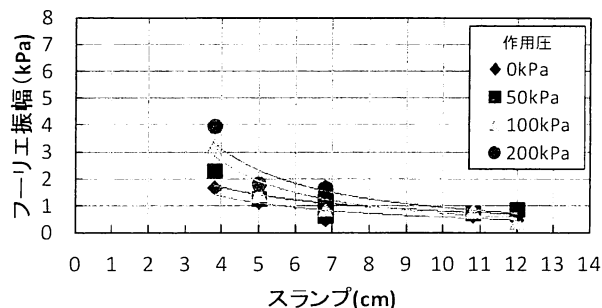


図-8 スランプとフーリエ振幅（ベントナイト系添加材）

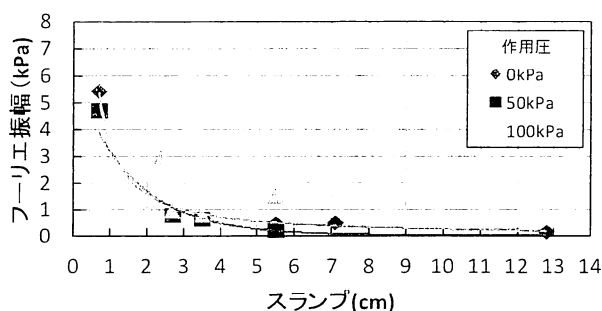


図-9 スランプとフーリエ振幅（気泡材）

4. 塑性流動性可視化ツールの開発と適用

(1) 工事の概要

本評価方法を用いた塑性流動性可視化ツールを工事に試験的に採用した。図-10に工事の平面図、および縦断面図を示す。土質は、前半は掘削断面のほとんどが洪積砂質土が主体の地盤、後半は強風化岩～軟岩である。本工事では、加泥材としてベントナイトや気泡材を加えて掘進を行い、平成23年10月に掘進完了している。図-11に示すように、シールド機の外径は4.4mであり、土圧計は攪拌翼の1つが土圧計の直近を通過するようほぼ同心円上の6か所に配置した。また、土圧の計測間隔は、土圧計近傍で4点程度計測できるよう0.25秒とした。

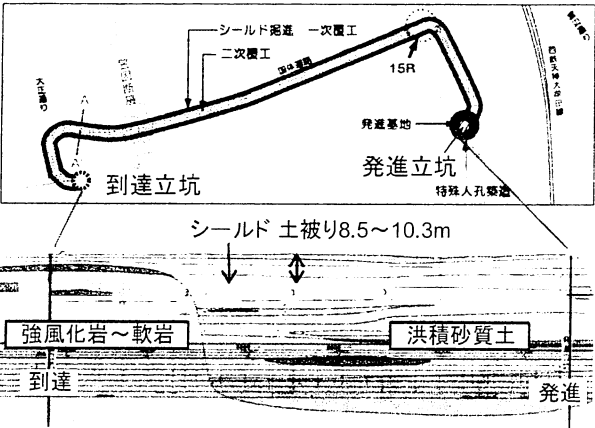


図-10 工事の平面図と縦断面図

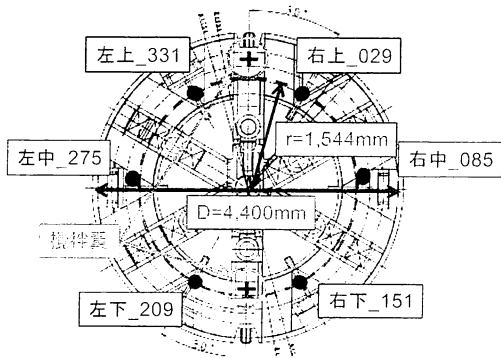


図-11 土圧計の設置位置

(2) 施工結果の概要

後述する塑性流動性の判定結果と施工条件が比較できるように、図-12～16に掘進時にジャッキストロークが100mm伸びるごとに計測されるデータを平均したジャッキスピード、ジャッキ推力、カッタートルク、切羽土圧、加泥材注入率を参考までに示す。施工側で管理できるジャッキスピード、切羽土圧、加泥材注入率は土質の変化に伴い変えていることが分かる。カッタートルクについては、岩盤部で加泥材注入率が高く設定されているために洪積砂質土部よりも若干小さい。

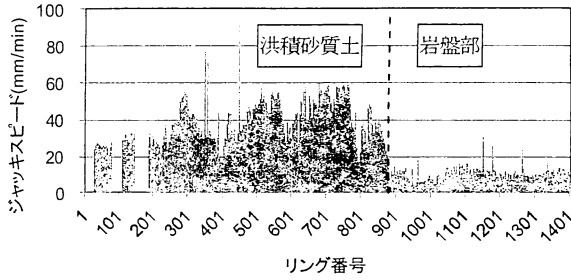


図-12 平均ジャッキスピード

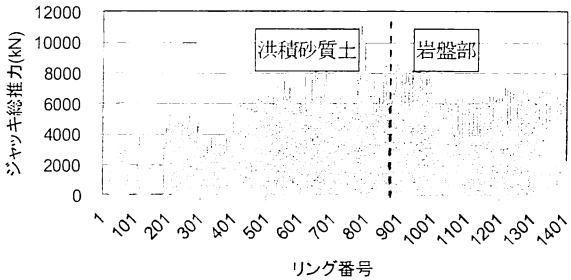


図-13 平均ジャッキ総推力

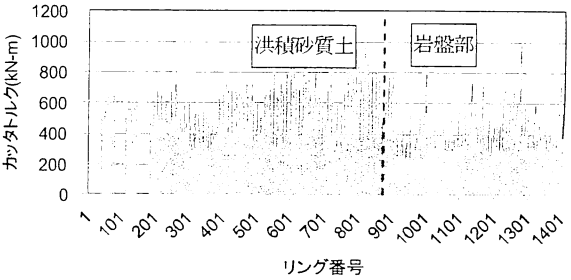


図-14 平均カッタートルク

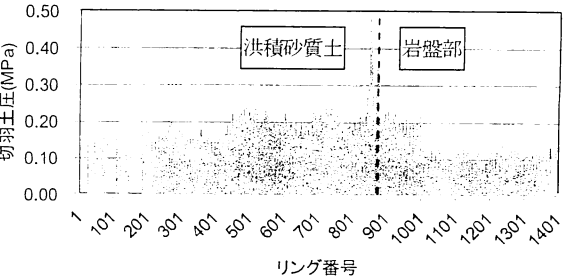


図-15 平均切羽土圧

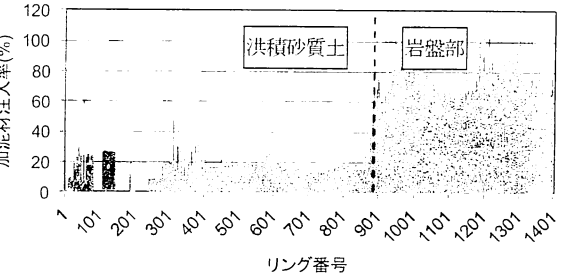


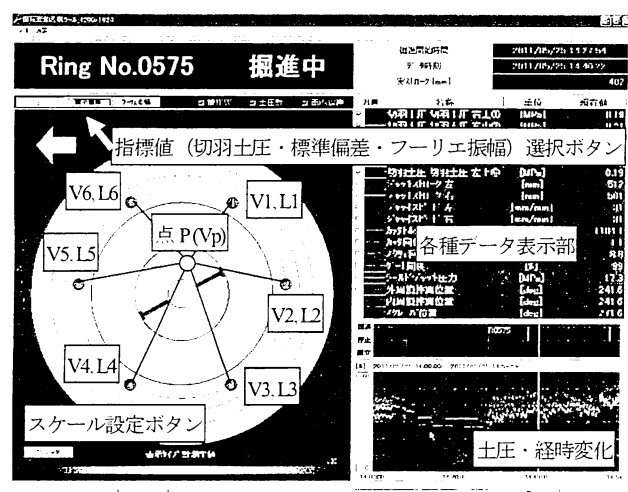
図-16 加泥材注入率

(3) 可視化ツールの概要

図-17に可視化した画面のイメージを示す。左半分にはチャンバー全体の状況を示す図、右半分にはそれぞれのデータを値として表示する部分に分けられている。

チャンバー全体の状況を示す指標値として、切羽土圧と、塑性流動性を判定するための標準偏差、およびフーリエ振幅の3種類が選択できる。

それぞれの指標値を面的に補間する方法について説明する。任意の点Pの指標値 V_p を算出するため、各土圧計での指標値 ($V1 \sim V6$) それぞれに、土圧計からの距離 ($L1 \sim L6$) に応じた重みづけ係数 α_n ($\sum \alpha_n = 1$) を乗じ、その総和を求めることとした。これを全ての画素点で計算して表示している。



$$V_p = \alpha_1 V1 + \alpha_2 V2 + \alpha_3 V3 + \alpha_4 V4 + \alpha_5 V5 + \alpha_6 V6$$

図-17 可視化画面のイメージと任意の点Pの指標値計算方法

標準偏差、フーリエ振幅の指標値を計算するためには、現時点から一定時間遡ったデータを参照する必要がある。ここでは、標準偏差は過去1分間、フーリエ振幅は10分間のデータを参照することとしている。その理由として、標準偏差では直近の変化を捉えやすくするために短めとした。一方、フーリエ振幅は、攪拌翼が接近するのは1分間に1回前後となるため、信頼性の高いフーリエ振幅を計算するためには長めのデータが必要であり、今回は10分間のデータを参照することとした。

(4) 可視化ツールの適用結果

施工時のデータと可視化ツールによる表示結果を2種類示し、可視化ツールの適用結果を考察する。

表中に示した掘進速度、総推力、カッタートルク、スクリー回転数、カッター回転数、 γ 密度計はジャッキストロークが100mm伸びるごとに計測された値である。

カッター回転数は右回りを正、左回りを負の値で示した。また、加泥材注入率は、100mm区間ごとの計画土量に対する加泥材の注入量の比率として計算した結果を示している。さらに、掘進中に排土された土を用いてスランブ試験を行ったので、実施したタイミングに併せて表中に示した。

また、可視化画面の色は、下限値側（掘削土が軟らかい場合）は青、中間部は白、上限値側（掘削土が硬い場合）は赤で表示されている。

a) 洪積砂質土 (No. 575リング)

表-2に洪積砂質土での一例としてNo.575リングでの施工データと可視化ツールによる表示結果を示す。本リングでは、すべての段階において施工時データが安定しており、塑性流動性の指標値（標準偏差、フーリエ振幅）も多少の変化は見られるものの、おおむね安定していると言える。900～1100mm付近でフーリエ振幅が赤くなっているが、これは切羽土圧が高めになってきたことが影響しているかもしれない。

なお、ジャッキストローク1000mmの時の標準偏差が全体的に赤くなっているが、これは直前にスクリー回転数が大きくなったことに伴う圧力変動が大きかったことが原因と思われる。

b) 岩盤部 (No. 1281リング)

表-3に岩盤部の一例としてNo.1281リングでの施工データと可視化ツールによる表示結果を示す。なお、本リングではジャッキストロークが1200mmに達する直前に掘進終了となっているため、その部分のデータが欠損している。その代わりに1195mm位置での指標値のみ示した。

本リングでは、洪積砂質土の例に比べるとスランブも低いことから、塑性流動性の指標値も全体的に高い（塑性流動性が悪い）結果となっている。ただし、ジャッキストロークが700～800mm付近や1100mm付近では、加泥材の注入率を若干増加したことと、あるいは、カッターの回転を反転させたことによって塑性流動性が改善されていることが分かる。

なお、800mm付近のフーリエ振幅が青く表示されている理由として、直前（過去10分以内）に掘進停止していた時間があつたためその影響を受けたものである。それに対して標準偏差は、過去1分間のデータを用いていることから、掘進停止の影響を受けず信頼性の高い判定結果になっていると思われる。

表-2 洪積砂質土 (No.573 リング) での施工状況と塑性流動性評価結果の比較

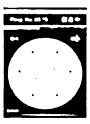
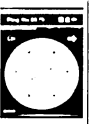
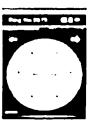
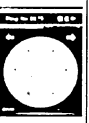
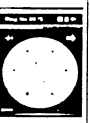
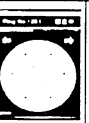
ジャッキストローク(mm)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
掘進速度(mm/min)	35	34	33	33	33	32	32	31	31	31	30	29
総推力(kN)	5928	6084	6420	7248	7032	7104	7308	7080	7428	7128	7216	6530
カッタートルク(kN*m)	1007	1077	1033	1129	1050	1068	1059	1042	1129	1042	1068	945
スクリー回転数(rpm)	11.6	11.1	11	11.1	10.5	10.6	10.7	10.7	14.7	10.8	8.9	8.9
カッター回転数(rpm)	-1.12	-1.11	-1.13	-1.14	-1.11	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1	-1.11	-1.1	-1.11
加泥材注入率(%)	9.6	9.9	10.3	9.7	10.1	10.8	9.9	9.9	9.7	9.7	9.4	9.9
γ密度計(g/cm ³)	1.45	1.48	1.47	1.46	1.47	1.48	1.48	1.44	1.44	1.47	1.46	1.45
スランプ(cm)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.8	—	—
切羽土圧 (0.1~0.3MPa)												
標準偏差 (0~10kPa)												
フル振幅 (0~10kPa)												

表-3 岩盤部 (No.1281 リング) での施工状況と塑性流動性評価結果の比較

ジャッキストローク(mm)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1195
掘進速度(mm/min)	12	11	11	11	11	11	10	10	10	10	10	
総推力(kN)	6960	6790	6929	7112	7085	7085	6936	6838	6643	7084	6846	
カッタートルク(kN*m)	1322	1374	1252	1182	1024	1015	875	1147	1173	1120	1015	
スクリー回転数(rpm)	3.4	5.6	5.1	6	8.5	10.5	8.8	8.8	6.7	6	4.9	
カッター回転数(rpm)	1.19	1.11	1.14	1.16	1.17	1.17	-1.15	1.17	1.16	-1.15	1.17	
加泥材注入率(%)	31.1	34.2	32.4	35.9	38.8	39.5	44.2	42.0	33.4	36.4	41.1	
γ密度計(g/cm ³)	1.32	1.35	1.35	1.34	1.33	1.3	1.29	1.3	1.31	1.33	1.34	
スランプ(cm)	—	—	3.5	—	—	—	4.0	—	—	—	3.0	—
切羽土圧 (0.0~0.3MPa)												
標準偏差 (0~10kPa)												
フル振幅 (0~10kPa)												

5. まとめ

土圧式シールドのチャンバー内掘削土の塑性流動性を評価、可視化することを目的とし、土圧データから塑性流動性を評価する方法と、その評価結果を可視化するツールを開発した。

計測される土圧データから攪拌翼の接近に伴う土圧変動成分を抽出し、その大小に応じて塑性流動性を評価する手法を提案した。具体的には、土圧データから全体的に生じる土圧変動を消去するため偏差土圧を計算し、その変動の大小を評価するために標準偏差やフーリエ振幅を算出して塑性流動性を評価する方法を考案した。

この評価方法の妥当性を検証するため、様々な塑性流動状態の土試料を用い、圧力作用下で攪拌しながら圧力変化を計測する要素実験を行った。その結果、スランプと塑性流動性指標値（標準偏差とフーリエ振幅）が相関関係にあることを確認した。

これらの塑性流動性指標値は土圧計位置での離散的なデータであるため、面的に補間する方法を考案し、チャンバー全体の塑性流動性を推定、表示できるツールを開発した。

本ツールを実工事に適用し、施工データと比較したところ、加泥材注入率の増加、カッターの反転などにより塑性流動性が改善された例や、切羽土圧の増加により塑

性流動性が悪化した例が確認できた。

今後は、本可視化方法を様々な施工条件の工事に適用し、さらに知見を蓄積し、より精度の良い塑性流動性の可視化方法を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 中川拓也, 杉山博一, 菅沼和好, 鎌倉友之: チャンバー内土圧計測から掘削土の塑性流動性を評価する方法の検討, 第 65 回年次学術講演会講演概要集, 6-252, 土木学会, 2010.
- 2) 小瀧伸也, 杉山博一, 安部透, 島厚夫, 風早謙一: チャンバー内土圧計測から掘削土の塑性流動性を評価する方法の検討 (その 2), 第 66 回年次学術講演会講演概要集, 6-019, 土木学会, 2011.
- 3) 渡邊洋輔, 杉山博一, 島厚夫, 安井克豊, 小瀧伸也: チャンバー内土圧計測から掘削土の塑性流動性を評価する方法の検討 (その 3), 第 67 回年次学術講演会, 6-146, 土木学会, 2012.
- 4) 小瀧伸也, 杉山博一, 島厚夫, 原忠, 渡邊洋輔: チャンバー内土圧計測から掘削土の塑性流動性を評価する方法の検討 (その 4), 第 67 回年次学術講演会, 6-147, 土木学会, 2012.

(2012.9.3 受付)

EVARUATION AND VISUALIZATION METHOD OF MUCK FLUIDITY IN A CHAMBER OF EARTH PRESSURE BALANCED SHIELD

Hirokazu SUGIYAMA, Atsuo SHIMA, Tadashi HARA,
Shinya KOTAKI and Yosuke WATANABE

As part of the excavation management of earth pressure balanced shield, real-time monitoring technology of plastic fluidity of excavated soil has been attracting attention. The authors showed that the magnitude of plastic fluidity correlates with earth pressure fluctuations of excavated soil due to the proximity of the mixing blades attached to cutter head. In addition, we have developed a software to estimate and visualize the plastic fluidity of the entire chamber. As a result of applying this software to a construction site, we confirmed that the plastic fluidity could be evaluated according to a change in direction of rotation of a cutter face, additives injection and earth pressure of excavated soil.