

10. 災害発生原因推定のための数値解析シミュレーション

10.1 切羽圧低下に関する3次元有限要素解析

10.1.1 はじめに

当該災害発生直前に掘進管理システムに計測されたシールドマシン前面に設置された土圧計の急激な圧力の低下挙動を図10.1.1に示す。12:06:02秒から土圧計の値は245kPaから急激に低下し、約1分後の12:07:10には155kPaまで低下した。その時刻以降は掘進管理システムの数字が同じ値を記録していることから、それ以降は何らかの理由により計測不可となったものと思われる。12:06:02はBセグメントを挿入するためにジャッキを引き抜いた時間であることや証言等を総合的に判断するとKセグメント抜け出しによって水や土砂がシールドマシン内に流入した可能性があり、それがシールドマシン前面の土圧に影響を与えたと考えられる。

ここでは、Kセグメント抜け出しによる隙間発生によってシールドマシン前面の土圧計が図10.1.1のような低下挙動をするかについて、3次元有限要素法による非定常浸透流解析を実施し、計測データとの比較を行った。

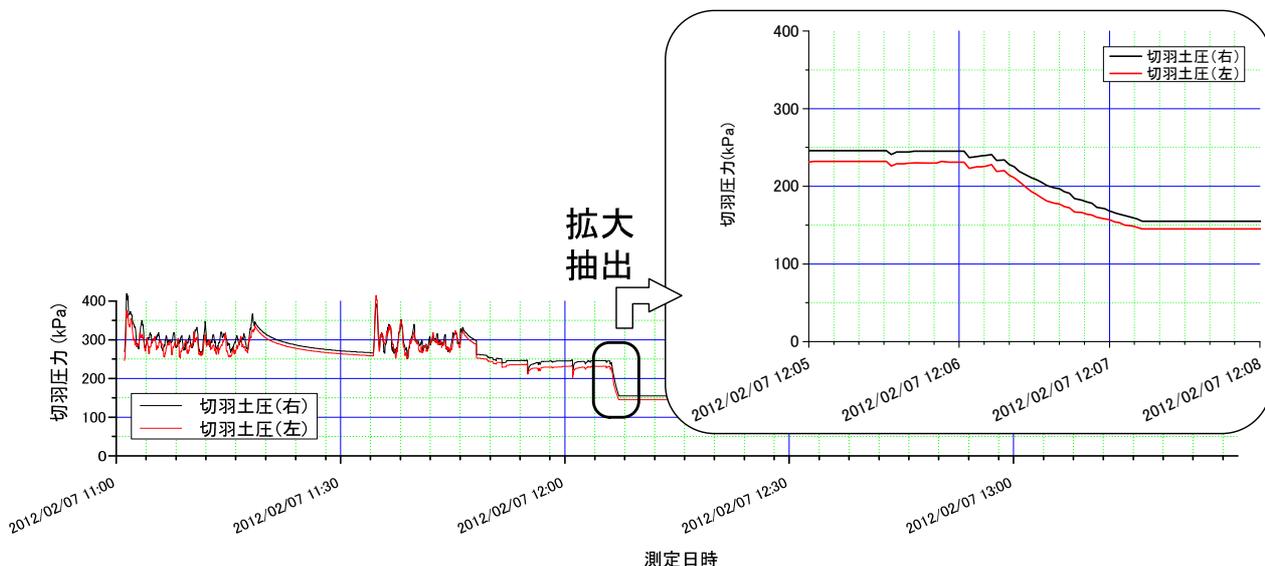


図 10.1.1 112 リング組立中の切羽圧力低下挙動

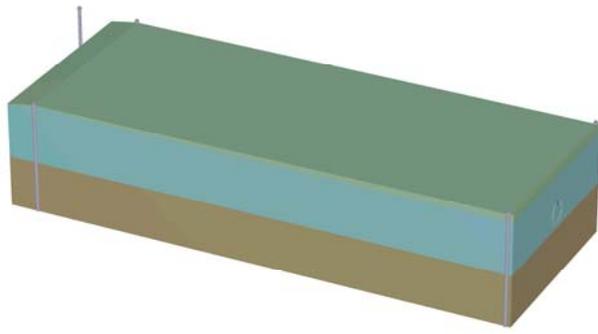
10. 1. 2 有限要素法 (FEM) による非定常浸透流解析の概要

(1) 有限要素法とは

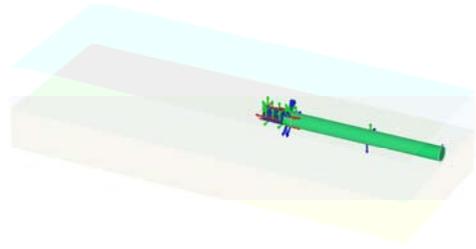
有限要素法は、航空機の翼の詳細な強度計算を行うために開発されたものであり、連続的な物体を有限個の「要素」に分割して各要素の特性を単純な数学的モデルで近似し、連立方程式の形にして全体の挙動を解析するものである。有限要素法は、土木分野では橋梁、トンネル、高速道路、ダム of 強度計算や津波、河川の流れ計算に、建築関係では高層ビル、大型ドームの設計計算などに利用されている。また、複雑な形状の解析が容易であり、汎用プログラムが作りやすく、強力な機能を有する汎用プログラムが市販されている。

(2) 使用した解析プログラム (ソフトウェア)

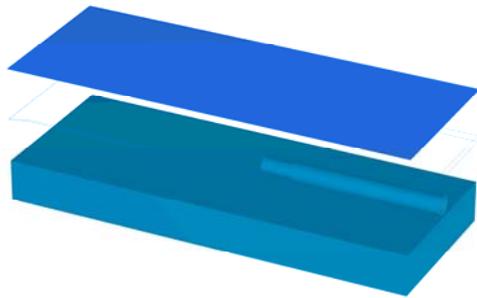
有限要素法による切羽圧低下に関する再現シミュレーションには地盤専用有限要素法ソフトウェア PLAXIS 3D 2013 (オランダ PLAXIS B. V.社製) を使用した。オランダ PLAXIS B V 社製の PLAXIS シリーズは、全世界で 7000 ライセンス以上の販売実績があり、主に欧州では設計基準 (Eurocode7&8) にて PLAXIS による 2次元を中心とした FEM 解析が行われているため、標準的な解析ソフトとして利用されている。



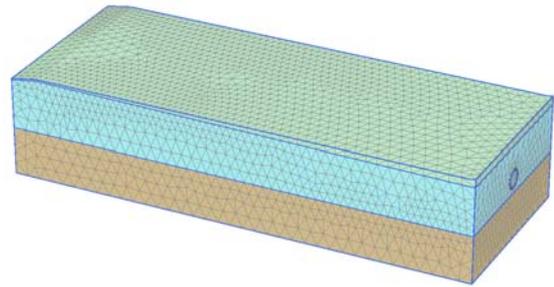
地層構成



構造物（セグメント、シールドマシン）

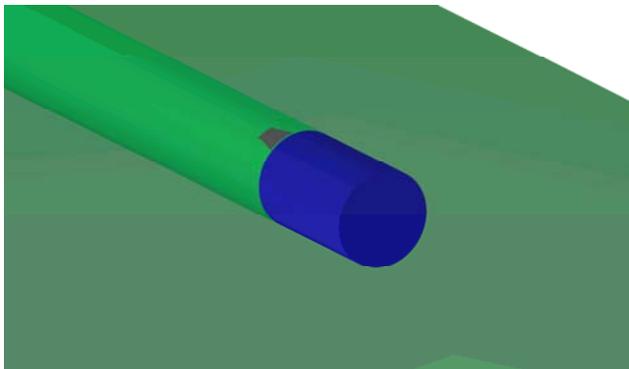


水位面設定箇所

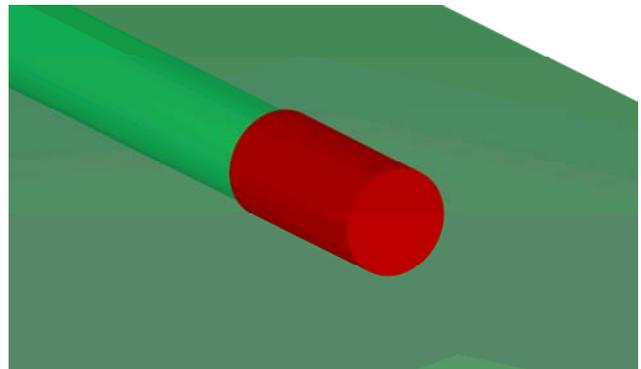


メッシュ図

図 10.1.3 解析領域のモデル化



(a) シールドマシンとセグメント（セグメント破損領域（1400mm 破損）



(b) シールドマシンとセグメント周辺部を厚さ 0.25m のオーバーカットによる透水性が良い領域で覆う

図 10.1.4 シールドマシン周辺箇所のモデル化（抽出図）

(2) 地盤パラメータと透水係数の設定

事業者作成「水島第二パイプライン防護設備建設工事 平成22年度詳細設計 設計計算書(その1)」¹⁾から、下記の地盤パラメータを使用した。

表 10.1.1 地盤パラメータ

土質	記号	平均 N 値	単位体積重 量 γ (kN/m ³)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦 角 ϕ ^{*2} (deg)	変形係数 E ₀ (kN/m ²)	ポアソ ン比 v _d ^{*5}
埋土層	F	3	18.0 ^{*1}	0	22	8,800 ^{*4}	0.40
沖積第1砂質土層	As1	5	18.0 ^{*1}	0	24	12,000 ^{*3}	0.40
沖積粘性土層	Ac	2	17.4	67	0	11,600 ^{*3}	0.45
洪積第1砂礫層	Dg1	43	19.0 ^{*1}	0	40	118,000 ^{*4}	0.30
洪積第2砂礫層	Dg2	50	20.0 ^{*1}	0	42	137,200 ^{*4}	0.30

*1 JH 設計要領第一集に示される値より推定

*2 $\phi = \sqrt{(15N) + 15}$ より推定

*3 孔内水平載荷 E₀=E_s α=4

*4 N 値より換算 E₀=2.74N α=1 を乗じている

*5 ポアソン比はトンネル標準示方書(開削工法編)に示される一般的な値を使用

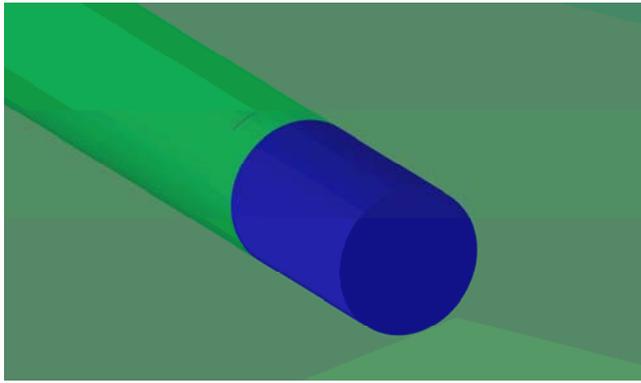
透水係数は、事業者によりシールド掘進対象地盤の洪積第1砂礫層(Dg1)と沖積第1砂質土層(As1)について実施されている。ここで、本解析では表 10.2.1 に示すようなパラメータを使用した。

表 10.1.2 解析に使用した透水係数

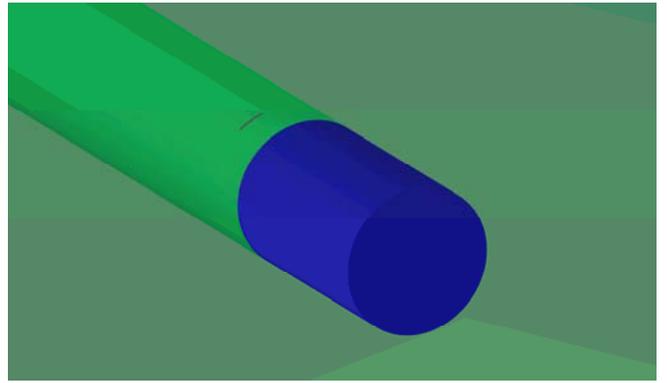
土質	記号	透水係数 k (cm/sec)	解析に使用した透水係数 k (cm/sec)	
			【1】	【2】
沖積第1砂質土層	As1	0.8~2×10 ⁻²	1.16×10 ⁻²	1.0×10 ⁻³
沖積粘性土層	Ac	—	1.74×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻⁵
洪積第1砂礫層	Dg1	1~4×10 ⁻²	2.89×10 ⁻²	1.0×10 ⁻²

(3) セグメントの破損による水漏れの再現

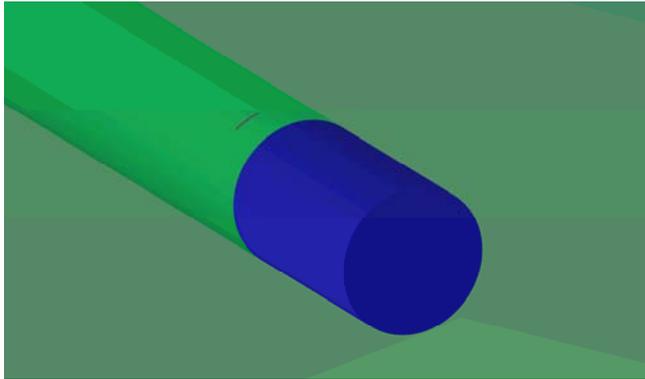
セグメントの破損による水漏れを再現するために、K セグメントが抜け出したと仮定して K セグメントの要素の一部を取り去り、それを再現した。破損規模は図 10.1.5 に示す7種類であり、K セグメントの抜け出し長としては、50mm、100mm、150mm、200mm、250mm、500mm、1400mm である。



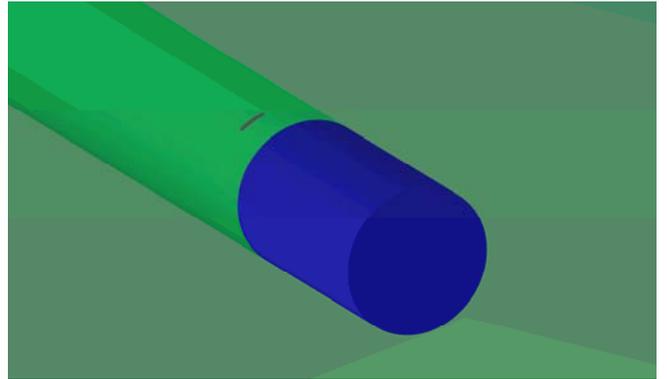
(1) 隙間 50mm



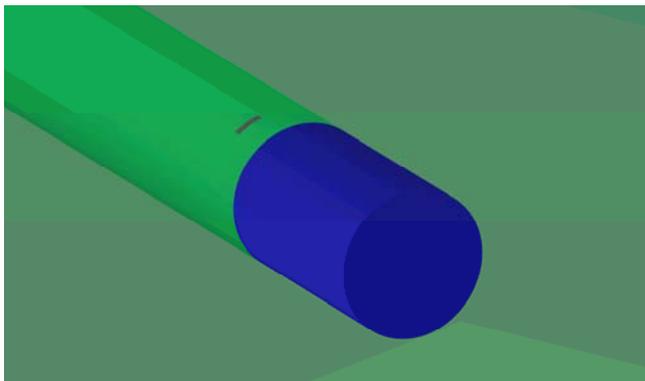
(2) 隙間 100mm



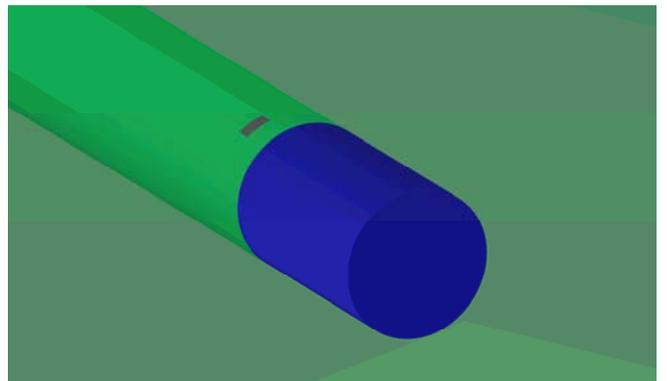
(3) 隙間 150mm



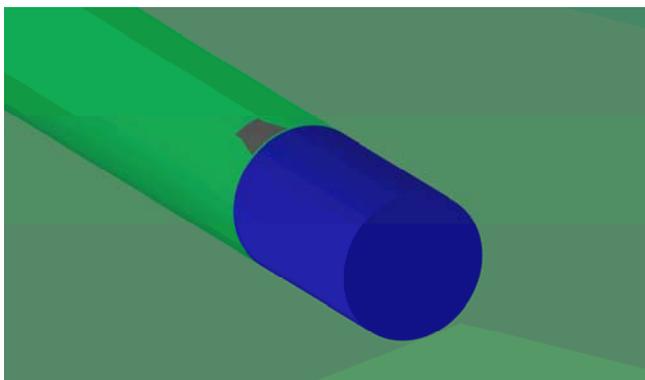
(4) 隙間 200mm



(5) 隙間 250mm



(6) 隙間 500mm



(7) 隙間 1400mm

図 10.1.5 セグメントの破損規模

10.1.4 解析ケース

解析ケースを表 10.1.3 に示す。検討項目は下記の 3 点である。すなわち、

- ① セグメント破損規模
- ② オーバーカットによる透水性
- ③ 透水係数を変化させた場合

これらについて、①は図 10.1.5 に示す 7 種類、②は透水係数を 3 種類、③は透水係数を 2 種類に変化させた解析を行った。

解析ステップの状況を図 10.1.6 に示す。まず、自然地盤を再現するために K0 圧密による自重解析を行い、第 2 段階で弾塑性解析を実施した。その後、トンネル掘削を再現するように地盤掘削とシールドマシン、セグメントの構築を行った後に弾塑性解析を実施した。弾塑性解析にて解が安定した後、非定常浸透流解析を時間スケールとして 5 日間 (=7200 分) 行った後、オーバーカット部 (②) を発現させてセグメント破損規模 (①) を変化させた各ステップの非定常浸透流解析を時間スケールで 5 分間実施した。なお、③については透水係数の違いによる影響を把握するために実施したものであり、初期条件の透水係数パラメータも変化させて解析を行っている。

表 10.1.3 解析ケース一覧

ケース	①セグメント破損規模 (mm)	②オーバーカット (k×)			③透水係数 表 10.1.2	
	50/100/150/200/250/500/1400	100	50	10	【1】	【2】
1	○	○	—	—	○	—
2	○	—	○	—	○	—
3	○	—	—	○	○	—
4	○	○	—	—	—	○
5	○	—	○	—	—	○
6	○	—	—	○	—	○

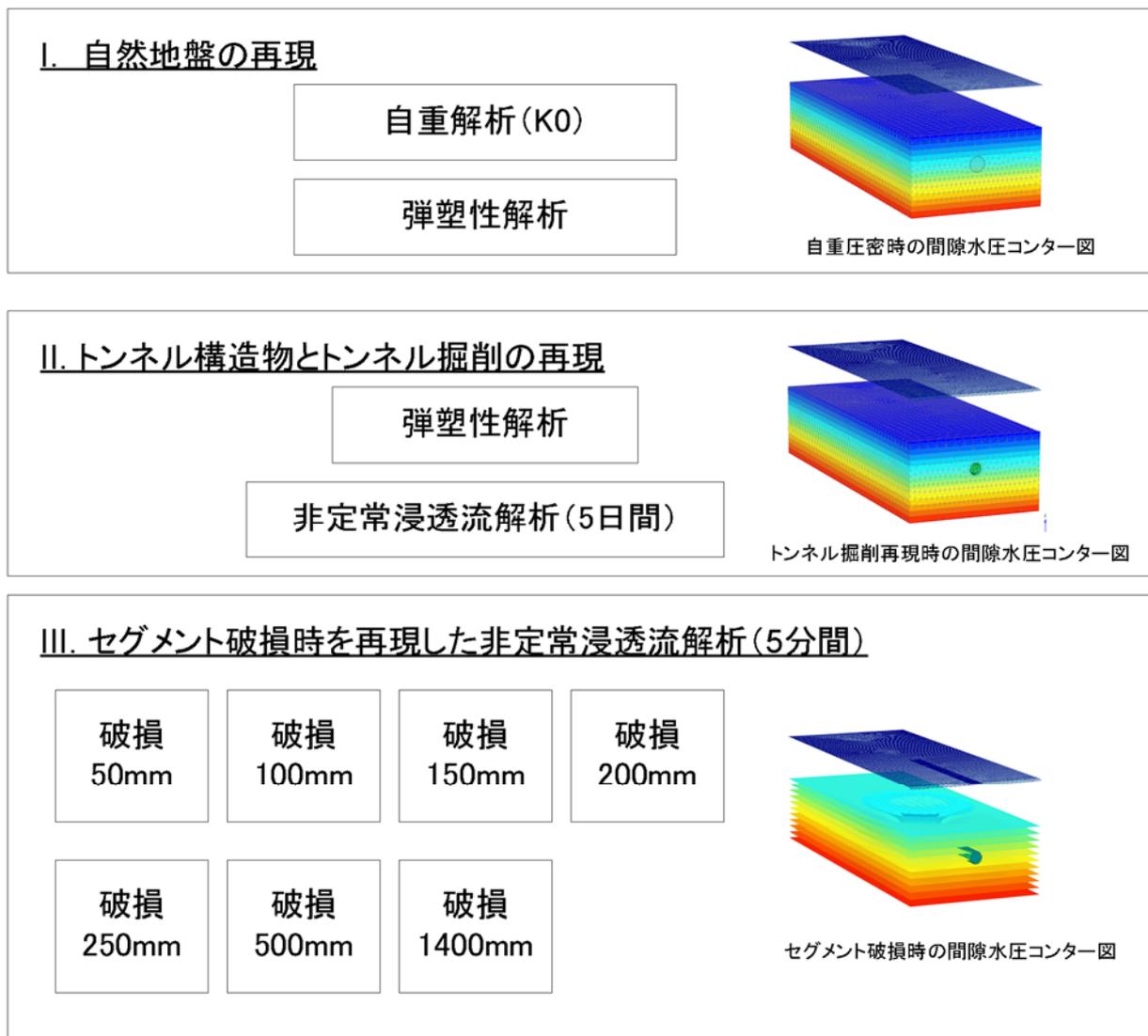


図 10.1.6 解析フロー

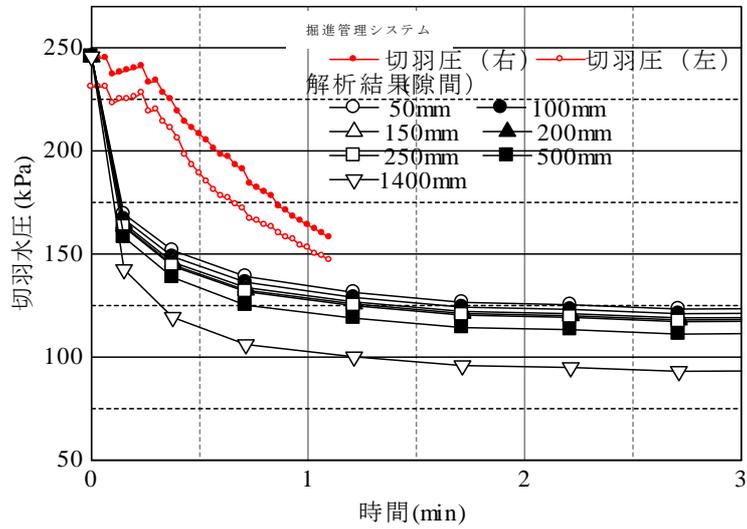
10.1.5 解析結果

(1) 掘進管理システムによる計測データとの比較

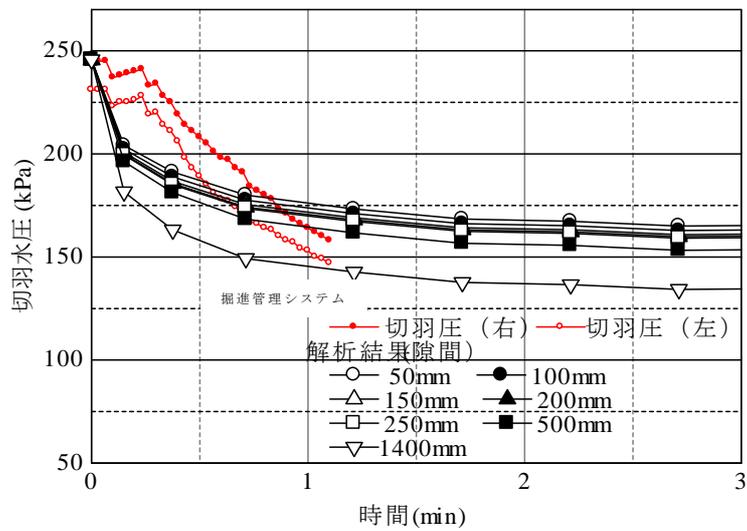
まず、掘進管理システムによる左右の切羽圧の変化と各解析ケースの結果を比較する。図 10.1.7 にセグメント破損後の切羽の間隙水圧低下状況をケース毎に示す。すべてのケースにおいてセグメント破損部から漏水を再現すると切羽圧の低減が見られた。今回の解析条件では切羽圧の低下に与える影響因子としてはオーバーカット部の透水係数の変化が最も大きかった。オーバーカット部は堅固な砂礫層の場合には、空隙として存在する可能性もあり、その場合には透水係数は大きくなる。そのような状態を解析では忠実に再現することは難しいが、シールドマシン周辺のオーバーカット部によってセグメント破損による坑内への土砂・水流入による水圧低下によって切羽に設置された圧力センサーが圧力低下したということは、解析から示すことができる。

なお、掘進管理システムによる左右の切羽圧変化と各解析ケースの結果を見ると、初期（15 秒）では、透水係数が $Dg1$ 層の透水係数の 10 倍のケースと一致しているが、その後徐々に切羽圧が低下していき、掘進管理システムによる左右の切羽圧が

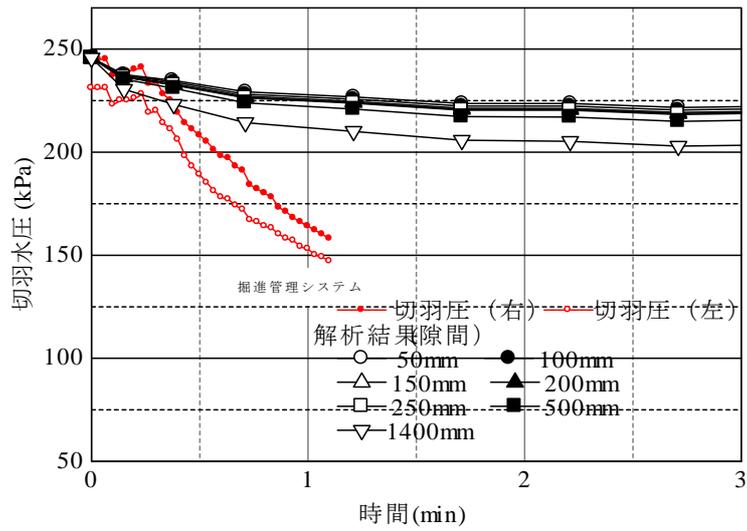
計測された最終状態では透水係数が Dg1 層の 50 倍や 100 倍の解析ケースの結果に漸近しつつある。つまり、坑内への土砂・水の流入により周辺地山の様相が変化して短時間で透水性が良くなっていったものと推察される。



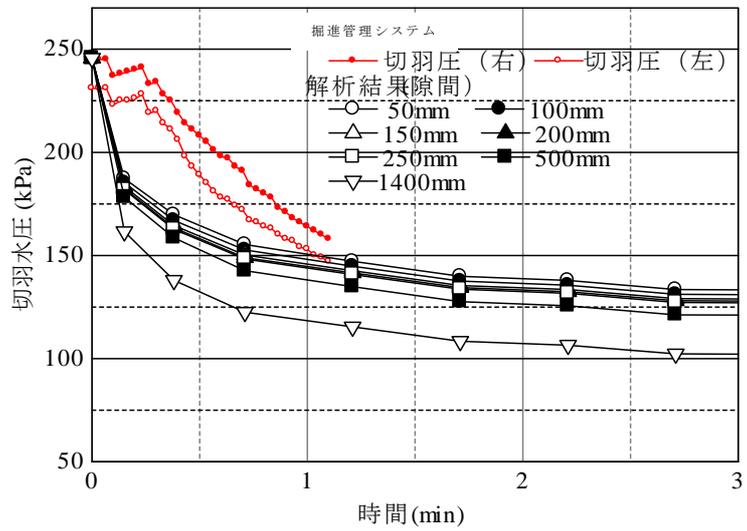
(1) ケース 1



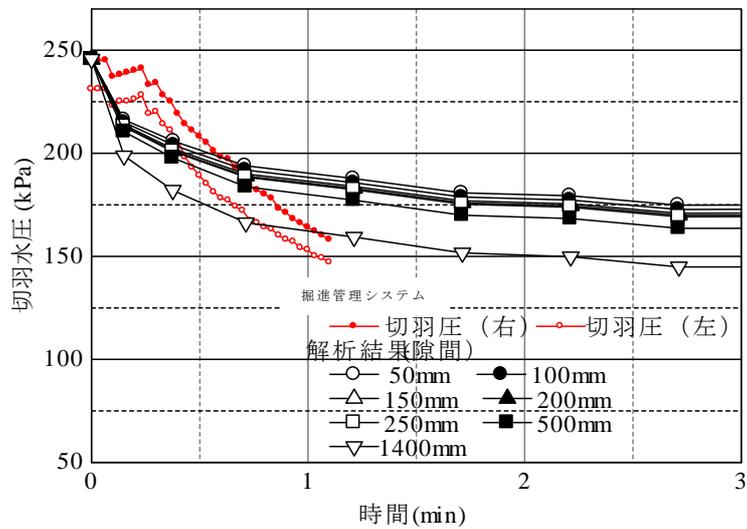
(2) ケース 2



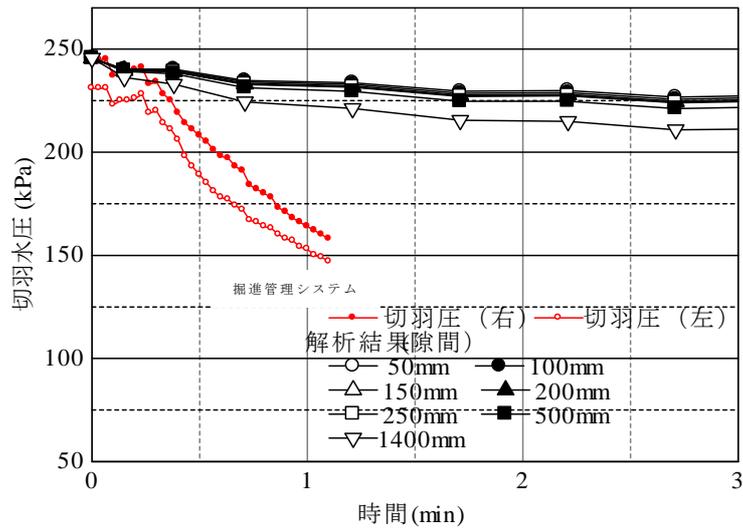
(3) ケース 3



(4) ケース 4



(5) ケース 5

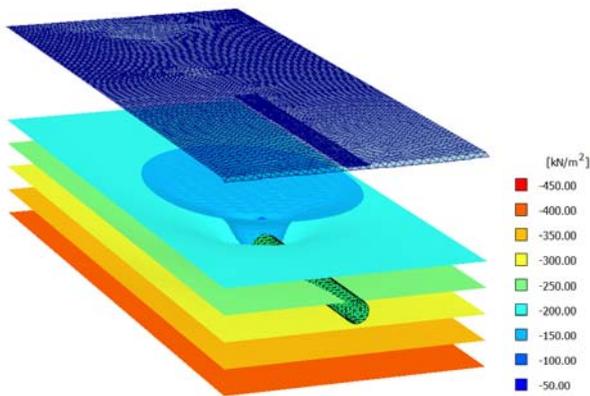


(5) ケース 6

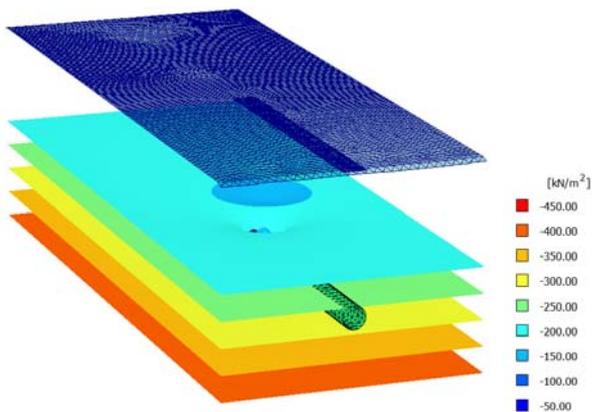
図 10.1.7 セグメント破損による各ケースにおける切羽圧の低下挙動

(2) セグメント破損部周辺の間隙水圧分布状況について

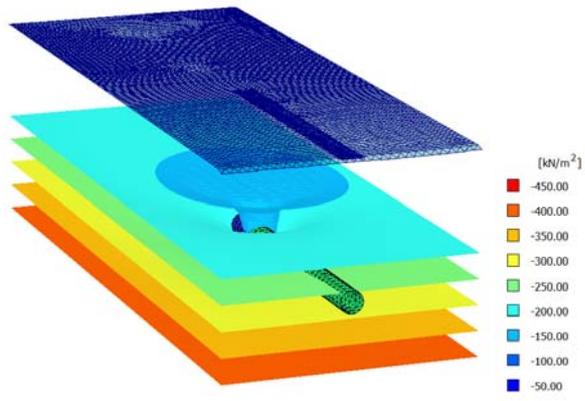
セグメント破損部周辺の間隙水圧の等高分布について隙間 50mm の結果を図 10.1.8 に示す。全てのケースにおいてセグメント破損部から間隙水圧が低下している状況が分かる。さらに、オーバーカット部の透水性が良いほど地表面まで間隙水圧低下範囲が広がっていることが分かる。



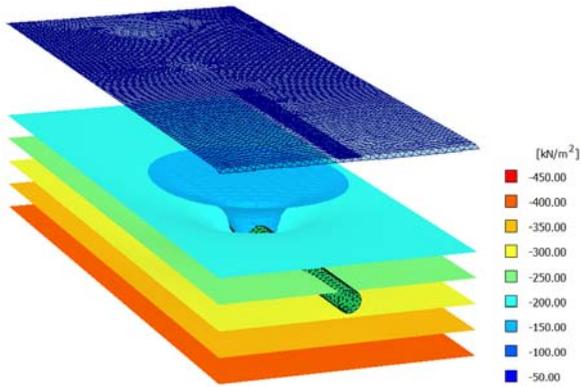
(1) ケース 1



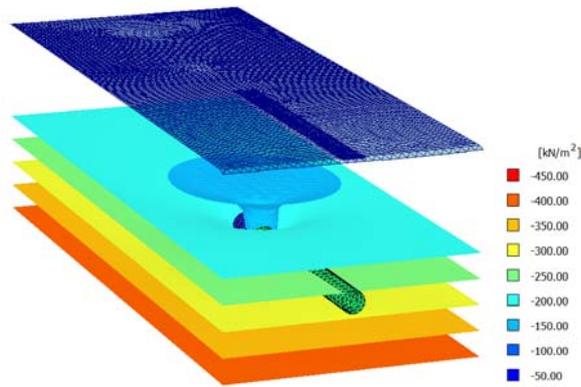
(2) ケース 2



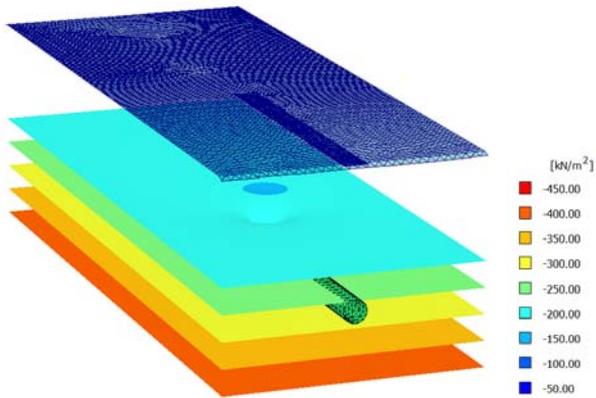
(3) ケース 3



(4) ケース 4



(5) ケース 5



(6) ケース 6

図 10.1.8 隙間 50mm の間隙水圧の分布

10. 1. 6 まとめ

本節では、K セグメント抜け出しによる隙間発生によってシールドマシン前面の圧力計が低下挙動をするかについて、3次元有限要素法による非定常浸透流解析を実施し、計測データとの比較を行った。その結果、オーバーカット部の透水性を良くすることで、切羽部の圧力低下を再現することができた。当該災害発生現場の地盤は砂礫層でありオーバーカットによって切羽前面とシールドマシン後方には隙間が存在することが考えられる。そのような状態となれば掘進管理システムによる切羽圧力が低下した挙動を説明することができる。すなわち、掘進管理システムの切羽圧力の低下挙動は、K セグメントの抜け出しにより、切羽前面から K セグメントに至るまで、水の流れが発生したことによって説明することができる。

10.2 セグメントリング構造の崩壊に関する個別要素法解析

10.2.1 個別要素法 (DEM) ²⁾について

個別要素法とは、あるステップでの球要素同士の重なり合い U をバネ定数 k で乗ずること ($F=kU$) により、球要素間に働く力 F を算出し、その力から次のステップでの球要素間の位置 x を運動方程式 ($F=ma$ 、 m : 質量、 a : 加速度 ($=\frac{d^2x}{dt^2}$)) により求め、新たな球要素の位置 x を算出し、再度、新たな球要素同士の重なり合い U を算出するというステップを繰り返すことにより、砂礫等の挙動をシミュレートするものである。図 10.2.1 は、個別要素法の計算手順を示す。

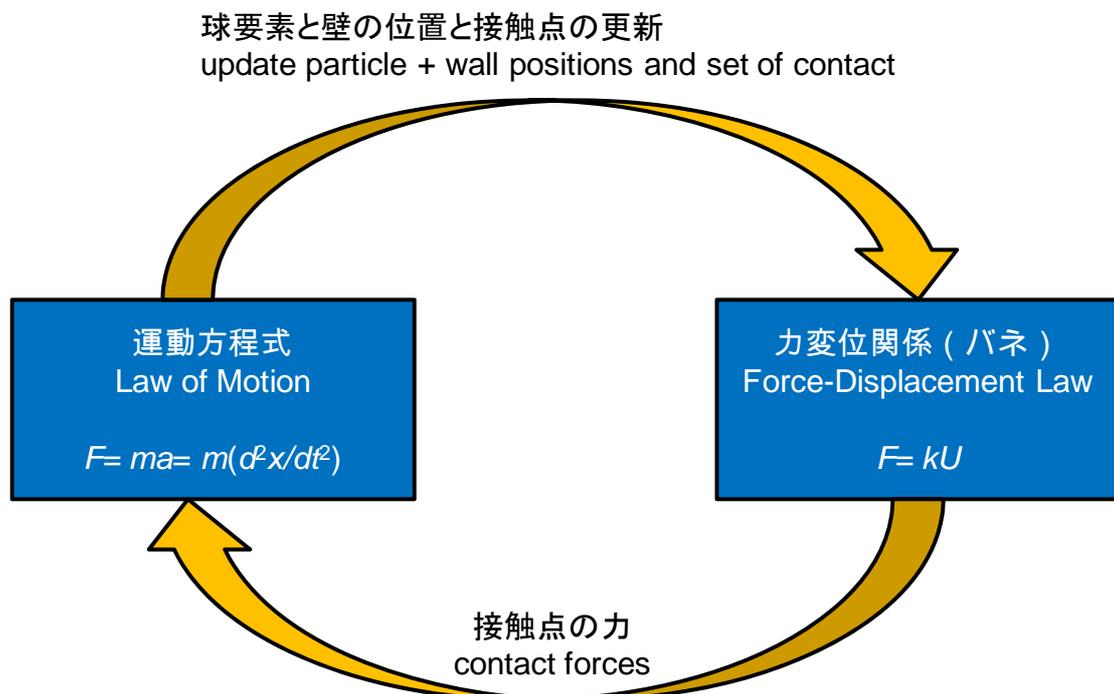


図 10.2.1 個別要素法の計算手順

個別要素法 (DEM) の球要素同士の接触点での力学モデルを図 10.2.2 に示す。このように、球要素同士の接触点での重なり合いを法線方向 U^n と接線方向 ΔU^s で求めれば、簡単に法線方向の力 F^n と接線方向の力 F^s が求まる。また、すべり条件も考慮されており、生じている接線方向の力 F^s が F^s_{max} より大きいとすべりが生じる。

$$F^s_{max} = \mu |F^n|$$

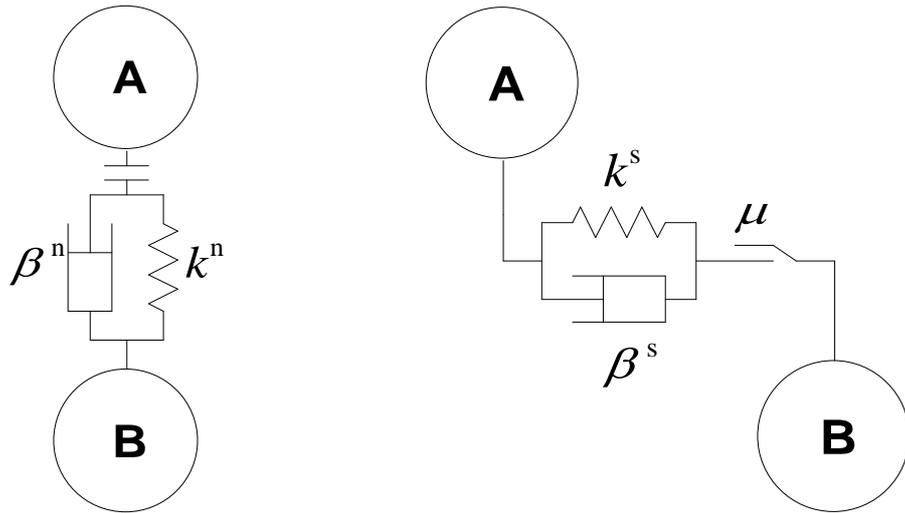
$$|F^s| > F^s_{max} \rightarrow \text{すべり発生}$$

ここで、 μ は摩擦係数である。

本報告書では、摩擦係数を変化させることで、セグメント継手 (セグメント同士の接触面) の摩擦を変化させたシミュレーションを実施している。

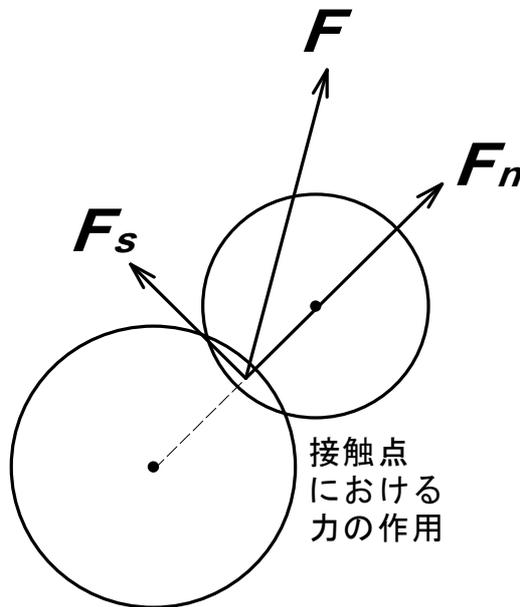
また球要素はコンクリート内の細骨材及び粗骨材をモデル化している。

このような力学モデルは粒状体の挙動を表現する上では有用であるが、リング継手の挙動を表現するには、接触点におけるボンド（ここでは「コンタクトボンド」という。）を付加する必要がある。個別要素法では、コンタクトボンドも提案されており、図 10.2.3 のようである。このように、コンタクトボンドを与えることで、球要素同士が結び付き、せん断力だけでなく引張力に対しても抵抗できるようになる。本報告書では、コンタクトボンドをリング継手に対して用いた。リング継手に作用するせん断力又は引張力どちら一方がコンタクトボンドの強度を超えるとコンタクトボンドは消失し、球要素の接触点の力学モデルのみとなる。



(a) 接触点でのモデル（法線方向）

(b) 接触点でのモデル（接線方向）

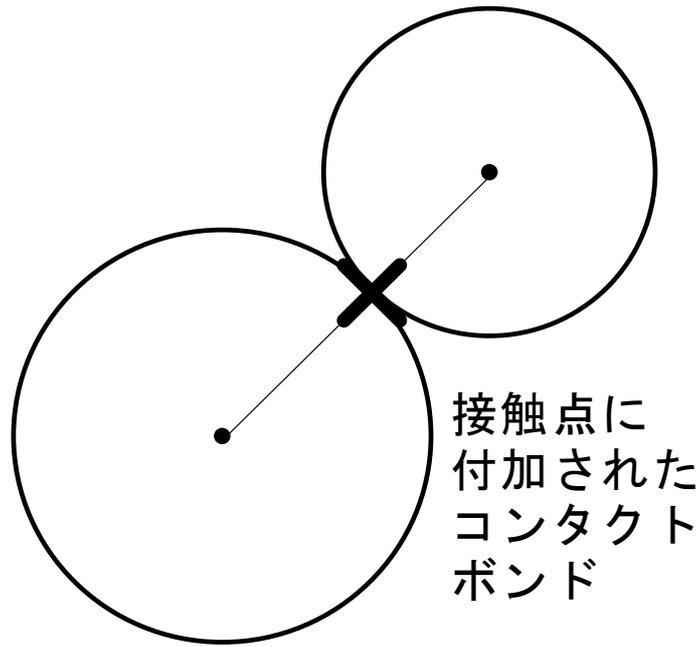


接触点におけるモデル $F^n = k^n U^n$
 $F^s = k^s \Delta U^s$

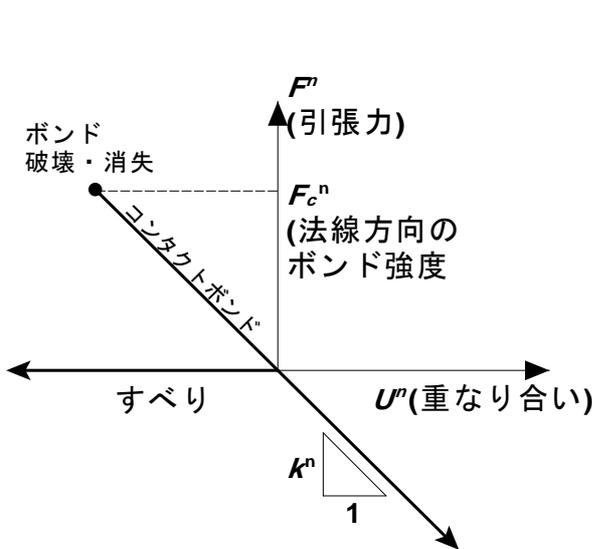
すべり条件 $F_{\max}^s \leq \mu F^n$

(c) 接触点におけるモデルとすべり条件

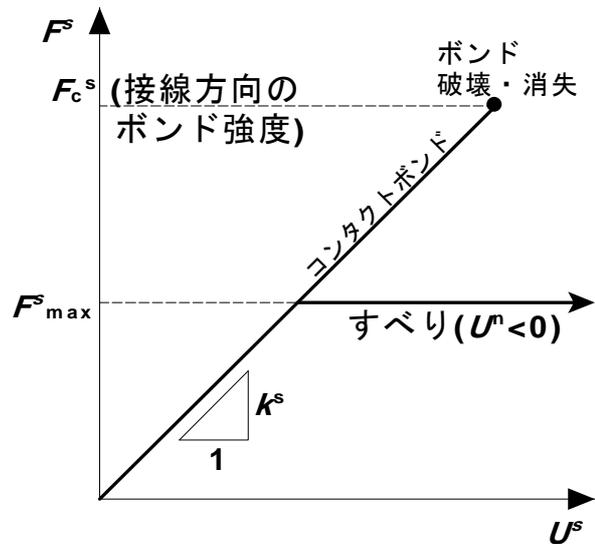
図 10.2.2 個別要素法（DEM）の球要素同士の接触点でのモデル



(a) コンタクトボンド



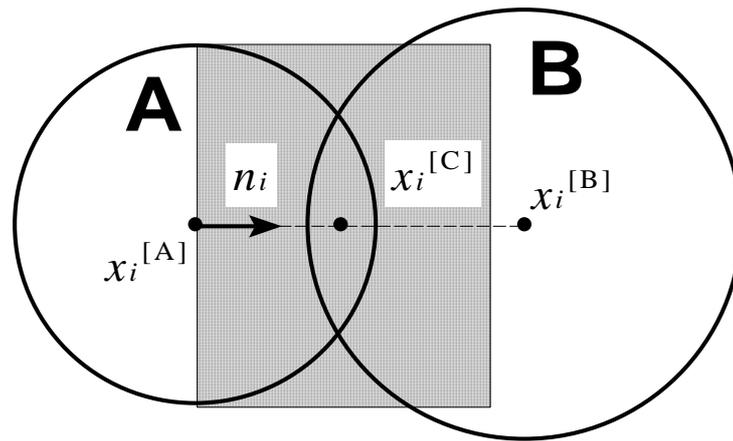
(b) 法線方向の力学モデル



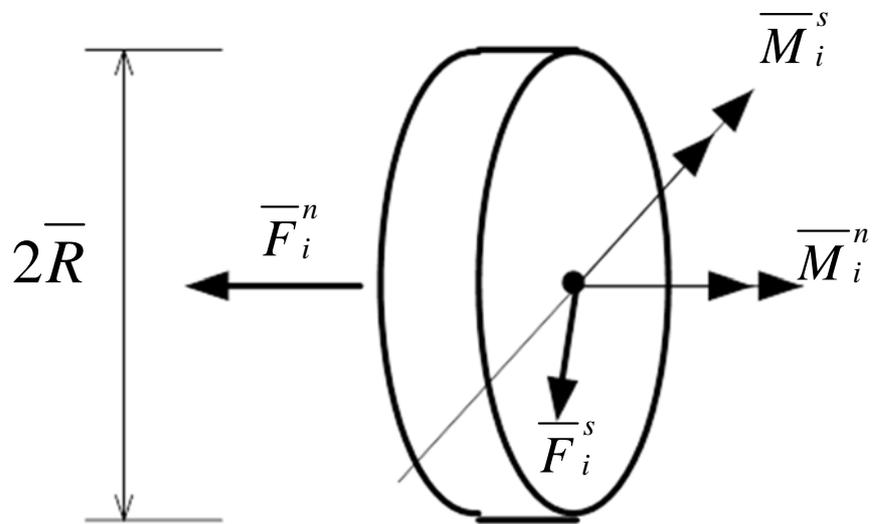
(c) 接線方向の力学モデル

図 10.2.3 コンタクトボンドのモデル

さらに、球要素だけでは、セグメント（コンクリート）の挙動を表現できないため、セグメントを構成する球要素同士を平行ボンドで固結させている。平行ボンドは球要素同士を固結し、せん断応力、引張り応力だけでなく曲げモーメントにも抵抗する。こちらも同様に平行ボンドに作用するせん断応力又は引張り応力が平行ボンドの強度を超えると平行ボンドは消失する。コンタクトボンドと平行ボンドの違いは、コンタクトボンドが曲げモーメントに対し抵抗しないのに対し、平行ボンドは曲げモーメントにも抵抗する点である。



(a) パラレルボンド



(b) 球要素 B に作用する力とモーメント

図10.2.4 球要素同士を固結させるパラレルボンド

10.2.2 解析パラメータの決定方法について

(1) セグメントを表現するための解析パラメータについて

解析パラメータは図 10.2.5 に示すフローチャート³⁾に従って決定した。同図の丸印で示した ρ_s 、 V_p 、 V_s 、 V_{p_bm} 、 V_{s_bm} 、 q_u が実験から決定される。実験から決定されるパラメータは以下のようなものである。

ρ_s ：細骨材、粗骨材の粒子密度 (kg/m³)

V_p ：細骨材、粗骨材の P 波速度 (m/sec)

V_s ：細骨材、粗骨材の S 波速度 (m/sec)

V_{p_bm} ：コンクリートの P 波速度 (m/sec)

V_{s_bm} ：コンクリートの S 波速度 (m/sec)

q_u ：コンクリートの一軸圧縮強度 (N/mm²)

細骨材、粗骨材の粒子密度は、日本の標準砂である豊浦標準砂の値を用い、2650kg/m³とした。 V_p 、 V_s は豊浦標準砂 ($D_r=80\%$) の P 波、S 波速度から決定した¹⁾。さらに、第 8 章で述べたように実際に使用される予定だった新品のセグメントからコンクリート部分を切り出し、コンクリートの P 波、S 波速度、一軸圧縮強度を計測し、 V_{p_bm} 、 V_{s_bm} 、 q_u を決定した。

球要素の平均半径は、セグメントの厚さ 160mm を球要素 2 個分で表現できるように、平均半径を 40.8mm としている。球要素の平均半径を 40mm ではなく 40.8mm とした理由は、球要素の平均半径が 40.8mm であれば球要素同士が丁度接するようにしてセグメントの外径 (4820mm) を形成できるからである。球要素は単一の径で解析するよりも粒径にわずかな幅を持たせた方が解析として安定するため、最小半径 $R_{min}=27.2\text{mm}$ 、最大半径 $R_{max}=54.4\text{mm}$ とし、 $R_{max}/R_{min}=2$ としている。

これらの値からフローチャートの式 (1) を用いて球要素の剛性が、式 (2) を用いてパラレルボンドの剛性が、式 (5)、(6) を用いてパラレルボンドの強度が求まる。

摩擦係数 μ はシミュレーションの中で変化させている。

減衰定数 β は、1 以下では自由振動、1 以上では過減衰振動、1 では臨界減衰振動と呼ばれる。ここでは、臨界減衰振動に近い 0.8 という値を採用した。

このようにして決定されたセグメントを表現する解析パラメータを表 10.2.1 にまとめた。

また、安定な解析を行うため、計算に用いる時間刻み Δt を決定する必要がある。ここでは安定限界の時間刻み Δt_{cr} の値を反映させ、計算ごとに Δt を変化させているが、 Δt の値は $1.0 \times 10^{-7} < \Delta t < 1.0 \times 10^{-5}$ の範囲内にあった。

図 10.2.5 のフローチャートを用いて決定したパラメータを使用し、セグメント単体曲げ試験をシミュレートした。球要素の半径はこのシミュレーションの場合 80.4mm としている。シミュレーション結果が単体曲げ試験時の荷重と変位を平均的に表現できている。

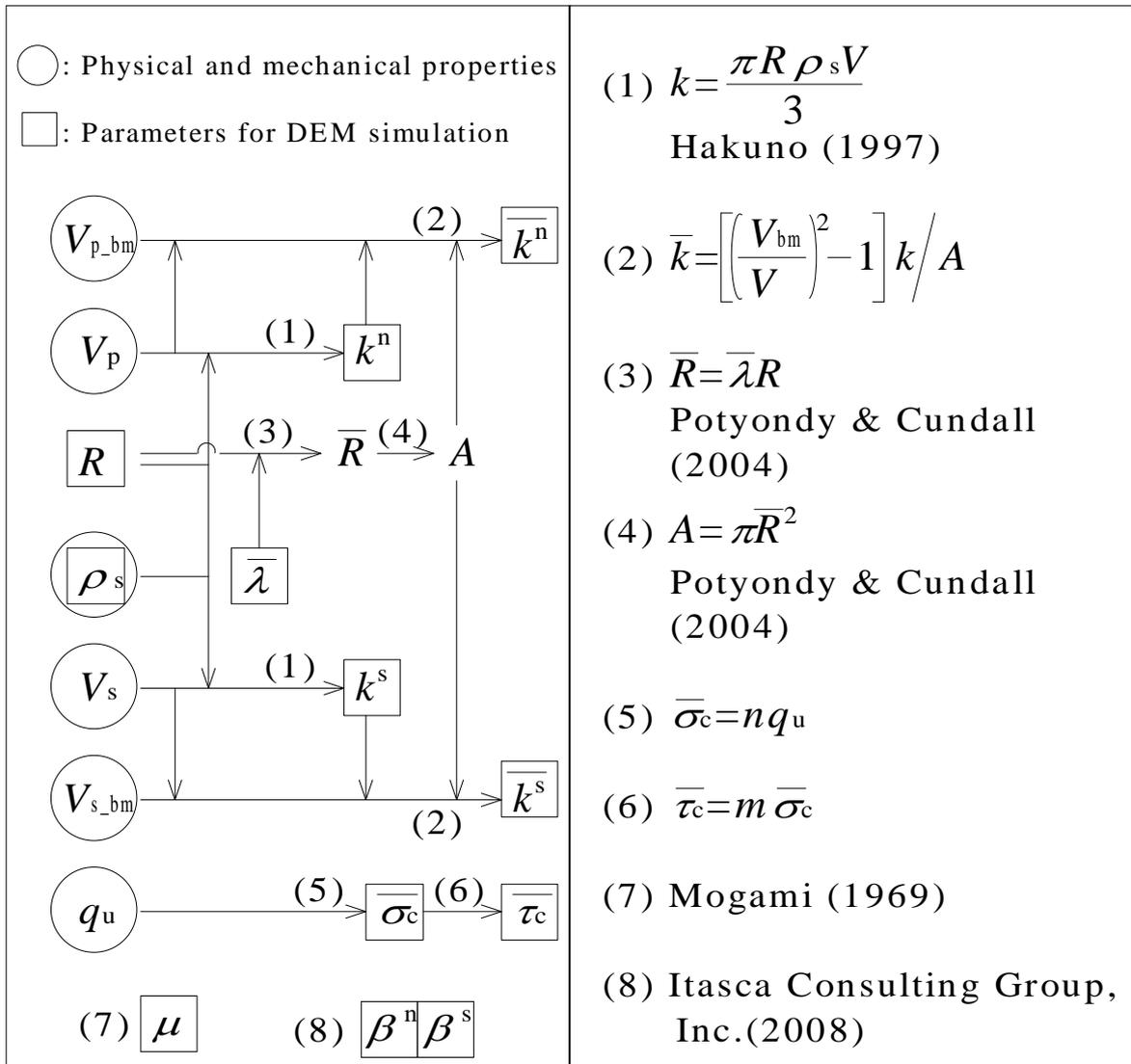


図 10.2.5 解析パラメータを決定するフローチャート

表 10.2.1 セグメントのパラメータ

パラメータ (材料定数)		記号	セグメント	単位
球要素	密度	ρ_s	2650	kg/m ³
	平均半径	R	0.0408	m
	法線方向の剛性	k^n	18.0	kN/mm
	接線方向の剛性	k^s	7.3	kN/mm
	摩擦係数	μ	0.10	-
	減衰定数	β_n, β_s	0.8	-
パラレルボンドと球要素の半径比		$\bar{\lambda}$	1.0	-
パラレルボンド	法線方向の剛性	\bar{k}^n	480	N/mm ³
	接線方向の剛性	\bar{k}^s	130	N/mm ³
	法線方向の強度	$\bar{\sigma}_c$	160	N/mm ²
	接線方向の強度	$\bar{\tau}_c$	160	N/mm ²

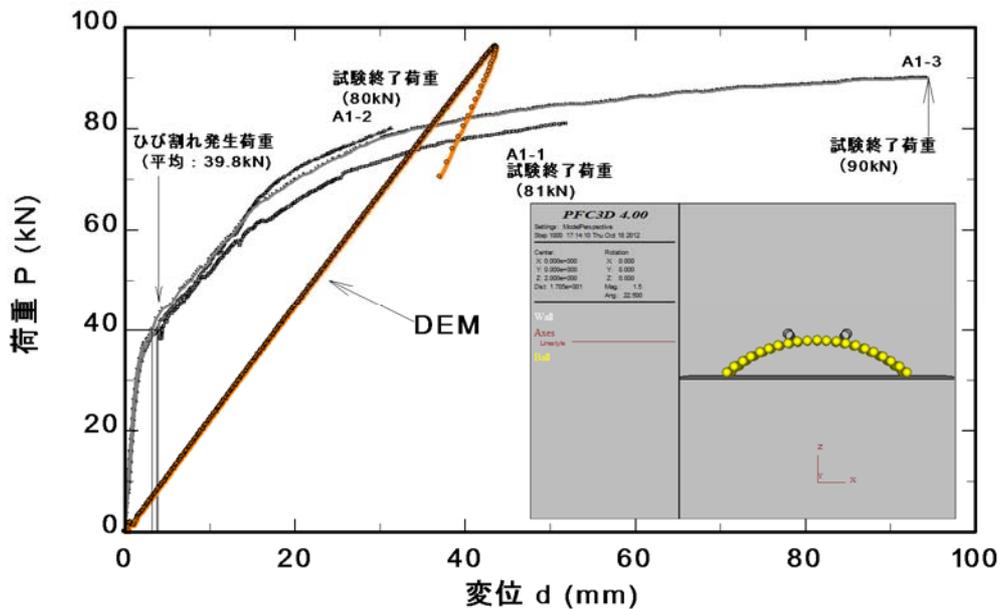


図 10.2.6 個別要素法 (DEM) によりシミュレートされた単体曲げ試験時の荷重と変位

(2) リング継手を表現するためのパラメータについて

図 10.2.7 に示すように、リング継手のボルトの中心は、セグメントの坑内側から 40mm の箇所にある。したがって、リング継手を表現する球要素の半径は 40mm とした。

リング継手を表現する球要素同士をコンタクトボンドで締結し、ボルトを表現する。コンタクトボンドの剛性と強度は、第 8 章で述べたように、ボルトインサートの引張り試験結果、ボルトインサート及びボルトボックスの載荷試験結果から決定した。

法線方向の剛性 $k^n = 36 \text{ kN/mm}$

接線方向の剛性 $k^s = 14 \text{ kN/mm}$

法線方向の強度 $\sigma_c = 105.3 \text{ kN}$

接線方向の強度 $\tau_c = 62.9 \text{ kN}$

密度、摩擦係数、減衰定数については、セグメントを表現する球要素と同様とした。

表 10.2.2 にリング継手を表現する解析パラメータをまとめた。これらのパラメータを第 8 章で示したボルトインサートの引張り試験結果とボルトインサート及びボルトボックスの載荷試験結果に表示すると図 10.2.8、図 10.2.9 のようになり、パラメータが試験結果をよく表現していることがわかる。

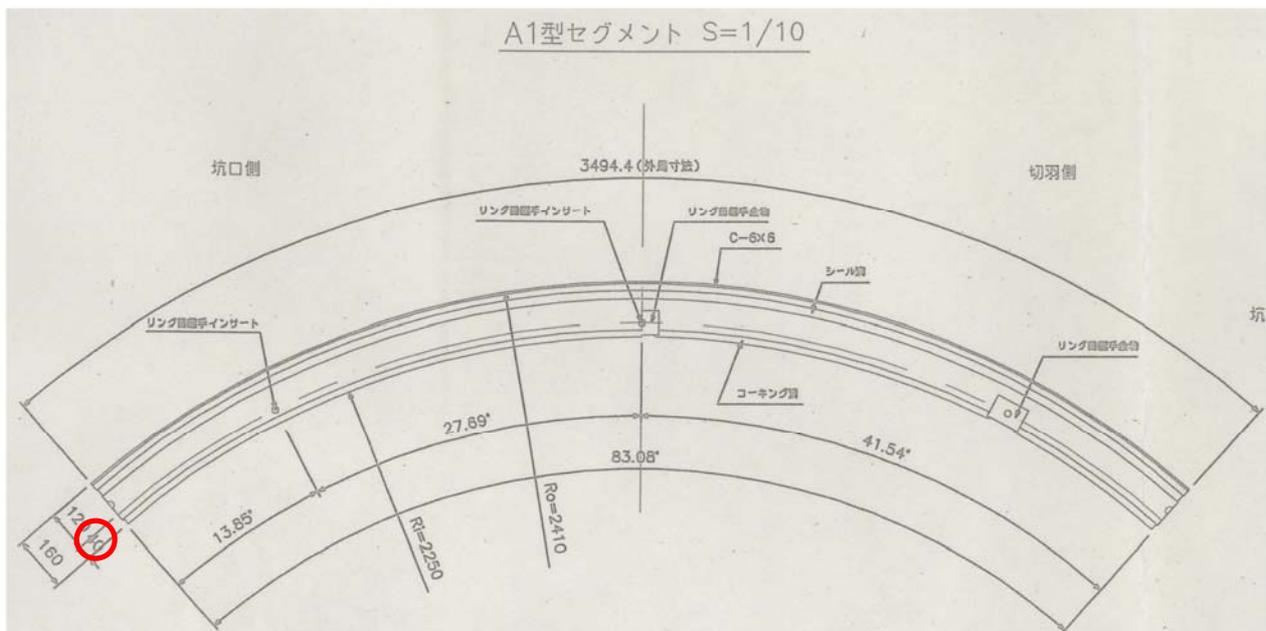


図 10.2.7 リング継手のボルトの中心の位置¹⁾

表 10.2.2 リング継手を表現する解析パラメータ

パラメータ (材料定数)		記号	リング継手	単位
球要素	密度	ρ_s	2650	kg/m ³
	平均半径	R	0.04	m
	法線方向の剛性	k^n	36	kN/mm
	接線方向の剛性	k^s	14	kN/mm
	摩擦係数	μ	0.10	-
	減衰定数	β_n, β_s	0.8	-
コンタクトボンド	法線方向の強度	σ_c	105.3	kN
	接線方向の強度	τ_c	62.9	kN

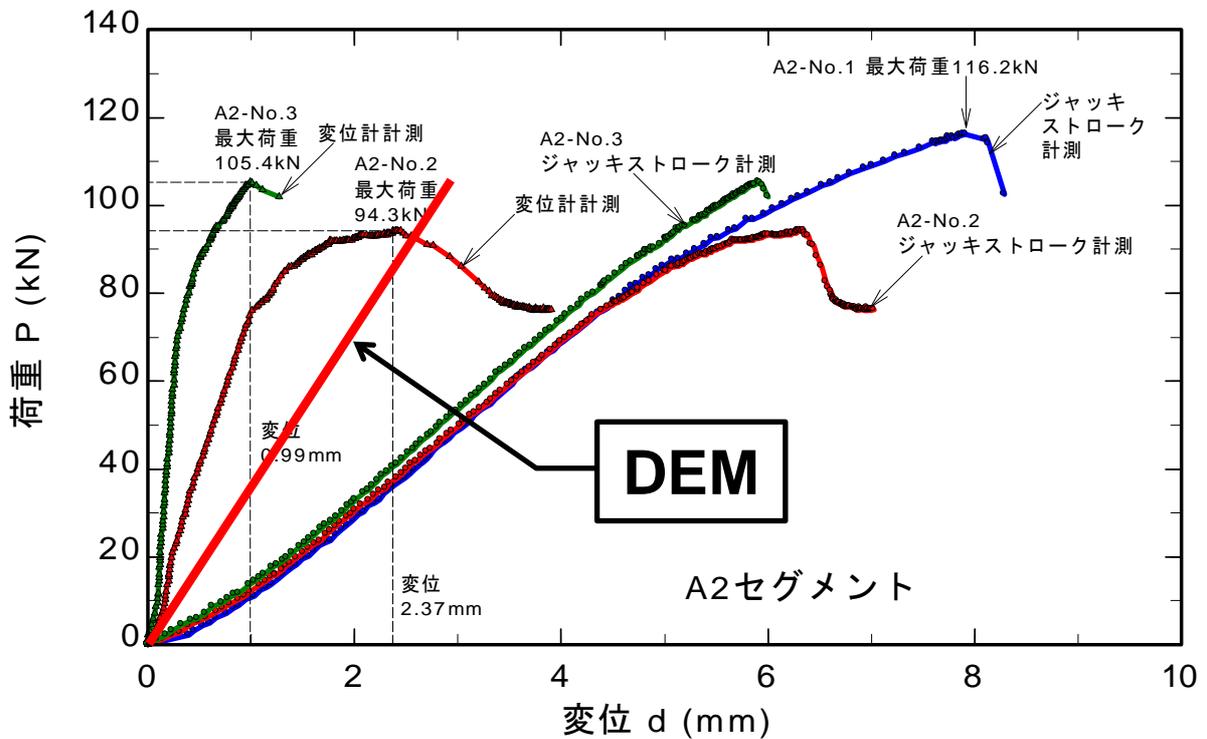


図 10.2.8 ボルトインサートの引張り試験結果と個別要素法パラメータの表示

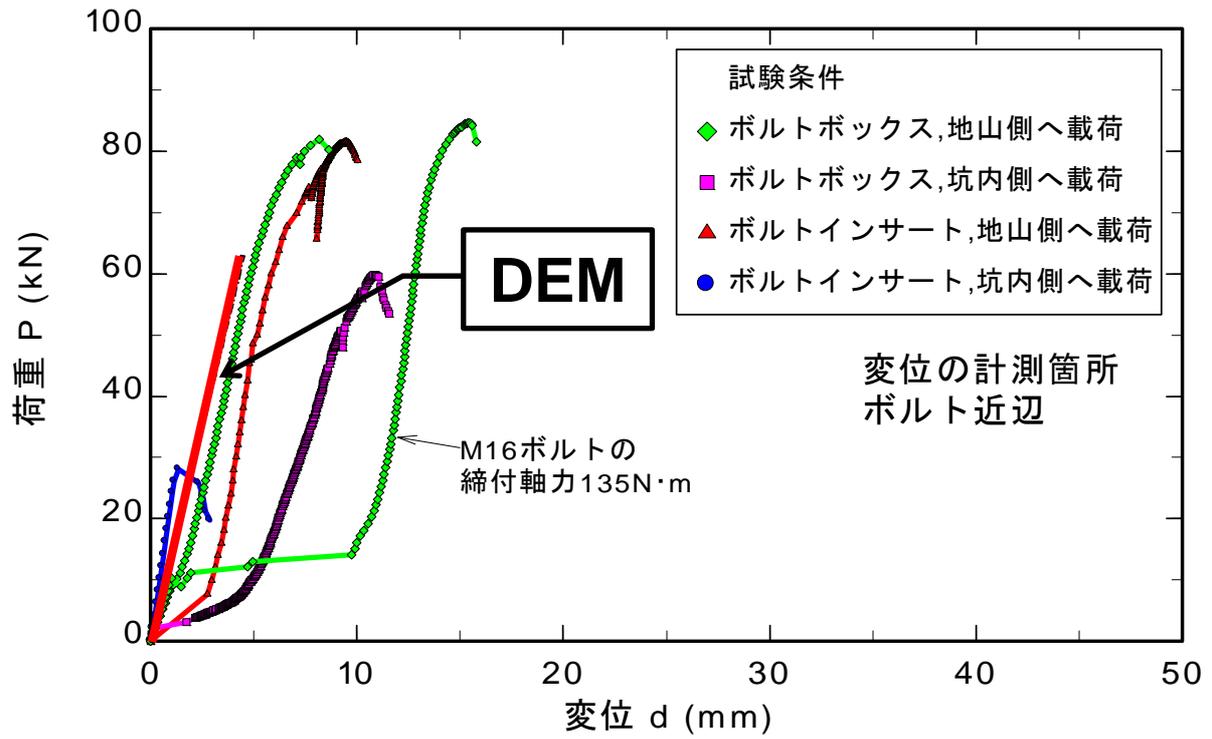


図 10.2.9 ボルトインサート及びボルトボックスの载荷試験結果と個別要素法パラメータの表示

10.2.3 作用させる外力（設計荷重）について

シミュレーションで用いた外力について説明する。ここでは、第4章で述べた設計荷重をシミュレーションに対しても用いている。災害発生前には109リングから裏込め注入材を注入していたという証言も得られていることから、109リングまでは裏込め注入材を介してセグメントが地盤と接触していたと考えられる。したがって、109リングまでは設計時と同様に土圧、水圧、自重反力、地盤反力を加える。

加えた土圧、水圧を図10.2.10、図10.2.11、表10.2.3に示す。また、自重反力(18.297kN/m)についても、設計時と同様にセグメントリングの3時から9時の方向に、下方から上向きの力を載荷する。

地盤反力係数も設計時と同様に法線方向（セグメントリングの中心に向かう力）に $k=40 \text{ MN/m}^3$ という値を入力している。セグメントの外径よりも球要素がはみ出すとそのはみ出した量に地盤反力係数を乗じて、地盤反力をセグメントリングの中心に向かって球要素に作用させる。

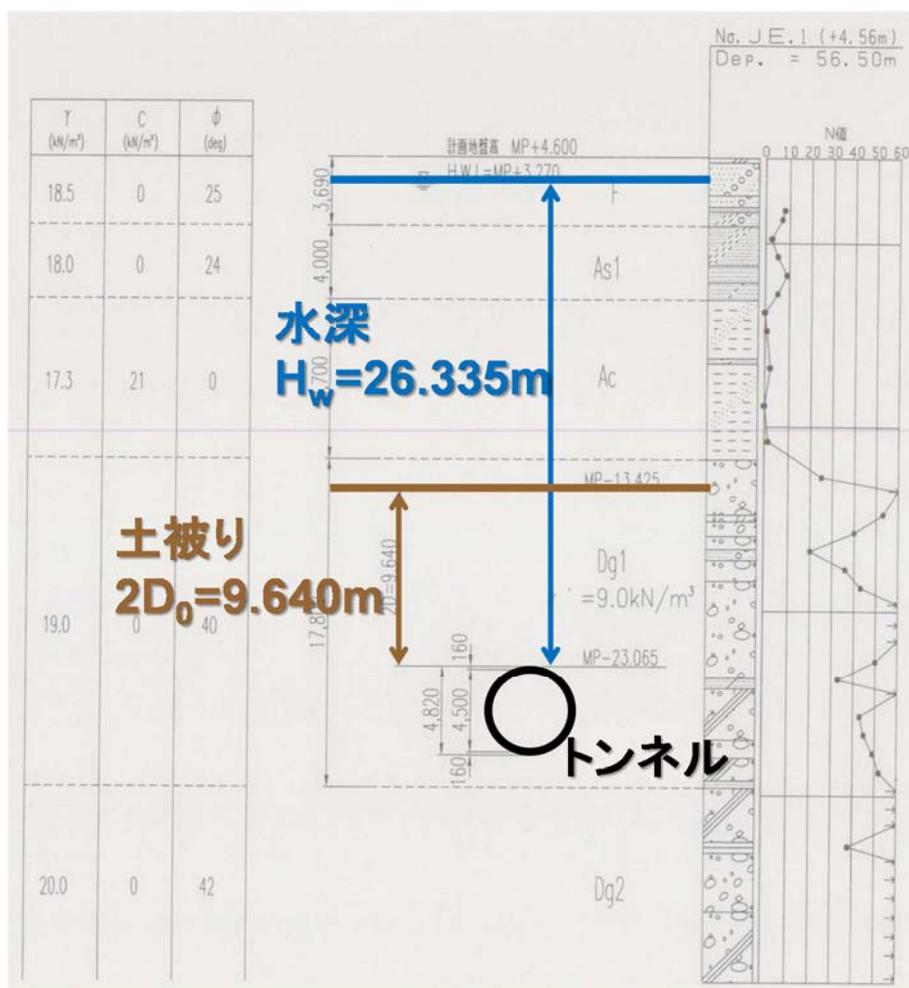


図 10.2.10 土被りと水深 1)に加筆修正

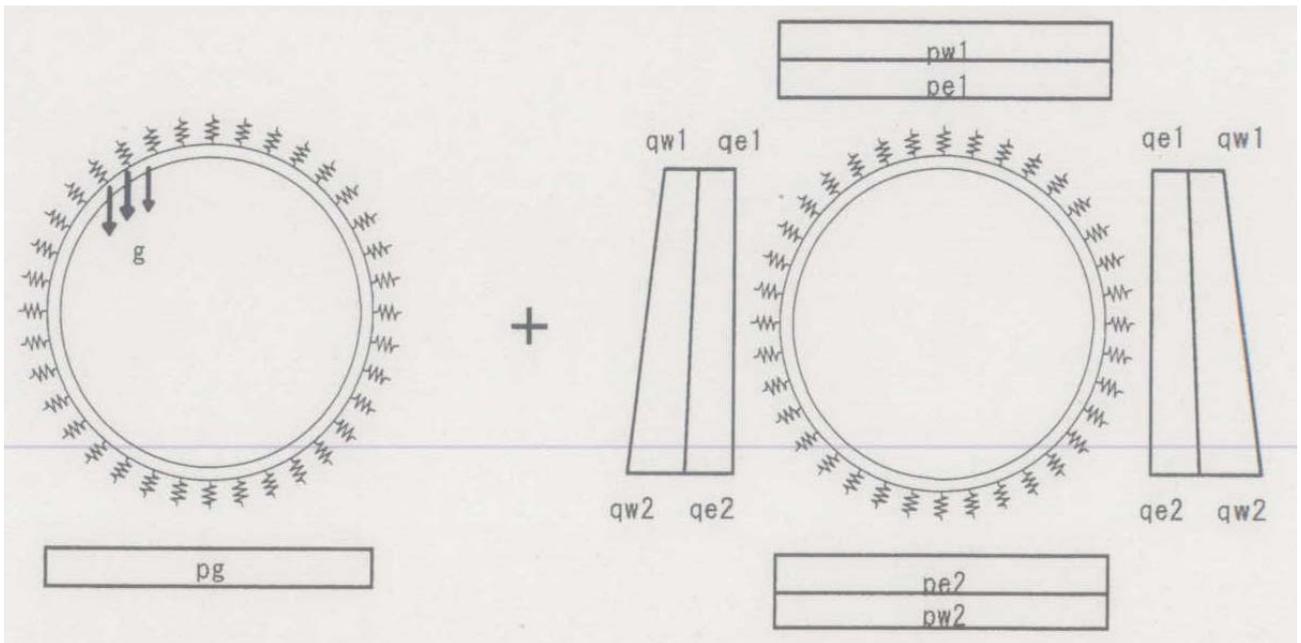


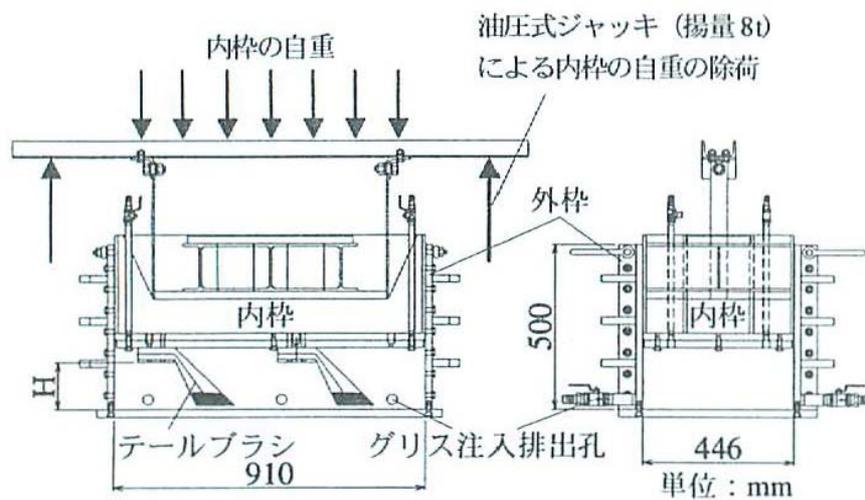
図 10.2.11 土圧と水圧の分布¹⁾

表 10.2.3 設計における土圧と水圧¹⁾

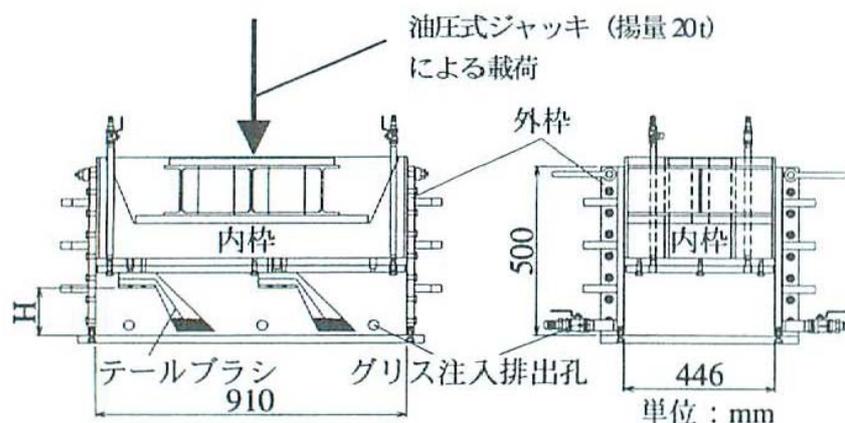
項目		単位	荷重値	
			m当り	リング 当り
頂部鉛直土圧	p_{e1}	kN/m^2	86.76	121.46
底部鉛直土圧	p_{e2}	kN/m^2	37.11	51.95
頂部側方土圧	q_{e1}	kN/m^2	34.70	48.58
底部側方土圧	q_{e2}	kN/m^2	52.05	72.87
頂部水圧	p_{w1}	kN/m^2	271.25	379.75
底部水圧	p_{w2}	kN/m^2	320.90	449.26

一方、111リング、110リングについては、裏込め注入材の痕跡が見られず、セグメントの損傷が激しかったことから、セグメントが地盤と接することなく、水圧のみが作用する状態だったと考えられる。そのため、111リング、110リングについては、水圧のみを作用させる。作用させる水圧は設計時の水圧と同様である。地盤には接していないため、土圧、自重反力、地盤反力は作用しない。

また、テールブラシが一部固着していたため、固着している場合、固着していない場合のシミュレーションを実施している。固着している場合には、すべてのテールブラシが固着しているものとしてシミュレーションを実施している。テールシールが固着していない場合、テールシールの剛性は4.6MN/mとし、裏込め材により固着した場合は、5.9MN/mとしている。これらの値は、既往の研究からテールブラシ載荷試験結果を参考に決定した（図10.2.12、図10.2.13参照）。



(a) 載荷方法①



(b) 載荷方法②

図10.2.12 テールブラシ載荷装置⁴⁾

(高橋正朗ら、シールドのテールシールがセグメントに与える影響に関する研究、土木学会論文集 F1 (トンネル工学) 特集号 Vol.66、No.1、pp.109-120.)

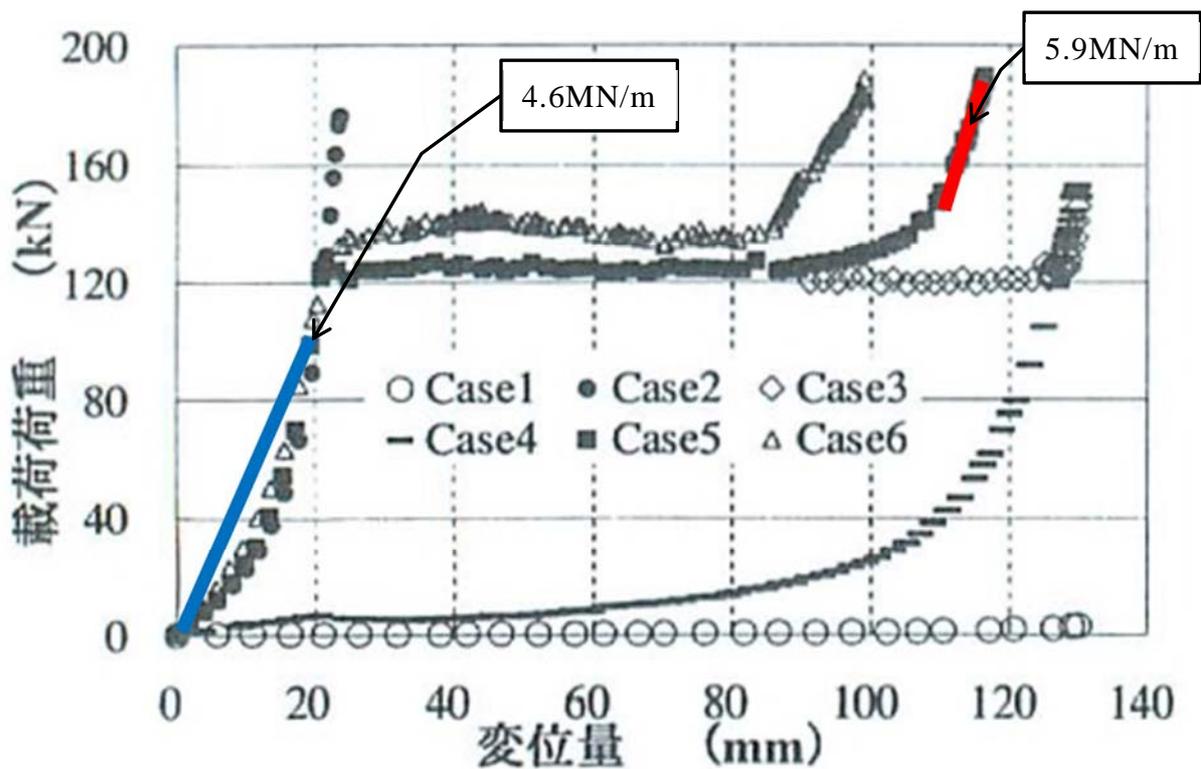


図 10.2.13 テールブラシの荷重試験における荷重荷重と変位量⁴⁾ (Case1: テールブラシのみ、Case2: テールグリスのみの場合、Case3: テールブラシにテールグリスを注入した場合、Case4: 裏込め材がすべてのテールブラシ内部に混入して固化した場合、Case5: Case4 の状態でグリス圧を作用させた場合、Case6: Case5 の状態に加えて、裏込め材がテールブラシ間に入り込んでブロック状に固化した場合) (高橋正朗ら、シールドのテールシールがセグメントに与える影響に関する研究、土木学会論文集 F1 (トンネル工学) 特集号 Vol.66、No.1、pp.109-120.)

10.2.4 シミュレーションの手順

シミュレーション手順を以下に説明する。

- ① セグメント内外径の円筒状の壁要素を設ける。また 112 リング切羽側、108 リング坑内側にも壁要素を設ける。
- ② 壁要素間に球要素（最小半径 $R_{\min}=0.0272\text{m}$ 、最大半径 $R_{\max}=0.0544\text{m}$ 、平均半径 $R=0.0408\text{m}$ ）を密度 1.572g/cm^3 となるよう発生させる。
- ③ セグメント間、リング間に壁要素を設置する（図 10.2.14 左図参照）。
- ④ リング継手の設計図面と同様の位置の球要素を削除し、新たにリング継手用の球要素（半径 $R=0.04\text{m}$ ）を設け、コンタクトボンドを付加する。これによりリング継手が再現される（図 10.2.14 右図参照）。
- ⑤ 全球要素間に平行ボンドを付加する。
- ⑥ セグメント間、リング間の平行ボンドを削除する。これにより、セグメントは完全に独立し、リング間はリング継手のみで締結されている状態となる（図 10.2.15 右図参照）。
- ⑦ 108 リングの球要素の変位及び回転を固定する（図 10.2.16 右図参照）。
- ⑧ セグメント間、リング間の壁要素を削除する。
- ⑨ シールドマシンの設計図面と同様の位置に円筒状の壁要素を設置する（図 10.2.16 右図参照）。
- ⑩ ジャッキの設計図面と同様の位置に壁要素を設置する（図 10.2.16 右図参照）。ジャッキは 112 リング B1 セグメントのセグメント組み立て時のジャッキ総推力（756kN：掘進管理システムの 2 月 7 日 12 時 5 分 56 秒時点のデータ）を表現できるように、球要素と僅かな重なり合いを持たせる。12 時 5 分 56 秒時点で実際に使用されたジャッキは、ジャッキ No.17～22 の 6 本であり、1 本当たり 126kN のジャッキ推力が働いている。シミュレーションでは、掘進中もシミュレーションしているため、合計 26 本のジャッキに均等に 126kN のジャッキ推力が働いているものとしている。この時の総推力は 3276kN となる。実際の掘進中のジャッキ総推力（13701kN：掘進管理システムの 2 月 7 日 11 時 34 分 51 秒時点のデータ、使用ジャッキ本数 21 本）と比べると非常に小さい値である。
- ⑪ テール部を模擬する円筒状の壁要素（セグメントの外径と同等の直径を有し幅 435mm）を設置する。
- ⑫ 重力を作用させる。
- ⑬ 110 リングの掘進。109 リングの幅 1400mm のうち 885mm が地盤に露出。土水圧、自重反力、地盤反力を載荷（図 10.2.17 参照）。
- ⑭ 111 リングの掘進。109 リングの残り 515mm に土水圧、自重反力、地盤反力を載荷。合わせて、110 リングの幅 1400mm のうち 885mm に水圧のみを載荷。
- ⑮ 112 リングの掘進。110 リングの残り 515mm に水圧のみを載荷。合わせて、111 リングの幅 1400mm のうち 885mm に水圧のみを載荷。
- ⑯ 裏込め注入材によりテール部が固着する場合を表現するケースでは、テール部の剛性を 4.6MN/m から 5.9MN/m にあげる（図 10.2.19 参照）。
- ⑰ 第 7 章で述べたように掘進管理システムのデータと掘進指示書のデータからシー

ルドマシン及びテール部を水平方向に 0.506 度、鉛直方向に 0.13 度傾ける（図 10.2.20、図 10.2.21 参照）。鉛直方向にのみ 0.13 度傾ける場合もシミュレーションを実施している。

- ⑱ ジャッキ 23、24、25、26、1、2、3、4、5（計 9 本）を抜く（図 10.2.22 参照）。
- ⑲ 上記した条件でもセグメントリングが崩壊しなかった場合、第 7 章で述べたように掘進管理システムのデータからシールドマシン及びテール部を鉛直下方に 8mm ほど変位させる。

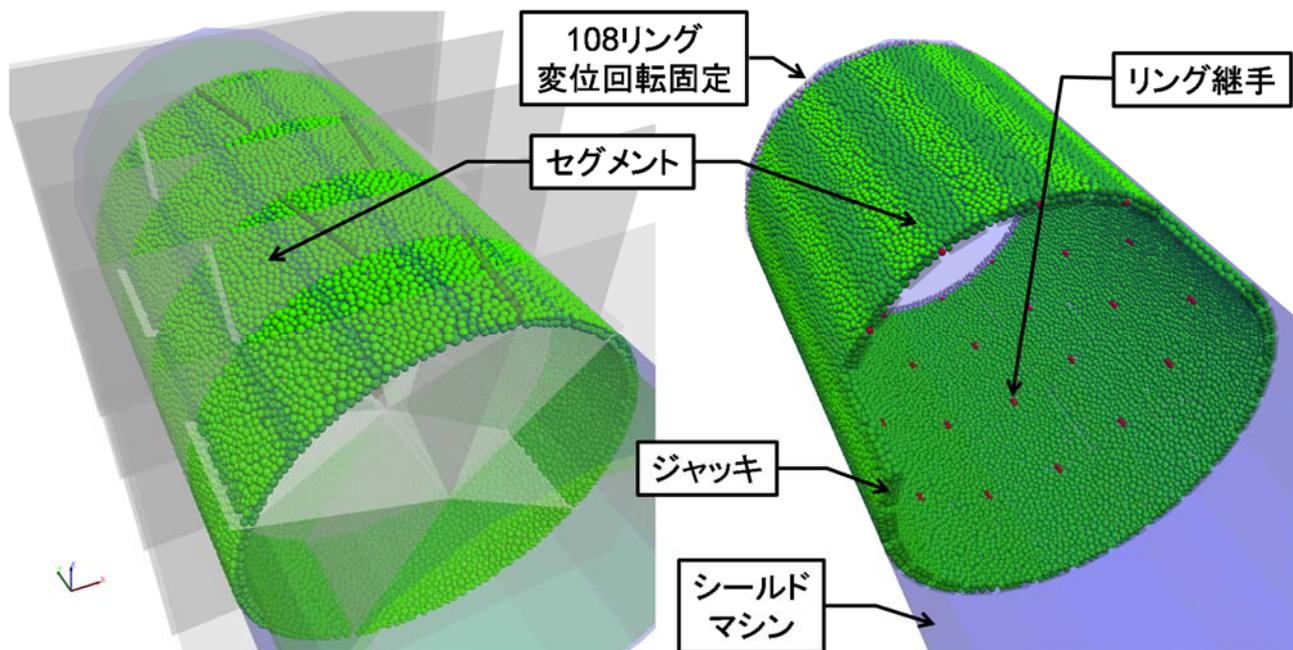


図 10.2.14 セグメント及びリング継手の作成

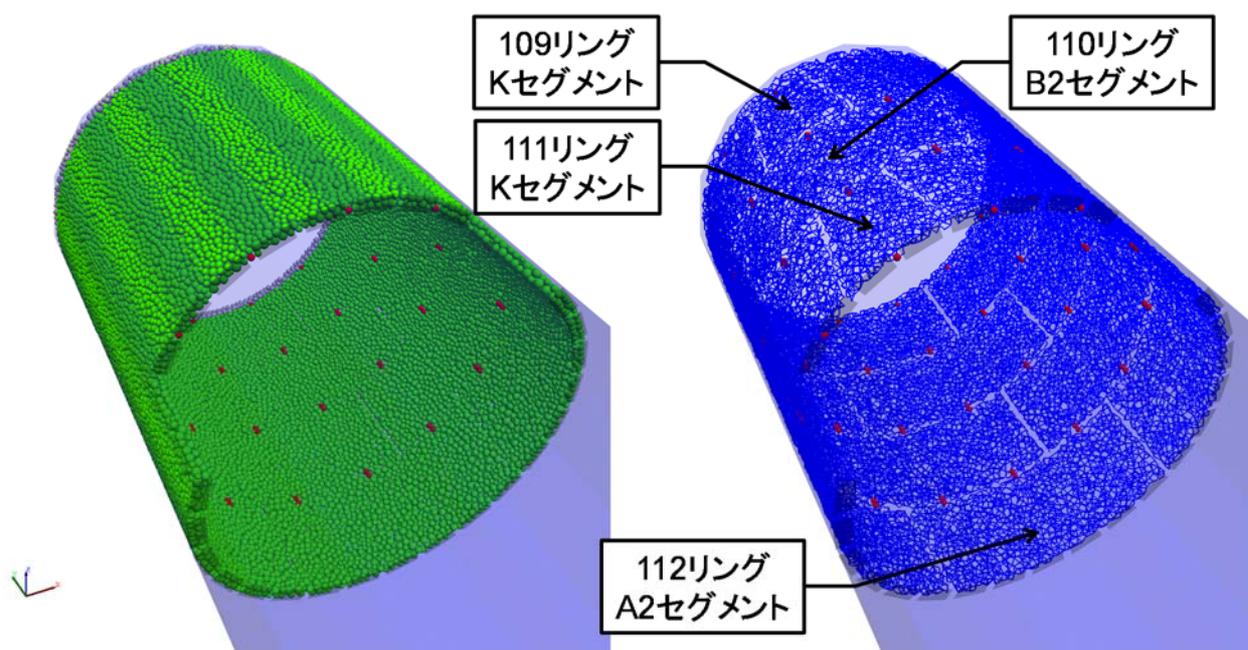


図 10.2.15 パラレルボンドの分布

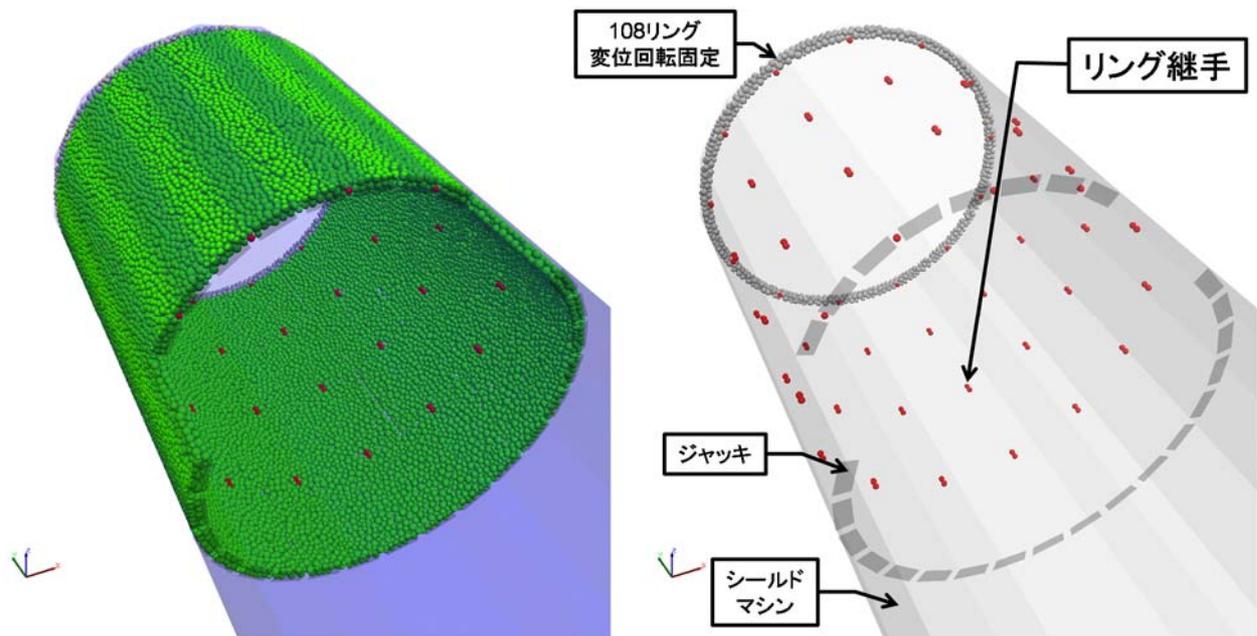


図 10.2.16 108 リングの変位回転固定、シールドマシン、ジャッキの設置

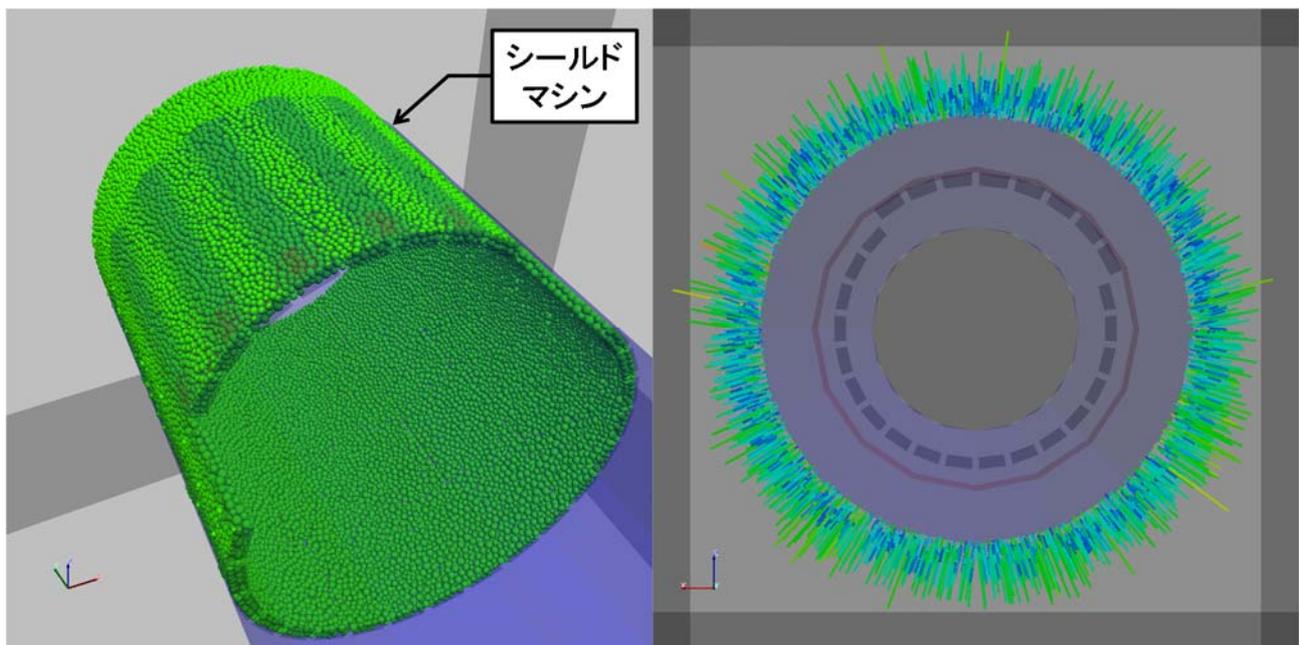


図 10.2.17 110 リングの掘進。109 リングが裏込め注入材を介して地盤と接するため、土圧、水圧、自重反力、地盤反力を载荷。

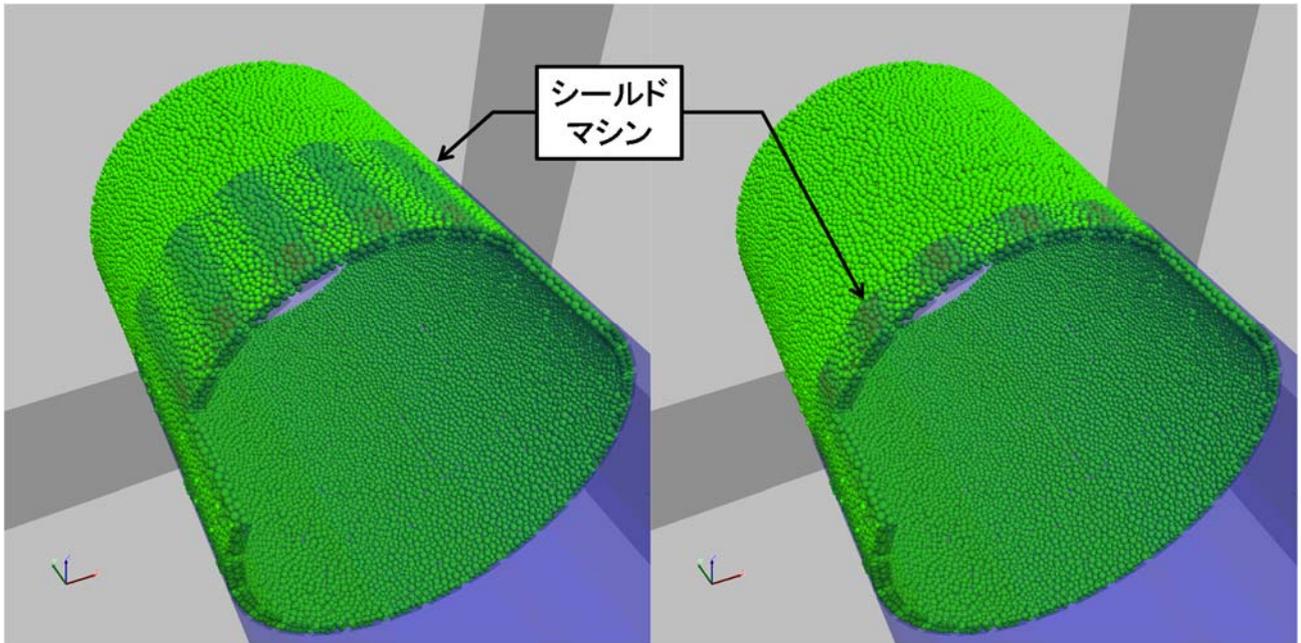


図 10.2.18 111 リングの掘進。112 リングの掘進。110 リング、111 リングに水圧のみを載荷。

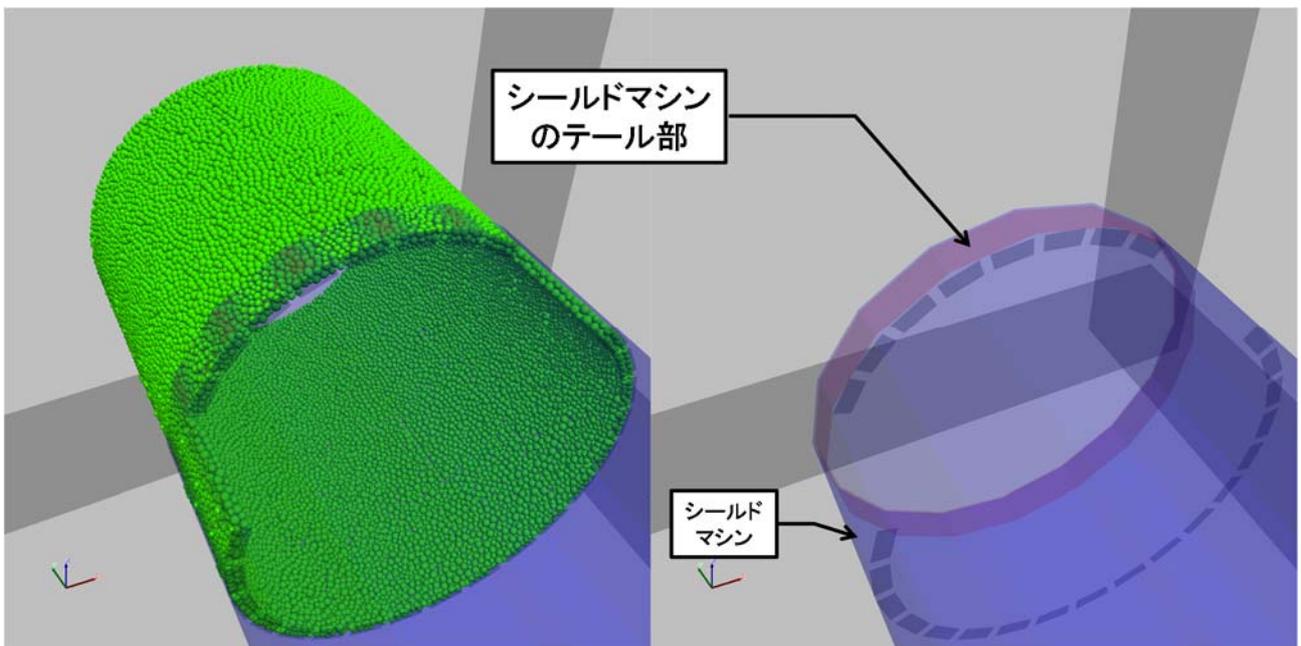


図 10.2.19 シールドマシンのテール部

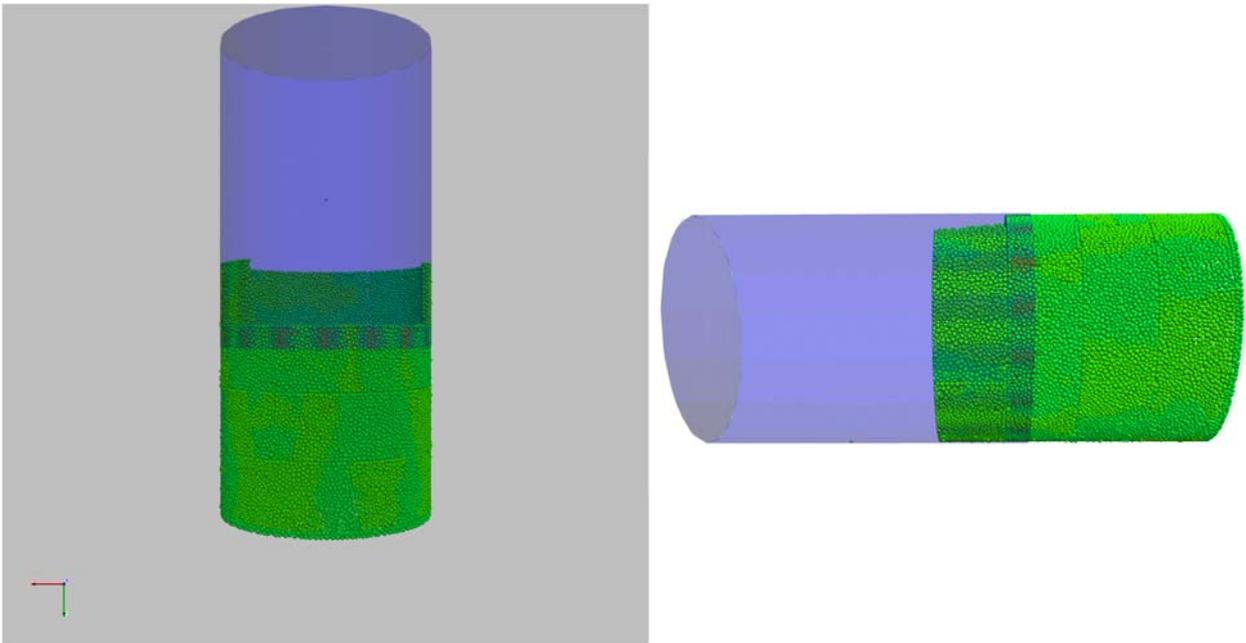


図 10.2.20 シールドマシン、テール部を水平方向に 0.506 度、鉛直方向に 0.13 度傾ける前

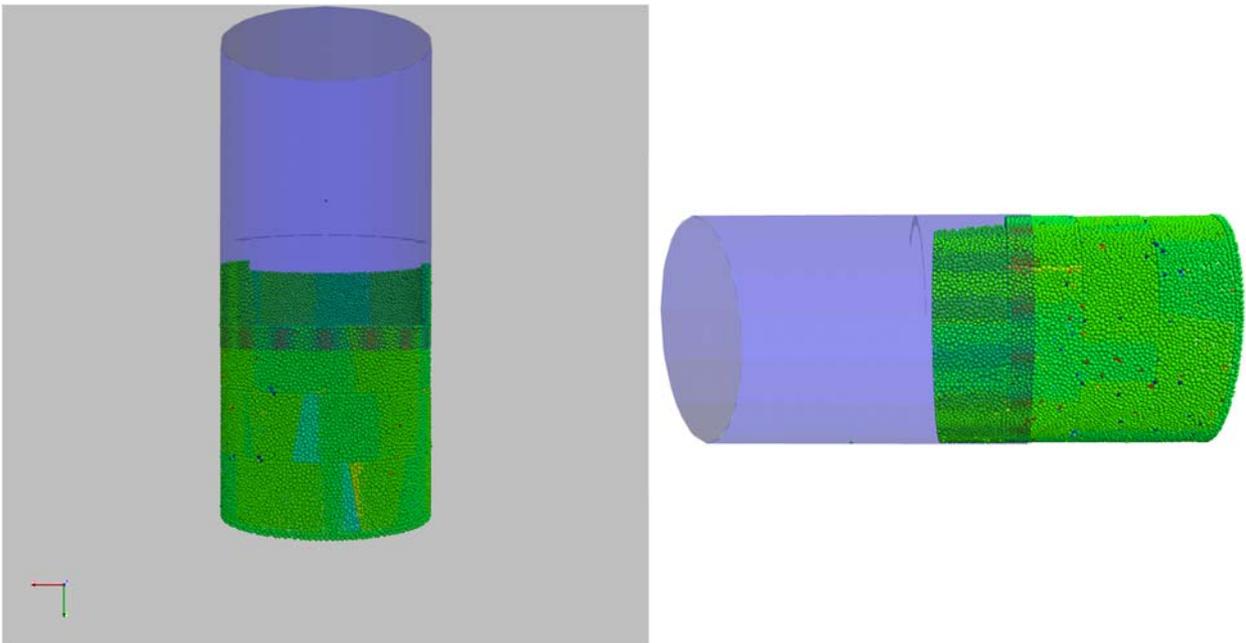


図 10.2.21 シールドマシン、テール部を水平方向に 0.506 度、鉛直方向に 0.13 度傾けた後

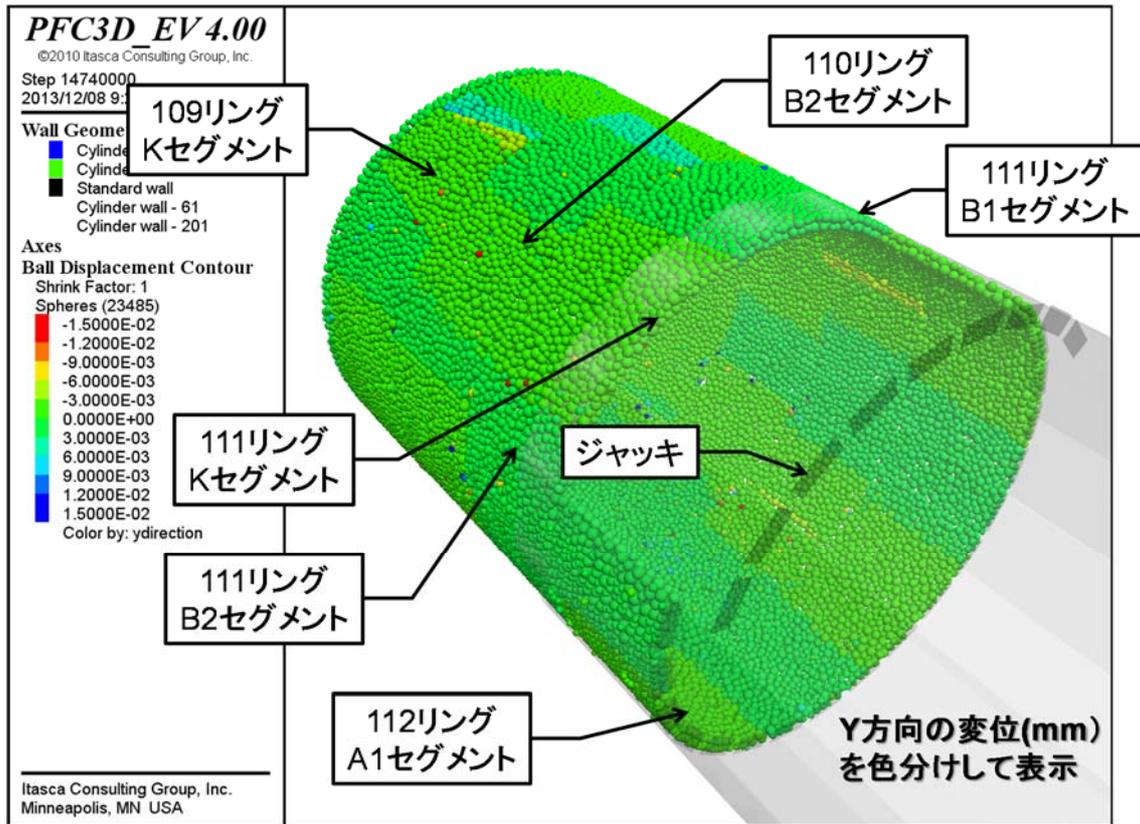


図 10.2.22 ジャッキ 23、24、25、26、1、2、3、4、5（計 9 本）を抜いた後 Y 方向（掘進方向）の変位を色分けして表示
 - : 切羽側（赤色）、+ : 発進立坑側（青色）

10.2.5 シミュレーション結果

実施したシミュレーションのケースについて表 10.2.4 に示す。

図 10.2.3～図 10.2.8 に各ケースの解析結果を示す。図中の色分けは、Y 方向（掘進方向）の変位を表示しており、Y 方向の変位がマイナスであれば切羽側に変位していることを示し（赤色）、プラスであれば発進立坑側に変位していることを示す（青色）。

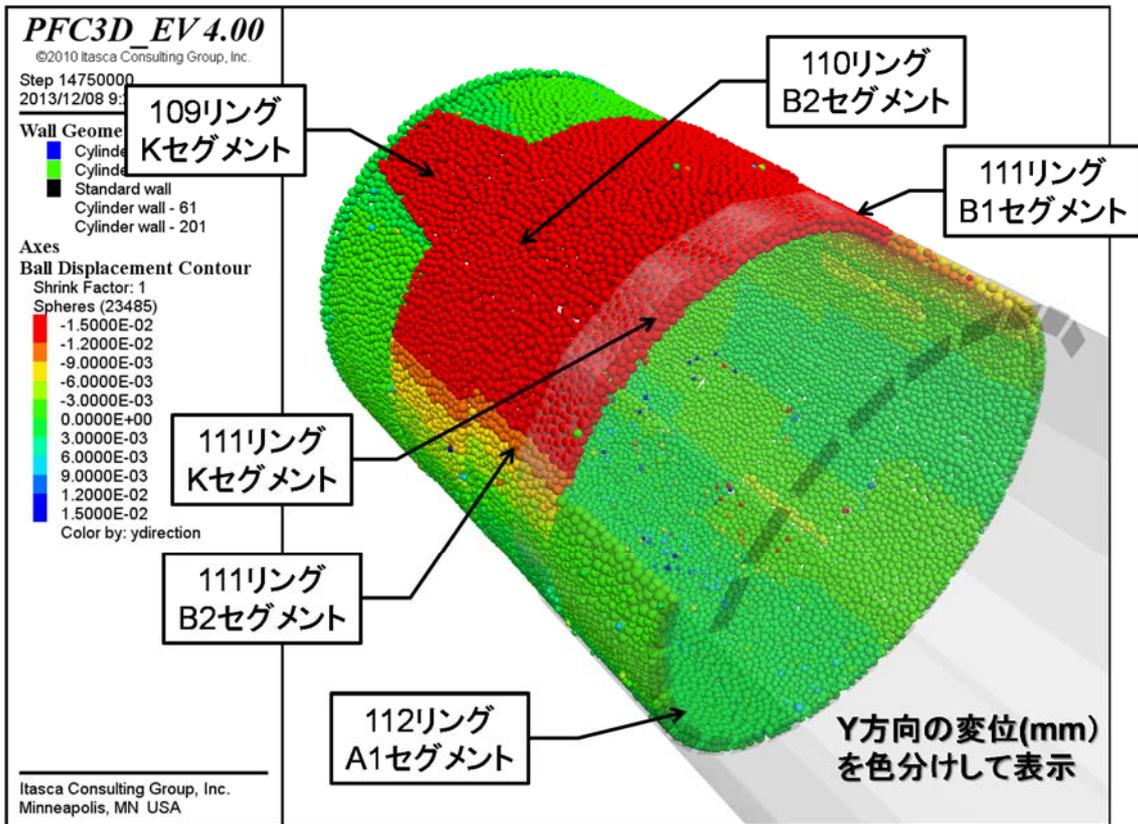
全てのケースの比較から以下のことが明らかとなった。

- ・セグメントの摩擦係数が 0.1 の場合、シールドマシンを鉛直及び水平に傾けた場合、鉛直のみに傾けた場合ともに、セグメントリングが崩壊した。
- ・テール部の固着の有無による影響はあまり見受けられなかった。これは図 10.2.13 に示したように、テール部の剛性が固着の有無によりそれほど大きく変化しないためである。
- ・セグメントの摩擦係数が 0.2 の場合、K セグメントは抜け出そうとするが、セグメントリングの崩壊には至らなかった。

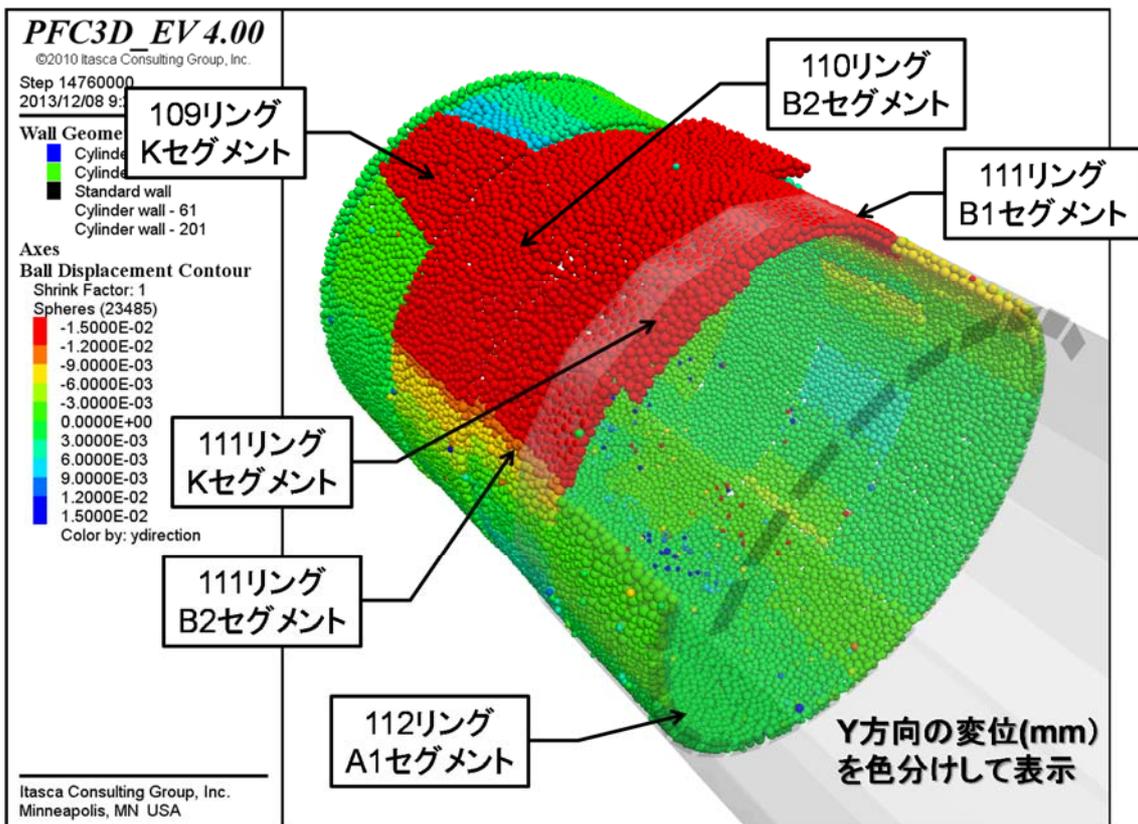
表 10.2.4 実施したシミュレーションの条件

	セグメントの摩擦係数	テール部の固着の有無	シールドマシンの鉛直方向の傾き	シールドマシンの水平方向の傾き	シールドマシンの鉛直方向の変位
Case1	0.1	有	0.13	0.506	無
Case2	0.1	無	0.13	0.506	無
Case3	0.2	無	0.13	0.506	8mm
Case4	0.1	無	0.13	無	無
Case5	0.2	無	0.13	無	8mm

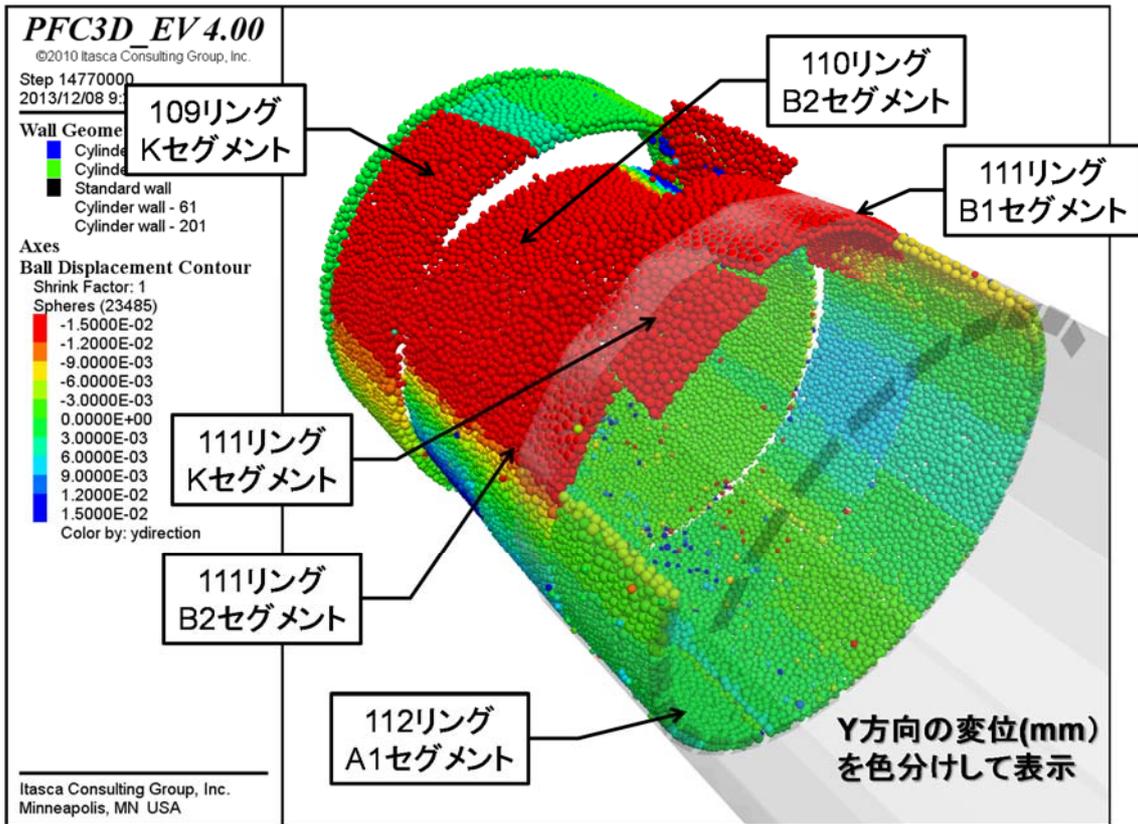
(1) Case1 : セグメントの摩擦係数 0.1、テール部の固着有、シールドマシンを鉛直方向、水平方向に傾ける。



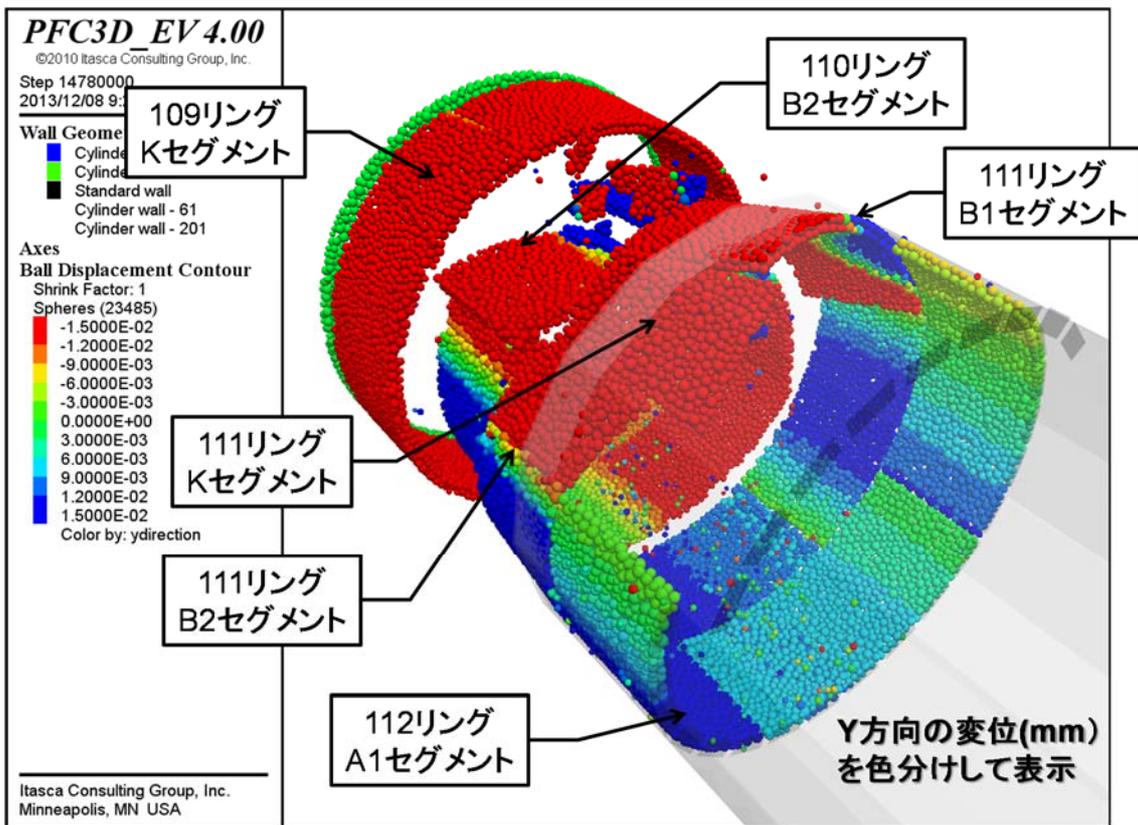
(a)



(b)

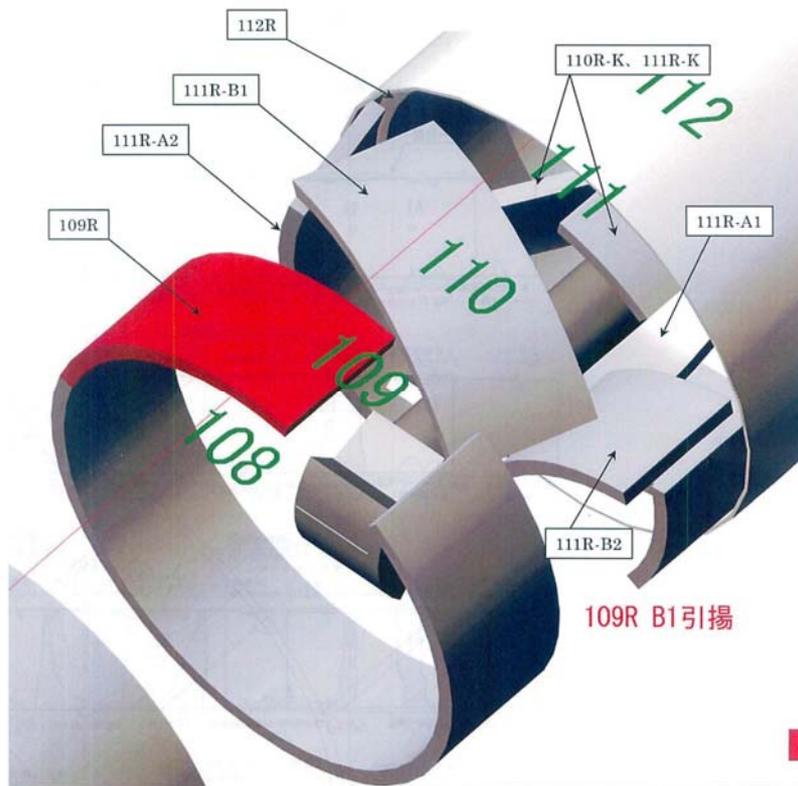


(c)

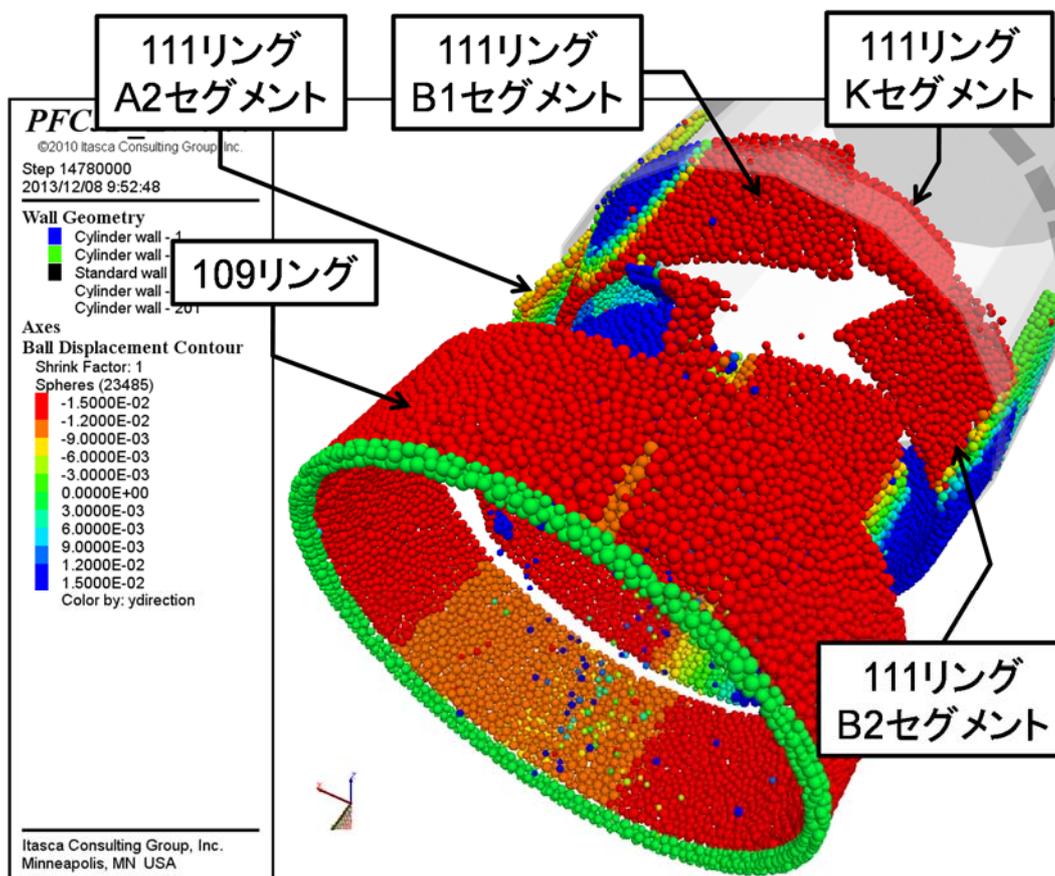


(d)

図 10.2.23 セグメントの崩壊機序、Y 方向（掘進方向）の変位を色分けして表示
 - : 切羽側（赤色）、+ : 発進立坑側（青色）



(a) 海底地盤のセグメントの状況（事業者作成）



(b) 個別要素法による崩壊状況

図 10.2.24 海底地盤のセグメントの状況と個別要素法による崩壊状況との比較

(2) Case2: セグメントの摩擦係数 0.1、テール部の固着無、シールドマシンを鉛直方向、水平方向に傾ける。

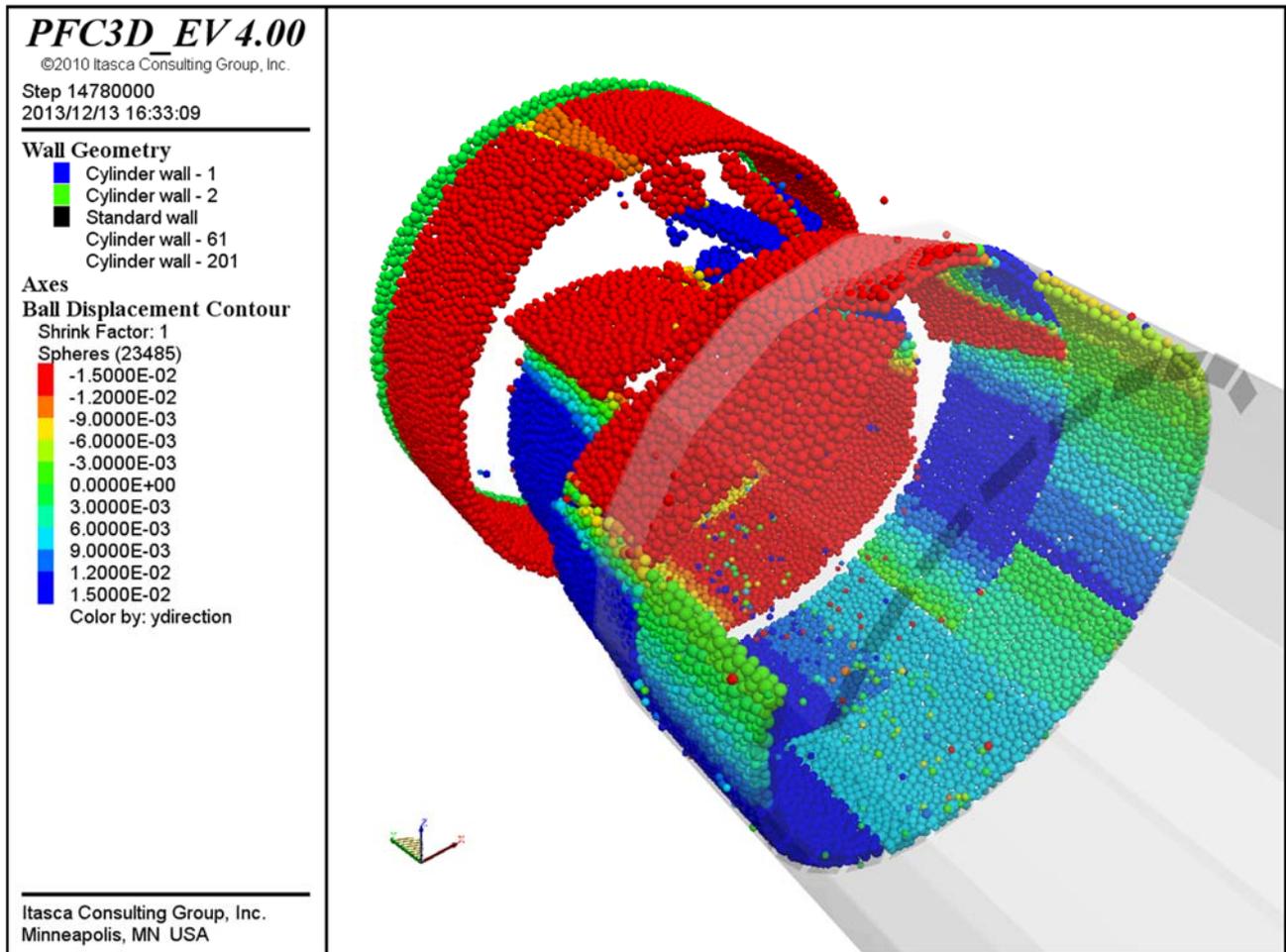


図 10.2.25 Case2 の個別要素法による崩壊状況
 Y 方向（掘進方向）の変位を色分けして表示
 - : 切羽側（赤色）、+ : 発進立坑側（青色）

(3) Case3 : セグメントの摩擦係数 0.2、テール部の固着無、シールドマシンを鉛直方向、水平方向に傾けた後、鉛直のみに 8mm 変位。

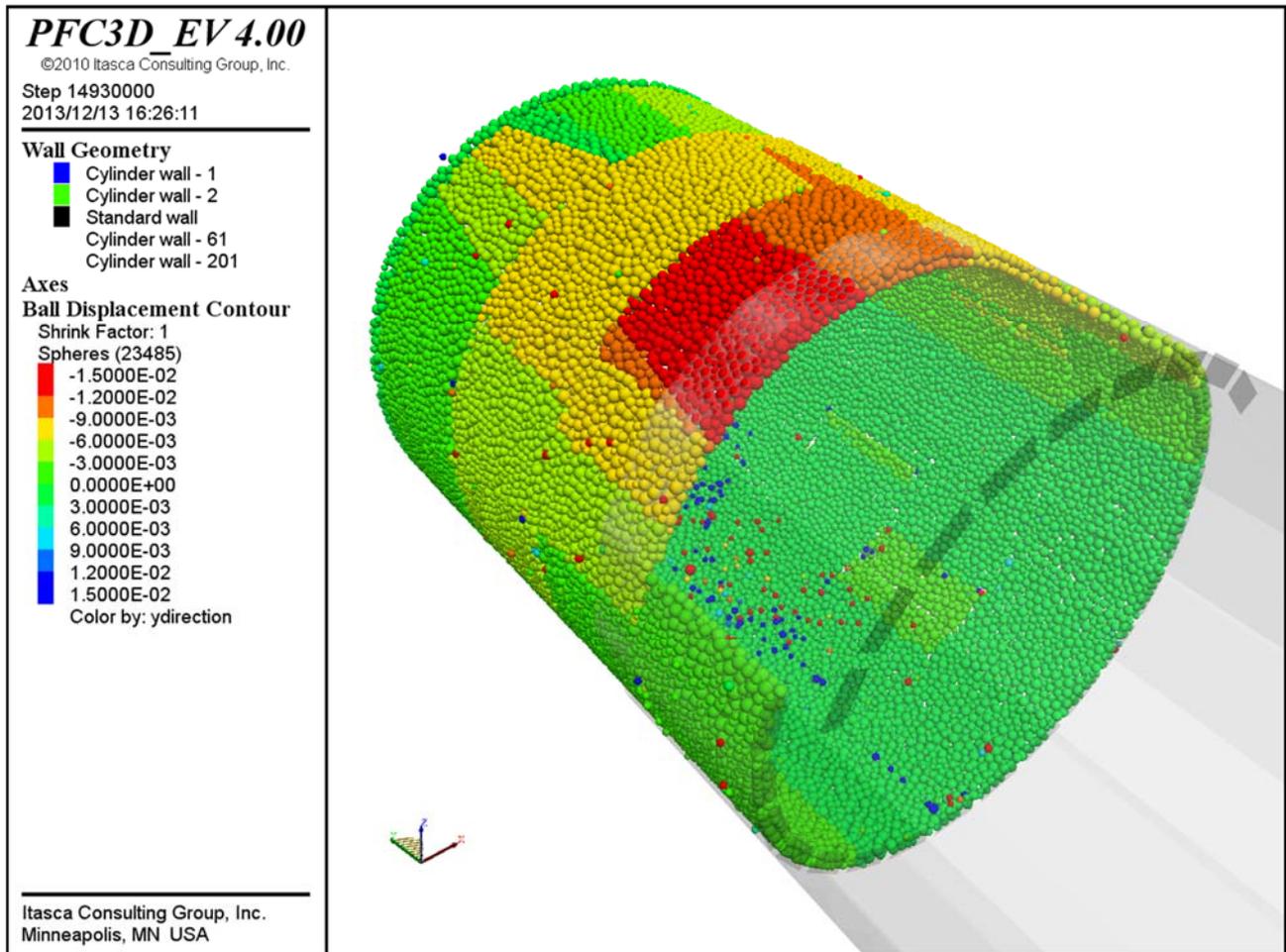


図 10.2.26 Case3 の個別要素法による崩壊状況
 Y 方向（掘進方向）の変位を色分けして表示
 - : 切羽側（赤色）、+ : 発進立坑側（青色）

(4) Case4: セグメントの摩擦係数 0.1、テール部の固着無、シールドマシンを鉛直方向のみに傾ける。

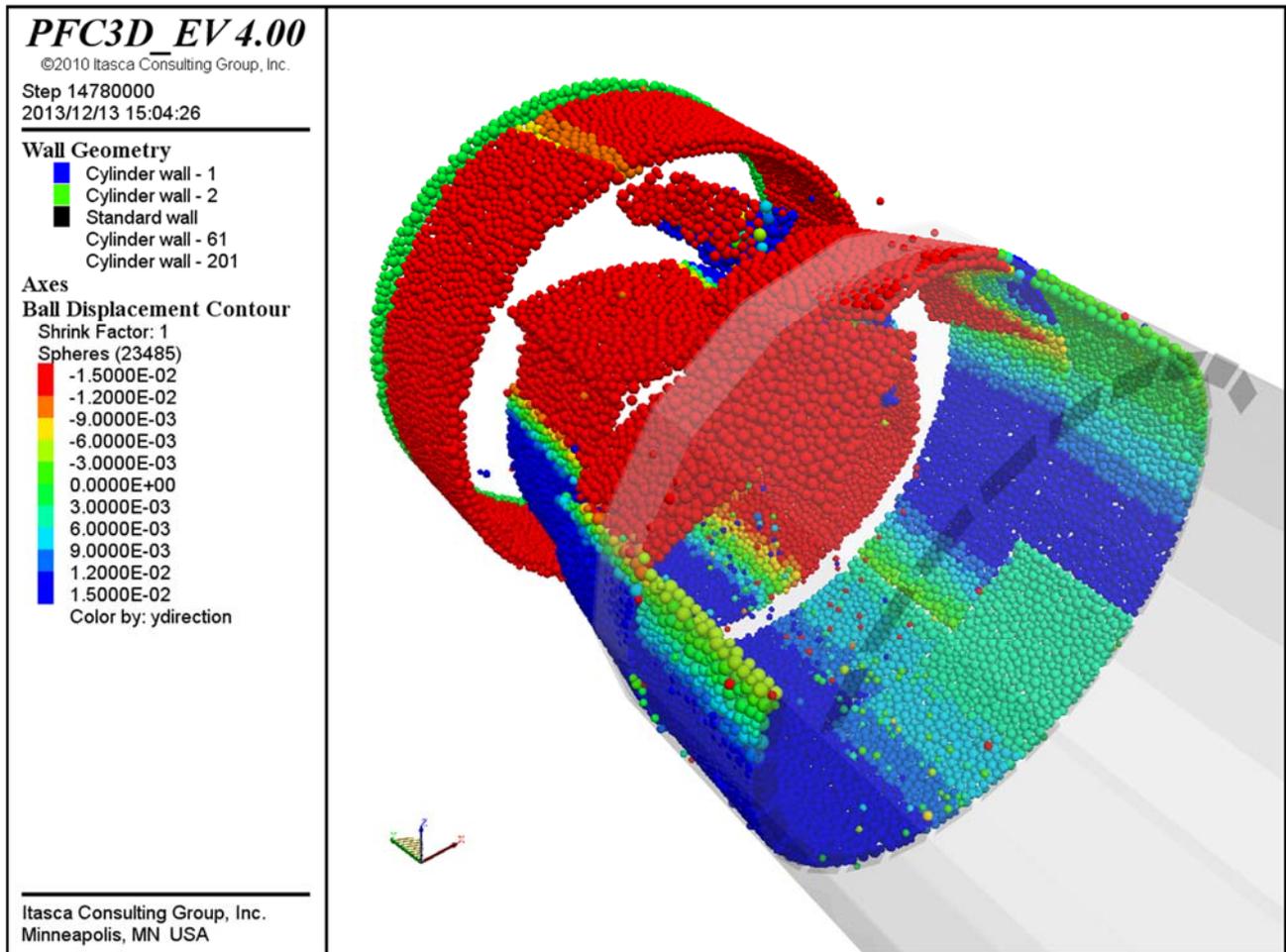


図 10.2.27 Case4 の個別要素法による崩壊状況
 Y 方向（掘進方向）の変位を色分けして表示
 - : 切羽側（赤色）、+ : 発進立坑側（青色）

(5) Case5 : セグメントの摩擦係数 0.2、テール部の固着無、シールドマシンを鉛直方向のみに傾けた後、鉛直のみに 8mm 変位。

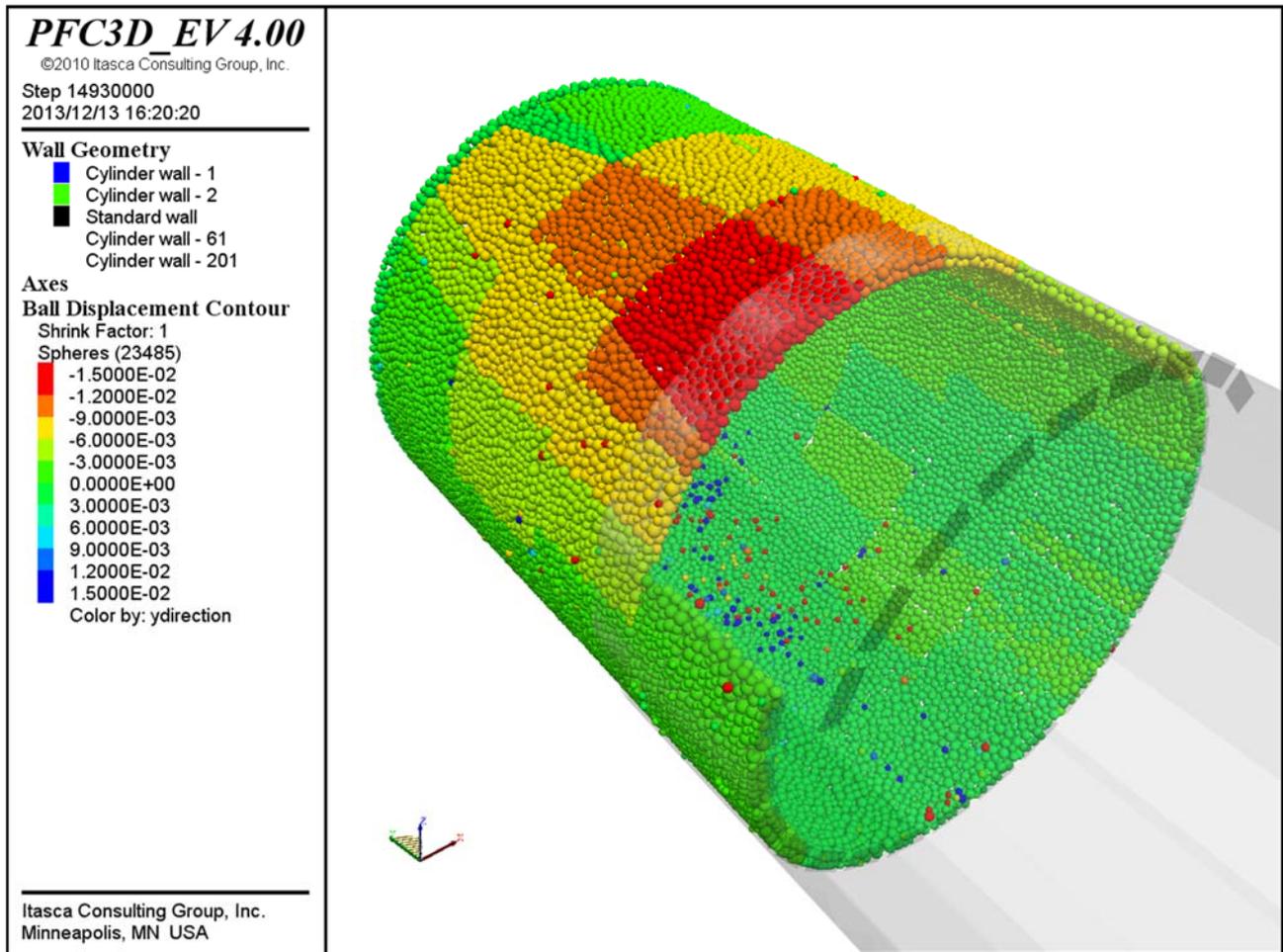


図 10.2.28 Case5 の個別要素法による崩壊状況
 Y 方向（掘進方向）の変位を色分けして表示
 - : 切羽側（赤色）、+ : 発進立坑側（青色）

10.3 本章のまとめ

- (1) 第7章で示した災害発生時にシールドマシン前面の切羽圧が低下したことについて、3次元有限要素法による非定常浸透流解析から、111リングのKセグメントに隙間が生じ、その隙間からシールドマシン内に水が流入したことで説明できることが明らかとなった。
- (2) 第7章で得られたシールドマシンのセグメントに対する傾き、上部のジャッキを9本引き抜くこと等、災害発生直前の状態を3次元個別要素法により再現したところ、111リングのKセグメントが抜け出そうとし、111リング、110リングがほぼ同時に破壊することが明らかとなった。3次元個別要素法による解析でも第8章で示した破壊の機序と同様にセグメントが破壊した。

参考文献

- 1) 事業者：「水島第二パイプライン防護設備建設工事 平成 22 年度詳細設計 設計計算書（その 1）」, 2011 年 3 月.
- 2) Itasca Consulting Group Inc.: Particle Flow Code in 3 Dimensions Theory and Background、 pp.2-4~2-5、 pp. 2-6~2-10、 pp. 1-24~1-25、 pp. 1-15~1-22、 Minneapolis Minnesota 554ji01 USA、 2008.
- 3) 吉川直孝、堀智仁、伊藤和也、三田地利之: 固結粒状材料における個別要素法パラメータの決定方法の検討、地盤工学ジャーナル、Vol. 8、No. 2、pp. 221-237、2013.
- 4) 高橋正朗ら、シールドのテールシールドがセグメントに与える影響に関する研究、土木学会論文集 F1 (トンネル工学) 特集号 Vol.66、No.1、pp.109-120.