

### 3次元山留め掘削実験とその解析

日衡 (名古屋工業大学大学院) ○正 会 員 岩田 尚之  
名古屋工業大学大学院 学生会員 井上 泰介  
名古屋工業大学大学院 学生会員 竹井 秀貴  
名古屋工業大学 国際会員 中井 照夫  
名古屋工業大学 国際会員 檜尾 正也

#### 1.はじめに

山留め掘削の設計は一般的に2次元問題として行われる。またその設計は初めに土圧を設定するが、その土圧は地盤定数にのみ依存し壁体剛性に依存しない。これはランキンを始めとする剛塑性論に基づく主働土圧、受働土圧論に準拠し計算する結果である。しかし、これまでの2次元での実験および弾塑性解析による研究<sup>1)</sup>から土圧は施工過程や壁体剛性によって分布形状や大きさが変化し、その変化は深度方向でのアーチ効果によって決められることがわかっている。3次元問題ではこの土圧変化は深度方向だけでなく水平方向を含む3次元アーチ効果によって決まることを実験・解析で検討するとともに、2次元問題として扱った土圧結果と比較し3次元土圧の発生メカニズムを明らかにする。また、従来の2次元による設計を3次元化することのメリットについて述べる。

#### 2.実験装置概要

実験装置は2次元実験、3次元実験共に同じ実験機を使用した。Fig.1に実験装置の概要を示す。内寸法が幅50cm高さ32cm奥行き80cmの土槽を備え、1つの側面中央部に1辺を8cmとしたブロックが3段に設置され、それぞれ独立及び同時にスライドさせることが出来る。個々のスライドブロックには2cm×4cmを受圧面積とするロードセルが4×2個(計8個)備えられている。実験結果の出力として各段階で土圧分布と背面側の地表面変位の計測を行った。背面側の地表面沈下は上方のスライドシャフト上を連続的に移動できるレーザー変位計とスライドブロックからの距離を装置上部に設置した超音波変位計により測定を行った。これらの計測器はすべてデータロガーを通じてパソコンに接続され自動計測できるようになっている。2次元実験は幅5cm直径1.6mmと3mmのアルミ棒を重量比3:2として混合させたアルミ棒積層体( $\gamma_d=20.4\text{kN/m}^3$ )を地盤材料として使用し、3次元実験では粒径2mmと3mmのアルミナボールを重量比1:1として混合させたアルミナボール積層体( $\gamma_d=21.5\text{kN/m}^3$ )を使用した。

実験は次の4パターンで行った。

- <パターンI> 上側のブロックを段階的に4.0mmまでスライドさせる。  
その後中間、下側のブロックも同様の方法で4.0mmまでスライドさせる。
- <パターンII> 中間のブロックを段階的に4.0mmまでスライドさせる。
- <パターンIII> 下側のブロックを段階的に4.0mmまでスライドさせる。
- <パターンIV> 3段のブロックを同時に段階的に4.0mmまでスライドさせる。

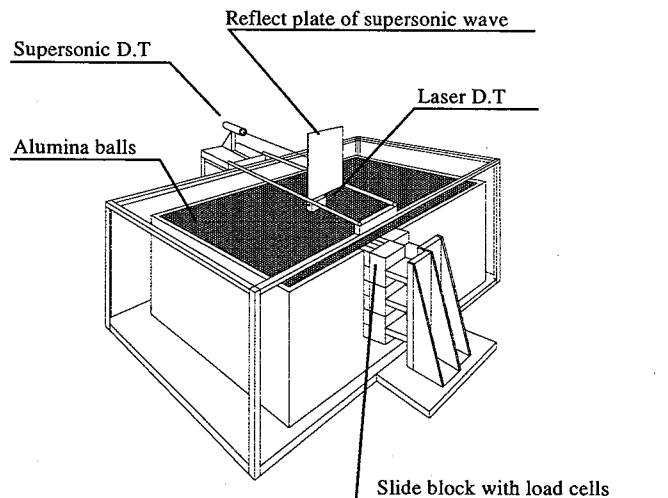


Figure 1. Apparatus for 3D model tests.

### 3. 解析概要

2次元と3次元共に等方硬化型の弾塑性構成式 (subloading  $t_{ij}$  model<sup>2)</sup>) を用いて有限要素解析を行った。解析に用いたパラメータは今まで用いているアルミ棒、アルミナボールを用いた実験の解析同様 Table.1 に示す値を用いた。参考としてアルミ棒とアルミナボール積層体の応力-ひずみ-ダイラタンシー関係を Fig.2 に示す。同図からアルミ棒およびアルミナボール積層体は正のダイラタンシーを示す砂に近い力学特性を示すことが判る。初期地盤は単位体積重量 (2次元:  $\gamma_d=20.4 \text{ kN/m}^3$ 、3次元:  $\gamma_d=21.5 \text{ kN/m}^3$ ) を自重圧密させ、計算機の中で作成した。解析に用いたメッシュ図を Fig.3、Fig.4 に示す。3次元解析の境界条件は底面は完全固定、側面は水平方向固定、深度方向を自由とした。2次元解析の境界条件は底辺完全固定、側面は水平方向固定とした。スライドブロックは接点に強制変位を与える手法で解析を行った。解析は実験に合わせ4つのパターンで行った。

Table.1 Parameter

$\lambda$	0.008
$\kappa$	0.004
$N(e_{NC} \text{ at } p=98\text{kPa} \text{ \& } q=0\text{kPa})$	0.3
$R_{CS}=(\sigma_1/\sigma_3)_{CS(\text{comp.})}$	1.8
$\beta$	1.2
$\nu_e$	0.2
$a$	1300

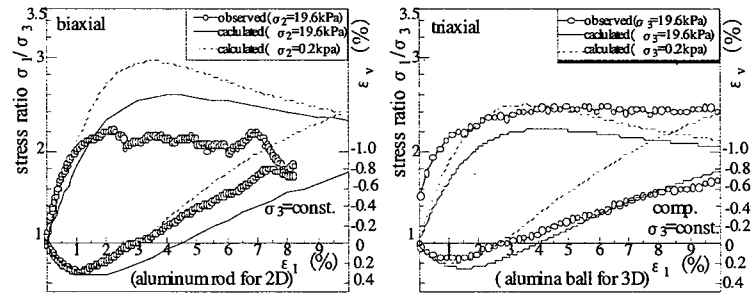


Figure 2. Observed and calculated stress: strain: dilatancy curves.

- (a) Biaxial test on aluminum rods mass
- (b) Triaxial test on alumina balls mass

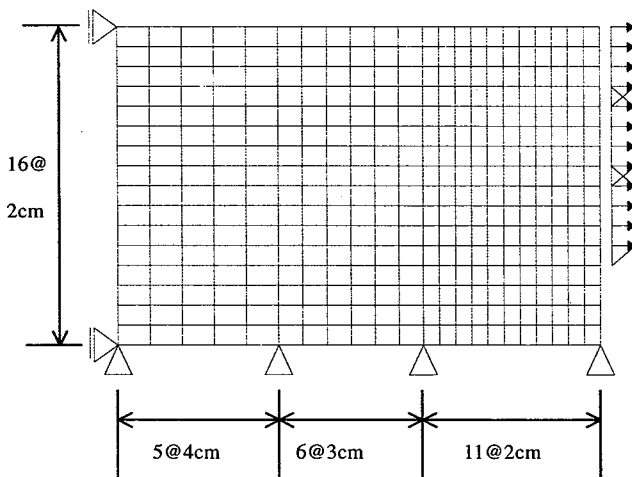


Figure.3 2D mesh

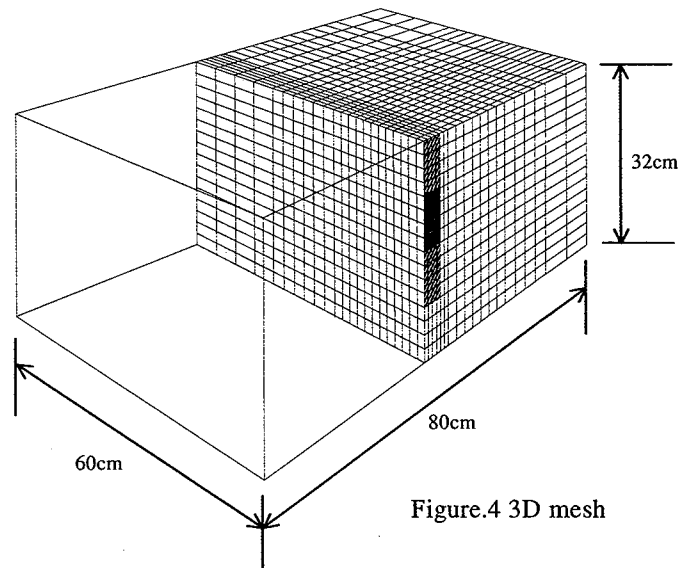


Figure.4 3D mesh

### 4. 地表面沈下の比較

パターンIの2次元実験結果を Fig.5、3次元実験結果を Fig.6、2次元解析結果を Fig.7、3次元解析結果を Fig.8 に示す。2次元と3次元の両方において解析結果は実験結果をよく説明している。実験および解析結果の傾向として、3次元では2次元に比べ掘削面付近で局所的に沈下が発生するが、最大沈下量は2次元と比べて大きくなる。このことから掘削面に隣接した構造物がある時、2次元で解析した場合には緩やかな傾斜を生じ問題とならない結果が得られても、実際の3次元では掘削面に隣接した構造物が沈下の影響があることになる。一方、2次元解析で影響を受ける範囲を推定した時、それは影響範囲を過大に見積もる可能性がある。このように2次元と3次元では沈下形状や大きさの解析結果に大きな違いが見られる。

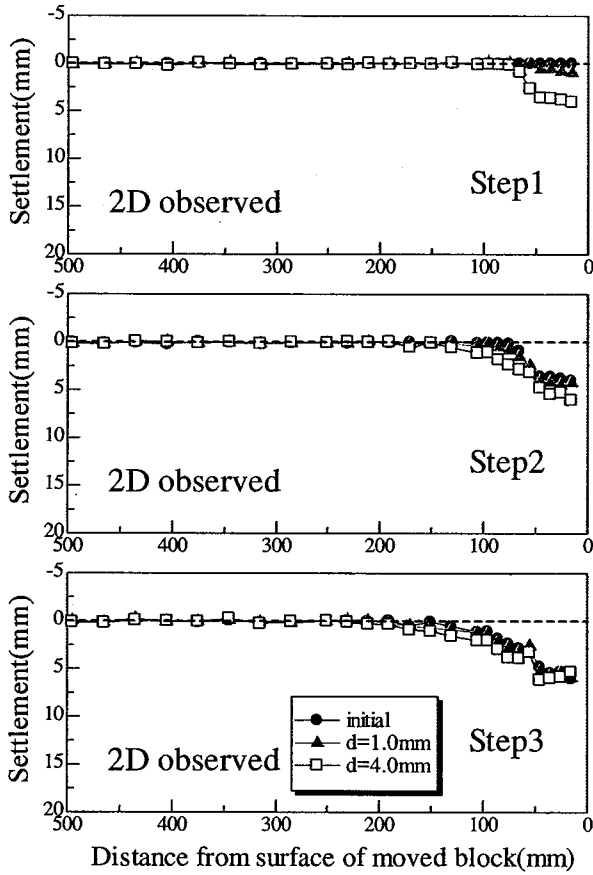


Figure 5. Observed surface settlements in pattern I of 2D test.

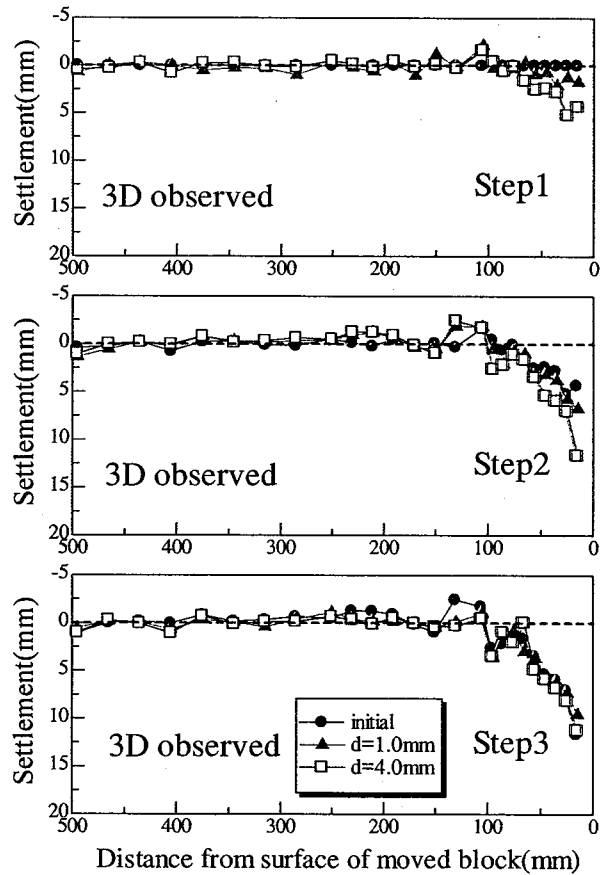


Figure 6. Observed surface settlements in pattern I of 3D test.

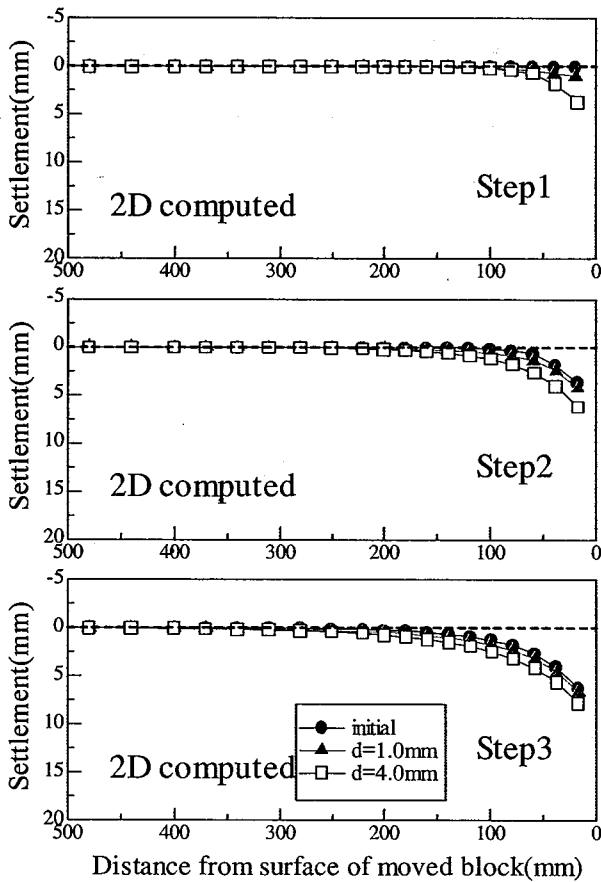


Figure 7. Computed surface settlements in pattern I of 2D test.

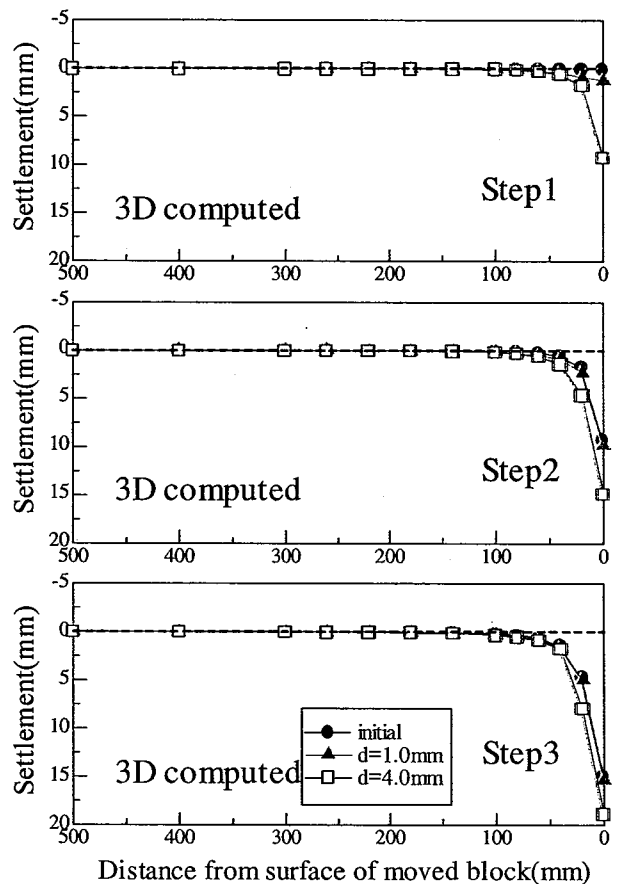


Figure 8. Computed surface settlements in pattern I of 3D test.

パターン II, III の 2次元実験結果を Fig.9、3次元実験結果を Fig.10、2次元解析結果を Fig.11、3次元解析結果を Fig.12 に示す。中間ブロックあるいは下側ブロックだけを動かすパターン II, III では実験、解析のいずれの場合も地表面沈下への影響は少ない。

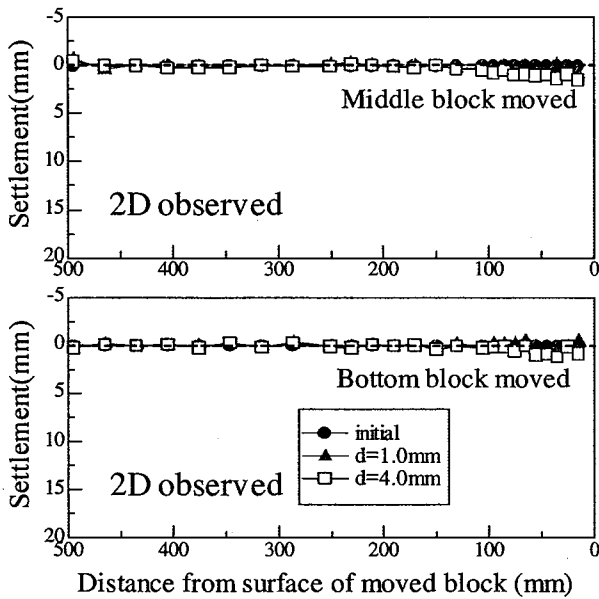


Figure 9. Observed surface settlements in pattern II and pattern III of 2D test.

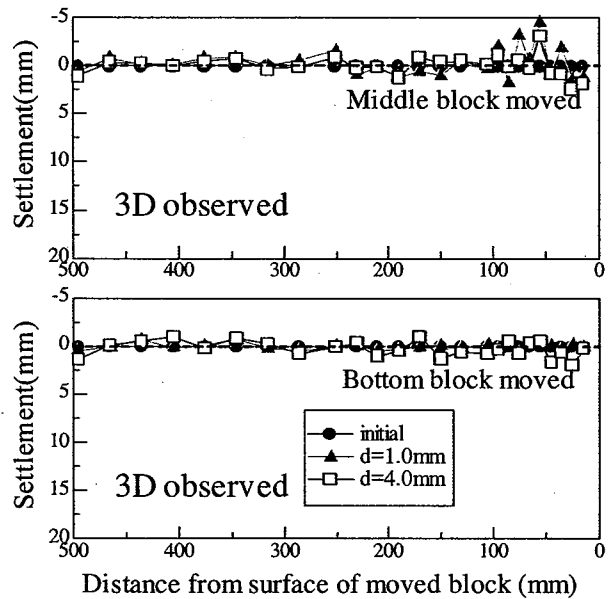


Figure 10. Observed surface settlements in pattern II and pattern III of 3D tests.

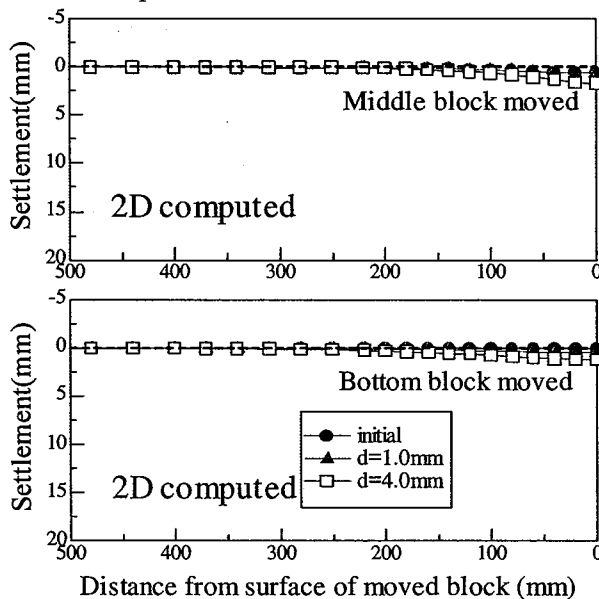


Figure 11. Computed surface settlements in pattern II and pattern III of 2D tests.

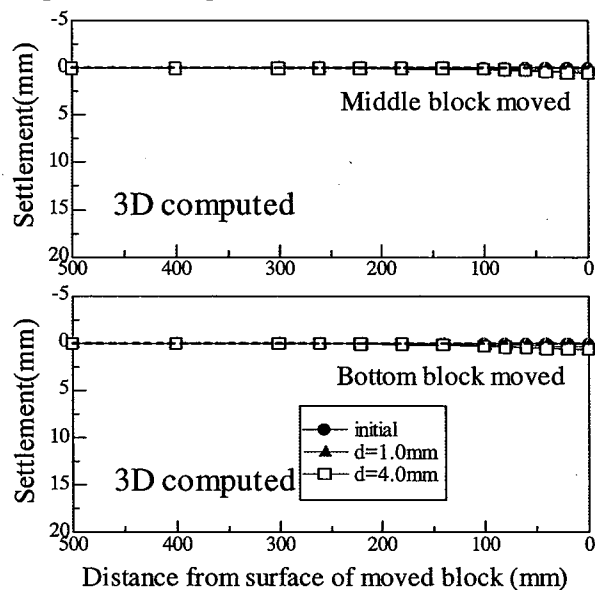


Figure 12. Computed surface settlements in pattern II and pattern III of 3D tests.

パターン IV の 2次元実験結果を Fig.13、3次元実験結果を Fig.14、2次元解析結果を Fig.15、3次元解析結果を Fig.16 に示す。ここでも、2次元に比べ3次元ではパターン I 同様地表面沈下は局所的に起こり、そこでの沈下量は3次元に比べ大きくなる。さて、Figs 5, 6 の実験結果および Figs. 7, 8 の解析結果の最終的な地表面沈下(Step 3)とここでパターン IV の解析および実験結果(Figs. 13- 15)を比較する。2次元と3次元のそれぞれで最終的に同じ壁体変位を与えていることになるが、実験および解析のいずれにおいても上から順次変位を与えていく方が同時に変位を与えるよりも地表面沈下の生じる範囲は狭くその最大値は大きくなっている。この壁体の変形過程の影響については既報<sup>3)</sup>で示しているが、ここでも同じ結果が実験、解析の両結果から得られている。すなわち、壁体の変形過程を考えない2次元解析で地表面沈下のプロファイルを予測したとき、変形過程と3次元効果の両特性を考慮していないため、影響範囲はかなり過大に、最大沈下量は

かなり過小に見積もることになる。

Fig.14 と Fig.16 の最大沈下量に若干の差が見えるが実験ではブロック近傍の勾配が急なためにアルミナボールが僅かではあるが側方から転がり込んだ事を付け加える。

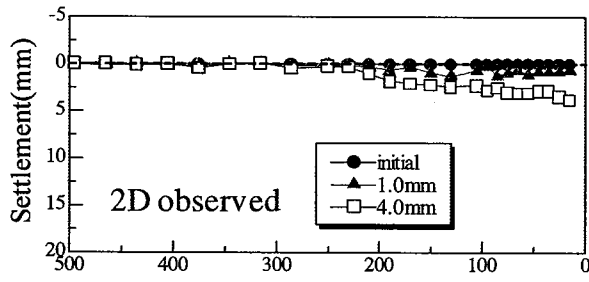


Figure 13. Observed surface settlement in pattern IV of 2D test.

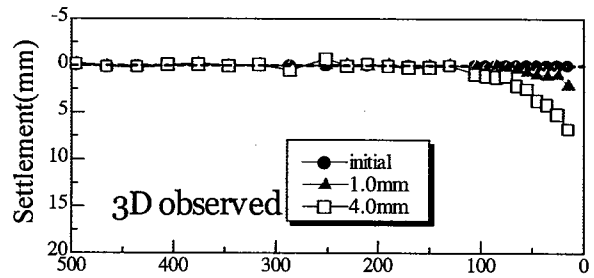


Figure 14. Observed surface settlement in pattern IV of 3D test.

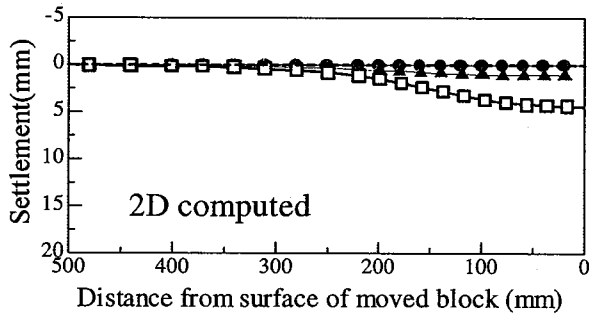


Figure 15. Computed surface settlements in pattern IV of 2D tests.

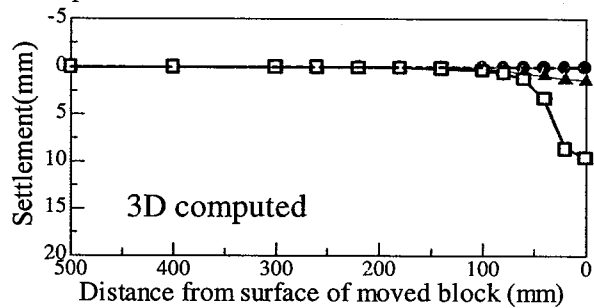


Figure 16. Computed surface settlements in pattern IV of 3D tests.

## 5. 土圧の比較

パターンIの2次元実験結果を Fig.17、3次元実験結果を Fig.18、2次元解析結果を Fig.19、3次元解析結果を Fig.20 に示す。尚、図中の矢印はスライドさせたブロック位置を示している。ここでも2次元、3次元に拘わらず解析結果は実験結果をよく表現している。3次元結果と2次元結果を比較すると、2次元ではスライドさせたブロックでの土圧は減少しその近傍での土圧の増加すなわちアーチング作用が見られるが、3次元では2次元で見られたようなブロック近傍での土圧の増加はほとんど見られない。また、全体として2次元に比べ3次元では動かしたブロックの土圧は小さくなる。また土圧の分布形状としてはランキン土圧のような三角形分布を示さず、2次元では樽状、3次元ではほぼ深さ方向に一様な分布となる。

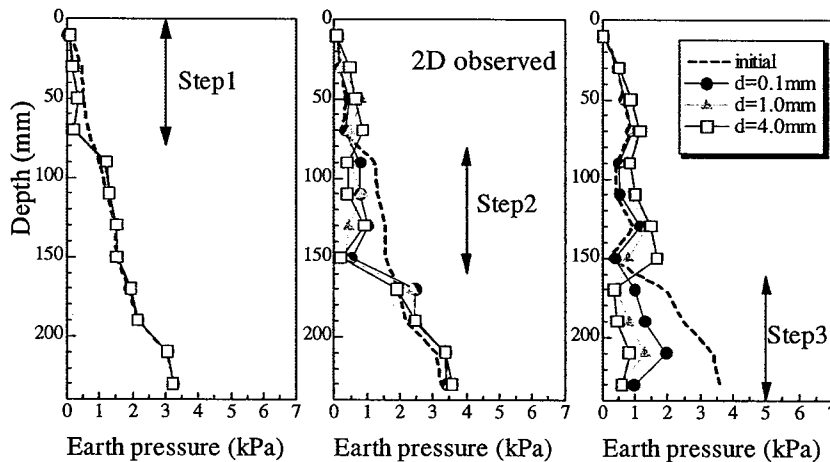


Figure 17. Observed earth pressure distributions in pattern I of 2D test.

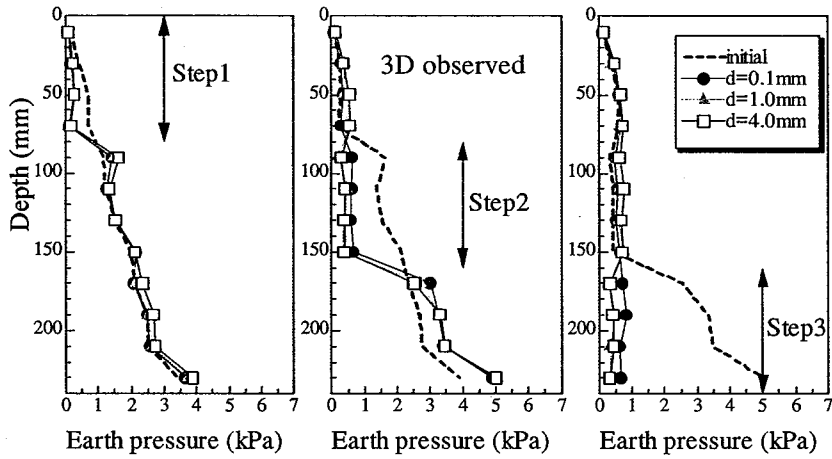


Figure 18. Observed earth pressure distributions in pattern I of 3D test.

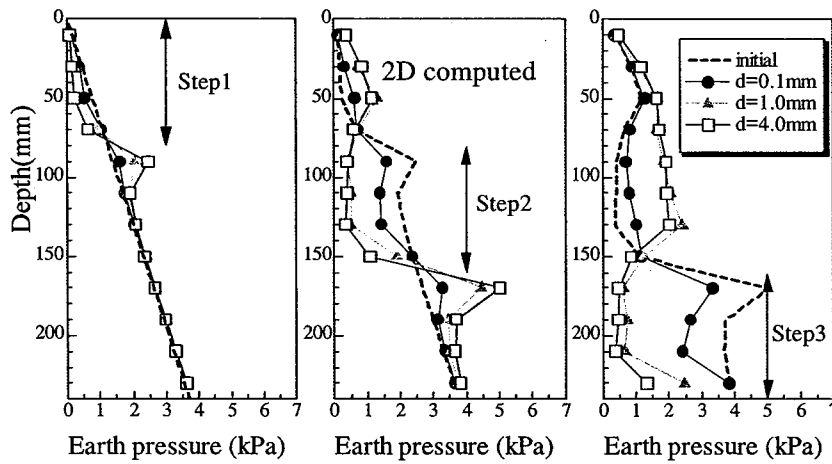


Figure 19. Computed earth pressure distributions in pattern I of 2D test.

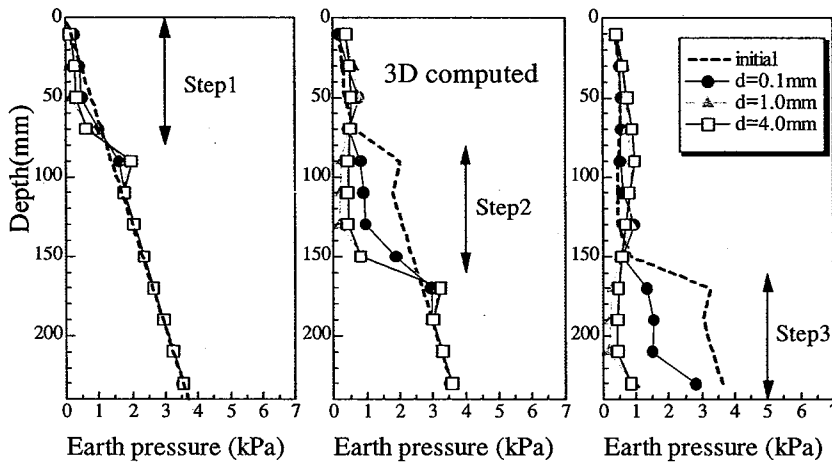


Figure 20. Computed earth pressure distributions in pattern I of 3D test.

パターン II, III の 2次元実験結果を Fig.21、3次元実験結果を Fig.22、2次元解析結果を Fig.23、3次元解析結果を Fig.24 に示す。パターン I の結果同様 3次元結果は 2次元結果と比較して土圧が小さくなる傾向が確認できる。ここでもランキン土圧のような三角形分布はしていない。

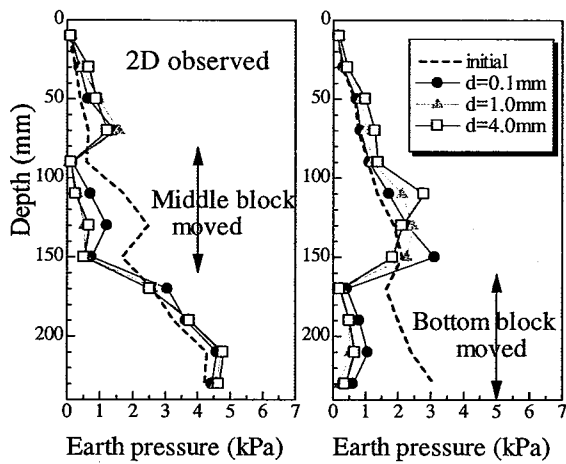


Figure 21. Observed earth pressure distributions in pattern II and pattern III of 2D test.

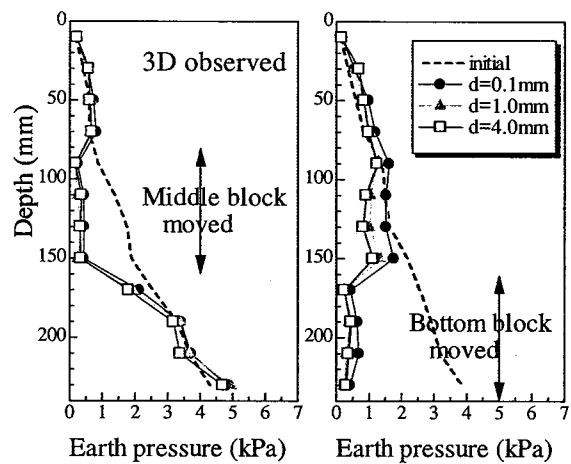


Figure 22. Observed earth pressure distributions in pattern II and pattern III of 3D tests.

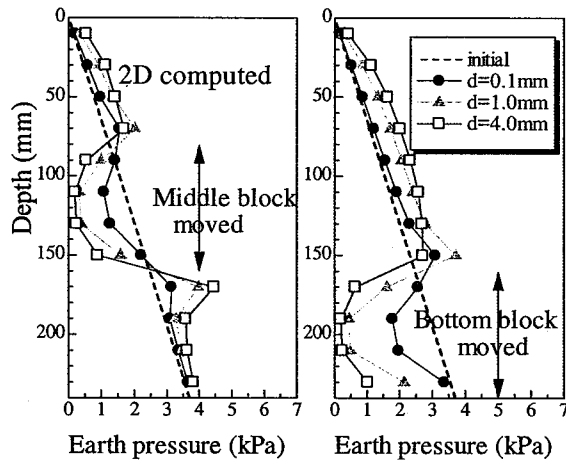


Figure 23. Computed earth pressure distributions in pattern II and pattern III of 2D tests.

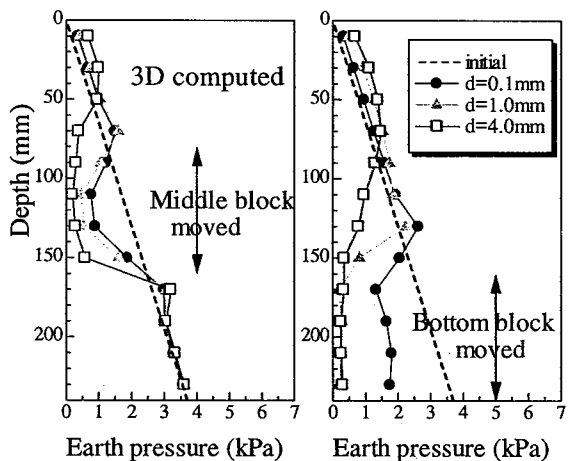


Figure 24. Computed earth pressure distributions in pattern II and pattern III of 3D tests.

パターンIVの2次元実験結果をFig.25、3次元実験結果をFig.26、2次元解析結果をFig.27、3次元解析結果をFig.28に示す。実験、解析とも2次元と3次元でよく似た土圧分布を示すが、ここでも3次元での土圧は2次元でのそれに比べ小さいことも判る。また、パターンIのSTEP3と最終形状はよく似た分布となっている。2次元での土圧分布は変位過程の影響を大きく受けているが3次元では2次元程明確な違いが見られない。地表面沈下の結果は前述したように、3次元でも土圧分布は壁体の変位過程の影響を受ける。

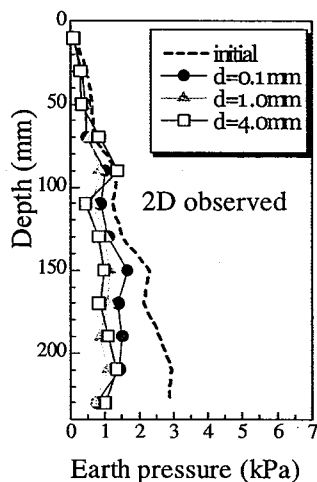


Figure 25. Observed earth pressure distributions in pattern IV of 2D test.

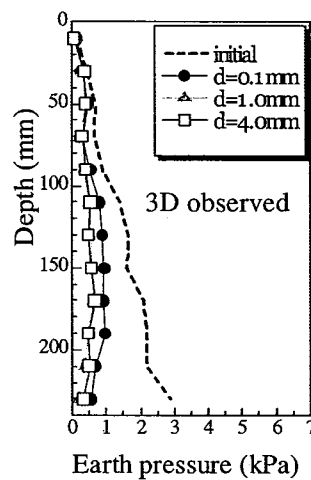


Figure 26. Observed earth pressure distributions in pattern IV of 3D tests.

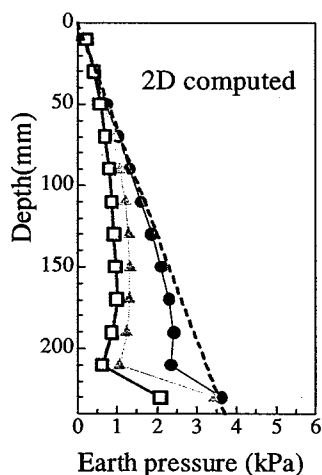


Figure 27. Computed earth pressure distributions in pattern IV of 2D tests.

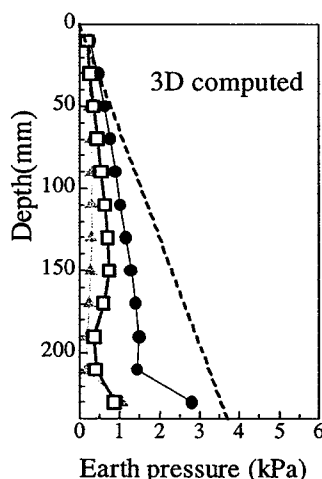


Figure 28. Computed earth pressure distributions in pattern IV of 3D tests.

## 6. 結論

3次元山留め実験および解析を2次元実験および解析と合わせて4つのパターンで行った。その結果、掘削問題を2次元で扱う場合と3次元問題として扱う場合では、地表面沈下や土圧が大きく異なることが判った。特に2次元では広範囲で緩やかな地表面沈下が生じるが、3次元では狭い範囲で局所的に地表面沈下が生じる。また、壁体が上側から順次変位する場合にはこの傾向が更に顕著になる。

地表面沈下に与える影響が最も大きいのは地表面付近での山留め壁の変形であり、地表面から深くなれば深くなるほど山留め壁の変形の影響は地表面沈下におよぼさなくなる。

土圧に関しても2次元と3次元では大きく傾向が異なり、2次元と比較して3次元は全体的に土圧が小さい。これは2次元では壁体変位による土圧の変化が深度方向でのみアーチ効果が発生するのに対して3次元では深度方向だけでなく水平方向にもアーチ効果が生じるためであり、その結果変位を与えるスライドブロック近傍の深度方向の土圧増加が3次元では極度に小さくなる。このスライドブロック近傍の土圧特性は掘削時の切梁軸力と置き換えることが出来、支保工反力は3次元効果を考えることによって低減し、経済的効果が期待できる。

全体を通じて土圧は壁変位やその深度によって大きく変化する。その土圧は僅かな壁体変位によって小さくなり、定常状態（主働土圧）となるがランキンの主働土圧に見られるような深度方向に三角形分布はしない。

以上から壁体変位を許せば土圧が小さくなり山留め架構に対する要求性能が抑えられ、変位が許せない場合には架構全体の要求性能が高くなるが地表面沈下等の周辺に及ぼす影響を抑えられる。経済的かつ安全な設計を行うには土圧を始めに設定する設計方法ではなく、山留め壁の変位と土圧の変化を適切に考慮した解析を行う必要があると言える。また今回、地盤材料の構成式として subloading  $t_{ij}$  model を用いた解析結果は2次元および3次元の実験結果を適切にシミュレートした。

## 参考文献

- 1) T. Nakai, H. Kawano, K. Murata, M. Banno, T. Hashimoto, Model tests and numerical simulation of braced excavation in sandy ground: influence of construction history, wall friction, wall stiffness, strut position and strut stiffness, *Soils and Foundations* Vol.22, No.3: 1-12, 1999
- 2) T. Nakai, M. Hinokio, A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified Material parameters, *Soils and Foundations* Vol. 44, No.2: 53-70, 2004
- 3) T. Nakai, M. Hinokio, H. M. Shahin, Y. Inoue, H. Takei, N. Iwata, Earth pressure and ground movements in 2D and 3D retaining wall problems: model tests and numerical simulation, *Proc. of NUMOGIX, Ottawa, 2004 (to appear)*