支柱鋼矢板工法の有限差分数値シミュレーションに基づく合理的設計の提案

棚橋　由彦*・蒋　　宇静*
中田　啓介**・戸田　政宏***

Rational Design of the "Alternate" Steel Sheet Pile Method based on Numerical Simulation by Finite Difference Method

by

Yoshihiko TANABASHI*, Yujing JIANG*

Keisuke NAKATA** and Masahiro TODA***

Subsidence and heaving are produced in the peripheral ground when the banking is constructed on soft ground, and various damages in its environ structure is caused. The steel sheet pile method is often used as a countermeasure in order to reduce such ground deformation. However, in the installation of the long pile, it is very uneconomical, and the long term execution period is also needed for the embankment. This study is to clarify the installation effect of the 'alternate' steel sheet pile method based on the in-situ observation, model experiment and numerical analysis.

1. はじめに

軟弱地盤上に盛土を築造すると，周辺地盤に沈下や側方変位を生じ，近接する構造物に様々な障害を及ぼす．こうした地盤変状を抑制する対策工法として，工事が比較的簡単で一般に工期が短く，堤内外の縁切り効果の大きい鋼矢板工法がしばしば用いられる．

有明海東沿岸の熊本平野を貫流する白川・緑川の下流部は，有明粘土に代表される極めて軟弱な地盤が厚く分布している．その上層には阿蘇を起源とする火山灰を含む砂質土が堆積しており，全層厚40mにも及ぶ複雑な軟弱地盤を形成している．このような地盤に鋼矢板を打設する場合，長尺となり，極めて不経済で築堤に長期間を要する．そこで工期の短縮，工費の削減を目指し，鋼矢板を支持層まで根入れする従来の鋼矢板工法に加え，鋼矢板を軟弱層の中間まで貫入させるフローティング工法が試験施工され，動態観測が実施された．しかしこの工法は支持力がほとんど得られないため，鋼矢板自体が沈下し，対策工として十分な効果を得ることはできなかった．そのため，現在フローティング工法と着底工法を組み合わせた交替鋼矢板工法が試験施工されその動態観測が実施されている．模型実験からを実施することにより，交替鋼矢板工法が沈下対策工として高い効果を持っていることが確認できた[1]．本研究では，試験堤における実測値と有限差分法による実地盤モデルの数値解析結果との比較から所要パラメーターを固定し，数値シミュレーションに基づき交替鋼矢板工法の打設効果を判定し，さらに，その合理的設計を模索する．

2. 試験堤

熊本平野を流れる白川・緑川流域の小島地区において，1992年に着底鋼矢板が試験施工されて以来，現在では3地区で5種類の鋼矢板の動態観測が行われている．この中で最もデータの蓄積が多いのは小島地区であり，全ての種類の鋼矢板が試験施工されており，観測期間も長い．よって本研究では小島地区の地盤条件

平成13年4月20日受理
* 社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)
** 福岡市役所 (Fukuoka City Hall)
***国土交通省 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport)

を基に，解析を行った．Fig.1，2に各鋼矢板の概念図と小島地区の地盤条件を示す．

本来，鋼矢板工法は鋼矢板を支持層まで貫入し，縁切り効果によって堤内側の地盤変位を防ぐ工法で，根入れが十分で座屈を起こさなければその後の変状は全くなくその効果は確実である．観測結果からも着底矢板の縁切り効果が証明され，観測開始から95ヵ月を経ても鋼矢板そばの堤内側の沈下は堤防側の4.1%に抑制され，非常に高い沈下抑制効果が確認できた．これに対しAs2層まで鋼矢板を打設したフローティング工区では，観測開始後81ヵ月で沈下抑制率が31.5%で期待していたほどの効果が得られなかった．鋼矢板自体の沈下量が堤内側の沈下量とほぼ同じであることから，支持力不足による鋼矢板の沈下が原因であると考えられる．実際As2層が非常に薄い沖新地区フローティング工区でも，観測開始後66ヵ月後で沈下抑制率が78.9%と鋼矢板の打設効果がほとんど得られていない．

フローティング工区での反省点を改善したのが交替鋼矢板工法である．これは着底鋼矢板とフローティング鋼矢板を組み合わせたもので，着底部の支持力によって鋼矢板の沈下を防ぎつつ工費削減を図ったものである．この工法は3地区で試験施工され動態観測が継続されているが，観測期間がまだ短いため鋼矢板の沈下抑制効果の判定は今後に待たねばならない．

3. 模型実験

3.1 実験概要

実験土槽は幅240cm×深さ40cm×奥行き35cmの剛性の高いもので，前面は強化ガラス張りで土層断面の観測も可能である．模型矢板は厚さ0.2cmのアクリル板を用い，交替鋼矢板は小島地区および沖新地区試験堤の条件に合わせ，長さ比Fr0.60(軟弱層厚に対するフローティング長)，幅比1対5および1対3をモデル化したものを用いた．計器は沈下計，間隙水圧計，土圧計に加えひずみゲージを添付し矢板の曲げモーメントを測定した．Fig.3に実験装置の概略図を示す．Fig.4に交替矢板模式図を示す．

3.2 実験方法

模型地盤の作成は，まず土槽内に模型矢板を設置し，砂層を敷き詰めた後，初期含水比83.5%の有明粘土を投入し，上載荷重4.9kPaで48時間予圧密を行い，粘土層を作成した．その後上部砂層を作成し模型地盤とした．載荷試験は，載荷幅40cm，載荷速度は0.245kPa/hで56時間載荷し，その後94時間は14.7kPaの定圧載荷

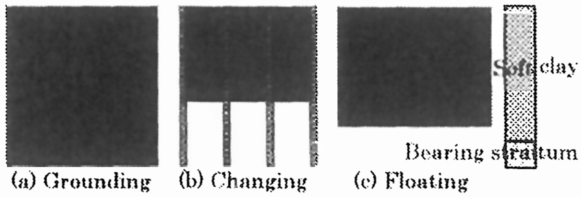


Fig.1 The each steel pile method conception

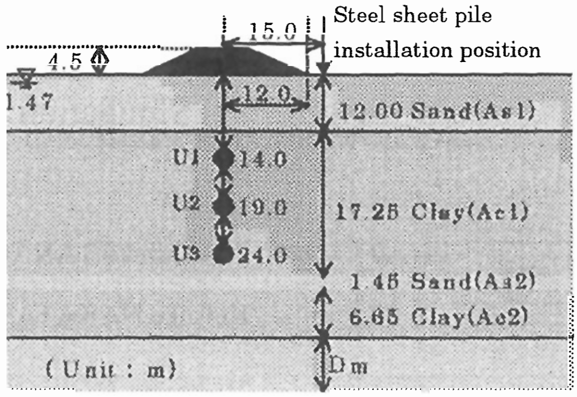


Fig.2 Osima geological map

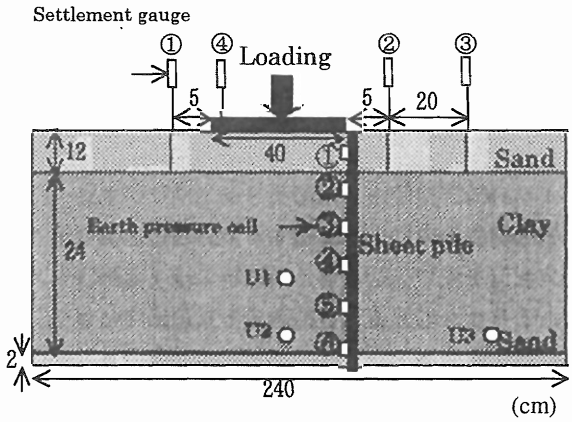


Fig.3 The experimental device

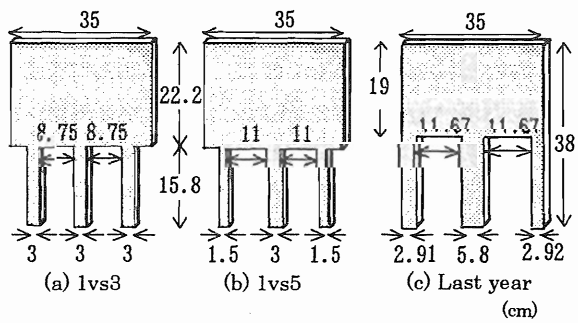
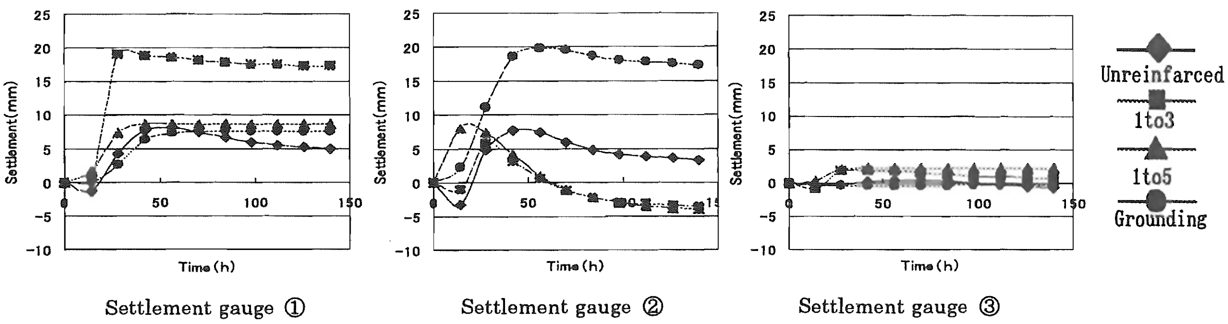
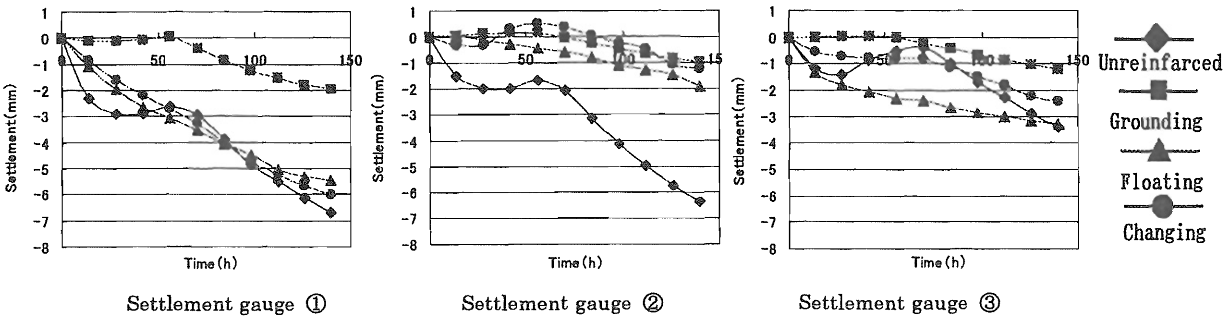


Fig.4 'Alternate' steel sheet pile model

を行った．実験ケースは無対策，着底矢板，交替矢板1対5および1対3の合計4ケース行った．Table. 1 に実験に用いた有明粘土の工学的性質を示す．



(a) Experimental results in 2000



(b) Experimental results in 1999

Fig.5 Compression of progress behavior of clay settlement

3.3 実験結果および考察

Fig.5(a)および(b)に模型実験における粘土層沈下量経時変化を示す．1999年に実施した実験に比べ実験方法の変更点は，沈下計①および②の配置位置であり，載荷盤からの距離を12.5cmから5.0cmへと変更した点と，沈下計④を新たに設置した点である．また，フローティング鋼矢板長は30cmである．沈下計①では，逓増載荷中に粘土の側方流動に伴う隆起が見られ，定圧載荷になると圧密による引き込み沈下の影響が見られるが，1999年の結果では全体的に引き込み沈下の影響が大きかった．沈下計②では，沈下計①と同様に逓増載荷中に粘土の側方流動に伴う隆起が見られるが，定圧載荷中の変位はほとんど生じていない．一方，沈下計③は載荷盤から大きく離れるため地盤変位は沈下計②に比べ小さいが，沈下曲線の違いは，粘土の練り返しによる反復使用によるせん断強さの低下が，特に2000年の結果では顕著であったためと考えられる．本年度新設した沈下計④は，全ケースとも同様の沈下傾向を示し，逓増載荷中に大きく沈下する．定圧載荷中は圧密沈下が緩やかに進行し，最終沈下量は約9.0cmであった．

沈下計ごとの沈下曲線の違いは，沈下計の設置位置に起因していると思われる．粘土の圧密状態を調べるために行った圧密試験の結果によると，実験終了時における粘土の圧密度Uは約90%であり最終沈下量は

Table.1 The propaties of Ariake clay

Item		Value
Density of a soil particle ρ_s (g/cm³)		2.5
Natural water content w_n (%)		83.5
Plastic limit w_p (%)		46
Plastic index I_p (%)		79
Gradation (%)	Sand	38
	Silt	35
	Clay	27
Cohesion c (kPa)		4.9
Internal friction angle ϕ (°)		6

4.6cmであった．このことから，載荷盤直下の粘土層沈下量の約半分はせん断変形によるものであり，それに伴う隆起の影響は載荷盤に近いほど大きいことが確認できる．したがって，沈下計①および沈下計②の位置が1999年度より近いため，隆起の影響が顕著に表れていると思われる．

次に矢板ごとの沈下抑制効果を式(1)に示す縁切り効果率Rで表す．式中のS_1とは堤内側の変位量であり，S_2とは堤外側の変位量である．模型実験ではS_1は沈下計②によって表され，S_2は沈下計④により一様に9.0cmである．これによって着底矢板は90.6%，交替矢板1対5は90.8%，交替矢板1対3は81.5%と表され，交替矢板が高い縁切り効果を持つことを確認できた．

$$R = \frac{S_2 - S_1}{S_2} \times 100 \qquad (1)$$

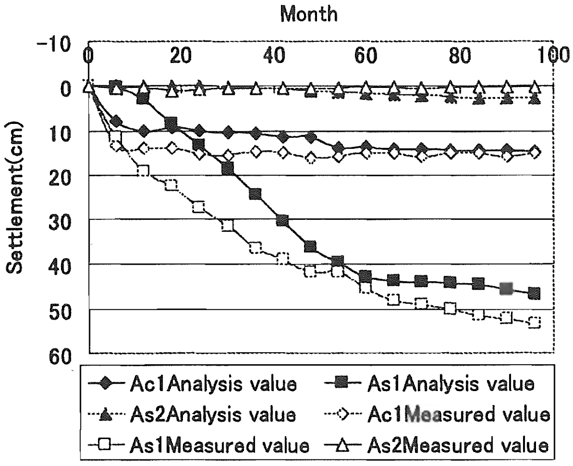
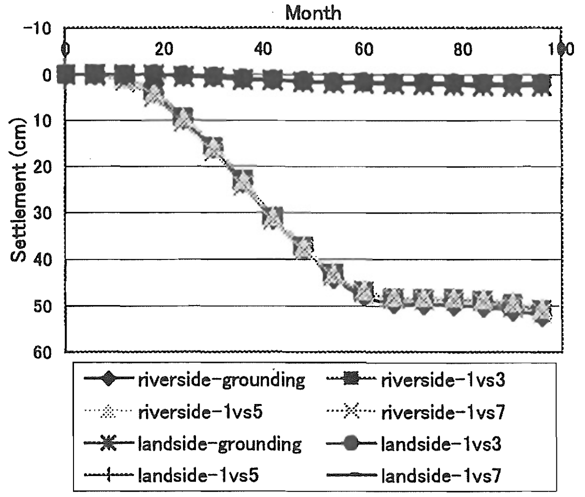
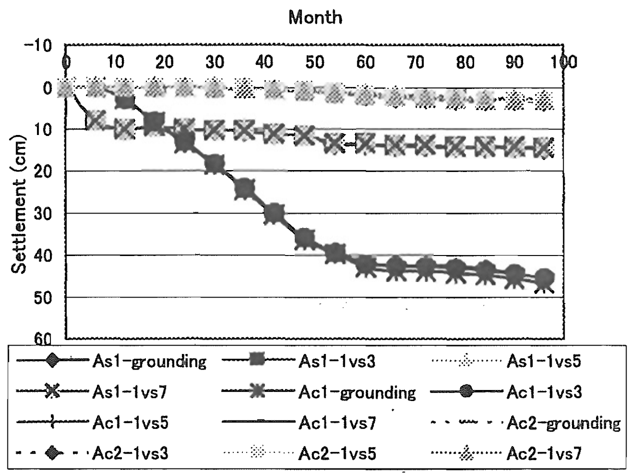


Fig.6 Comparing of analysis values with measured value on settlement



(a) Earth fill center



(b) Steel sheet pile periphery

Fig.7 Comparision with chang sheet pile by wide

4. 有限差分法による数値シミュレーション

4.1 解析方法と解析条件

本解析は小島地区試験堤の地盤条件を忠実に再現し，鋼矢板打設による沈下抑制効果を正確に予測することを目的とする．小島地区の地盤条件の概要はFig.2に示す通りである．

解析手法は大変形挙動を取扱える三次元有限差分法により，交替鋼矢板のモデル化を忠実に表現することが可能である．粘性土は力学的挙動をほぼ完全に表現できる修正Cam-clayモデルを用い，鋼矢板と地盤との境界にはインターフェイス要素を用いた．解析に必要なパラメーターは現地地盤を用いた室内試験から得られた値と動態観測結果からの逆算値より求めた．

解析モデルは横幅80m深さ40mで，地表面中央に盛土を作成し，モデル底面および側面の境界条件は固定とした．また排水条件は両排水とした．

4.2 解析結果の検討

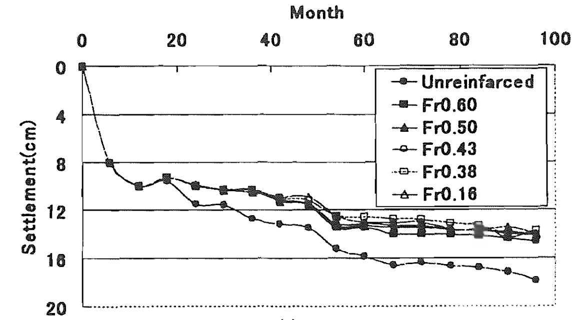
解析値の妥当性を検証するため，最も観測データが蓄積されている着底工区と比較する．Fig.6に層別沈下量の経時変化を示す．これは盛土直下の沈下量を表したものであるが，各層ともに同様の沈下傾向を示している．Ac1層およびAs2層は最終沈下量もほぼ一致している．Ac2層はOCR1.2程度の過圧密粘土と評価されるが，実地盤中では盛土による応力分散の割合が大きいため，解析結果が若干小さくなったと思われる．粘土層では実測値の沈下量が解析値よりも先行する傾向にあり，As1層にもその傾向が認められる．しかし盛土完成後55ヵ月後で沈下量はほぼ同じになり，解析結果は妥当であると思われる．

5. 数値シミュレーションに基づく評価

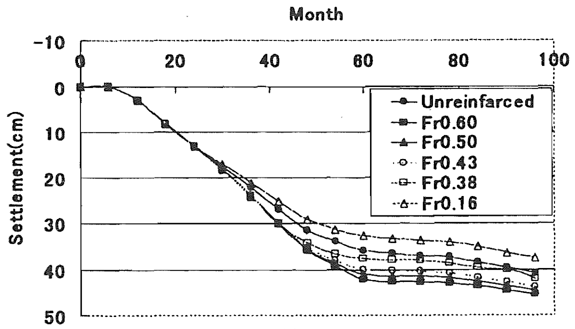
数値シミュレーションは着底鋼矢板，無対策，交替鋼矢板7ケースの合計9ケースを行った．交替鋼矢板7ケースは長さ比をFr=0.60に固定し，幅比を1対7，1対5，1対3，さらに幅比を1対7に固定し，長さ比をFr=0.50，0.43，0.38，0.16と変化させた．ここで長さ比Fr(Floating-ratio)とは，軟弱層厚37mに対するフローティング部の長さを無次元化したものであり，幅比は着底部1枚で支持するフローティング部の枚数である．

5.1 着底・フローティング鋼矢板の幅比による検討

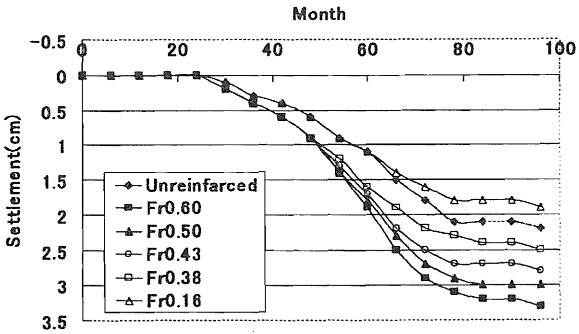
着底鋼矢板長38.5m，フローティング鋼矢板長22.5mを組み合わせた鋼矢板打設効果を判定する．フローティング長は，鋼矢板の許容沈下量3cmと堤内側のり尻の累加沈下深度分布が3cmとなる深さを動態観測結果から設定した．着底鋼矢板1枚で最大7枚のフローティング鋼矢板を支持することが理論上可能であり，小



(a) As1



(b) Ac1



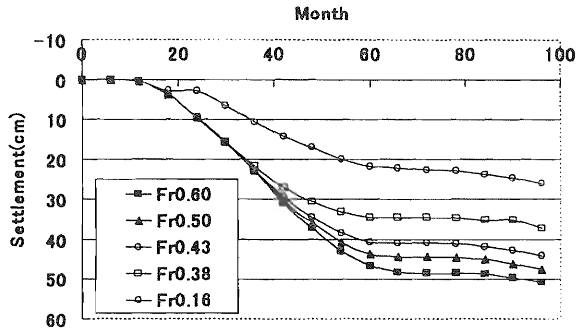
(c) Ac2

Fig.8 Comparision with 'Alternate' sheet pile in earth fill center by length ratio

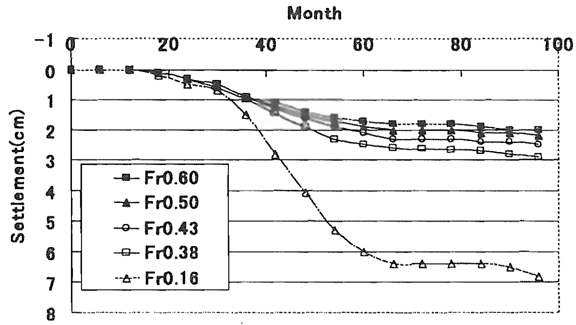
島地区試験堤で動態観測されている幅比1対7(着底対フローティング)，沖新地区試験堤で試験されている幅比1対5，および1対3について解析し比較した．盛土直下の層別沈下量をFig.7(a)に，鋼矢板周辺の沈下量をFig.7(b)に示す．図から分かるように，鋼矢板の組み合わせを変更しても沈下曲線はほぼ同じである．また鋼矢板の縦方向沈下量も着底部･フローティング部で沈下量の差はほとんど見られない．このことから，鋼矢板の沈下抑制効果は着底鋼矢板を密に貫入しても高くならず，合理的な幅比は1対7であるという結論を得た．

5.2 着底・フローティング鋼矢板の長さ比による検討

鋼矢板の沈下抑制効果は着底･フローティング鋼矢板の幅比に影響しないことが判明したので，フローティング鋼矢板長を変更して地盤変位を解析した．盛土直下の層別沈下量をFig.8に示す．As1層では沈下量が最も大きいのは無対策の場合で鋼矢板を打設した場合に比べ約4cm大きく，鋼矢板ありの場合はその差はほとんどなく沈下量14cmで落ち着いている．Ac1層Ac2層ではともにフローティング鋼矢板が長くなるにつれて沈下量が大きくなる傾向が見られ，その差はAc1層で最大10cmとなり，Ac2層で1.5cmである．これは鋼矢板の貫入により盛土下では右周りの回転ベクトルが発生し，フローティング鋼矢板が長いほどその大きさが増加することがその要因と考えられる．次にFig.9に鋼矢板周辺の沈下量経時変化を，Table.2に96ヵ月後の長さ比ごとの縁切り効果率を示す．盛土側沈下量はこれまでの傾向と同じく，Fr0.60が最大であり鋼矢板長が短くなるにつれて沈下量が減少している．無対策とFr0.16はほぼ同じ沈下量となっているので，これより砂層中にフローティング鋼矢板を打設することは，変位ベクトルにほとんど影響を与えないと考えられる．堤内側沈下量は逆にフローティング鋼矢板が長いほど小さくなる．この結果から縁切り効果率を求めると，長さ比Fr0.38以上で90%を超える高い値を得ることができた．以上の結果より，交替鋼矢板はフローティング鋼矢板が長いほど堤内側の沈下量を抑えることができるが，逆に盛土側では回転ベクトルの増大に



(a) Earth-fill side



(b) Landside

Fig.9 Comparision with 'Alternate' sheet pile in steel sheet pile periphery by length ratio

Table.2 Relationship between ratio and R

Length ratio (Fr)	S_1 (cm)	S_2 (cm)	R (%)
Grounding	52.3	2.0	96.2
0.60	50.9	2.0	96.1
0.50	47.6	2.2	95.4
0.43	44.3	2.5	94.4
0.38	37.4	2.9	92.2
0.16	26.1	6.8	73.9

Table.3 Construction cost comporision

Length ratio (Fr)	Construction term (Day)	Personal cost (Thousand yen)	Machine cost (Thousand yen)	Materials cost (Thousand yen)	Construction cost reduction rate(%)
Grounding	250	11875	19500	47950	0
0.60	104	4940	8112	30198	44.5
0.50	91	4332	7113	25900	52.9
0.43	83	3947	6482	23209	57.6
0.38	76	3639	5975	21066	61.3
0.16	62	2969	4875	12447	74.4

よって沈下量が大きくなることと，縁切り効果率はフローティング工矢板をAc1層まで打設すれば非常に高い値を得ることができるという結論を得た．

6. 間隙水圧の変化

Fig.10に着底鋼矢板解析値の間隙水圧経時変化図を示す．間隙水圧は初期値を0とし過剰間隙水圧の変動を記録した．どのケースにおいてもその変動は類似しておりU1，U2，U3の順に過剰間隙水圧が大きく圧密の進行に伴う過剰間隙水圧の消散は確認できない．また動態観測値に比べ，間隙水圧の変動曲線はほぼ同じであるが，その大きさは約1/3程度であった．これは観測地点の沈下に伴い間隙水圧自体が上昇してしまったことや，実測値の透水係数が試験値よりも大きかったことが原因として考えられる．また計測深度が浅いほど過剰間隙水圧が大きくなるのは，盛土による応力増加の影響が浅い深度ほど大きく，深くなるにつれて分散していくためである．堤内側の同深度で計測した間隙水圧はほとんど変化しておらず，鋼矢板による間隙水圧遮断効果を確認できる．

7. 合理的設計法の提案

長さ比や幅比を変えた解析的検討により，鋼矢板の形状による盛土周辺地盤の沈下傾向を検証することが

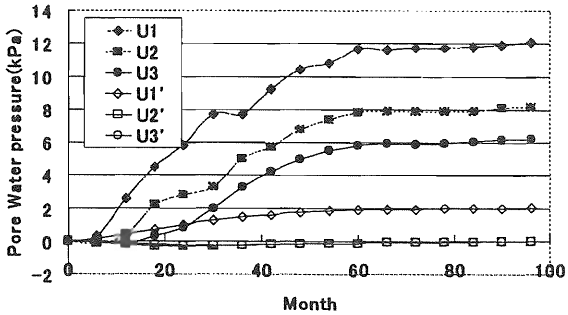


Fig.10 Progress of analysis value pore water pressure

できた．交替鋼矢板の種類ごとの施工費用について検討する．施工費用は人件費，機械使用料，材料費から算出し，その他の経費は施工条件による変化が大きいので考慮していない．着底鋼矢板1枚で支持できるフローティング鋼矢板の最大支持枚数は，鋼矢板に作用する外力の釣り合いと，曲げ応力およびせん断応力からの許容応力度から求められる．そのため長さ比や幅比によって最大支持枚数は異なるが，条件を同じにして比較するため，すべて幅比1対7として考えた．

施工速度を考慮し，施工長100mでの着底鋼矢板工区の総費用を100として，交替鋼矢板ごとの施工費用指数を導き出し，Table.3に示す．以上の結果から盛土周辺の沈下は幅比に影響されず，長さ比によって沈下傾向が変化することから，堤内側の許容沈下量をコンクリート構造物の沈下許容限界の5cmに設定すると，Table.2より長さ比Fr0.38までが条件を満たす．また工費削減率は最大でFr0.38のとき61.3%と高い値を得た．

8. 結論

鋼矢板打設による盛土周辺の沈下抑制効果は，幅比の影響は少なく，長さ比によって変化することが分かった．また，フローティング鋼矢板が長いほど盛土側の沈下量が増加するが，堤内側の沈下量は抑えられることも分かった．堤内側の許容沈下量の大きさによって，最適な長さ比を決定することが可能であるが，許容沈下量を5cmとした場合，長さ比はFr0.38となり工費削減率は61.3%もの高い値を得ることができる．

参考文献

1）棚橋，蒋，高田，中田：模型実験による厚い軟弱粘土層における鋼矢板打設効果の判定，第55回年次学術講演会講演概要集，第3部（A），pp.412～413，仙台，2000.