

遠心模型実験装置を用いた高含水粘土の自重圧密実験

西林 清茂 細谷 芳己
高橋 真一

Self Weight Consolidation of Very Soft Clay in Centrifuge

Kiyoshige Nishibayashi Yoshimi Hosoya
Shin-ichi Takahashi

Abstract

Geotechnical centrifuge model testing is effective in investigating self weight consolidation which occurs at fills of dredged clay and soft alluvial seabed clay layers. Consolidation phenomena can be reproduced very quickly while keeping to stress and strain similarity laws by means of this testing method.

Centrifuge model testing of self weight consolidation in which the model is equal theoretically to ground 10 m in depth and subjected to consolidation for a period of 30 years is described in this report. It was confirmed as a result of this test that the characteristics of consolidation in a small stress range is grasped clearly by this testing method, and it was demonstrated that numerical analysis is effective also for self weight consolidation.

概要

しゅんせつ埋め立て間もない粘土地盤や、海底表面付近の粘土地盤のように非常に含水比の高い粘土地盤は、自重圧密現象が生じるが、この現象の把握には遠心力実験装置を用いた自重圧密実験が有効である。この実験方法によると現実の地盤で生ずる圧密現象を忠実に再現し、しかも非常に短時間で実験が行なえる特徴がある。今回は、粘土層 10 cm の模型地盤に 100 G の大きさの自重を働かせて、理論的に粘土層厚 10 m、圧密時間が30年間に相当する自重圧密実験を行なった。

実験の結果によると、高含水比の粘土の沈下解析を行なう場合に影響の大きい低応力域での圧密特性が精度良く把握できるとともに、自重圧密問題に対する数値解析方法を検証することができた。

1. まえがき

若令埋立地盤の圧密沈下、地盤改良効果の予測や効果の確認といった圧密過程を精度良く予測することは非常に重要な問題である。その中でもしゅんせつ粘土で埋め立てた地盤や海底表面付近の粘土地盤の圧密解析は、非常に含水比が高い超軟弱粘土のため粘土自重の影響が大きく上述の目的にあった予測を一層難しくしている。

上記の圧密問題に取り組む実験的方法の1つに遠心力場で模型実験を行なう方法^{1),2)}があるが、この報告では、この実験方法を用いて軟弱粘土の自重圧密実験を行ない、実験から得られる粘土の圧密特性の検討、また実験結果から得られた圧密特性を用いて行なった数値解析結果から得られたいくつかの知見について示した。

2. 実験装置と相似則

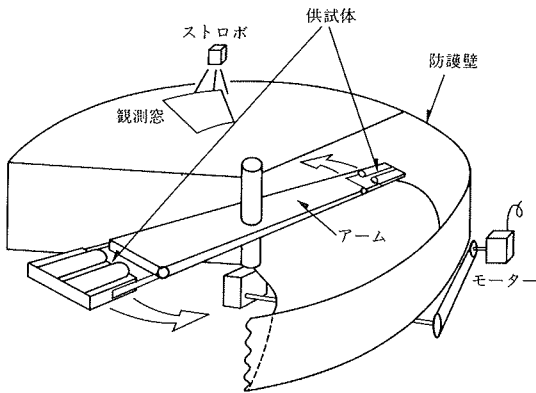
2.1. 遠心力装置を用いた模型実験方法

図-1に遠心模型実験装置の概要を示す。図に示すよう

に模型地盤を回転アームの先端に取り付けて回転させ、発生する遠心力を利用して模型の自重を増加させるもので、モデルの規模を大きくすることなく、実物と同じ応力状態が再現できる。土の種類、密度、含水比、及び骨組み構造が同じ土質材料の力学的性質は式(1)³⁾で示されるように応力状態に変化するため、土構造物の模型実験では実物と同じ応力状態の再現は重要な問題であり、模型を大きくすることなく応力状態の相似性を満足させて模型実験が行なえるこの実験方法は非常に有効な方法である。

$$\text{土の力学的性質} = F(\text{土の応力状態}) \quad \dots\dots(1)$$

遠心力装置を用いた土構造物の模型実験は、1960年代より、日本、イギリスがその先駆者として取り組んでいるが、装置が特殊であることから最近までこの実験手法は普及していなかった。しかし、これまでの研究成果によってこの実験手法の有効性が広く認められ、最近では粘土の自重圧密、地盤の支持力、斜面安定などの基礎的



図一1 遠心模型実験装置

な実験はもちろんのこと、ジオテキスタイルを用いた補強地盤の問題や、地盤の液状化などの動的問題など、より応用的な問題の取り組み⁴⁾も試みられている。

2.2. 遠心模型実験における相似則⁵⁾

模型地盤を半径 r m の回転アームに取りつけて毎秒 N 回転させると $r(2\pi N)^2$ m/sec² の遠心加速度が模型に作用する。これが重力加速度 $1g$ の n 倍、すなわち ng であれば、模型内の土の単位体積重量 γ は、重力場におけるその n 倍となる。したがって、縮尺 $1/n$ の模型をこの遠心力場に置けば、実物と相似の深さ Z/n における自重応力は $(Z/n) \cdot n\gamma = Z\gamma$ となり、実物と全く一致する。実験では鉛直応力だけでなく全ての応力状態が実物と等しくなるため、当然発生する間げき水圧も実物に等しく、その消散過程及びそれに伴うひずみの発生過程も実物と相似的で、その時の相似則は次のようになる。

いま、 t が土中の距離 l を速度 v の水が流れるのに要する時間を表わし、また添え字 p, m がそれぞれ実物と模型とを表わすととして、

$$t_m = l_m / v_m$$

$$t_p = l_p / v_p \quad \dots\dots\dots(2)$$

模型材料は実物と同じで、その透水係数を k とすると

$$v_m = ki_m = k \cdot (h_m / i_m)$$

$$v_p = ki_p = k \cdot (h_p / i_p) \quad \dots\dots\dots(3)$$

実物と模型との対応する点の間隙水圧は等しいから

$$h_m = h_p \quad \text{また} \quad n l_m = l_p \quad \dots\dots\dots(4)$$

したがって

$$i_m = ni_p \quad \therefore v_m = v_p \quad \dots\dots\dots(5)$$

したがって式(2)から

$$t_m = 1/n^2 \cdot t_p \quad \dots\dots\dots(6)$$

このようにダルシーの法則さえ成り立てば、模型の間げき水の移動に要する時間は圧密問題、透水問題を通じて実物の $1/n^2$ に短縮されることになる。

2.3. 遠心模型実験装置の概要

表一1に今回用いた遠心模型実験装置の概要⁶⁾を示す。

実験装置は、回転アームに取り付けた供試体容器を3相モーターを用いて回転させ、模型に対して遠心力を働かせるようにしたものである。

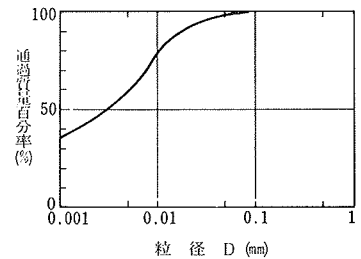
諸元	性能及び寸法
公称半径	256cm
回転数	50 ~ 280r.p.m.
公称加速度	10 ~ 200G
供試体容器	φ12 × H30cm

表一1 遠心模型実験装置の概要

3. 実験材料

東京都内から採取した粘土の0.3mmふるいの通過分を実験試料とした。表一2に主な土質特性を、また図一2に粒径加積曲線を示す。

比重	2.708
w_l	107.0%
w_p	52.7%
l_p	54.3%



表一2 主な土質特性

図一2 粒径加積曲線

4. 実験方法及び実験条件

表一3に実験条件を示す。模型地盤は、含水比を調整した粘土試料を内径12cmの透明アクリル容器に高さ約10cmに入れて作製し、遠心加速度100Gの遠心力場で実験を行なった。実物への換算高さは100倍の粘土層厚約10m、圧密時間は実験時間の10,000倍となる。

実験は、供試体回転中に、回転に同調させたストロボ発光を用いて粘土表面の沈下を肉眼で測定したほか、所定時間の圧密終了後には回転アームを停止して試料容器を取り出し、粘土層底部より少しずつ試料を押し出す方法で粘土層を厚さ3mmのスライスに分割して粘土試料の含水比を測定した。

	初期状態			排水条件	圧密時間 (t)	圧密度 (U)
	W_o^*	f_o^*	I_L^*			
モデル1	159%	5.31	1.96	両面	29hr.	100%
モデル2	〃	〃	〃	〃	5hr.	60%
モデル3	〃	〃	〃	〃	1.7hr.	28%
モデル4	〃	〃	〃	片面	29hr.	100%
モデル5	118%	4.20	1.20	両面	〃	〃
モデル6	〃	〃	〃	片面	〃	〃

* : W_o 初期含水比 f_o 初期体積比 I_L 液性指数

表一3 実験条件

5. 実験結果及び考察

5.1. 圧密特性の検討

圧密特性は、いくつかの自重圧密実験結果から図-3に示す計算方法により求めた。

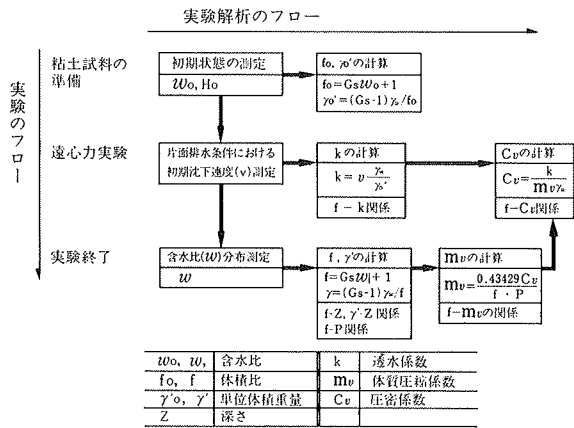


図-3 圧密特性の算出方法

以下に実験結果を示す。図-4は、圧密終了後 (U=100%)の含水比分布から求めた f-log p 関係である。図中にはほぼ同じ含水比の試料による標準圧密試験結果も付記した。自重圧密実験結果は、排水条件による差は認められず、0.01 kgf/cm² 以下の小さい応力領域から連続的な f-log p 関係が求められている。その得られた f-log p 関係の圧縮指数 c_c は、初期含水比が大きい試料(試料 A)の結果が初期含水比の小さい試料(試料 B)の結果に比べて大きく、圧縮性が大きいことを示している。

また、標準圧密試験結果は自重圧密実験とほぼ連続的な関係を示しているが、応力が小さい範囲で、標準圧密試験結果が自重圧密実験結果に比べて少し小さい体積比を示している。この点に関しては、前者が段階荷重、後者が深さに応じ連続的に荷重が増加する漸増荷重であることから、荷重の増加割合を変えた圧密試験結果から得られる P_c 付近の f-log p 関係の違いと同様の傾向⁷⁾が現われているものと考えられる。このことより、初期含水比が高い粘土試料に対する標準圧密試験から得られた小さな応力範囲の f-log p 関係を用いて沈下解析を行なうにあたっては最終沈下量に影響する f-log p 関係の選定には留意すべきと考えられる。

図-5は、f-log k 関係である。図中には標準圧密試験結果を付記した。自重圧密実験結果は、fの減少に伴い k は単調減少している。標準圧密試験結果は、fが大きい範囲で少し小さく、またばらつきが見られるが自重圧密実験結果とほぼ連続的な関係が得られている。

図-6は、f-c_v 関係である。図中には標準圧密試験から求めた圧密係数 c_v と c_v' に一次圧密比を乗じた圧密係

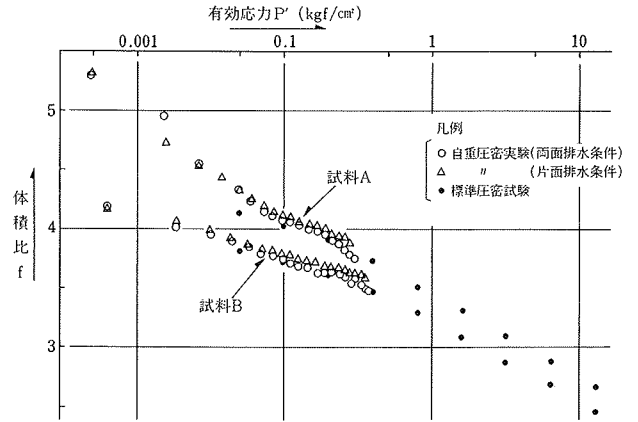


図-4 f-log p 関係

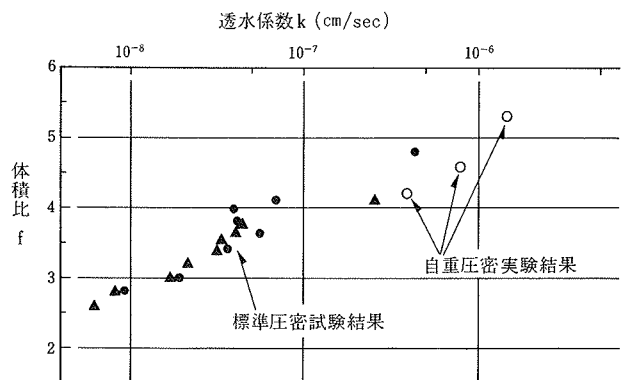


図-5 f-log k 関係

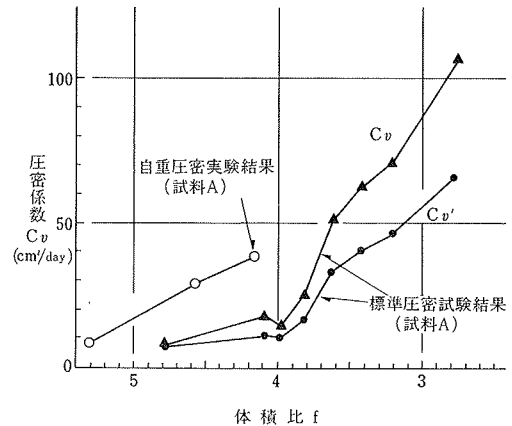


図-6 f-c_v 関係

数 c_v' も付記した。自重圧密実験の結果は f の減少に伴い c_v は単調増加している。標準圧密試験結果の c_v, c_v' は、自重圧密実験結果に比べて小さい値を示しているが、f の減少に伴い c_v が増加する傾向は同じで、そのうち c_v が c_v' よりも自重圧密実験結果に近い結果を示している。

5.2. 実験結果の解析

実験結果の解析は、圧密中の層厚の変化・c_v 値の変化・自重の影響を考慮した式(7)⁸⁾を用いて数値解析^{8),9)}を行ない検討した。表-4に解析に用いた土質条件を示した。

解析は、自重圧密実験から求めた土質条件を用いた解析 (Case 1) のほかに標準圧密試験から求めた土質条件を用いた解析 (Case 2, Case 3) も併せて行なった。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \xi^2 \left\{ c_v \frac{\partial^2 \xi}{\partial z_0^2} + \frac{dc_v}{d\xi} \left(\frac{\partial \xi}{\partial z_0} \right)^2 - \frac{d}{d\xi} (c_v \cdot m_v \gamma') \frac{\partial \xi}{\partial z_0} \right\} \dots (7)$$

	Case 1	Case 2	Case 3
f-log P関係(P=kgf/cm ²)	f=3.32-0.86 log P	f=3.45-0.70 log P	"
f-C _v 関係(C _v =cm ² /day)	C _v =3.14(f-8.86) ² -31.1	f>4.78 C _v =7.4 f<4.78 C _v =30.6(f-4.78) ² +7.4	f>4.78 C _v =7.0 f<4.78 C _v =16.7(f-4.78) ² +7.0
初期体積比 f ₀	5.31	"	"
単位体積重量 γ'(t/m ³)	0.322	"	"
初期層厚 H ₀ (m)	9.59	"	"
備考	自重圧密実験結果	標準圧密試験結果C _v	" C _v '

表一四 解析条件

(1) 最終沈下量の検討

表一五に最終沈下量を示す。Case 1は実験結果に近い値が得られた。Case 2, Case 3では自重圧密実験結果に近い f-log p 関係を土質条件に用いた結果、実測沈下量に近い結果が得られている。

(2) 時間一圧密度曲線の検討

図一七、図一八は、時間一圧密度曲線の実験結果と解析結果で、このうち図一七は片面排水条件の結果を、図一八は両面排水条件の結果を示している。図より標準圧密試験結果を用いた Case 2, Case 3 は、ほぼ同じ沈下曲線を示し、実験結果に対して圧密前半部では速い、また圧密後半部では遅いと圧密度曲線の形が違っている。これは解析に用いた圧密係数が、実験結果に比べて圧密前半部では大きすぎ、また圧密後半部では小さすぎたものと考えられる。一方、遠心模型実験結果を用いた解析結果 Case 1 は圧密前半部から後半部まで実験結果を良く表わしており、圧密係数の評価が妥当であったことが示されている。なお、両面排水条件の結果で少し差が見られるが、これは両面排水条件の解析に用いる c_v は片面排水条件の結果から決定せざるをえないこと⁵⁾ やその他、若干の実験条件の違いが影響した結果と考えられる。

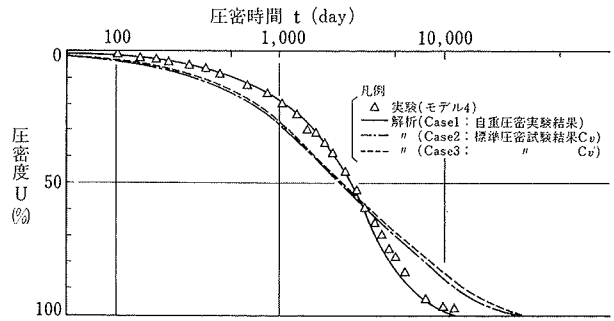
	最終沈下量
実験結果*	2.10m
Case 1	2.14m
Case 2, 3	2.17m

*換算沈下量：1G場の沈下量に換算

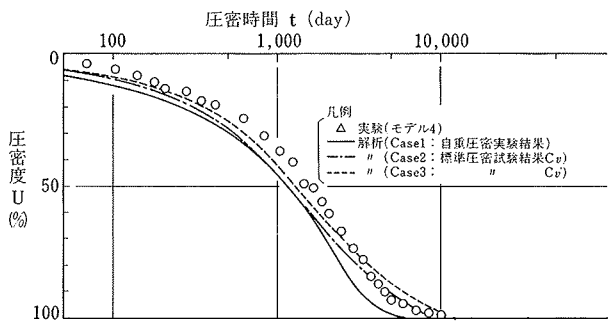
表一五 最終沈下量

(3) 等時線の検討

図一九は、圧密過程を表わす f の等時線の実験結果と c_v 一定における解析結果を示したもので、深さを圧密前の原始座標で表わした。図中の解析結果は、等時線の形状の比較を容易にするため、実験結果と同じ圧密度における計算結果を示した。解析結果は、実験結果に比べて粘土層下部で遅く、粘土層上部で速いなど等時線の形状



図一七 時間一圧密度曲線 (試料 A, 片面排水条件)



図一八 時間一圧密度曲線 (試料 A, 両面排水条件)

が違っている。これは、実験における圧密係数が圧密の進行に伴って増加するため圧密の速い所では圧密がより促進された影響と考えられる。

図一十、図一十一は、実験結果と解析結果 (Case 1, Case 2, Case 3) を示したものである。まず、図一十に示した Case 2, Case 3 の解析結果は、図一九で示した c_v 一定の解析結果に比べてより実験結果に近い結果を示しているものの、依然両者とも実験結果に比べて粘土層上部の圧密の進行が速く、下部では遅いなど図一九の解析結果の傾向と変わらず、解析の c_v の増加の評価が小さかったものと考えられる。一方、実験結果と Case 1 の解析結果を比較した図一十一においては、解析結果は実験結果の f の分布を良く表わしており、自重圧密実験から求めた c_v の変化の評価が適切であったことが示されている。

以上の結果から、圧密中の c_v の変化は、等時線の形状に大きく影響を与えることが明らかになった。そして実験結果と解析結果の比較検討から、自重圧密実験での c_v の変化は自重圧密実験から求めた c_v の変化を解析に用いた Case 1 が最も適切であり、標準圧密試験から求めた解析条件 Case 2, Case 3 は誤差が大きいことがわかった。

6. まとめ

この報告では、遠心模型実験装置を用いて高含水比粘土の自重圧密実験を行ない、高含水比粘土の圧密特性を検討した結果、高含水比状態の粘土の圧密特性は、この

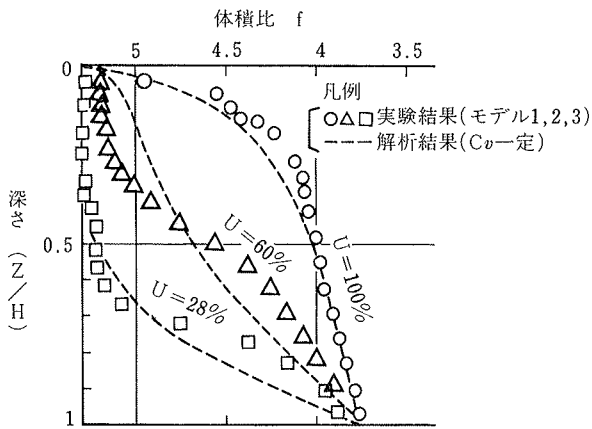


図-9 圧密度 (試料 A; 両面排水条件)

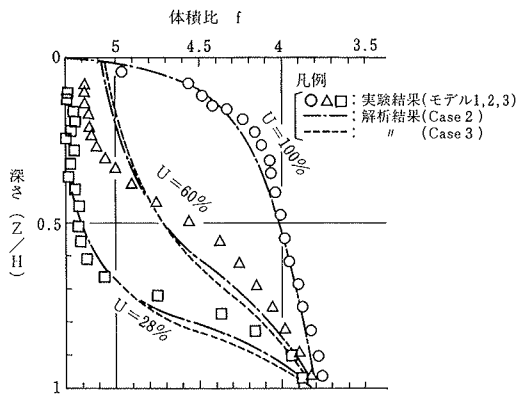


図-10 圧密度 (試料 A, 両面排水条件)

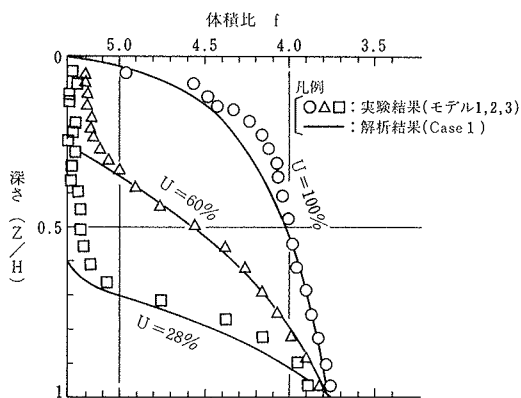


図-11 圧密度 (試料 A, 両面排水条件)

実験方法から精度良く求められることが確認された。また同じ試料を用いて標準圧密試験を行なった結果、圧密時間に大きく影響する圧密係数 c_v が自重圧密実験から

求めた値に比べて小さい値を示すなど試験結果の精度は問題があることが認められた。

次に、得られた圧密特性を用いて数値解析を行なった結果、圧密中に c_v が大きく変化する場合の圧密過程、特にその粘土層内部の圧密過程を精度良く解析するためには、 c_v の変化を精度良く求めて、しかもその変化を十分考慮した解析を行なう必要があると考えられる。

今後は、載荷荷重、ドレーンの有無など、より現実的な境界条件を考慮した圧密沈下問題に取り組みたい。

謝 辞

自重圧密実験の実施、及び本文をまとめるに当たってご協力、ご助言頂いた大阪市立大学工学部高田直俊教授、望月秋利助教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 三笠, 高田, 望月: 遠心力を用いた土構造物の模型実験, 土と基礎, vol. 28, No. 5 (1980. 5), pp.15~23
- 2) 高田, 今井, 木山: 圧密沈下を考える, 4: 浚渫粘土の圧密沈下(その1), 土と基礎, vol. 27, No. 4 (1979. 4) pp.101~108
- 3) 三笠: 土の力学における2つの視点について, 土質工学会関西支部, (1978. 11), pp.19~33
- 4) Geotechnical Centrifuge Model Testing, Proceeding of International Symposium on Geotechnical Centrifuge Model Testing, (1984)
- 5) 高田: 軟弱粘土の自重圧密過程の数値計算, 土木学会論文報告集, 第334号, (1983), pp.113~121
- 6) M. Masato: Two Decades of Centrifugal testing in Osaka City University Geotechnical Centrifuge Model Testing, Proceeding of International Symposium on Geotechnical Centrifuge Model Testing, (1984), pp.43~52
- 7) 土質工学会編: 土質試験法, 第4章圧密試験, p.407
- 8) 三笠: 軟弱地盤の圧密, 鹿島出版会
- 9) 西林, 細谷, 小日向, 高橋: 圧密沈下解析手法に関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 31, (1985), pp.104~108
- 10) 西林, 細谷, 小日向, 高橋: 圧密沈下解析手法に関する研究(その2), 大林組技術研究所報, No. 34 (1987), pp.21~25