

ドレーンの集排水機能を具備したマクロエレメント法に基づく板状ドレーンのモデル化に関する一考察

鉛直ドレーン マクロエレメント法 水～土連成変形解析

名古屋大学 国際会員 ○田代むつみ, Nguyen Hong Son, 山田正太郎, 野田利弘

1. はじめに

Barron(1948)¹⁾の解を用いたドレーンの圧密計算では、板状ドレーンを円柱状に換算する必要があり、ドレーンの外周を等値する式(Hansbo, 1970²⁾)や、換算径をドレーンの幅と厚さの平均と等しいとする式(Rixner et al., 1986³⁾)が一般に使われる。本報ではこれらの方法に、ドレーンの断面積を等値する換算式を加えて、板状ドレーン打設地盤の圧密挙動に及ぼす換算手法の影響を数値解析により検討した。鉛直ドレーンの解析では、著者らが提案した「ドレーンの集排水機能を具備したマクロエレメント法^{4),5)}」を搭載した水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA**^{6),7)}を用いた。

2. ドレーンの集排水機能を具備したマクロエレメント法の概要

関口ら(1986)⁸⁾により提案されたマクロエレメント法は、鉛直ドレーンによる改良域内部の個々の土要素にドレーンの「集水」機能を持たせることで、2次元平面ひずみ条件であっても鉛直ドレーンの圧密促進効果を表現することができる。著者らは、本手法のさらなる高機能化を目的に、ドレーン内の水圧を未知数として扱うと共に、式(1)に示すドレーンの連続式を支配方程式に加えることで、ドレーンの「排水」機能も具備した新たなマクロエレメント法を提案した。

$$\text{ドレーンの連続式: } \kappa(h - h_D)\rho_w g + \sum_{j=1}^2 \beta_j (h_{Dj} - h_D)\rho_w g = -\kappa(z - z_D)\rho_w g + \sum_{j=1}^2 \beta_j (z_{Dj} - z_D)\rho_w g \quad (1)$$

ここに、 h_D と h_{Dj} はそれぞれ、ドレーン内の全水頭及び上下のドレーン要素に含まれる全水頭で、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度である。 κ と β_j はそれぞれ、土とドレーン間の流量係数（「集水」機能を与える係数）および上下の要素間のドレーンを介した流量係数（「排水機能」を与える係数）であり、以下の式で与える。

$$\kappa = \frac{8kV}{F(n)d_e^2 \rho_w g}, \quad F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}, \quad n = \frac{d_e}{d_w}, \quad \beta_j = \frac{k_w}{l^j} \frac{l^j}{l^j} \cdot \frac{n^j}{n^2} \quad (2)$$

ここに、 k は土の透水係数、 V は土要素の体積、 d_e は有効集水径、 d_w はドレーン径、 k_w はドレーンの透水係数、 l^j は土要素中心間を結ぶベクトル、 l^j はその大きさ、 n^j と s^j は要素の境界面 j の外向き法線ベクトルと面積である。有限変形解析においては V, l^j, n^j は現時刻の値を用いる一方で、 d_e や d_w は材料定数として常に同じ値を使用する。

3. 板状ドレーンから円柱状ドレーンへの換算手法とドレーンの透水係数の換算に関する一考察

片面排水条件下にある層厚20mの粘土地盤（粘土の透水性： $k = 1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 、その他の材料定数は文献4）と同じ）に、ドレーンピッチ $d = 1\text{m}$ の正方形配置で底面まで打設した状況を設定し、地表面（大気圧解放の排水条件）に10日かけて150kPaまで鉛直等分布荷重を定率漸増荷重し、圧密終了まで解析を実施した。板状ドレーンは幅 $a = 100\text{mm}$ とし、厚さ b は2, 4, 8mmの3種類を想定して、以下の3種類の式により直径 \tilde{d}_w の円柱状ドレーンに換算して比較した。

$$\text{①ドレーンの外周を等値する式 (Hansbo, 1970): } \tilde{d}_w = 2(a+b)/\pi \quad (3)$$

$$\text{②換算径をドレーンの幅と厚さの平均とする式 (Rixner et al., 1986): } \tilde{d}_w = (a+b)/2 \quad (4)$$

$$\text{③ドレーンの断面積を等値する式: } \tilde{d}_w = 2\sqrt{ab/\pi} \quad (5)$$

上記の板状ドレーンから円柱ドレーンへの換算手法は、ドレーンの「集水」能力を妥当に評価するための手法であるが、①や②の換算手法では、ドレーンの断面積が変化してしまうために、ドレーンの「排水」能力に影響が及んでしまう。このため、既往の研究（文献4）において著者らは、ドレーンの「排水」能力が円柱形ドレーンへの換算によって変化しないように、ドレーンの透水係数を次式を満足するように換算する必要性について示している。

$$\frac{a_w}{a_e} k_w = \frac{\tilde{a}_w}{\tilde{a}_e} \tilde{k}_w, \quad a_w = ab, \quad \tilde{a}_w = \pi \tilde{d}_w^2 / 4 \quad (6)$$

ここに、 a_w, \tilde{a}_w (k_w, \tilde{k}_w)はそれぞれ板状ドレーン及び円柱状ドレーンに換算後の断面積（透水係数）である。本報では、ドレーンの有効集水円の面積 a_e （1本のドレーンが担当する改良断面積）については換算前後で変化しないとする一般的な関係（ $a_e = \tilde{a}_e, d_e = 2d/\sqrt{\pi} = 1.13d$ ）とし、式(6)による k_w の換算の影響についても併せて検討した。

表-1に解析ケースの一覧を示す。ケース2と3はケース1よりもドレーンの透水性が低く、ウェルレジスタンスが発生しやすい条件にある。また、ケース1と2はドレーンの透水係数の換算式(6)を適用していないのに対し、ケース3では適用している。表-1に示す通り、 \tilde{d}_w の換算手法①と②では、 \tilde{d}_w の換算によってドレーンの断面積が増加するため、式(6)を適用することによってドレーンの透水係数は低下する。したがって、 \tilde{d}_w の換算手法①と②については、ケース2よりもさらにケース3の方がウェルレジスタンスが発生しやすい条件にある。

図-1に、各解析ケースにおける沈下量と、荷重一定放置中（100日目）における過剰間隙水圧とドレーン内の水圧の

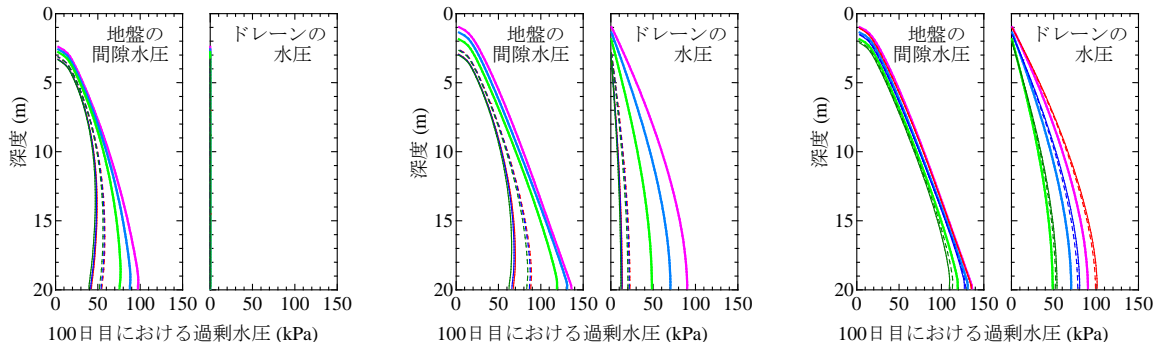
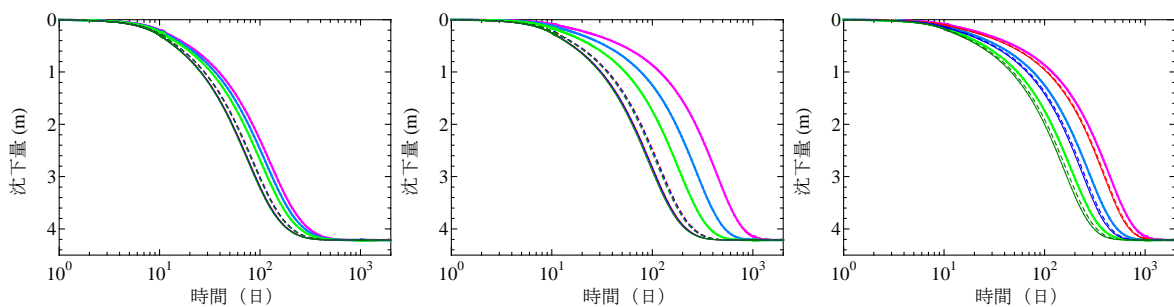
等時曲線を示す。ウェルレジスタンスの有無と、式(6)によるドレーンの透水係数 k_w の換算の有無に応じて、圧密挙動に及ぼす d_w の換算手法の影響の大小が異なることが分かる。一般に、換算される d_w の値は、 \tilde{d}_w の換算手法③<②<①の順に大きく、 d_e が一定の場合、式(2)における $F(n)$ は③>②>①となることから、「集水」機能を与える κ もまた③<②<①となる。このため、鉛直ドレーン打設地盤の圧密速度は、 d_w の換算手法に応じて③<②<①となる。 d_w の換算前後でドレーンの透水係数 k_w を一定とする場合（ケース 1, 2）は、式(2)における \tilde{k}_w/n^2 は③<②<①であることから、「排水」機能を与える β_j も③<②<①となる。ただし、ウェルレジスタンスが発生しないケース 1 では、そもそも「排水」機能による差が現れないため、圧密挙動に対する d_w の換算手法の影響は小さい。また、 d_w の換算手法①と②では、ドレーン厚 b の変化に対する d_w の感度が鈍く、ドレーンの厚さを 2 倍にしても圧密挙動にほとんど変化が現れない。一方、 d_w の換算と併せて、 k_w の換算を行うケース 3 では、①と②においても顕著なウェルレジスタンスが発生し、ドレーンの厚さが圧密挙動に与える影響が明確に表れている。また、式(6)による k_w の換算を行うことで、同一のドレーン厚さに対し「排水」機能を決定する β_j は①=②=③となるため、 d_w の換算手法の違いによらず同程度のウェルレジスタンスが発生する。このため、ケース 3 では、ドレーン厚 b が圧密速さに与える影響が、 d_w の換算手法の違いによらず同様に表れている。ドレーンの透水係数の換算を行わないケース 2 では、このような影響を見落としていると言える。

以上で示した通り、板状ドレーンを円柱状ドレーンにモデル化する際に、 d_w の換算手法として①や②を用いる場合は、ドレーンの透水係数の換算を行わないとウェルレジスタンスを過小評価する可能性があるため注意が必要である。

参考文献 1) Barron, R. A. (1948): Consolidation of fine-grained ..., Trans. ASCE No.2346, 718-754. 2) Hansbo, S. (1979): Consolidation of clay by bandshaped ..., Ground Eng'g., **12**(5), 16-25. 3) Rixner, J. J. et al. (1986): Prefabricated vertical drains, **1**, Federal Highway Administration, FHWA-RD-86/168. 4) Yamada et al. (2015): Macro element method ..., S&F (accepted). 5) Noda et al. (2015): Study on the pore water pressure..., S&F (accepted). 6) Asaoka and Noda (2007): All soils all states all round ..., Int. Workshop on Constitutive Modeling, Hong Kong, China, pp.11-27. 7) Noda et al. (2008): Soil-water coupled finite..., S&F, **48**(6) pp.771-790. 8) 関口秀雄ら (1986): 局部荷荷を受ける..., 第 31 回土質工学会シンポジウム発表論文集, 111-116.

表-1 解析で比較したケース（全ケースで $d_e = 1.13d = 1.13m$ で一定）

ドレーンの透水性 k_w					ケース 1		ケース 2		ケース 3		
k_w の換算 (式(6))					大 ($k_w = 1.0 \times 10^2$ cm/s)		小 ($k_w = 5.0 \times 10^{-2}$ cm/s)		小 ($k_w = 5.0 \times 10^{-2}$ cm/s)		
d_w の換算手法	b (mm)	凡例	d_w (m)	$F(n)$	無		無		有		
					k_w (cm/s)	k_w/n^2 (cm/s)	k_w (cm/s)	k_w/n^2 (cm/s)	k_w (cm/s)	k_w/n^2 (cm/s)	
①外周を等値 (式(3))	2	—	0.0649	2.12	1.0×10^2 ($k_w = k_w$)	3.30×10^{-1}	5.0×10^{-2} ($k_w = k_w$)	1.65×10^{-4}	3.02×10^{-3}	9.97×10^{-6}	
	4	—	0.0662	2.10		3.44×10^{-1}		1.72×10^{-4}	5.80×10^{-3}	1.99×10^{-5}	
	8	—	0.0688	2.06		3.71×10^{-1}		1.85×10^{-4}	1.08×10^{-2}	3.99×10^{-5}	
②幅と厚さの平均 (式(4))	2	- - -	0.0510	2.35		2.04×10^{-1}		1.02×10^{-4}	4.90×10^{-3}	9.97×10^{-6}	
	4	- - -	0.0520	2.34		2.12×10^{-1}		1.06×10^{-4}	9.42×10^{-3}	1.99×10^{-5}	
	8	- - -	0.0540	2.30		2.28×10^{-1}		1.14×10^{-4}	1.75×10^{-2}	3.99×10^{-5}	
③断面積を等値 (式(5))	2	—	0.0160	3.51		1.99×10^{-2}		9.97×10^{-6}	5.0×10^{-2}	9.97×10^{-6}	9.97×10^{-6}
	4	—	0.0226	3.17		3.99×10^{-2}		1.99×10^{-5}		1.99×10^{-5}	1.99×10^{-5}
	8	—	0.0319	2.82		7.98×10^{-2}		3.99×10^{-5}		3.99×10^{-5}	3.99×10^{-5}



(a) ケース 1 (ウェルレジスタンス無, k_w 換算無) (b) ケース 2 (ウェルレジスタンス有, k_w 換算無) (c) ケース 3 (ウェルレジスタンス有, k_w 換算有)

図-1 解析結果 (凡例は表-1 参照)