バーチカルドレーンの打設間隔とスミヤーゾーンの影響

京都大学 嘉門雅史 地域地盤環境研究所 諏訪靖二, 福田光治, 陳国華, 下野段朋恵

バーチカルドレーンの改良地盤を対象にした沈下計測と解析結果等から, スミヤー効果のためドレーン近傍の透水係数あるいは圧密係数が減少し圧密遅れが生じるが, この影響は打設間隔にも依存する。本論文はサンドドレーン, プラスチックボードドレーン, パックドレーンなど幅広い工法を対象に, スミヤー効果をパラメータにした圧密解析を行い, この解析結果をもとにしてスミヤー効果の圧密遅れに対する影響度を工法別に示した。さらにドレーン径, 打設間隔, スミヤー幅, 透水係数の低減からなる透水係数低減比の算出式を提案し, この低減比によって工法毎のスミヤー効果の影響度がある程度統一的に表現できることを示す。またこのような整理結果からスミヤー効果の圧密遅れに対する効果も評価した。スミヤー効果の存在は種々のデータから明白で, 設計手法も提案されている。しかしこれらは工法に依存しており, スミヤー効果を考慮した設計法の普及を妨げている。本研究はこのような観点から透水係数低減比を共通の尺度にする可能性を示した。

キーワード: スミヤー効果, サンドドレーン, パックドレーン, プラスチックボードドレーン, 打設間隔, 圧密時間

Spacing of vertical drain and influence of smear zone on consolidation velocity

M.Kamon: Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

S.Suwa, M.Fukuda, G.Chen and T.Shimonodan: Geo-Research Institute

Purpose of this study is to propose a unified treatment of the smear effect on a delay of consolidation subjected to a clay layer improved by sand drain (SD) or pre-fabricated band shaped drain (PBD). Therefore, the finite differential method was applied to analysis this problem. As the results, it was found that the trend of delay of consolidation was taken account by the reduction ratio of hydraulic conductivity of clay. This ratio is constituted of the parameter revealing the spacing, thickness of the smear zone, radius of drain, and reduction ratio of hydraulic conductivity. In this paper, the relationship between spacing of drain, delay of consolidation, and smear effect depending on the methodologies of vertical drains is arranged on the same figure and is shown to scatter in the narrow zone.

Keywords: Smear zone, Sand drain, Packed drain, Pre-fabricated board drain, Smear zone, Delay of consolidation

バーチカルドレーンの打設間隔とスミヤゾンの影響

京都大学 嘉門雅史

地域地盤環境研究所 諏訪靖二, 福田光治, 陳国華, 下野段朋恵

1. はじめに

バーチカルドレーンによる改良地盤を対象にした沈下計測と解析結果等に依拠した研究によって、打設時のドレーン周辺の乱れにより、透水係数や圧密係数が低下して圧密遅れを伴うことが指摘されている。この現象をスミヤ効果と呼び、打設間隔が狭いほど顕著に発生することが示されており¹⁾、スミヤ効果は理論的、現象論的には明確な事実として把握され、室内実験や解析結果などを介して設計法も提案されている^{2)~4)}。しかしこれらの設計法を厳密に理論を尊重して適用するためには、透水係数や圧密係数の鉛直方向と水平方向の異方性や、打設条件によって異なる乱れの幅などを知る必要があり、実務的にスミヤ効果を考慮することを困難にしている。またスミヤ効果がサンドドレーン(SD)やプラスチックボードドレーン(PBD)毎に個々に提案され、一般性に欠けていることも適用を困難にしている原因のひとつである。これらの問題を解決するためには、SDとPBDの両工法に関するスミヤ効果を統一して把握し、スミヤ効果の一般性を確立することを目指した基礎的研究が必要である。本論文は両工法で予想される乱れの範囲を参考にしてスミヤゾンの幅と透水係数や圧密係数の低減比に着目した基礎的研究成果を示した。研究手法はスミヤゾンの発生を前提にして、等方性を仮定した差分法等の解析的方法で、スミヤの影響を調べた結果を示している。また透水係数低減比の計算式を提案し、これによって、SD、PBD及びパットドレーン(PD)等広範な工法に関するスミヤゾーンによる圧密遅れが統一的に評価できる可能性を示した。

2. 現場データを用いた逆解析によるスミヤ効果の確認

スミヤ効果の例証によく用いられるデータが現場計測データに基づく逆解析結果により整理された図-1~3である。いずれも有効径 d_e 、ドレーン径 d_w あるいは PBD の場合は換算径 d_w により $n=d_e/d_w$ から計算される n を用いた整理方法であり、スミヤ効果に関する既存研究の着目点もこの n による整理が中心である。

図-1⁵⁾はSDを対象に整理されたもので、ドレーン打設間隔が広がり、 n が大きくなれば打設による乱れの影響が小さくなり $c_h/c_v=5\sim6$ 程度になることを示している。一般的に細粒土の堆積

図-1 n と圧密係数低減効果⁵⁾

過程や鉛直方向からの土被圧の作用による構造特性の発達等から圧密係数の異方性が発達し(鉛直方向の圧密係数) $<$ (水平方向の圧密係数)になる⁶⁾ことが報告されている。図の傾向を外捜することによって n が大きくなれば c_h/c_v が5~6の値に近づくことから n が大きくなるほどスミヤ効果は消失し、自然状態に近づいていくという期待につながっている。このような結論にいたる原因はスミヤ効果が n を因子に整理されていることにあると考えられる。

スミヤゾーンの形成にはケーシング形状、ドレーンと乱れの面積比も影響する。PBD でもサンドドレーンと同様に図-2のようにドレーン打設間隔 n と圧密係数の低減比の関係が示されている⁷⁾。これらの関係を図-3⁸⁾のように n を基準にして SD と PBD 各々に提案された図を重ねてみると、PBD のばらつきが顕著であり、 n による一般化が困難であることが分かる。なお図-3 で示されているPBD の種類はカートホートドレーンである。ばらつきの原因としてマントレルの形状や規模及び打設方法などによる乱れ程度の違いにあるが、与える影響は工法によって異なることを示唆している。従ってスミヤ効果の現象は SD, PBD いずれの工法でも明白に存在するにも関わらず、それが定量的、統一的に把握されてこなかったのを、将来的にマントレルが改良され大型化したり、形状を変えるとこれらの関係図をそのまま準用することはできなくなることを意味している。また SD と PBD の取扱い方には差がみられることから、提案されている設計方法も設計理論として整合性がないことを示している。図-4 は図-1 に示された式

と図-3 の直線式を同じ図に重ねあわせ

たものである。自然地盤の c_h/c_v の初期値を5とすると、低減の初期値は5にしなければならぬ。このことを考慮して初期値 5 で正規化した関係(点線)もつけ加えた。自然地盤を基準にするとこの点線が低減比になる。工法毎に整理された図では n と c_h/c_v の関係には直線的な傾向が存在することが期待さ

図-2 地盤の c_h と n の関係⁷⁾

図-3 (c_h/c_v) と n の関係 ($U=90\%$)⁸⁾
(袋詰めサンドドレーン, カートボードドレーン, サンドドレーン)

図-4 広い n の範囲におけるスミヤ効果と低減比

れたが、図-4 のように重ね書きしてみると統一性に欠け設計には使用できないことがわかる。従って現場データの解釈例として示されている図-1~3 の関係を設計に利用しようとしても、図-4 に示された工法による大きな差の原因を明確にしなければ単純に現場データで事実であるといっても利用することはできないことが分かる。

3. スミヤ・ゾーンの研究方法

スミヤ・ゾーンの存在の確認は実験規模で強度・透水係数・圧密係数の低下が確認されており、乱されない状態の値に対する低減比として考慮されている。朴・三浦の研究ではこれらの低下ゾーンはマントレル直径の2.5~3倍、そして水平方向の透水係数は約1/5に低下していることが報告されている^{3), 4)}。朴・三浦らはこれらの実験事実を踏まえて三重円筒モデルを提案し、内部スミヤ・ゾーン、外部スミヤ・ゾーン及び乱されていない外延部のゾーンに分け、マントレルの直径を d_m とすれば、それぞれ $(1.5 \sim 2.0) d_m$, $(5 \sim 7) d_m$ としている。またこれらのゾーンの透水係数は乱されない外延部の値を基準に内部スミヤ・ゾーンの1/5、外部スミヤ・ゾーンの内部と外延部の値の平均値として計算することを提案している。既存の多くのスミヤ効果に関する提案モデルは朴らのように多重円筒モデルが基礎になっている。しかし朴らの研究はPBDにおけるスミヤ効果が直接の対象であり、SDを含めた広範囲なハーチカルトレーンの工法に適用することは証明されていない。SDのスミヤ効果に関しては尾上⁹⁾らの研究成果があげられる。しかしこうした研究には図-1~3に示されたような現場データの傾向を分析する研究は見当たらない。これらのことを考慮して本研究ではスミヤ・ゾーンの1層とする二重円筒モデルを用いるが、広範囲な工法を対象とするためスミヤ・ゾーン幅をマントレルに対する比としてではなく、厚さそのものとして取扱い、その幅や効果の影響評価方法を見出すことを目指した。

4. 差分法・FEMによる解析方法と合理性

スミヤ効果の解析には圧密に関する差分法を用い、解析に用いた地盤パラメータは大阪湾岸で見られる代表的な沖積粘土から選択した。差分法に用いた例を図-5, 6に示した。図より大阪湾岸の沖積粘土はやや過圧密傾向を示し、また沖積粘土下部には低塑性の粘土が堆積している。またトレーンとスミヤ・ゾーンの関係を図-7に示した。図中、 d_e : トレーンの有効径で正方形配置の打設を考えて打設間隔を d とすれば $d_e = 1.13 \times d$ として計算した。トレーン径 d_w はSDンではトレーン径40, 60cmとしたが、PBDは換算径を用い、経験的な値5cmとした。 s : スミヤ・ゾーンの幅で、マントレル径 d_m とすれば約 $2d_m$ の範囲内で計算幅を抽出した。 H : 沖積粘土の厚さで31mとした。この解析では大阪湾の沖積粘土の一般的な地盤改良で実施されているような貫通トレーンを対象にし、沖積粘土上下端

図-5 土被り圧と圧密降伏応力

を両面排水条件とした。また解析に用いたスミヤゾーンの透水係数あるいは圧密係数の低減と幅などの関係を表-1 にまとめて示した。これらの地盤条件に対して即時載荷で 100kPa 載荷し、沈下圧密度で 50%に達する時間でスミヤ効果を評価した。図-8 はスミヤ効果を見放したφ40cm の SD に対する打設間隔 150, 200, 250cm に関する解析結果の経時変化で、打設間隔によって圧密時間に違いが見られるがいずれも最終沈下量は 3.95m で同じ値である。またφ60cm の SD, PBD 及び PD についても同様にスミヤ効果がない場合の計算を行った。これの沈下量がスミヤ効果を考える上で基準になる時間～沈下量である。この時間沈下を最終沈下量で割りひずみ圧密度を求めた。図-8 は打設間隔を変えた時の差分法による SD に関する解析結果例である。図-9 は SD と PBD に関する差分法と Barron 式による圧密度と時間係数の関係を比較したものである。差分法では土質試験結果に対応するように深度方向に圧密パラメータを変え、また鉛直方向の排水も考慮しているが、Barron 式では水平放射流れが対象で、しかも圧密パラメータは地盤の平均的な値を用い $c_v=70\text{cm}^2/\text{day}$ とした結果である。しかし差分法と Barron 式には圧密モデルの違いはあるが、図に示されるように打設間隔及び SD と PBD の工法によらず同じ圧密係数を用いても両者の間には良好な類似性があり、この類似性によって、差分解析結果の信頼性を確認した。また解析では深度方向に異なった圧密パラメータを用いたが、ひとつの圧密パラメータで計算した Barron の推定式と類似しており一般性は維持されていると判断した。

図-6 間隙比，湿潤単位体積重量，圧縮指数

図-7 解析に使用したメッシュ・境界条件

表-1 解析ケース

	サンドドレーン	PD	PBD
ドレーン径 換算径 $d_w(\text{cm})$	40, 60	12	5
打設間隔 $d(\text{cm})$ (□配置)	150, 200, 250, 300	100	80, 100 150
$n (=d_e/d_w)$	2.7～7.1	9.4	18.1～ 33.9
スミヤゾーン幅 $S(\text{cm})$		5, 10 20, 40	
透水係数 低減比		1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 10	

5. スミヤー効果による圧密遅れ一般化の検討

解析結果を踏まえてスミヤー効果による圧密遅れを分析する。ここで比較する因子はひずみ圧密度で50%になるときの経過日数である。図・10 はこのうち SD と PBD に関してスミヤーゾーンの幅と圧密遅れの関係を示したものである。図にはスミヤー効果がない場合の結果も付記してある。

このスミヤー効果がない場合の圧密度50%

に達する所要時間は打設間隔が広がるに従い、打設間隔に比例するように長くなっている。この関係を基準にするとスミヤー効果がある場合は圧密遅れを示しているが、圧密時間と打設間隔の関係は、スミヤー幅が同じで、その中の圧密係数の低減

比が同じであれば、スミヤー効果がない場合の関係に近似的に平行になるような圧密遅れを示すことが分かる。また SD と PBD の打設間隔に対する50%圧密度の期間の勾配は近似的に平行している。しかし、SD や PBD 等の工法の違い、あるいはスミヤーゾーンの幅や圧密係数の低減比などによってこれらの位置は異なるので統一的な評価を行う必要がある。本論文ではこの統一的な因子として透水係数低減比を用いた。図・11 は浸透流モデルで、 h 、 h_s は外周部とスミヤー外周部の圧力水頭、ドレーン外周の圧力水頭はゼロ、 k 、 k_s 、 k_m は外周部の乱されない部分の透水係数、スミヤーゾーンの透水係数、平均透水係数である。平均透水係数は図・11 の外周部からドレーン外周部迄の流路における平均値として算出している。なおスミヤーゾーンと外周部の透水係数には式(1)に示す低減係数 α の関係を仮定した。

$$k_s = k / \alpha \quad (1)$$

図・8 解析によるSDの沈下経時変化

図・9 SD,PBDの解析結果とBarron式による推定結果

図・10 スミヤーゾーン幅と圧密遅れ

$$q = 2\pi r^2 \frac{\partial h}{\partial r} k \cdot D \quad (2)$$

$$\frac{k_m}{k} = \frac{\ln(n)}{\alpha \cdot \ln\left(1 + 2\frac{s}{d_w}\right) - \ln\left(\frac{1 + 2\frac{s}{d_w}}{n}\right)} \quad (3)$$

被圧層の厚さ D とする運動の式 (2) を基礎として、被圧定常流条件下で透水係数低減比 (k_m/k) を算出する式 (3) を誘導した。式中スミヤーズゾーン s は存在しても、透水係数が低減しないならば $\alpha = 1$ であるから、 $k_m/k = 1$ になる。また、スミヤーズゾーン s がなく、 $s = 0.0$ ならば α に関わらず、 $k_m/k = 1$ になり、整合性は満たしている。図・12

図・11 浸透モデル

は SD, PBD, PD の 3 工法に対し、スミヤーズゾーンの幅や透水係数低減比を変えた表・1 に示す解析ケースの結果を透水係数低減比と圧密遅延時間比で整理したものである。ここに圧密遅延時間比はスミヤー効果がない場合の 50% 圧密に要する時間に対するスミヤー効果がある場合の 50% 圧密時間 t_{50} (スミヤー効果あり) / t_{50} (スミヤー効果なし) である。図から施工法が異なり、スミヤーズゾーンの幅も異なるという種々の条件に関わらず、透水係数低減比が小さくなれば圧密遅延時間比も小さくなるという傾向がみられ、工法によるばらつきは小さい。このことは、透水係数低減比の有効性を示している。この図からはスミヤー効果による圧密遅れが顕著になるのは平均透水係数比が 0.6 以下であることを示しており、スミヤー効果は条件によって異なることを予想させる。図・13 は透水係数の低減比を一律 5 にした時の n に対する SD と PBD の透水係数低減比

の関係を示している。図より SD は $n = 4 \sim 10$ 程度であるので、 n の変化に対する透水係数低減比の変化割合は PBD の関係に比べやや顕著である。これに対し $n = 20 \sim 45$ の範囲にある PBD は、スミヤーズゾーンの幅の影響は SD に比べて大きい。が、 n に対する圧密遅れの低減割合は小さいことが予想される。

図・12 透水係数低減比と圧密遅延時間比

6.あとがき

SD と PBD に対するスミヤ効果を統一的に把握するために透水係数低減比を提案した。この結果 SD, PBD, PD 等の工法やスミヤゾーンの発達条件によらず、概略的ではあるがこの透水係数低減比によって、スミヤ効果による圧密遅延現象を統一的に評価できることを示した。この結果から n のスミヤ効果に対する影響はSDがPBDに比べ大きいことがわかった。しかしスミヤ幅の影響はSDに比べPBDが大きく、圧密遅延が顕著になることが予想される。またドレーンへの流れが主流となる場合は n が大きくなってもスミヤ効果は残り、 n が大きくなってもスミヤ効果が消失して自然条件にならないことが分かった。

図-13 解析による n とスミヤ効果による透水係数低減比

参考文献)

- 1) D.T.Bergado, L.R.Anderson, N.Miura, A.S.Balasubramaniam: Soft Ground Improvement, ASCE PRESS, pp.102-108, 1996
- 2) Rixner, J.J., Kraemer, S.R.Smith, A.D.: Prefabricated vertical drains, Vol.1, Federal Highway Administration, Report No.FHWA-RD-86/168, Washington D.C., 1986
- 3) 朴永穆, 三浦哲彦: 現場条件を考慮したプラスチックボードドレーンの性能, 土木学会論文集 No.499/III-28, pp.51-58, 1994
- 4) 朴永穆: 低平地に堆積する海成粘土の土質特性と鉛直排水工法による地盤改良に関する研究, 佐賀大学学位請求論文, pp.129-154, 1994
- 5) 網干壽夫: 設計・施工上の留意点をさぐる, 5.土の圧縮と圧密, 土と基礎, No.3, pp.59-67, 1985
- 6) 小林正樹, 松本一明: 粘土の水平方向圧密係数について, 第31回土木学会年次学術講演会概要集(III), pp.167-168, 1976
- 7) 嘉門雅史: プラスチックボードドレーンによる軟弱地盤改良, 軟弱地盤の改良⑧, 総合土木研究所, pp.34-41
- 8) 竹内敦雄, 相京博之, 脇田英治: 軟弱地盤上の盛土による圧密沈下の事前予測と現場測定例, 土と基礎, Vol.36, No.7, pp.57-62, 1988
- 9) 尾上篤生: ドレーンのウエル・レジスタンスに関する基礎的研究, 清水建設研究報告別冊, No.32, pp.10-80, 1991