

潮間帯における粘性土地盤の圧密特性に関する研究

熊谷隆宏¹・上田正樹²・池野勝哉³
渡部要一⁴・佐々真志⁵

干潟の地盤環境の形成過程を解明する上では、干出と冠水を繰り返す潮間帯における圧密特性を明らかにすることが重要である。本研究では、潮間帯における地盤環境の形成過程の解明に向けて、高透水性の中間砂礫層が存在するような場合の自然干潟をも含む条件を設定し、潮位変動下の圧密実験を実施した。さらに、Sekiguchi・Ohta (1977) の弾塑性および弾・粘塑性構成則を適用し、潮汐作用下の圧密挙動を定量的に評価できる有限要素解析手法を提案する。また、適用性を検証した解析モデルを用いて、水平排水層が存在する場合に、堆積粘性土地盤の干潮位からの地盤面の高さが自重圧密沈下特性に与える影響を評価した。

1. はじめに

河口域における粘性土干潟では、河川から供給されたシルト、粘土分が海底に堆積した後、波浪や潮汐の作用下における長期の圧密過程を経て、地盤環境が形成される。干潟の地盤環境の形成過程を解明する上では、干出と冠水を繰り返す潮間帯における圧密特性を明らかにすることが重要である。また、失われた干潟の修復・再生のために、例えば、浚渫粘土等を用いた人工干潟の適切な造成方法等を検討するためには、潮間帯における圧密特性を評価する手法が必要不可欠であると考えられる。

Abu-Hejleh ら(1995)は、地盤内水位の低下および表面の蒸発が自重圧密に及ぼす影響について、乾燥に伴って生じる亀裂の影響を考慮した 1 次元の圧密理論を適用して評価している。また、Stark ら(2005)は、粘性土を積層的に設置する場における 1 次元的な圧密に対して、新規層の乾燥過程を考慮した解析モデルを提案している。このように、外水位が地盤より常に低く、地盤の乾燥が生じる条件における圧密に関して研究が行われているが、干出と冠水を周期的に繰り返す潮位変動下における圧密特性に関して、これまでに研究が行われていない。特に、干潟の地盤環境の形成過程において、河川より砂・礫分が供給される出水時には、シルト・粘土分比べて土粒子重量が大きい砂・礫分が先に沈降・堆積するため、地盤内部に砂礫層が形成されることが推定される。そのような高透水性の中間砂礫層の存在は、潮位変動下における圧密特性に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

本研究では、潮間帯における地盤環境の形成過程の解明に向けて、高透水性の中間砂礫層が存在するような場合の自然干潟をも含む条件を設定し、潮位変動下の圧密

実験を実施した。さらに、Sekiguchi・Ohta (1977) の弾塑性および弾・粘塑性構成則を適用し、潮汐作用により有効圧密圧力が変動する条件下の堆積粘土の自重圧密変形を合理的に評価できる有限要素解析手法を提案する。

2. 土槽実験

(1) 実験概要

実験装置として、内水位の制御が可能な大型土槽と、その内部に設置された小型土槽を使用した(図-1)。この小型土槽に、含水比を液性限界の 1.3 倍にあたる 145.1 %に調整した海成粘土を投入し、振幅 1m, 周期 12hr の潮位変動を 4ヶ月間作用させて、圧密実験を実施した。実験では、高透水性の層が圧密特性に及ぼす影響を調査するため、鉛直排水層設置条件、水平排水層設置条件、および原泥条件を実験条件として抽出した。試料粘土の主な物性値を表-1 に示すとともに、図-2 と図-3 に、標準圧密試験より得られた圧密特性を示す。また、図-4 に、各排水層の設置位置を示す。排水層として、幅 9.4 cm×厚さ 0.39 cm のプラスチックドレーンを使用し、鉛直排水

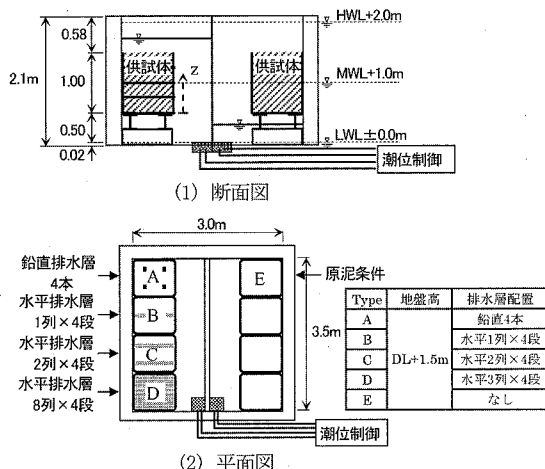
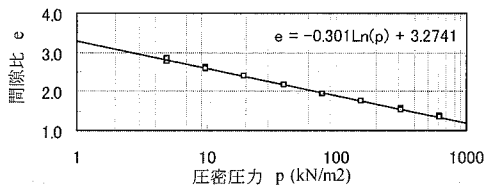
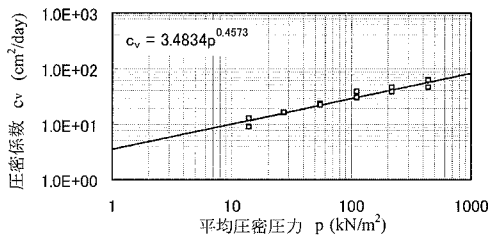


図-1 土槽実験概略図

1 正会員 Ph. D 五洋建設株式会社 技術研究所
2 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所
3 正会員 工修 五洋建設株式会社 技術研究所
4 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 土質研究室長
5 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 研究官

表-1 粘土物性値

土粒子密度 ρ_s		2.59g/cm ³
自然含水比 w_0		122.1 %
粒度組成	砂分	7.5 %
	シルト分	41.2 %
	粘土分	51.3 %
コンシステンシー	液性限界 w_L	111.6 %
	塑性限界 w_P	45.4 %
	塑性指数 I_p	66.2 %
強熱減量 L_d		10.3 %

図-2 $e - \log p$ 関係図-3 $c_v - p$ 関係

層は、一辺 0.4m の正方形配置、水平排水層は鉛直方向に 0.25m 間隔で設置した。また、図-5 に、水位変動下における水平排水層の圧密促進機能の模式図を示す。

(2) 実験結果

実験期間中、間隙水圧計を供試体底面より 0.50m と 0.75m の高さに設置し、連続的に間隙水圧を計測した。原泥条件の Type E、鉛直排水層を設置した Type A、および水平排水層を水平面全体に設置した Type D における地盤中の間隙水圧の変動例を図-6 に示す。水平排水層が存在しない Type E と Type A では、潮位が地表面 (DL+1.5m) より高く、地盤が冠水しているとき、間隙水圧は、潮位変動に追従し、静水圧分布を形成しながら変動する。一方、地盤が干出しているとき、地盤内水位は低下することなく地表面位置に維持され、間隙水圧は、地盤内の深度に対応した値になることがわかる。水平排水層が存在する条件では、排水層近傍の間隙水圧は、排水層の冠水時には、潮位に追従して静水圧分布を形成しながら変動する一方、排水層の干出時には、大気圧レベルまで低下することがわかる。また、このような排水層部の圧力低下時に、地盤内と排水層部の水頭差に起因する透水力が地盤内に大きく作用する。

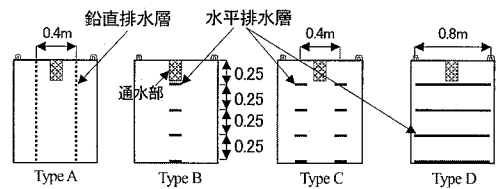


図-4 排水層設置位置

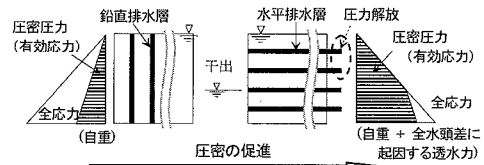
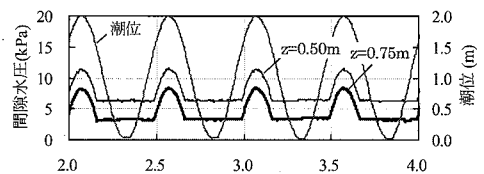
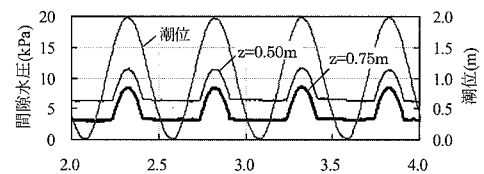


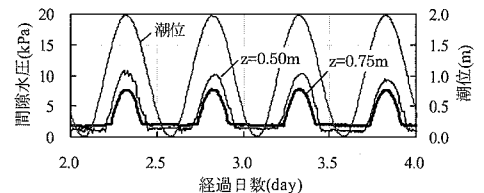
図-5 水平排水層の圧密促進機能



(1) Type E (原泥条件)



(2) Type A (鉛直排水層設置条件)



(3) Type D (水平排水層設置条件)

図-6 潮位変動下における間隙水圧の変動

沈下量の経時変化を図-7 および図-8 に示す。水平排水層が存在する場合は、周期的な水位変動の中で、地盤の干出時に、地盤内と排水層部の水頭差に起因する透水力が有効圧密圧力として作用する。その結果、透水力が作用する干出時に圧密沈下が大きく進行する一方で、冠水時には、透水力が作用しないため、沈下の進行が非常に小さいことが分かる。また、水平排水層の範囲の拡大に伴って増加する地盤内の平均圧密圧力の大きさに応じて、沈下量は、A, B, C, D の順に大きくなる。一次元沈下特性を示す Type A および Type D に対して、 $e - \log p$ 関係を用いて最終沈下量を算定すると、自重のみが圧密圧力として作用する Type A では、最終沈下量

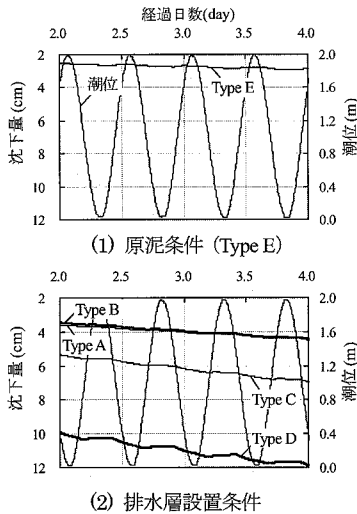


図-7 潮位変動下における沈下の進行

$S_f=9.8$ cm であり、実測値とよく一致する。一方、外水位を LWL に固定し、最大透水力が作用する条件で、Type D の最終沈下量を算定すると、 $S_f=18.5$ cm であり、実測値に比べて若干大きく予測される。この原因については次章で考察する。

実験後の含水比の深度分布を図-9 に示す。水中重量のみが圧密圧力として作用する Type A は、干出時に透水力が有効圧密圧力として作用する Type B~D に比べて、圧密によるひずみの発生が小さいため、初期状態からの含水比の低下が小さい。また、一次圧密が終了していない Type E では、Type A よりもさらに含水比の低下が小さいことがわかる。水平排水層が局所的に存在する Type B と Type C では、測点毎に含水比の低下特性が異なる。また、Type B と Type C の排水層を通る測点位置では、水平排水層が水平面全体に存在し、透水力の作用により地盤内の平均圧密圧力が最も大きくなる Type D と比較して、同程度の含水比の低下が現れることがわかる。

3. 数値解析

Sekiguchi・Ohta (1977) の弾塑性構成モデルは、異方性と主応力の回転に伴う塑性ひずみの発現を考慮でき

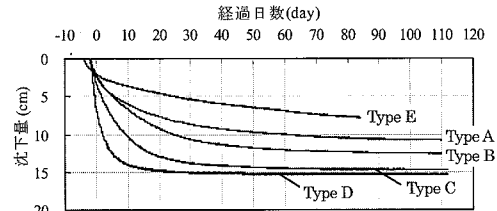


図-8 沈下量の経時変化

るように、Cam-Clay モデルを拡張したモデルである。さらに、弾・粘塑性構成モデルは、クリープ等の粘土の時間依存性を同時に考慮することができる。Sekiguchi・Ohta (1977) の弾・粘塑性構成モデルは、以下のように書き表される (例えば、飯塚, 1999; 地盤工学会編, 2002)。

・流動曲面: $F = \alpha \ln \{1 + t/t_0 \exp(\bar{f}/\alpha)\} - v^p = 0$

$$\bar{f} = MD \ln p'/p'_0 + D\eta^* \dots \dots \dots (1)$$

・関連流れ則: $d\epsilon_{ij}^p = \gamma \partial F / \partial \sigma'_{ij} \dots \dots \dots (2)$

・ひずみの加法性: $d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \dots \dots \dots (3)$

ここに、 $d\epsilon_{ij}^e$ は弾性ひずみ増分、 $d\epsilon_{ij}^p$ は粘塑性ひずみ増分、 $d\epsilon_{ij}$ は全ひずみ増分を示している。 α は二次圧密係数、 M は限界応力比、 D はダイレイタンス係数、 v^p は粘塑性体積ひずみである。また、せん断応力比パラメタ η^* は、平均有効応力 p' と偏差応力 s_{ij} を用いて、
$$\eta^* = \sqrt{3/2} (s_{ij}/p' - s_{ij0}/p'_0) (s_{ij}/p' - s_{ij0}/p'_0) \dots \dots \dots (4)$$

と表される。

また、添え字 0 は、基準状態における値を示している。弾塑性モデルでは、式 (1) に示す流動曲面 F の代わりに、以下に示す降伏関数を用いる。

$$f = MD \ln p'/p'_0 + D\eta^* - v^p = 0 \dots \dots \dots (5)$$

このような弾塑性および弾・粘塑性構成則を適用し、潮汐作用により有効圧密圧力が変動する条件における堆積粘土の自重圧密変形を評価できる解析手法を提案する。

水平排水層が存在しない場合、間隙水圧は、地盤の冠水時に、潮位に追従して静水圧分布を形成しながら変動する一方、干出時には、地下水位の低下が現れず、地盤内の深度に応じた一定値を保つ。すなわち、有効圧密圧力は、潮位変動に応答することなく、一定であるため、

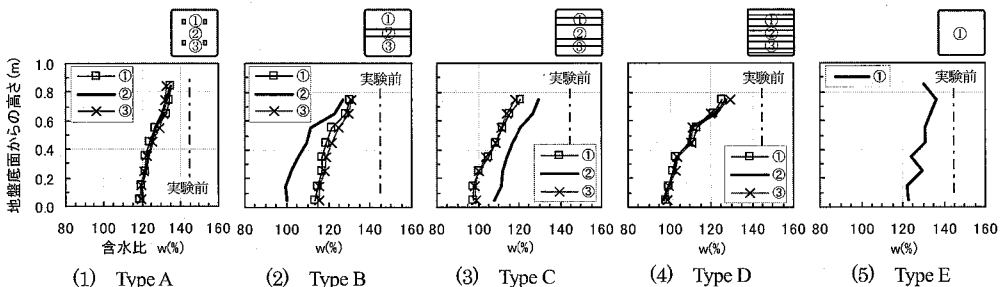


図-9 含水比の深度分布

表-2 解析に用いる物性パラメータ

単位体積重量 γ_t	13.4kN/m ³
圧密降伏応力 p_c	0.29kN/m ²
基準間隙比 e_0	3.64
圧縮指数 λ	0.310
膨潤指数 κ	0.046
限界応力比 M	0.886
ダイレイタンス係数 D	0.062
正規圧密時の静止土圧係数 K_0	0.68
ポアソン比 ν	0.42
初期透水係数 k_0	5.0×10^{-7} cm/s
二次圧密係数 α	0.012

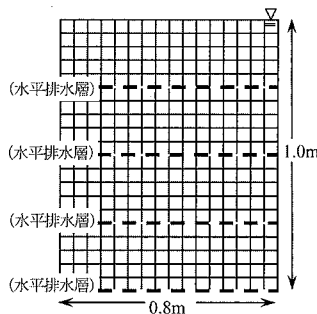


図-10 FEM 解析領域

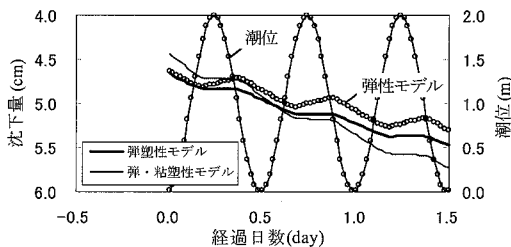


図-11 潮位変動下の沈下解析結果 (Type D)

水平排水層が存在しない条件の解析では、水に接する地盤面に、全水頭一定の境界条件を設定する手法を用いる。

水平排水層が存在する場合、排水層部の間隙水圧は、排水層の冠水時には、潮位に追従して変動するが、排水層の干出時には、大気圧レベルまで低下する。すなわち、潮位が地盤面より下がる干出時に、地盤内と排水層部の水頭差に起因する透水力が、有効圧密圧力として作用する。このような有効圧密圧力の変動条件に対して、以下に示す手法を用いて解析する。

- ①潮間帯の水平排水層部を除く、水に接する地盤面には、潮位変動に関わらず、全水頭一定の境界条件を与える。
- ②潮位変動下において、地盤の冠水時には、潮間帯の水平排水層部に、全水頭一定の境界条件を与える。地盤の干出時には、潮間帯の水平排水層と潮位を比較して、位置の高い方の地表面からの深度を位置水頭低下量に換算し、水平排水層部に境界条件として与える。このとき、地盤内に透水力の作用が再現される。

また、堆積直後の粘土は、過剰間隙水圧を保持した未圧密地盤である。解析では、以下に示す手法を用いて、初期の未圧密地盤を表現する。

- ①対象地盤を正規圧密地盤とみなし、初期間隙比に対応する圧密降伏応力 p'_c を設定するとともに、初期鉛直有効応力を p'_c に一致させる。
- ②鉛直有効応力が、圧密終了後に土被り圧 ($\gamma'z$) に一致するように分布荷重を仮想的に与え、未圧密地盤を擬似的に表現する (γ' は粘土の水中単位体積重量)。

解析モデルの適用性の検証のため、水平排水層が存在し、1次元挙動を示す Type D を対象にして、潮位変動下における自重圧密の有限要素解析を行う。図-10 に、平面ひずみ問題として扱う断面 2 次元解析領域を示す。表-2 に示す地盤物性パラメータを用いて、潮位変動下の圧密沈下を解析した結果を図-11 に示す。ここで、弾塑性および弾・粘塑性モデルとの比較のため、線形弾性モデル (Biot, 1941) による解析結果を併せて示す。弾塑性および弾・粘塑性モデルでは、透水力に伴って有効応力が増加する干出時に圧密沈下が大きく進行する一方で、冠水時には、有効応力の減少に伴い、沈下の進行が非常に小さいという実験で観測された沈下特性が、十分に表現されていることがわかる。これに対して、弾性モデルでは、有効応力が増加する干出時に沈下が大きく進行する傾向は表現されているが、透水力が消散する冠水時において、観測された沈下特性と異なり、有効応力の減少 (除荷) による膨潤変形が顕著に生じる結果となる。すなわち、弾塑性または弾・粘塑性モデルの適用により、潮位変動に起因する透水力の負荷/除荷の周期的な作用の中で、堆積粘土が正規圧密過程と過圧密過程を周期的に変移する現象を精度よく表現できることがわかる。

次に、1 次元変形を示す Type D と Type E に対して、沈下量に関する弾塑性および弾・粘塑性モデルの再現性の検証を行う。図-12 に示すように、実験における時間沈下関係を解析で再現するためには、原泥状態の Type E では、粘土の透水係数を標準圧密試験結果の低応力域を外挿して得られる値の 10 倍、また、排水層が存在する Type D では、3 倍に設定する必要があった。すなわち、低応力条件下の自重圧密は、標準圧密試験で行われる圧密状態に比べて、圧密の進行が速いことが考えられる。低応力条件下における自重圧密の進行が速くなる原因の 1 つとして、圧密に伴う排水によりブリーディング現象が発生し、排水機能を持つ毛管の水みちが形成されるためと推測されるが、詳細については、今後の研究課題である。

弾塑性および弾・粘塑性モデルに基づく解析結果と実験結果を比較すると、実験では、二次圧密に代表される粘性の効果は、有意に現れていないと考えられる。また、2 次元変形を示す Type B、Type C に対しても、Type

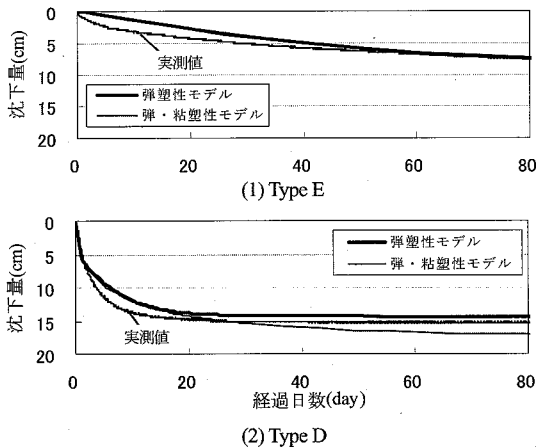


図-12 数値解析モデルの適用性の検証 (1次元問題)

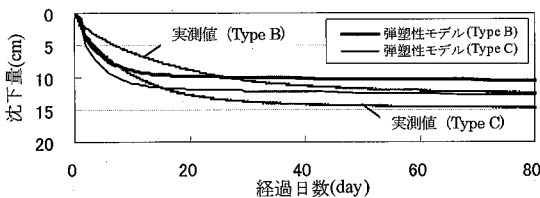


図-13 数値解析モデルの適用性の検証 (2次元問題)

Dと同様に、粘土の透水係数を3倍に設定すると、図-13に示すように、弾塑性モデルにより、実験で得られた沈下傾向を概ね再現できることがわかる。

水平排水層が存在する場合、潮位変動下の有効応力の大きさは、干潮位からの地盤面の高さの影響を受ける。表-3に示す条件に対して、地盤面の高さが沈下特性に与える影響について、弾塑性モデルを適用した解析により評価する。ここで、Case IVは、潮位を干潮位に固定し、有効圧密圧力として、常に最大透水力が作用する条件である。干潮時に現れる地盤内全水頭分布の解析結果例を図-14に示す。潮汐作用下では、地盤面の高さが高く、干出時間が長くなるとともに、水頭差に起因する有効応力が地盤内で強く発生する。その結果、表-4に示すように、地盤高が高い条件で、最終沈下量が大きくなることがわかる。実験では、地盤高をCase IIのD.L+1.5mに設定しており、水平排水層が存在する場合、実験で得られた沈下量が、干潮時の最大透水力を考慮した有効圧密圧力を用いて評価した値に比べて若干小さくなる原因は、このような地盤高の影響を受けるためと考えられる。

4. おわりに

本研究の成果として、実験により、潮汐作用下における粘性土地盤の自重圧密特性を明らかにした。特に、中間砂礫層に代表される水平排水層が潮間帯に存在する場

表-3 地盤高の影響評価を行うための解析条

	潮汐作用	LWLからの地盤面の高さ
Case I	有	DL+1.0m
Case II	有	DL+1.5m
Case III	有	DL+2.0m
Case IV	無	(最大透水力作用)

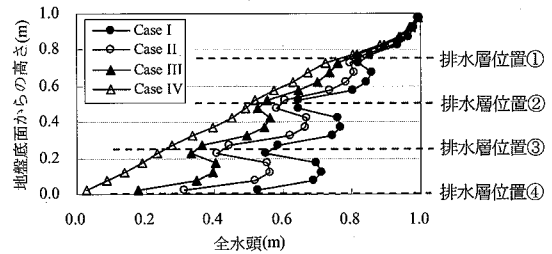


図-14 干潮時における地盤内全水頭分布(圧密度0%時)

表-4 最終沈下量解析結果

	最終沈下量
Case I	13.7cm
Case II	14.5cm
Case III	15.5cm
Case IV	16.7cm

合、有効圧密圧力として作用する透水力の影響が顕著に現れ、圧密が促進されることがわかった。また、潮汐作用下における自重圧密の問題に、Sekiguchi・Ohta (1977)の構成則に基づく有限要素解析手法が適用できることを検証した。ただし、自重圧密時における透水係数の評価については、今後詳細な検討が必要である。また、解析により、水平排水層が潮間帯に存在する場合において、地盤面の高さが自重圧密沈下特性に与える影響を評価した。

参 考 文 献

- 飯塚敦(1999): 塑性論的粘塑性論による関口・太田モデルの解釈, 第34回地盤工学研究発表会講演集, pp.595-596.
- 地盤工学会編(2002): 地盤の変形解析-基礎理論から応用まで-, 102p.
- Abu-Hejleh, A. N. and D. Znidarcic (1995): Desiccation Theory for Soft Cohesive Soils, J. of Geotech. Eng., Vol. 121, No. 6, pp. 493-501.
- Biot, M. A (1941): General Theory of three dimensional Consolidation, J. Appl. Phys., 12, pp. 155-164.
- Stark, D. T., H. Choi, and R. P. Schroeder (2005): Settlement of Dredged and Contaminated Material Placement Areas. 1 Theory and Use of Primary Consolidation, Secondary Compression, and Desiccation of Dredged Fill, J. of Waterway, Port, Coastal, and Oc. Eng., Vol. 131, No.2, pp. 43-51.
- Sekiguchi, H. and H. Ohta (1977): Induced Anisotropy and Time Dependency in Clays, Proc. of the 9th International Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng. Specialty Session 9, Tokyo, pp. 229-238.