



早稲田大学教授 赤木寛一
最終講義

土質力学のすすめ

-限界状態土質力学とシールドトンネルの掘削プロセス管理-

早稲田大学小野梓記念講堂

2025年3月15日

目 次

—まくら—

1. 土とは何か？
 2. 限界状態土質力学の誕生
 3. 土を掘るとは何か？
 4. 土質力学に基づくシールドトンネル掘削プロセス管理
 5. 今後の展望と御礼
-
-

赤木寛一の経歴

1954年12月30日生まれ 山羊座 岡山県岡山市出身

1973年3月 岡山県立岡山朝日高校卒業

1978年3月 早稲田大学理工学部土木工学科卒業

1984年3月 早稲田大学大学院博士後期課程修了, 工学博士(早稲田大学)

1978年 (昭和53年) 早大土木卒業アルバムより

後藤
研究室



後藤正司先生



天笠和徳



岡部安治



佐久間 治



高木 清



平田一人



前野宏司



松尾 肇



丸山雄吉



三保谷 明

森
研究室



森麟先生



赤木寛一



有吉秀一



岩本 淳



川瀬喜雄



古賀彰展



菅原道則



中根信一



西村高明



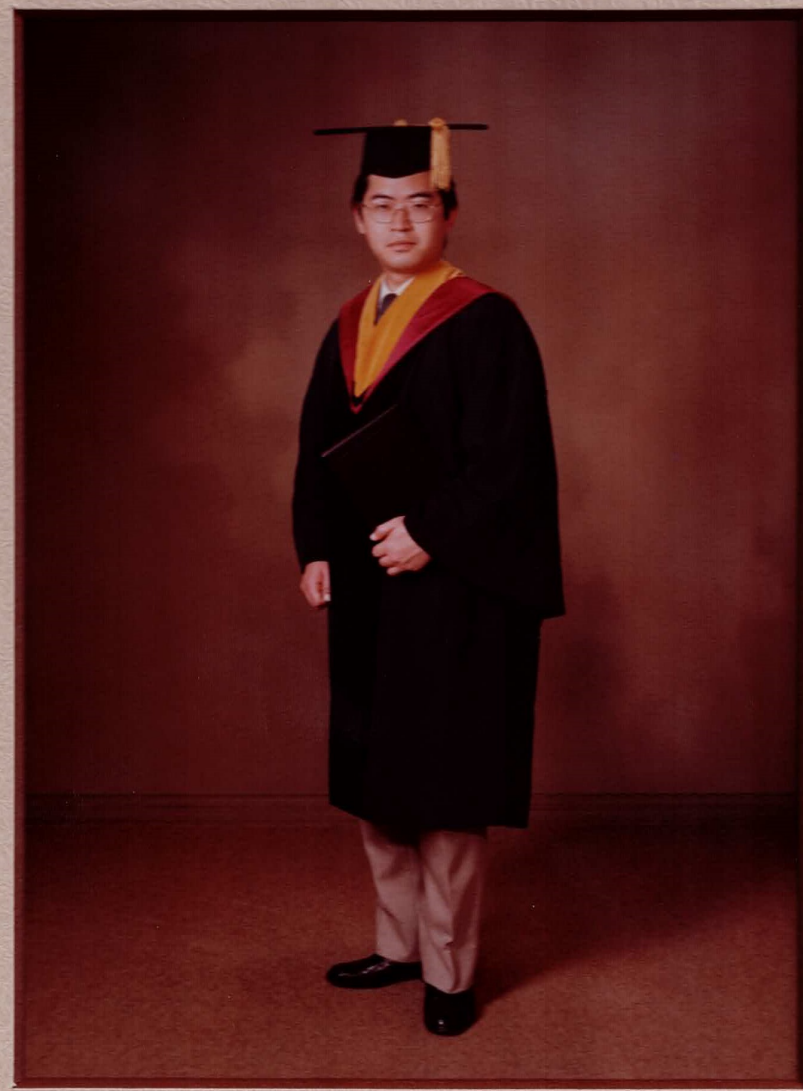
林 淳之



一松政夫



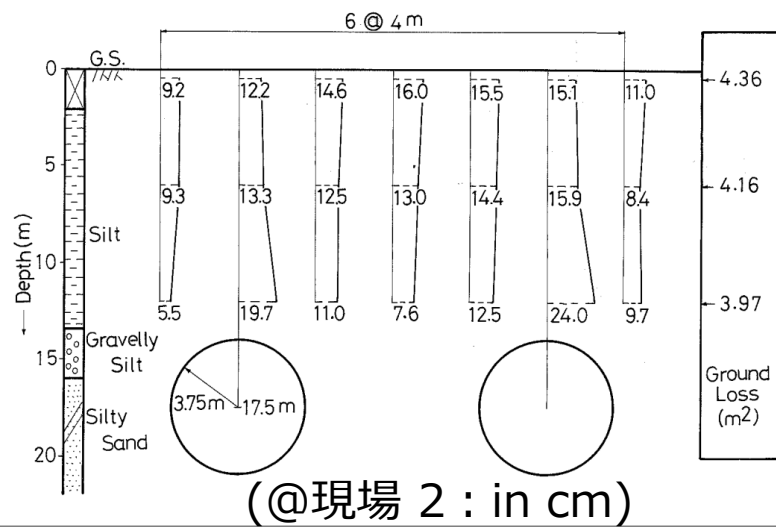
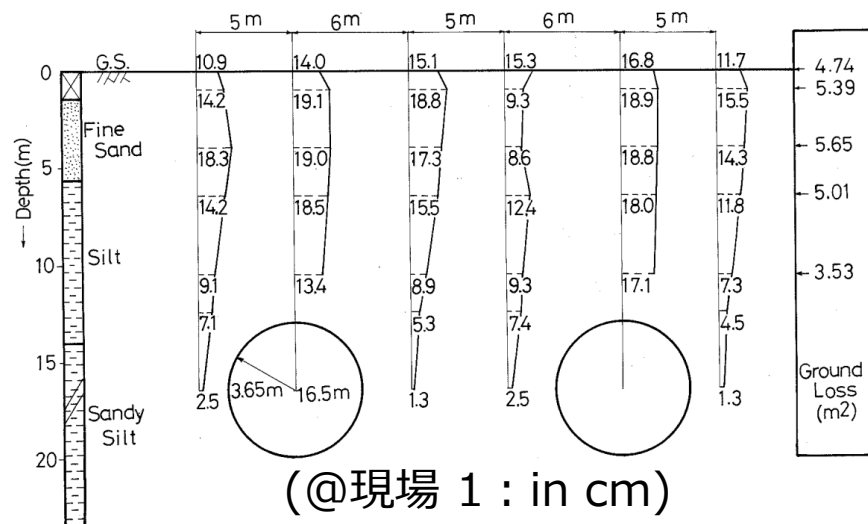
渡邊尚浩



博士学位授与式：1984年3月

正規圧密粘土の非排水せん断変形で

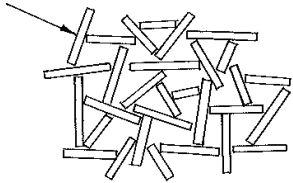
生じた乱れに基づく圧密現象に関する研究



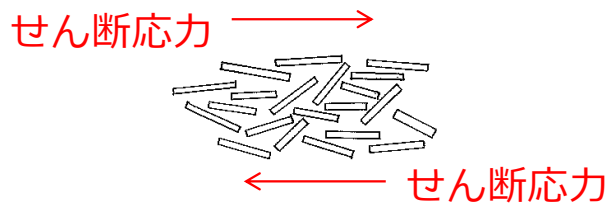
1970年代の軟弱粘性土シルト地盤での双設シールドトンネル工事現場における層別沈下実測結果

- ・シルト層における地盤沈下量がほぼ一定，浅部で増加
⇒シールド工事で乱されたシルト層で圧密沈下が発生し，累積増加

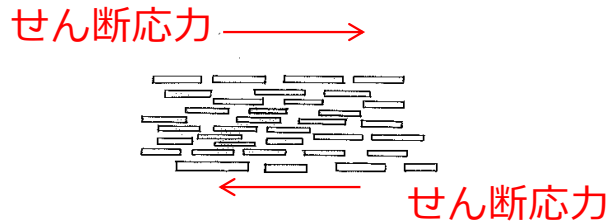
微細粘土粒子



a) 綿毛化構造



b) 部分的な配向構造

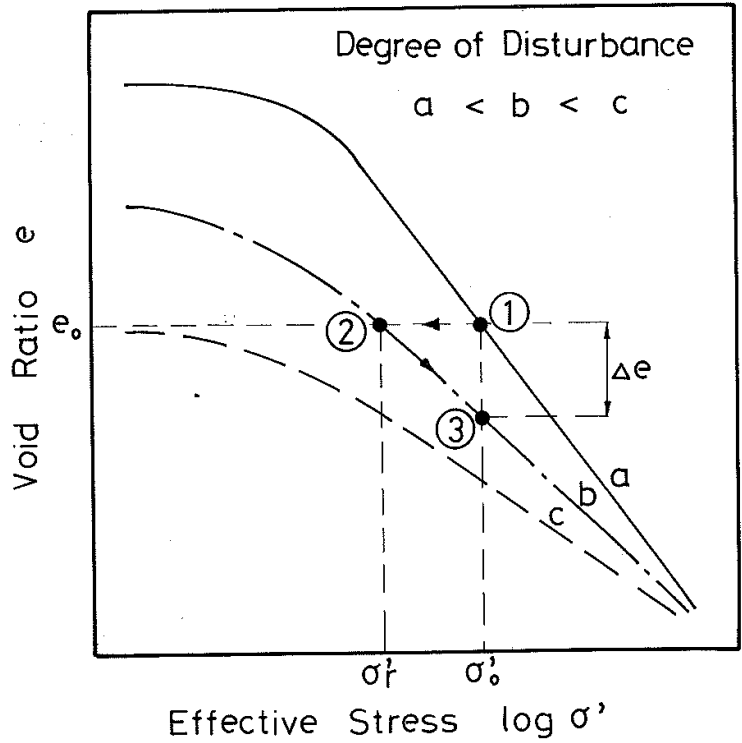


c) 配向構造

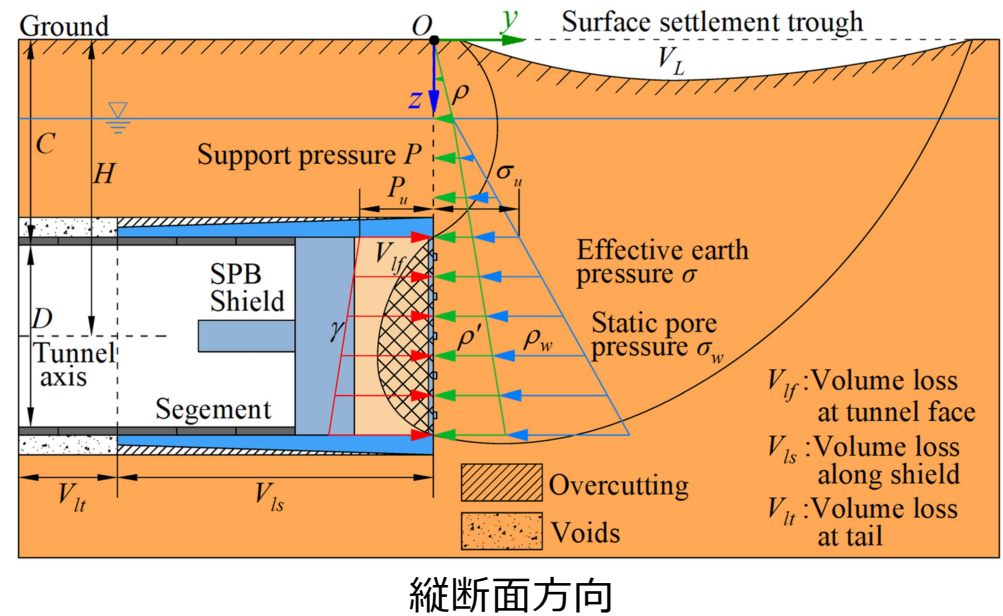
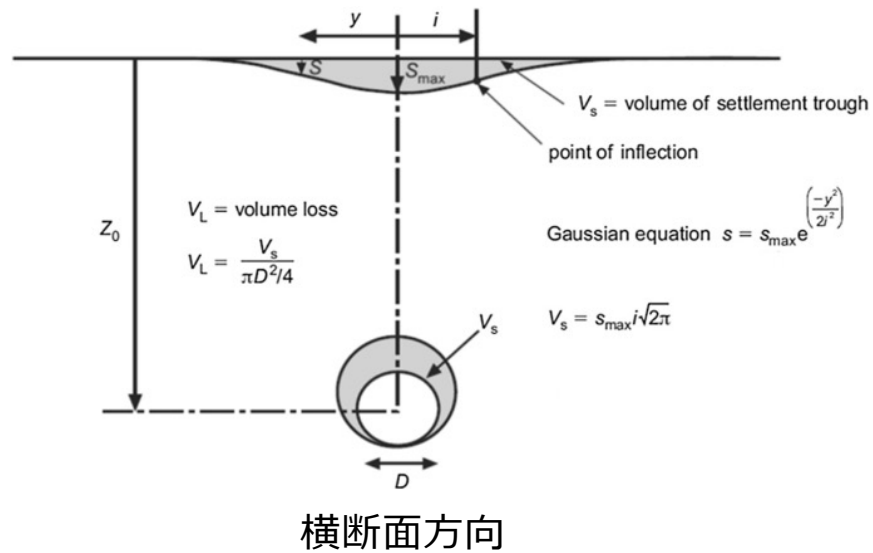
間隙比

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$= \frac{\text{間隙体積}}{\text{土粒子体積}}$$



軟弱粘性土の構造の乱れに基づく
 圧密現象



シールド工事に伴う掘削体積と地表面沈下体積の関係

物理学の質量保存則

⇒掘削土体積 ≠ 地表面沈下体積 : 圧密に伴う土の体積変化

⇒掘削土質量 = 地表面沈下質量

早稲田大学赤木研究室の歴史

1984年4月	早稲田大学専任講師就任, 赤木研究室創設
1986年4月	早稲田大学助教授就任
1994年4月	早稲田大学教授就任
1994年8月 1995年8月	英国ケムブリッジ大学工学部客員研究員 同大学チャーチルカレッジバイフェロー
2004年	赤木研究室創設20周年
2006年3月 2006年9月	NZ, カンタベリー大学工学部客員研究員
2007年5月	土木学会 論文賞 「土の塑性指数とpH に着目した土壌洗浄における凝集沈殿・脱水プロセス管理」
2010年3月	地盤工学会 功労章
2011年11月	日本ガス協会 論文賞 1) 「水素ガスの土中での移動特性とその検知」 2) 「車両輪荷重が舗装路下の埋設管に及ぼす土圧の評価手法に関する実験的検討」
2014年	赤木研究室創設30周年
2020年	新型コロナウイルス流行 研究室運営にも影響
2024年	赤木研究室創設40周年 早稲田大学 大隈学術記念賞 「限界状態モデルによる土質力学体系の構築と教育実践ならびに地盤工学における技術継承と新技術開発への貢献」

赤木 寛一 専任講師

(土木工学科)

昭和49年ワセダ土木に入学以来、今年で10年目。学生諸君の年代に割合近い訳です。しかしながら、大学入学後の10年というのは個人的にも、社会的にも大きく変化する時期にあたり、私自身を考えてみてもこの10年の時の流れは速く感じられ、10年前と現在では考え方もかなり変わってきたような気がします。大学の先生というのはその大事な時期に学生諸君と関わりを持つわけですから、責任重大であると思います。

この三月に定年で大学をおやめになった私の恩師にもあたる後藤正司先生は最終講義の中で、「自分のことを考えていればいい研究者であると同時に、他人である学生諸君のことを本気で心配することができる教育者でもあらねばならないという矛盾した役割をもつのが大学の先生である。」という趣旨のことを述べておら

れました。私も同感であり、自分の研究を一生懸命やるのはもちろんですが、学生諸君のことを本気で心配することができるようになればと思います。



赤木専任講師の横顔

森 麟

赤木さんは昭和53年本学の土木工学科を卒業し、大学院で土質工学を専門に研究して、粘土の乱れによる圧密現象に取組み本年2月工学博士の学位を受けた新進学徒であります。彼は岡山の出身で性格が素朴で大らかですが、物事をみる目は的確でシャープであり、粘り強いので研究者として十分な素質を持っています。またお酒は愉快地飲みますが大変強くてくずれません。それにカラオケが抜群にうまく渡哲也の持ち歌を得意としています。付き合いがよいので学生の兄貴分として教育面でも大いに活躍してくれることを確信しています。

(土木工学科教授)

(早稲田大学理工学部報 塔：1984年5月より)

大隈学術記念賞

赤木寛一

限界状態モデルによる土質力学体系の構築と教育実践
ならびに地盤工学における技術継承と新技術開発への貢献

貴下の右の業績は抜群であり
学術の水準の向上に寄与するところ
極めて顕著であると認められる
よって本大学はその規程にしたがい
本賞を授与する

二〇二四年十一月十四日

早稲田大学総長

田中愛治



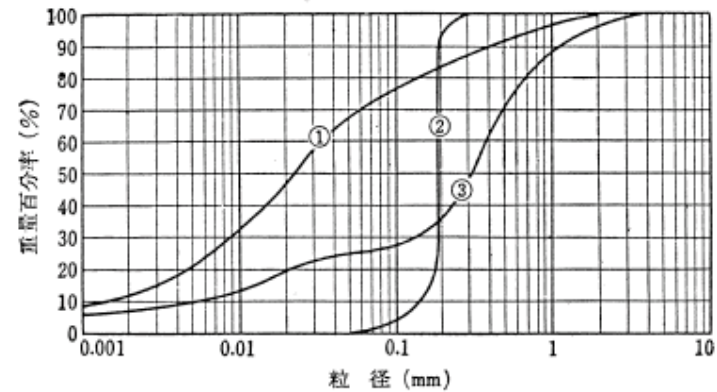
第九〇号



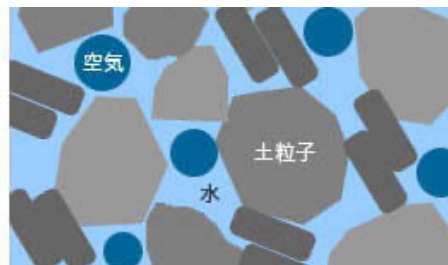
1. 土とは何か？

(1) 土の物理学

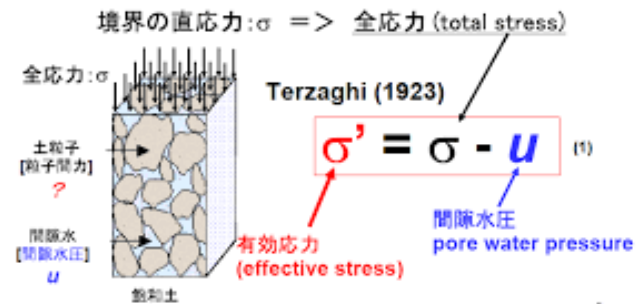
1) 土粒子の集合体：粒状体



2) テルツアギーの有効応力



土要素境界、内の応力



間隙比

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$= \frac{\text{間隙体積}}{\text{土粒子体積}}$$

(2) 土の化学

1) 粘土鉱物の構造と吸着水

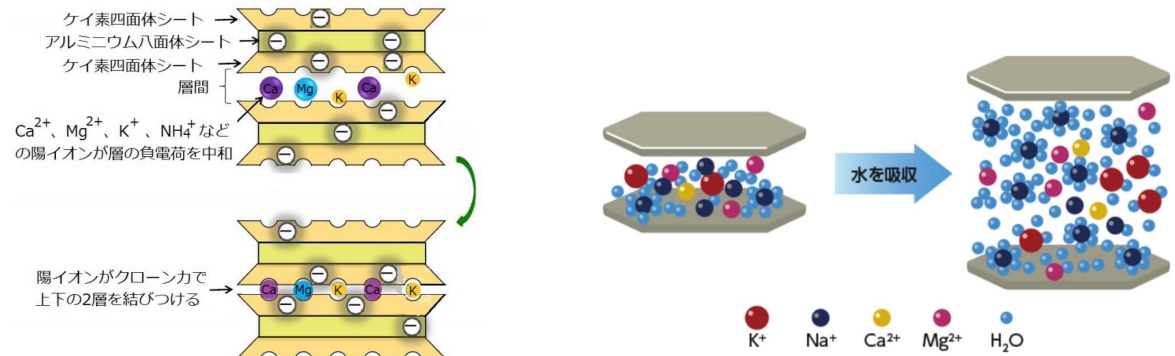
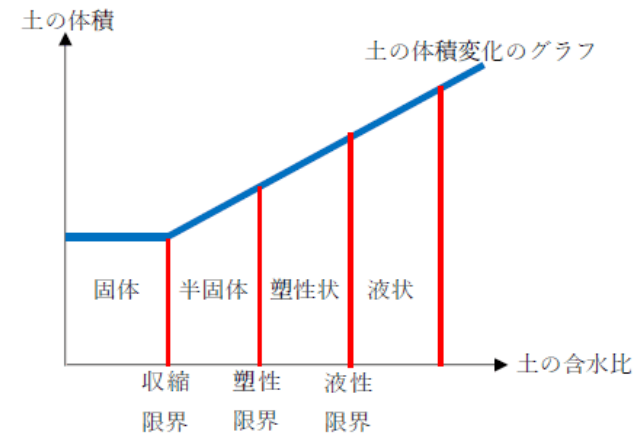
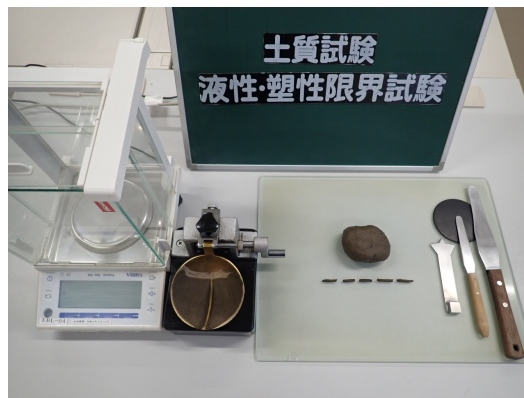
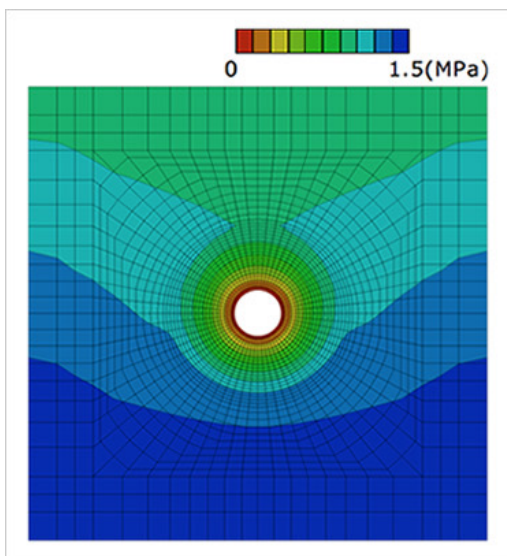


図2. 2:1型層状ケイ酸塩鉱物の陽イオン吸着メカニズム

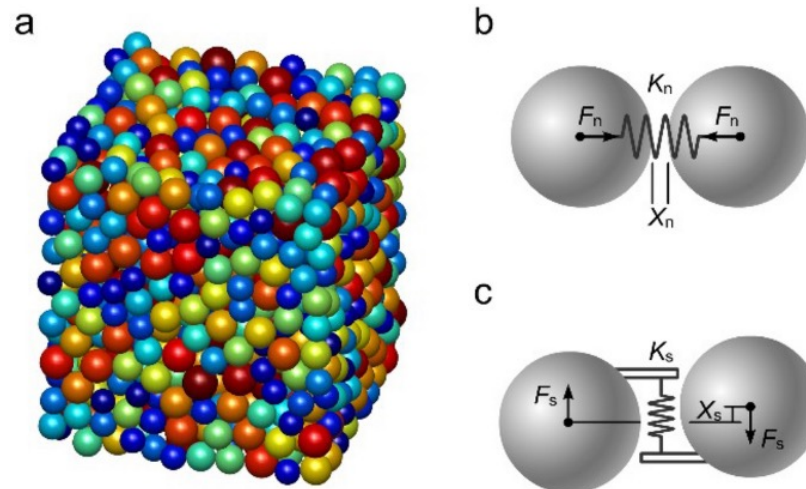
2) 粘土のコンシステンシー限界



(3) 土の数学



1) 有限要素法

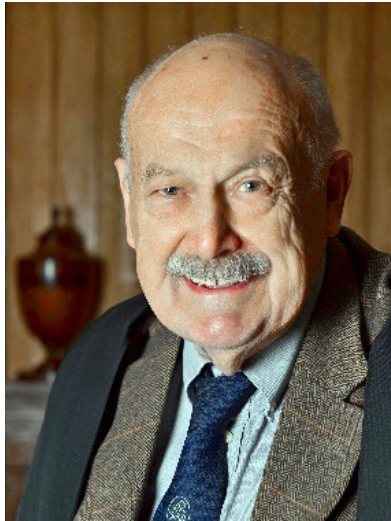


2) 個別要素法

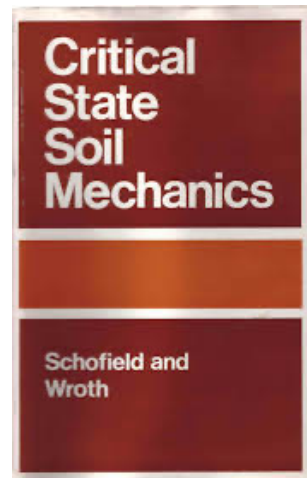
個別要素法でできること：赤木が流れます！ by S.Ishii(2025)



2. 限界状態土質力学の誕生



Andrew Noel Schofield FRS, FREng (born 1 November 1930) is a British soil mechanics engineer and an emeritus professor of geotechnical engineering at the **University of Cambridge**.



McGraw-hill, 1968



CHARLES PETER WROTH
He was joint author of `**Critical State Soil Mechanics**` . He was appointed Professor of Engineering Science at Oxford and Fellow of Brasenose College in 1979.

土質工学会（現，地盤工学会）会長
とのご縁からケムブリッジ大学へ



後藤正司 会長
(早稲田大学)
1974～1975



古藤田喜久雄 会長
(早稲田大学)
1988～1989



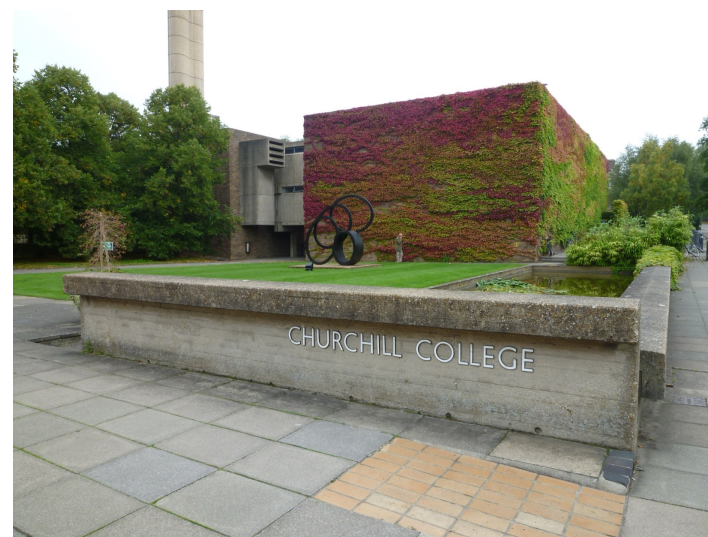
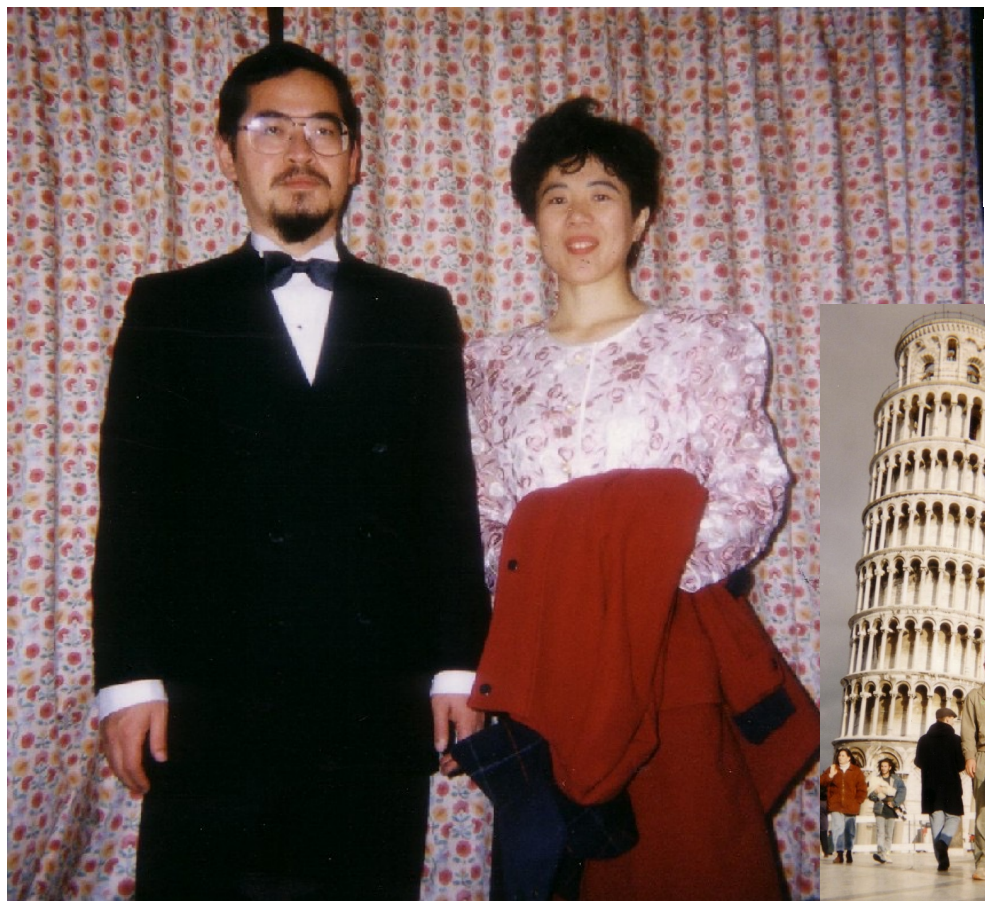
Wroth先生ご夫妻と
(第11回国際土質基礎工学会議,
グランドキャニオン, 1985, 8)



木村孟 会長
(学位授与機構)
1998～1999

古藤田先生，宮越さんと
(第11回国際土質基礎工学会議，
サンフランシスコ，ナパ，1985，8)





早稲田大学在外研究員@ケムブリッジ大学，チャーチルカレッジ（1994～1995）

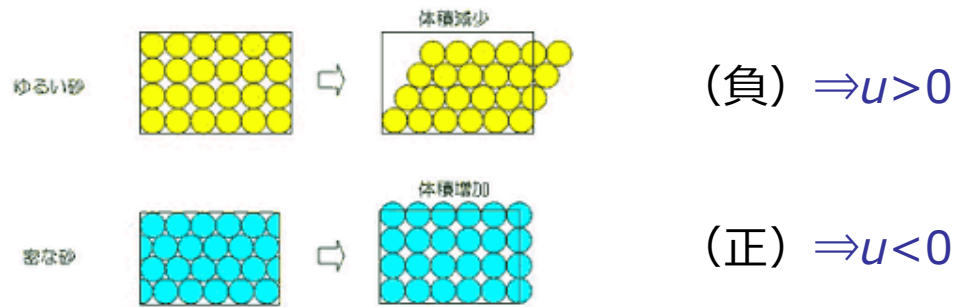


ケムブリッジ・マフィアの一員として@ドイツ, ハンブルグ会議 (1997,9)

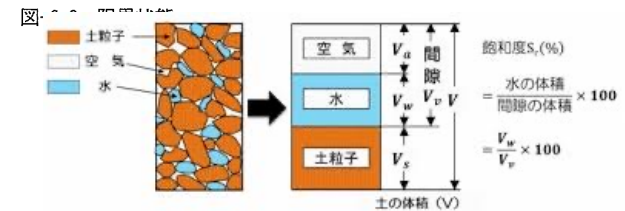
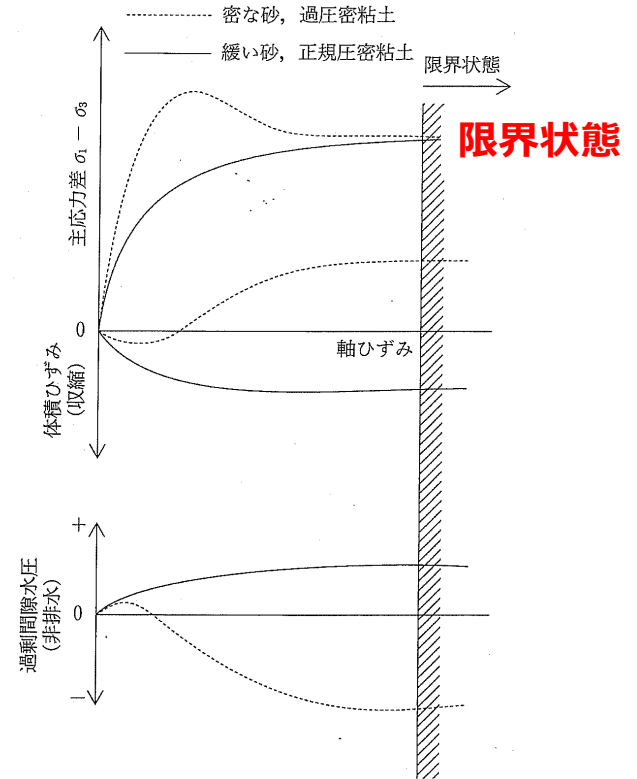
(1)限界状態モデル←土は土粒子の集合体と間隙で構成されること！

密な砂でもゆるい砂でも、またあるいは正規圧密粘土であっても過圧密粘土であっても、三軸圧縮試験を十分に大きなひずみが発生するまで継続して行くと、**応力および土の体積変化なしでせん断ひずみが増大する状態に到達する**。この状態では、三軸供試体にはすべり面が生じ、土は**破壊状態**に達していると考えられる。このような状態を**限界状態 (Critical State)** と呼ぶ。

⇒土の限界状態モデル (Critical State Model)



ゆるい砂と密な砂のせん断応力による体積変化 = **ダイレイタンスー (Dilatancy, 膨張)** : 間隙比 or 間隙水圧変化



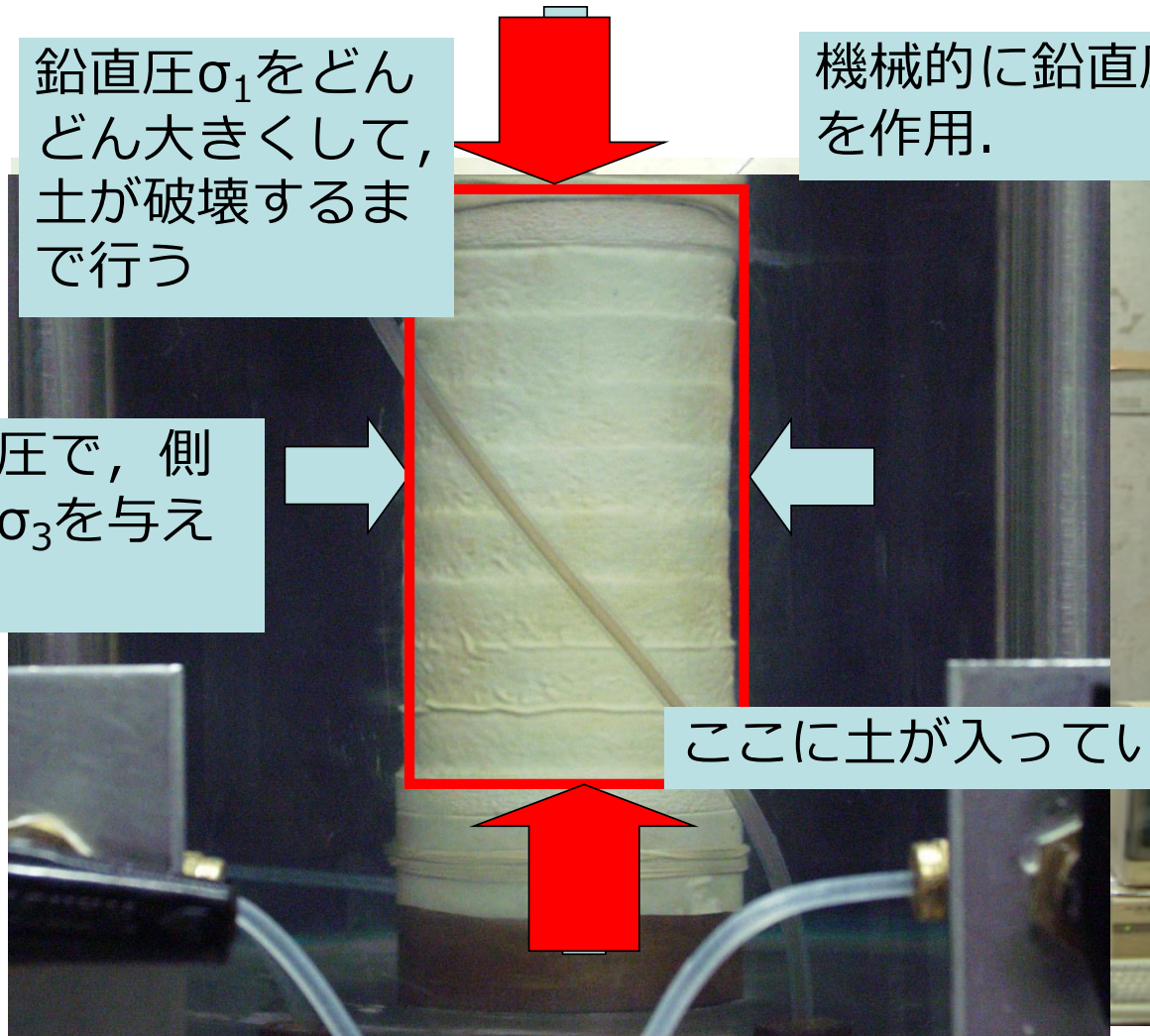
土の三軸圧縮試験 のプロセス

鉛直圧 σ_1 をどん
どん大きくして、
土が破壊するま
で行う

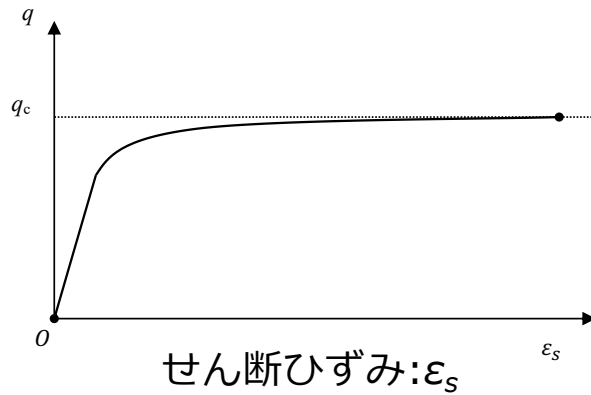
機械的に鉛直圧 σ_1
を作用.

水圧で、側
圧 σ_3 を与え
る

ここに土が入っています



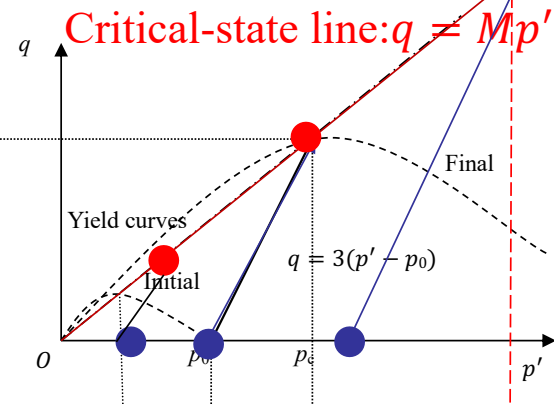
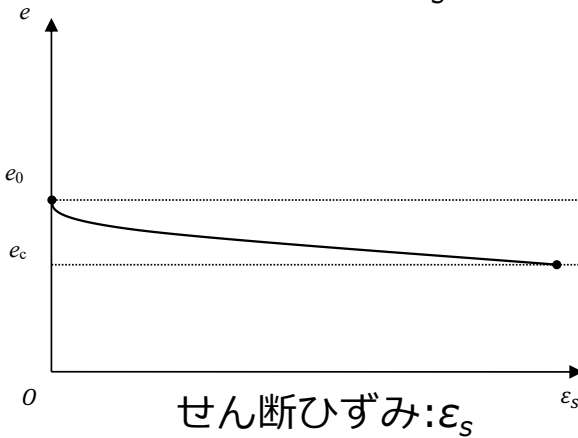
主応力差: q



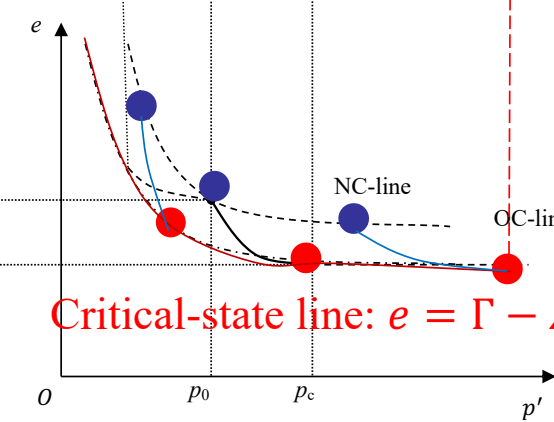
間隙比

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$= \frac{\text{間隙体積}}{\text{土粒子体積}}$$



平均有効主応力: p'



この図は3種類の側圧 $\sigma_3 = p_0/2, p_0, 2p_0$ で行った同じ土の排水条件の三軸試験結果である。

等方正規圧密後(青点) \Rightarrow 軸圧縮過程応力経路: $q = 3(p' - \sigma_3)$

\Rightarrow 限界状態(赤点)モデル: $q = Mp', e = \Gamma - \lambda \cdot \log p'$

(2)土の弾塑性モデル：ケムクレイモデル, Cam Clay Model)

右の図は過圧密状態にある粘土の排水条件での三軸圧縮試験結果である。

1) $p' = p_0$ まで等方正規圧密(緑点)した後に, $p' = p_1 (< p_0)$, $e = e_1$ (青点)まで除荷後に排水条件で軸圧縮試験を行うと, 応力点は下記の経路に従う。

2) $q = q_y$, $p' = p_y$, $e = e_y$ で降伏点応力(紫点)に到達したとき, 応力点は (p', q) 平面上で初期(Initial)降伏曲線 $f=0$ 上にある。

3) さらに q を増加させると, $q = q_c$, $p' = p_c$, $e = e_c$ で限界状態点(赤点)に到達して破壊する。

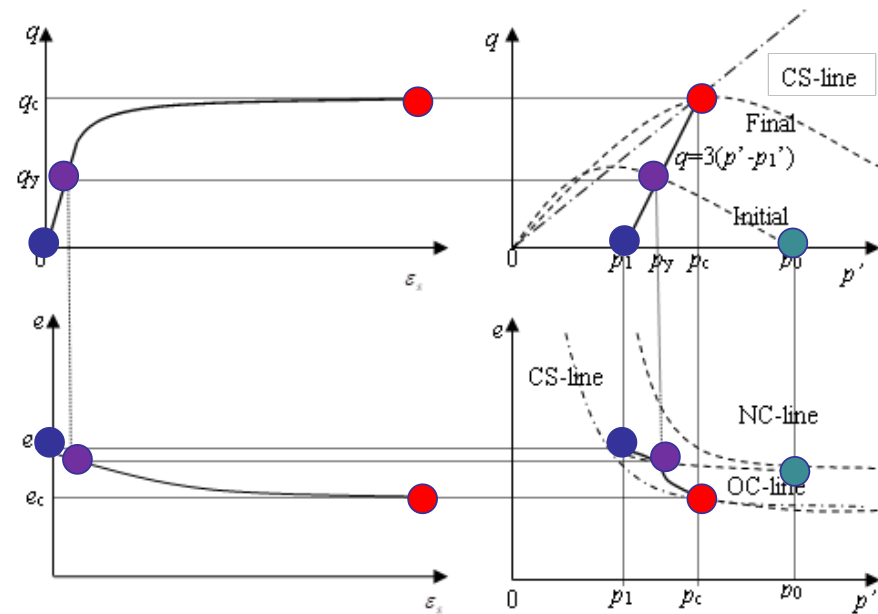


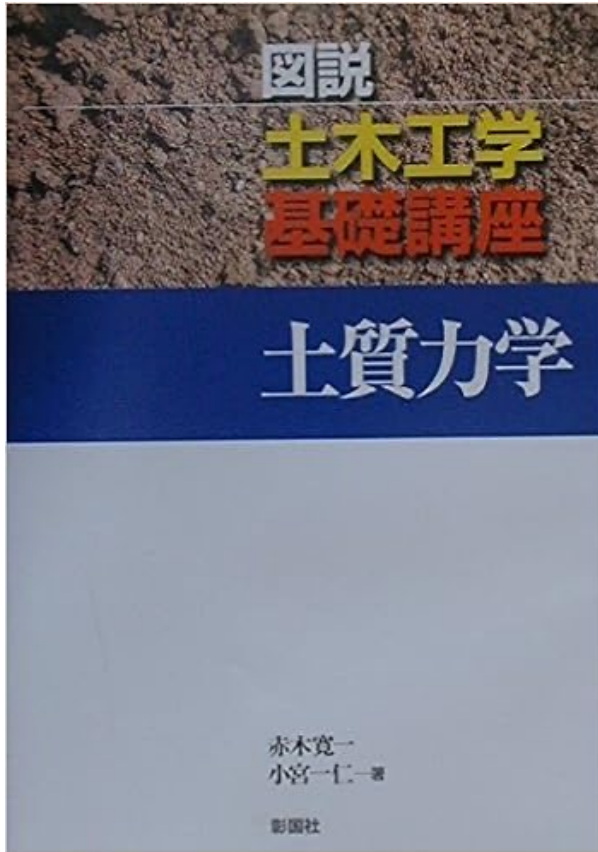
Fig. 2.11 Critical state of light OC clay during CD triaxial compression test

$0 < q < q_y$:弾性状態, $d\varepsilon_s = d\varepsilon_s^e$: OC(過圧密線上)

$q_y \leq q < q_c$:弾塑性状態, $d\varepsilon_s = d\varepsilon_s^e + d\varepsilon_s^p$,

流れ則: $\overrightarrow{d\varepsilon^p} = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma}$, $f=0$

$q = q_c$: 限界状態=破壊状態, $d\varepsilon_s \rightarrow \infty$



学部2年「土質力学」教科書，2000年10月

オリジナル・カムクレイの詳細な導き方を、Roscoe, Schofield & Thurairajah (1963) は述べているが、読んでゆくと途中で論旨が紆余曲折していて理解が容易でない。もっと単刀直入でわかりやすい導き方はないものかと、内外の多くの教科書がそれぞれ工夫を凝らして紹介しているが、筆者らがこれまで見た中では、赤木・小宮 (2000) による導出方法がもっとも優れていると思う。単刀直入・単純明快・言い得て妙であって、著者らの深い洞察力がうかがわれる。

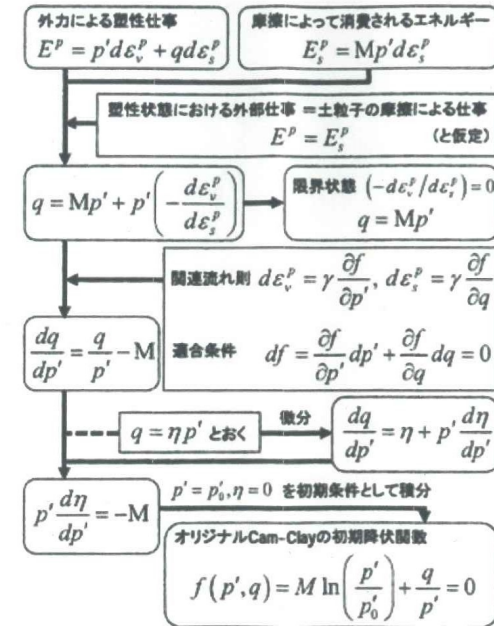


図-7 赤木・小宮(2000)によるオリジナル・カムクレイの導出(消散エネルギーを先見的に仮定しないから受入れ易い)



今井教授室 (2002年)



今井五郎先生を偲ぶ会 (2006年12月9日 於:ローズホテル横浜)

拝読

「基礎講座 土質力学」をお贈りいただいたにも拘らず ご返事いたしませんに申し訳ありません。

図説土工学シリーズがありますが、中味は数値土質力学ですね。コンピュータが発達しているのに数式(大程式)が必要、重要な余りですが、私の最近の米次(特に学部教育)は逆に、土の加算的性質・挙動の癖を粒状体の観点から徹底的に叩き込んで、最も簡単な式で使え、手計算で解を求めるとは惜しませる、ということです。理論知りの土知らずでは全く役に立ちませんし、少ない設計をねこと必定ですわ……。

よい新年をお迎之下れ。 故郷

追想 今井五郎先生 (2007) より

3. 土を掘るとは何か？

シールド工法による最初の成功例となったトンネルは、**マーク・イズムバード・ブルネル**によって開発され、彼とトマス・コ克蘭によって**1818年1月に特許**が取得された。テムズトンネルの掘削にそのシールド工法を採用し、1825年に掘削を開始した（開通は1843年）。

シールド工法のアイデア：造船所で働いているときに見たフナクイムシ（船食い虫）に起源があるといわれている。水中の木材に単に穴を開けただけでは、すぐに周囲の木材が膨張し穴が狭まってしまうが、**フナクイムシは石灰質を壁面にすりつけて一種の「トンネル覆工＝セグメント」を作っている。**

1870年、テムズ川の下へのタワー地下道 (Tower Subway) の建設、**ピーター・バーロウ**により大幅に改善された。バーロウが行った最も決定的な技術革新は、ブルネルが考案した**長方形断面**のシールドを、**円形断面**とした点にある。

1884年には、シティ・アンド・サウス・ロンドン鉄道（現在のロンドン地下鉄ノーザン線の一部区間）の建設に際し、**ジェームズ・グレートヘッド**によって大型化され改善された。→**開放型シールド工法**：切羽面の崩壊⇒**密閉型シールド工法**

立坑

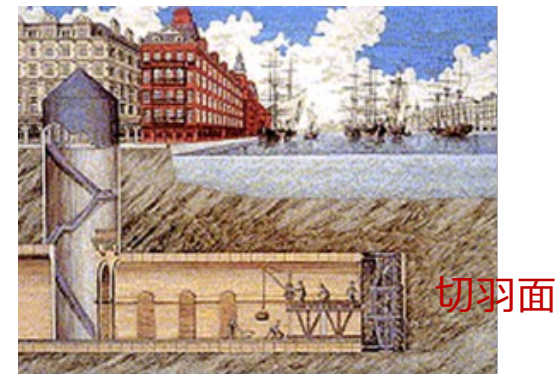
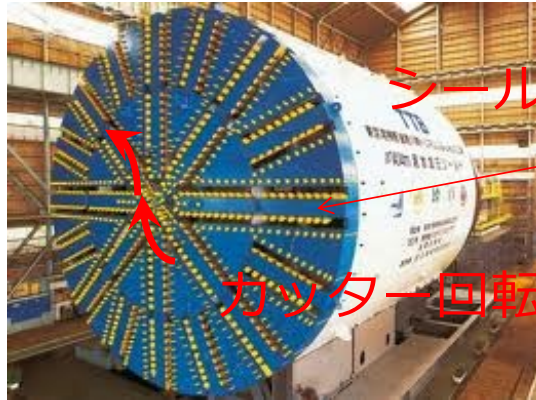


図-1.4 ブルネルのシールドトンネル

密閉型シールド工法



シールド機

カッター回転による掘削

4)シールド機推進油圧ジャッキ

1)シールド機切羽面

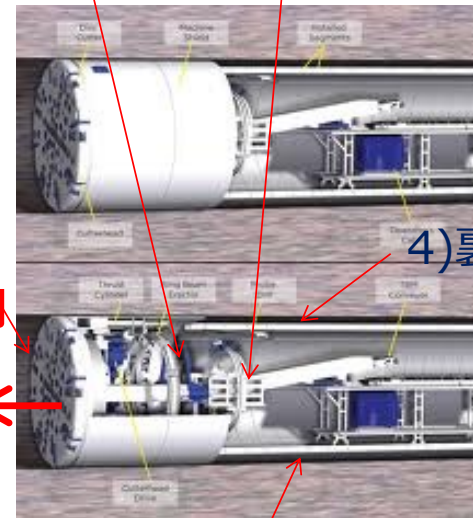
2)掘削土砂の輸送

東京湾横断道路トンネル用

泥水シールド機.

シールドトンネル掘進プロセス

掘進方向



4)裏込め注入

3)コンクリートセグメント

1) 切羽面土砂の掘削

2) 掘削土砂の輸送.

3) コンクリートセグメント設置.

4) 1)の切羽掘削と同時に油圧ジャッキによるシールド機推進. 裏込め注入

三次元有限要素法によるシールドトンネル施工解析

シールドトンネルの施工過程で生じる地盤の変形や応力・ひずみ状態の変化を十分に有限要素法で再現するために、切羽における押さえ圧力と土圧の釣り合い条件、**切羽の切削現象**、**シールド機の掘進に伴う地盤の変形状況**、シールド周辺とそれに接する地山との摩擦、テールボイドの発生および裏込め等のさまざまな要因を考慮しなければならない。

土を掘るということ

⇒リメッシュ法：金属加工における切削問題の解析手法

飽和地盤のシールドトンネル工事において、シールド機切羽前面に掘削により攪乱した状態を想定した**掘削要素**を配置する。次に、シールド機の掘削推進に伴う**掘削要素の変形と掘削要素と地盤要素の再分割**を繰り返すことによって、シールド機が地山を取り込みながら推進する状況を、有限要素法を用いてモデル化している。

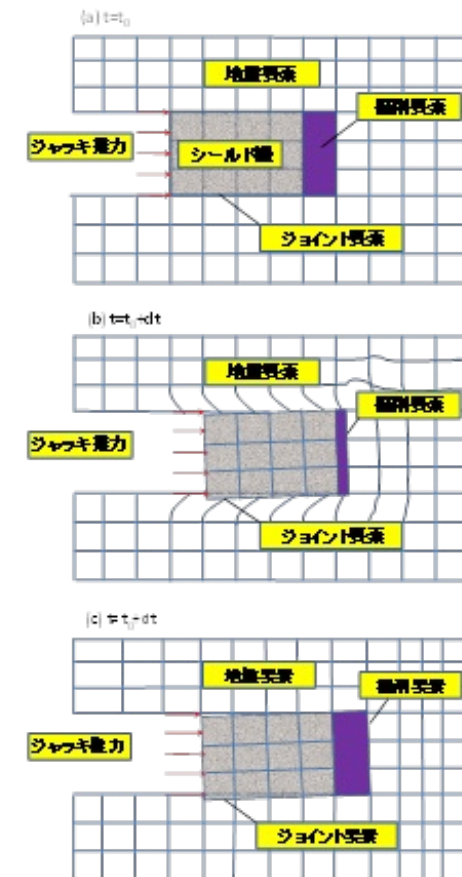
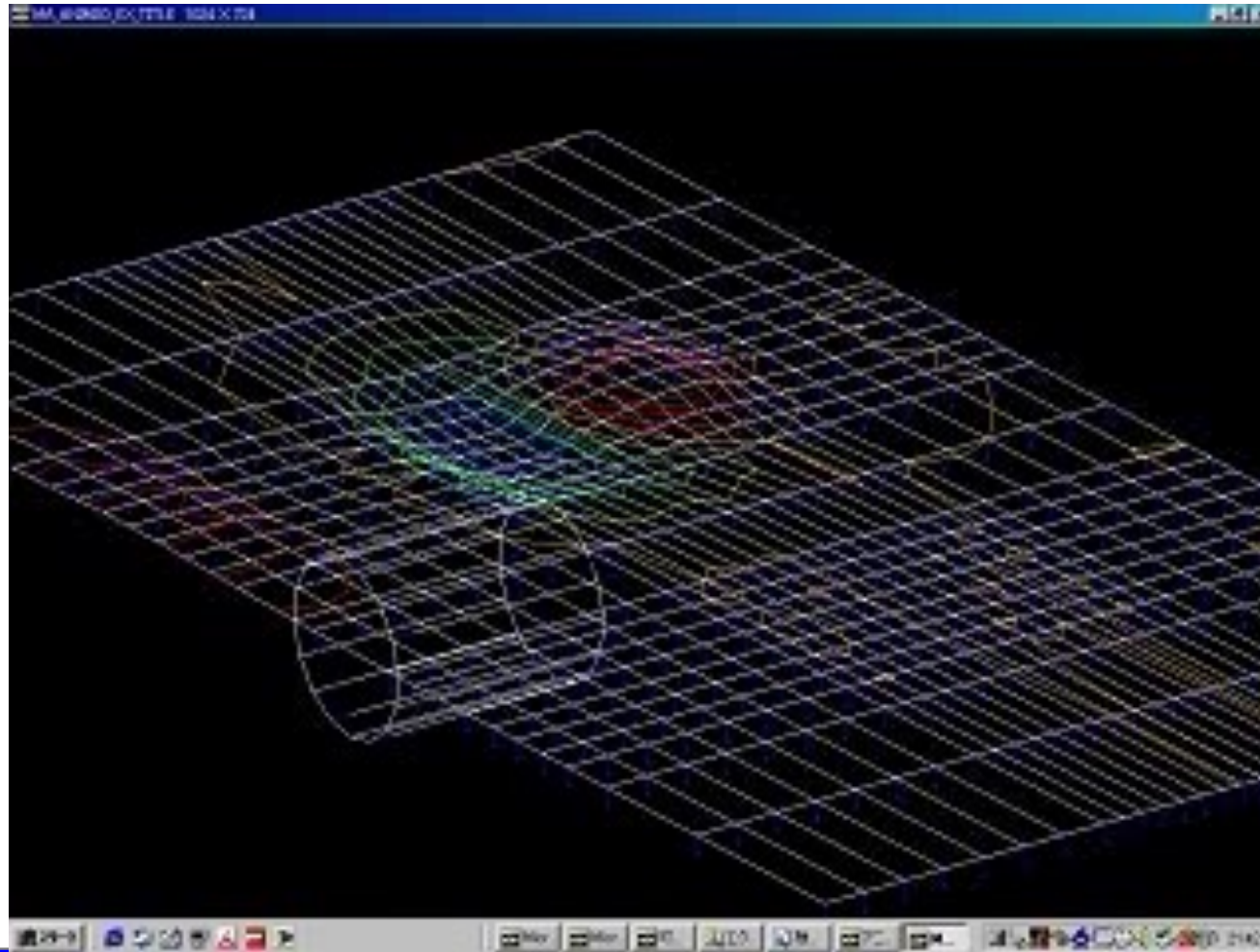
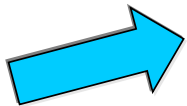


図-2-30 リメッシュ法の概略図

三次元有限要素法によるシールドマシン掘削プロセスのシミュレーション by K.Komiya(1994)

シールドマシン
推進方向



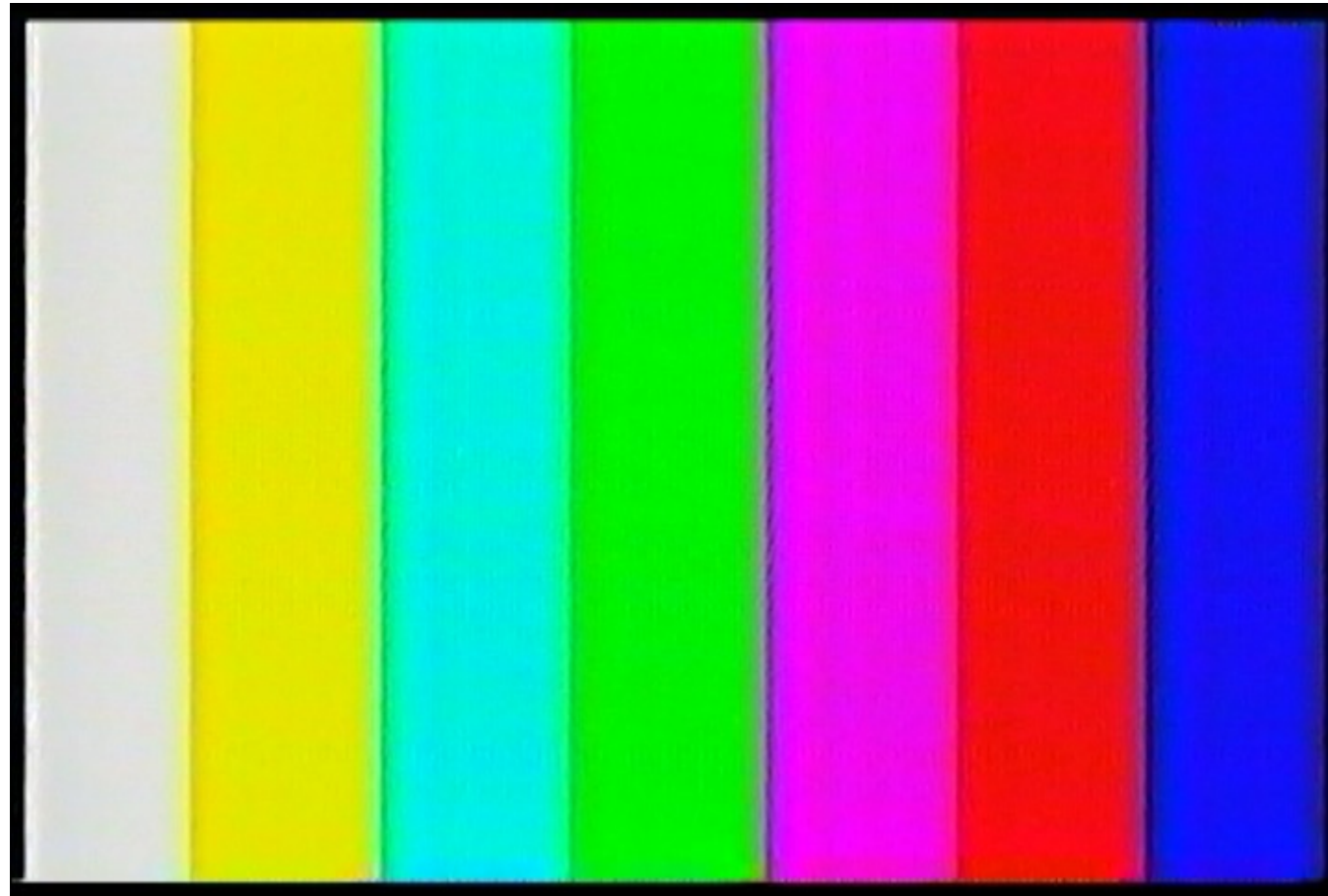
地盤変形状況

1)切羽圧力：小

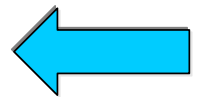
2)切羽圧力：大

3)切羽圧力：適正

三次元有限要素法によるシールドマシン掘削プロセスのシミュレーション by K.Komiya(1994)



シールドマシン
推進方向



1)シールドマシンの
運動状況

2)地盤の間隙水圧
変化状況

4. 土質力学に基づくシールドトンネル掘削プロセス管理

(1) はじめに

ペック先生の教え：国際土質地盤工学会メキシコ会議(1969)

⇒地盤種別に応じた切羽安定の重要性

(2) シールドトンネル掘削プロセスにおける切羽安定の考え方

1)切羽掘削用安定液として備えるべき要求性能

2)切羽掘削用安定液の現場管理手法と応用

(3) シールド掘削プロセスにおける排土量管理

⇒物質収支にもとづく考え方の重要性

(4) まとめ

(1) はじめに：地盤種別に応じた切羽安定の考え方

1) Firm ground (硬質地盤)

切羽は、即時的な支保なしで手掘りや機械で数フィート以上掘削可能。硬質粘土，固結した粘性を持つ粒状土

2) Raveling ground(ゆるみ崩壊性地盤)

切羽面内の土は、時間的に遅かれ早かれゆるみが生じてトンネル坑内に崩壊するが，初期段階で支保すると安定化。わずかに粘性を有する砂，見かけの粘着力を有するシルトや細砂，母岩に起因する構造を有する残積土

3) Running ground(崩壊性地盤)

切羽面内の土は，無支保状態でトンネル坑内に崩壊堆積するが安息角を持つ斜面を形成すると安定化。乾燥砂，細粒分を含まないゆるい礫

4) Flowing ground (流動性地盤)

ゆるみ崩壊性地盤や崩壊性地盤で切羽面に浸透水圧が作用すると，切羽面内の土は懸濁流体となってトンネル坑内に流入して不安定化。

5) Squeezing soils(押し出し性地盤)

切羽面内の土の押し出し速度が小さい場合には手掘り掘削が可能であるが，押し出し速度が大きい場合にはシールド掘削が必要。極めて軟弱な粘土や中程度の粘性を有する土

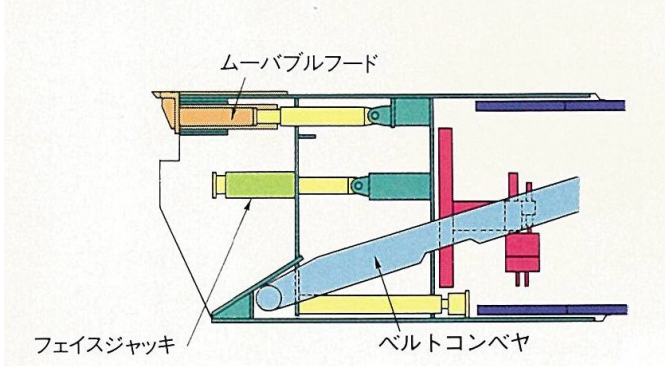


Dr. Ralph Brazelton
Peck (June 23, 1912 –
February 18, 2008)

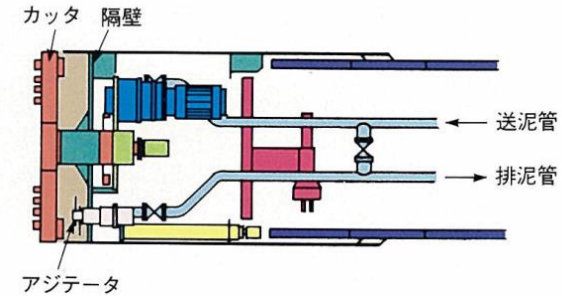
各種のシールド工法と技術の成り立ち

- 1) 切羽の安定, 2) テールシール, 3) 裏込め注入, 4) 排土機構, 5) セグメント構造

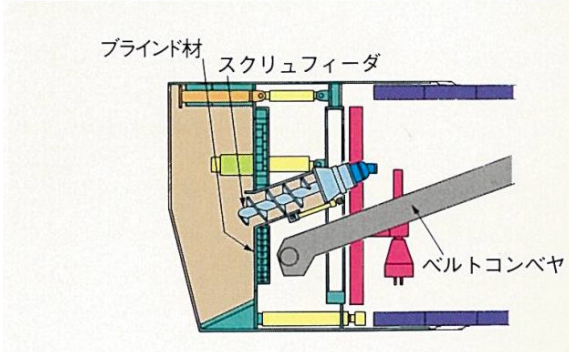
手掘り式シールド Firm ground, Raveling ground



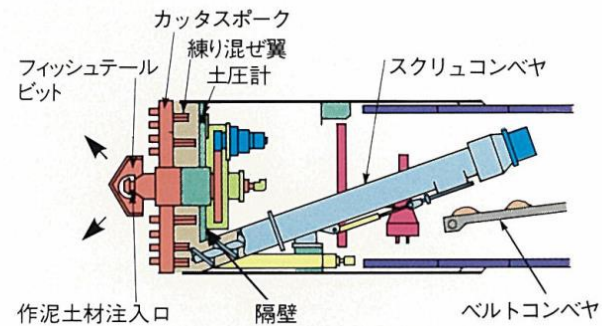
泥水式シールド Running ground, Flowing ground, Squeezing soils



ブラインド式シールド Squeezing soils

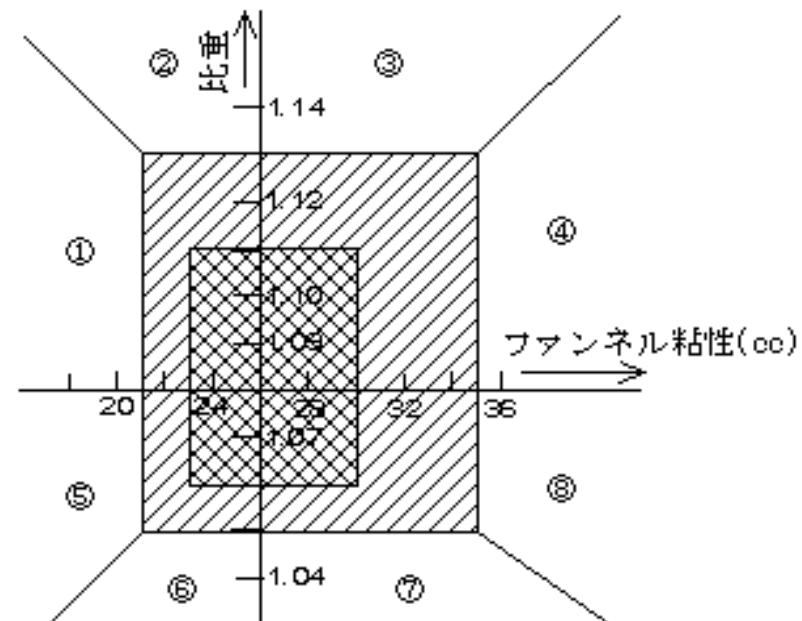


泥土加圧シールド Running ground, Flowing ground, Squeezing soils



(2) シールドトンネル掘削プロセスにおける切羽安定の考え方

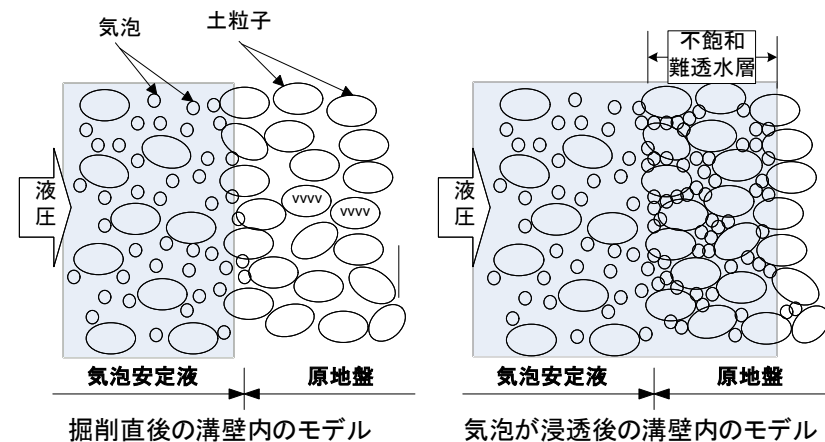
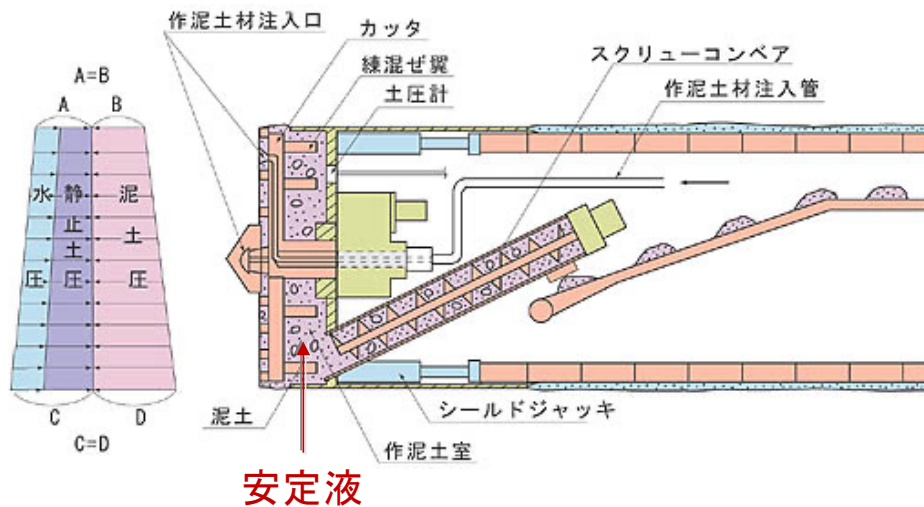
⇒密閉型シールド工法(泥水式, 土圧式)における切羽安定における
設定土圧とチャンバー内土砂の流動特性の定量的評価



地盤掘削用ベントナイト安定液の管理図！

1) 切羽掘削用安定液として備えるべき要求性能 by T.Nakayama(2008)

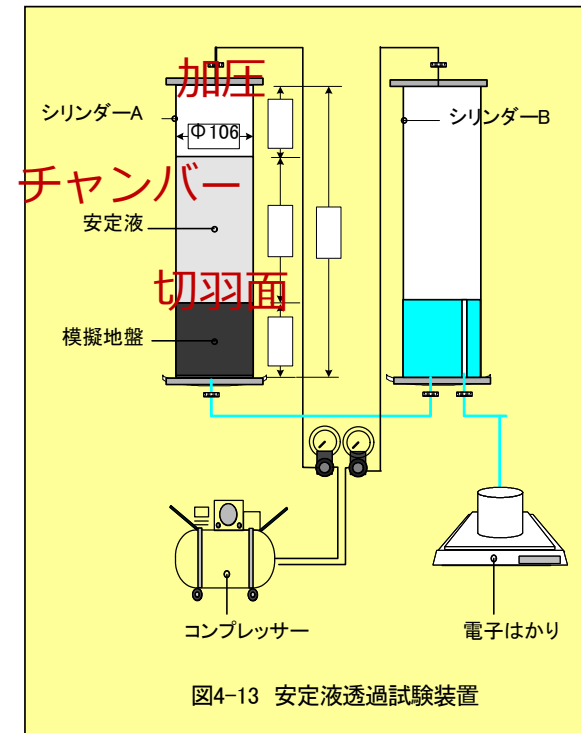
- a) 切羽安定性に係る条件：1)難透水層の形成，2)単位体積重量
⇒泥水式（泥膜，泥水圧），気泡土圧式（難透水層，泥土圧）
 - b) 流動性に係る条件：所定の流動性があること
 - c) 分離に係る条件：気泡懸濁液の分離が生じないこと
 - d) 消泡に係る条件：気泡懸濁液の消泡が生じないこと
- ⇒シールド切羽面の安定に関する掘削土砂の流動性と懸濁安定性



a) 切羽安定性に係る条件

□ 難透水層の形成と単位体積重量

- 切羽面の安定を保つのに必要な泥膜に相当する難透水層の形成性と液圧保持に必要な気泡安定液の単位体積重量を求める。



a)切羽安定性に係る条件

□ 1)難透水層の形成

透過試験の初期では透水量は時間に比例し増加するが、透水量が急激に小さくなる変曲点がある。この状態は泥膜に相当する難透水層が形成されたことを意味すると考えられる。

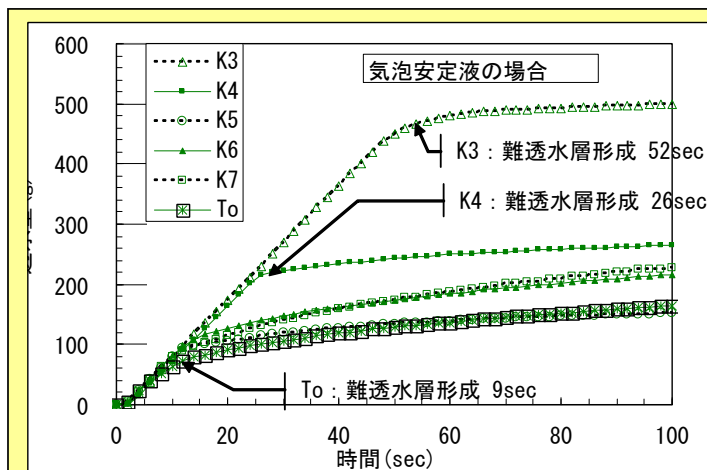
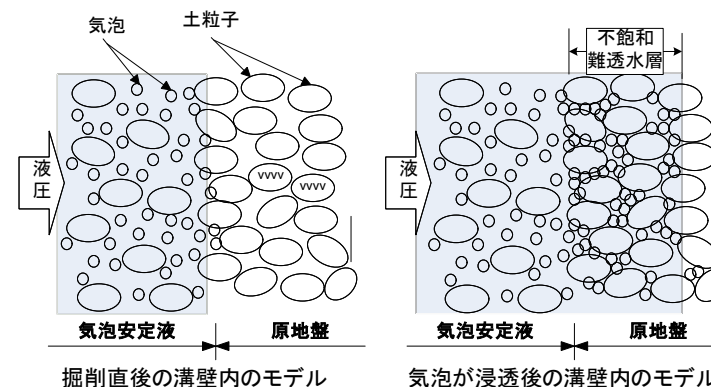


図-1 透水量と時間の関係(気泡安定液)

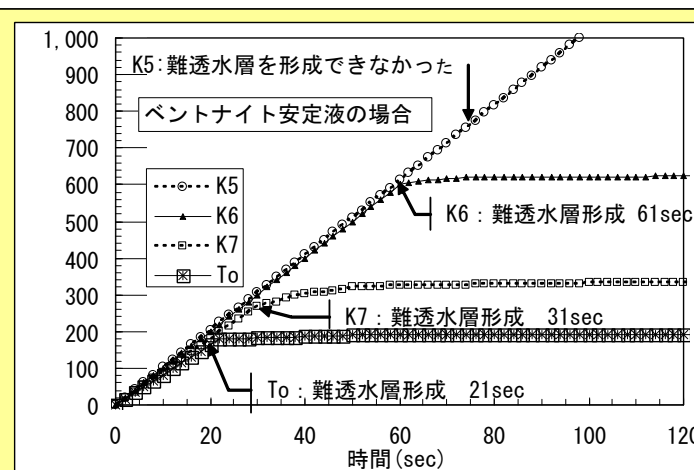


図-2 透水量と時間の関係(ベントナイト系安定液)

□ 2) 所要の単位体積重量

- 切羽保持のために必要な安定液の単位体積重量はベントナイト安定液の事例によると、**10.3kN/m³**である。→地下水圧バランスで十分。

$$\gamma_c = \frac{W_s + W_w + W_b}{V_s + V_w + V_b} = \frac{100 + w + Q}{\frac{100 - P}{\gamma_{ss}} + \frac{P}{\gamma_{sc}} + \frac{w}{\gamma_w} + \frac{Q}{\gamma_b}} \quad (4-8)$$

b) 流動性に係る条件

□ テーブルフロー値 (TF値)

- 掘削に必要な流動性をTF値で表す.
- TF値の計測装置はセメントの物理試験(JIS5201)に拠った.

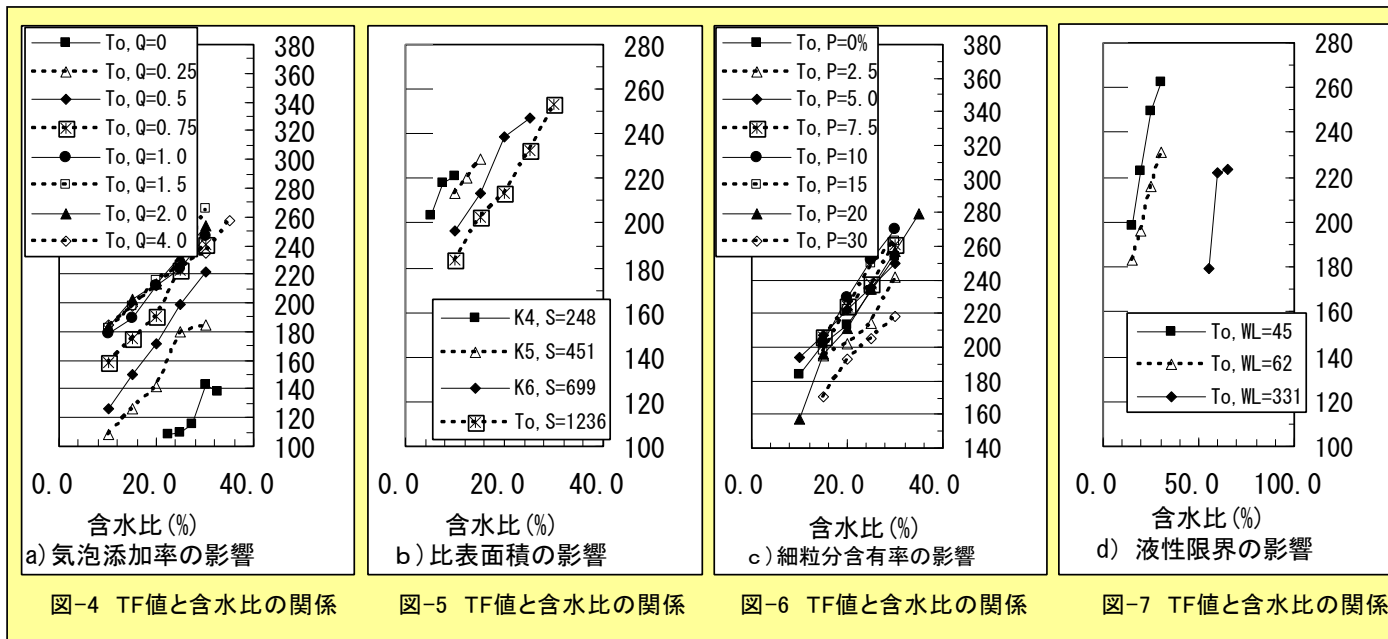


図-3 TF値計測装置およびTF値計測

□ テーブルフロー値 (TF値) の決定要因

- TF値は含水比に比例するので、式 (4-9) で表わす。

$$TF = \alpha_n w + \beta_n \quad (4-9)$$



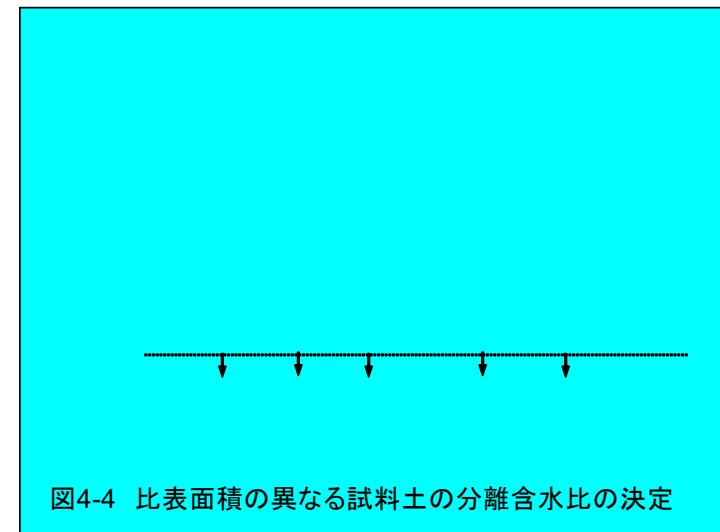
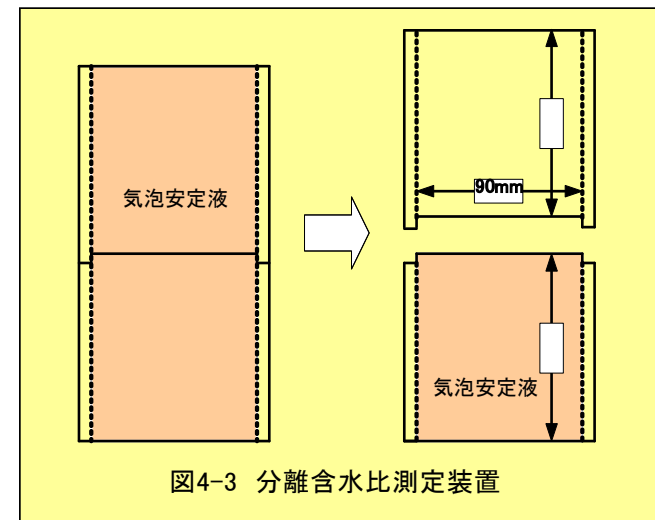
c) 分離条件

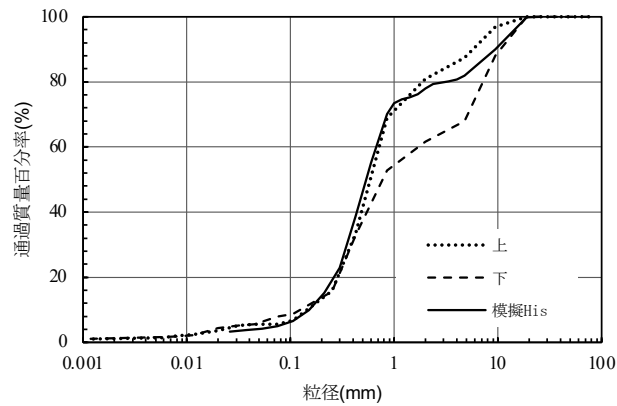
□ 分離含水比： W_{max}

気泡安定液の懸濁状態が崩れる含水比，分離含水比を求める。

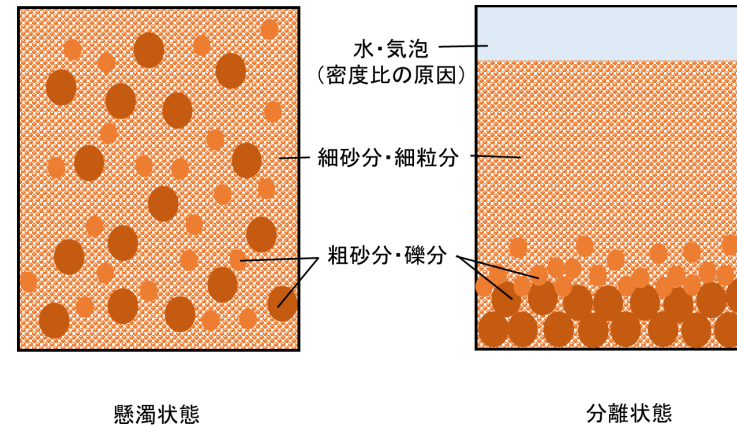
● 試験方法

分離含水比測定装置に気泡安定液を満たし，1時間後の上下容器中の安定液の単位体積重量の重量比を取ると，重量比が1.05以上になると急激に分離が生じることより，**重量比が1.05となる時の含水比を分離含水比とした。**

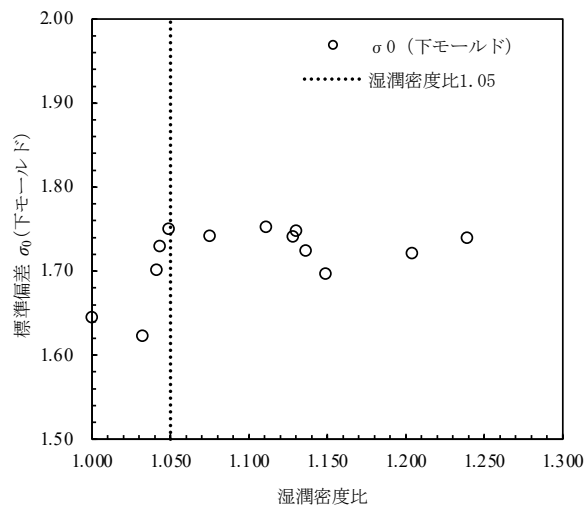




粒径加積曲線⑫ ($w=20.9\%$, $Q_M=0.8\%$, 湿潤密度比1.239)



分離現象プロセスの概念図



湿潤密度比と標準偏差 σ_0 との関係

$$f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0 D} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\ln D - \lambda}{\sigma_0} \right)^2 \right\}$$

$$W_{\max} = W_{\max C} \times \frac{100 - P}{100} + W_{\max F} \times \frac{P}{100}$$

$$W_{\max C} = -6.81Q_M + 0.96S + 18.44$$

$$W_{\max F} = W_L$$

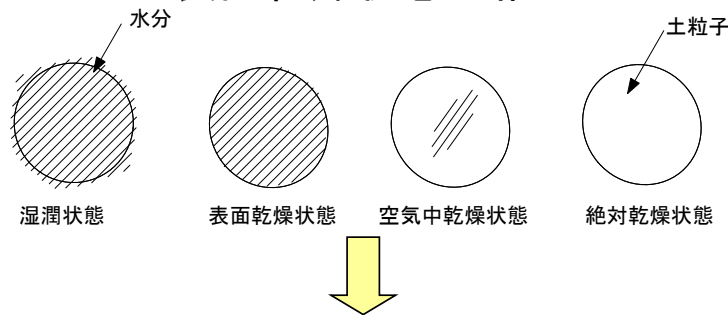
d) 消泡条件

□ 消泡含水比： w_{min}

気泡安定液中の気泡の消泡の生じない含水比を求める。
この含水比を消泡含水比と称する。土 = 粗粒分 + 細粒分

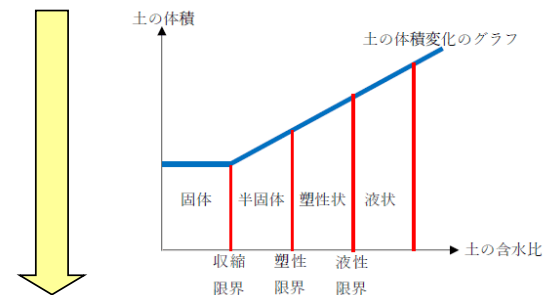
● 粗粒分の影響

表面乾燥状態に相当

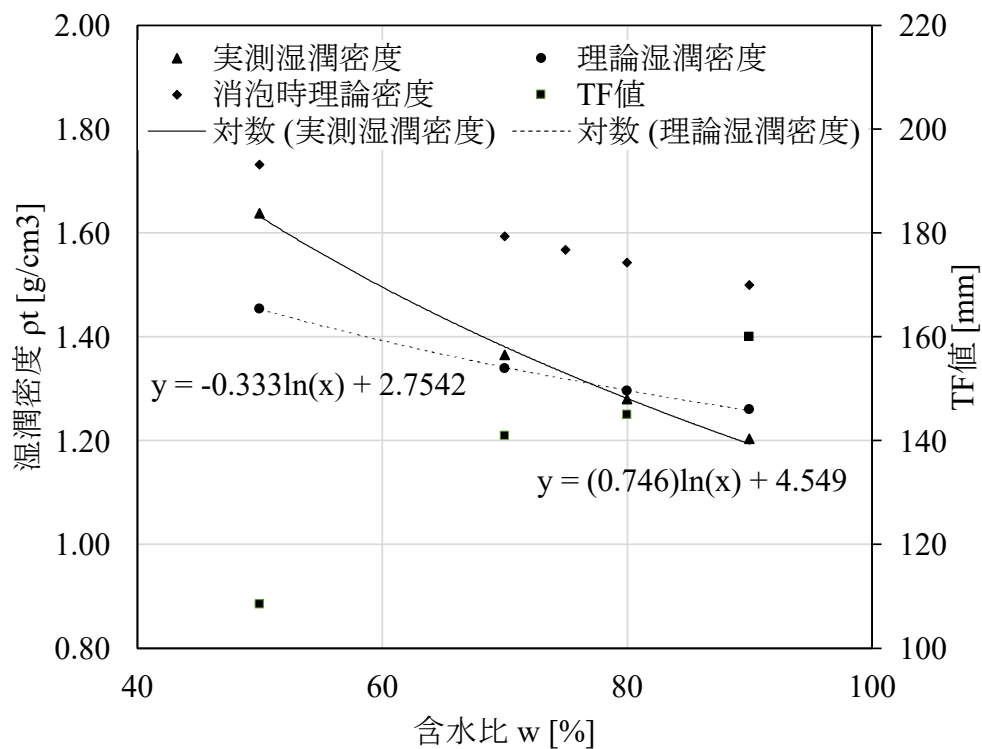


● 細粒分の影響

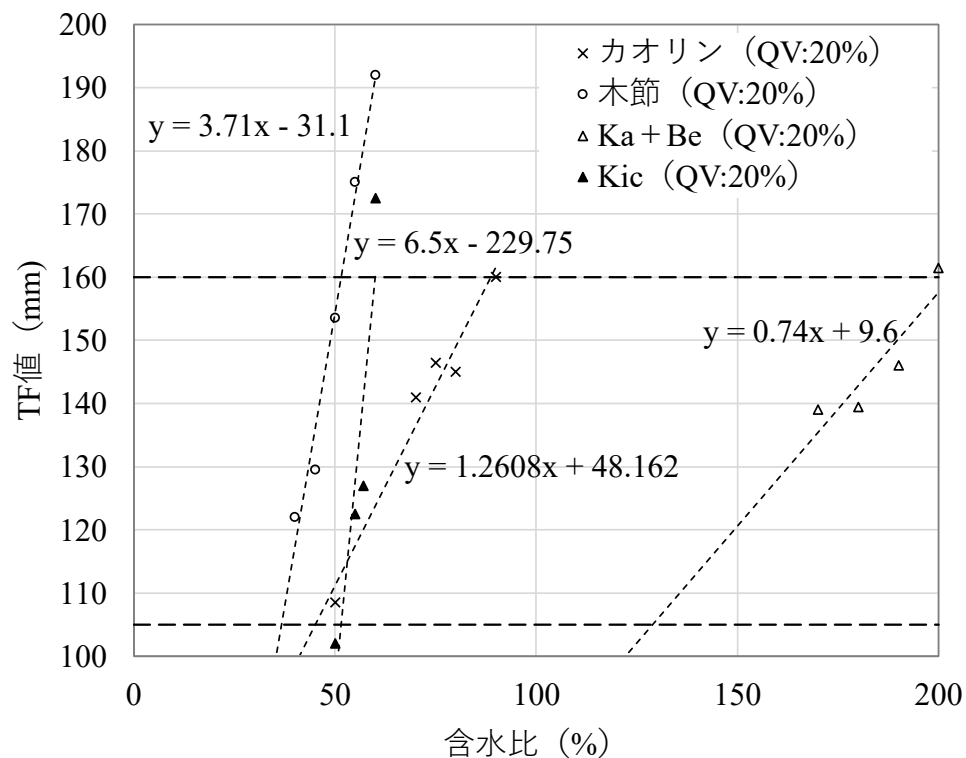
細粒分のコンシステンシー特性



$$w_{min} = \text{表面乾燥含水比 (6.97)} \times \frac{100 - P}{100} + \text{コンシステンシー特性} \times \frac{P}{100}$$



消泡含水比実験結果（試料A：カオリン）

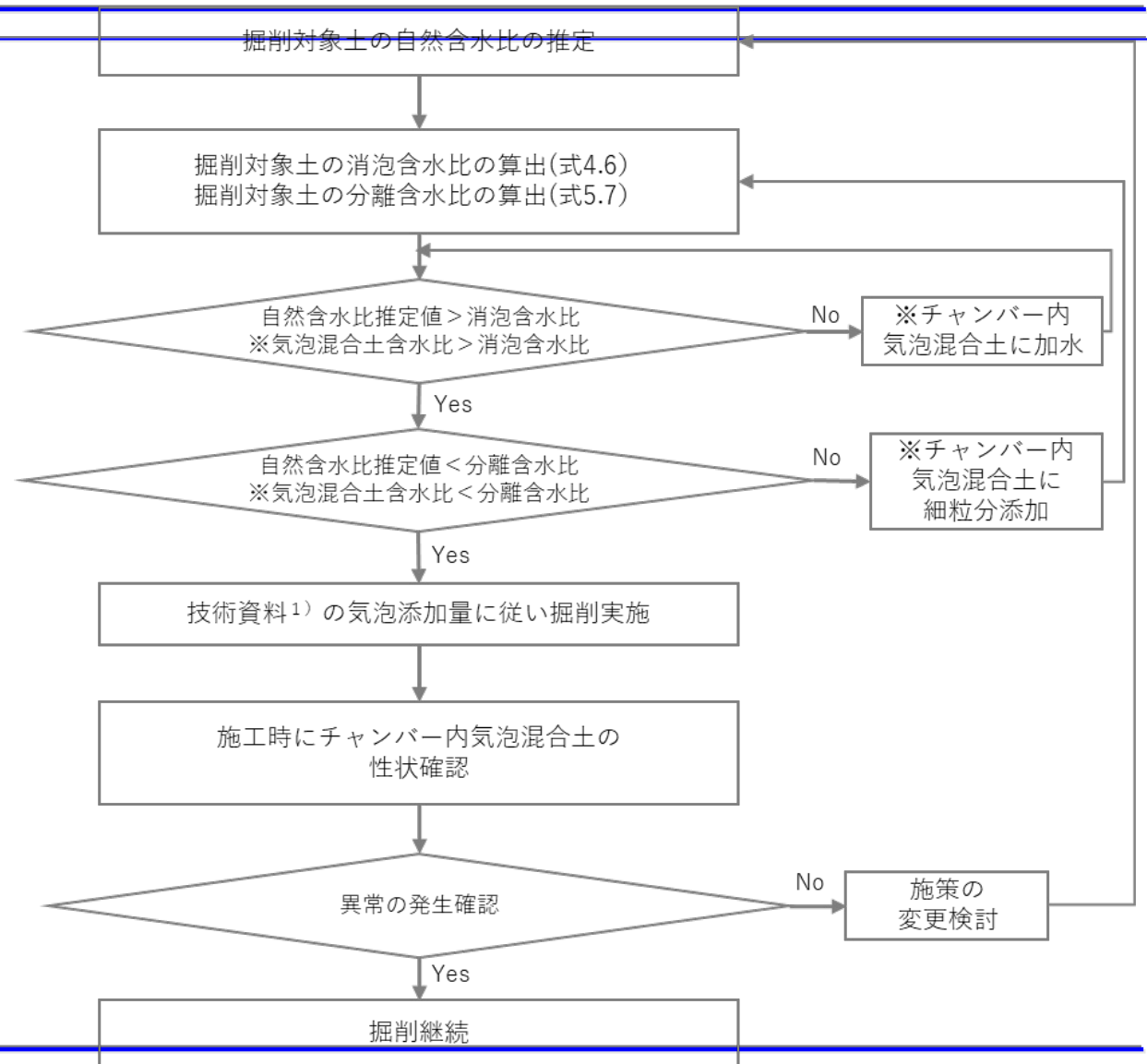


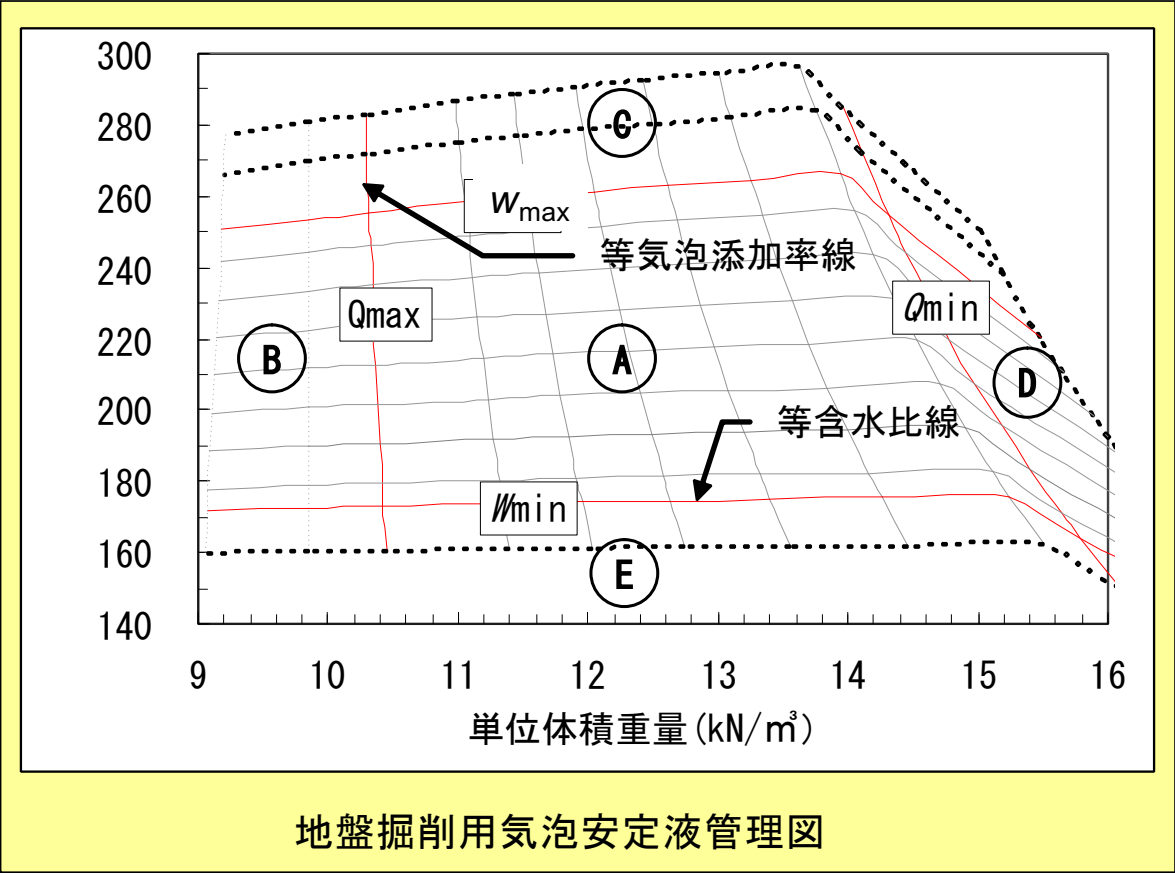
含水比とTF値との関係

$$w_{\min} = 6.97 \times \frac{100 - P}{100} + (w_L - 0.2 \cdot I_P) \times \frac{P}{100}$$

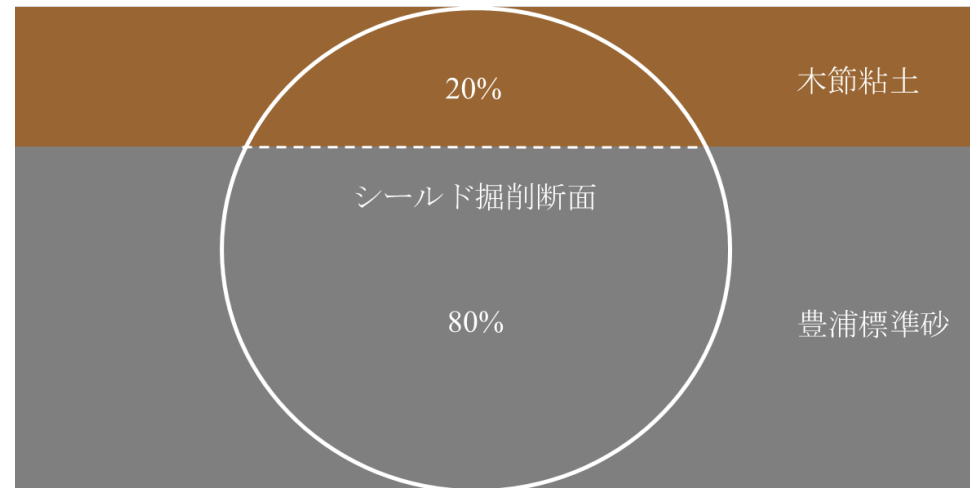
2)切羽掘削用安定液の現場管理手法と応用

切羽安定保持のための安定液の事前配合試験のフロー図





ケーススタディ：シールド掘削断面



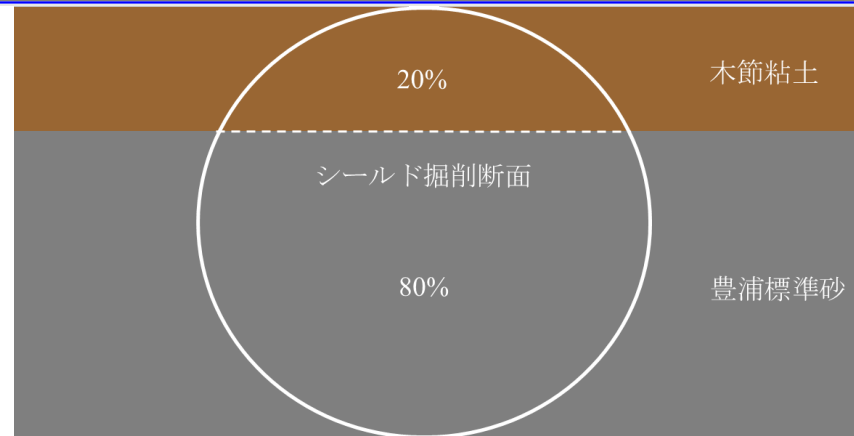
推定自然含水比 w_n の算出

掘削対象土	土層構成 (%)	単体での自然含水比 w_n (%)	自然含水比 w_n の推定値 (%)
木節粘土	20.00	35.00	31.00
豊浦標準砂	80.00	30.00	

自然含水比 w_n の推定値と消泡含水比 w_{min} , 分離含水比 w_{max} との比較

項目	含水比 (%)
自然含水比 w_n の推定値	31.00
消泡含水比 w_{min}	12.98
分離含水比 w_{max}	29.82

ケーススタディ：シールド掘削断面



Ka-Be添加後の土層構成

対象土	土層構成(%)
木節粘土	16.66
豊浦標準砂	66.68
Ka-Be	16.66

Ka-Be添加後の対象土物性値

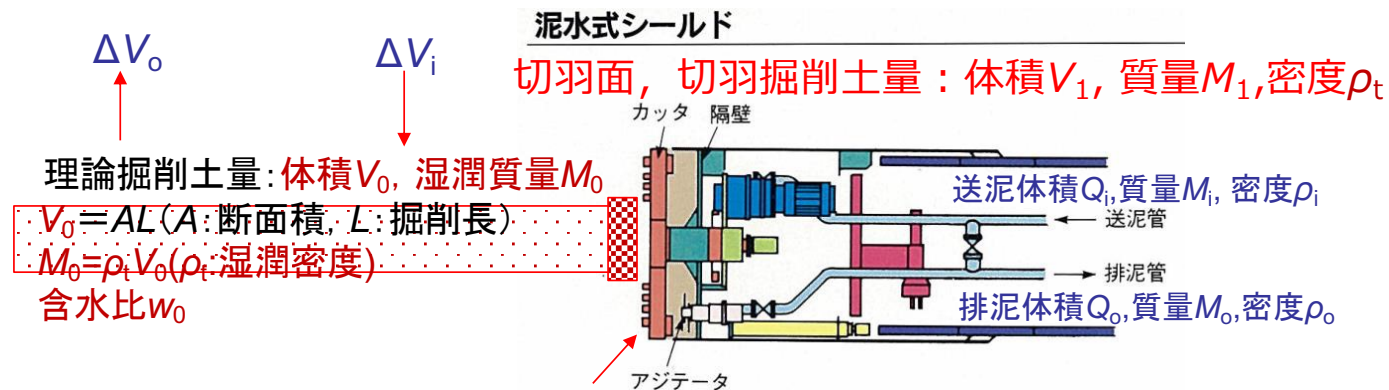
自然含水比 w_n の推定値 (%)	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_P (%)	塑性指数 I_P
55.83	103.23	29.16	74.07

細粒分添加後の自然含水比 w_n の推定値と消泡含水比 w_{min} 、分離含水比 w_{max} との比較

項目	含水比(%)
自然含水比 w_n の推定値	55.83
消泡含水比 w_{min}	34.12
分離含水比 w_{max}	61.10

(3) シールド掘削プロセスにおける排土量管理 ⇒物質収支にもとづく考え方の重要性

シールドトンネル工事の地盤掘削プロセスにおける物質収支



質量保存則: 排泥質量 $M_o =$ 送泥質量 $M_i +$ 切羽掘削土湿潤質量 M_1

$$\therefore \rho_o Q_o = \rho_i Q_i + \rho_t V_1$$

$$\Rightarrow \text{切羽掘削土湿潤質量 } M_1 = \rho_o Q_o - \rho_i Q_i$$

$$\Rightarrow \text{切羽掘削土湿潤体積 } V_1 = \frac{\rho_o Q_o - \rho_i Q_i}{\rho_t} \neq \text{偏差流量} = Q_o - Q_i$$

掘削土量管理のポイント

1)飽和粘性土地盤におけるブラインドシールドの掘削プロセス

⇒非排水状態での掘削変形プロセス

⇒掘削変形における土の体積変化なし

⇒**飽和土の掘削体積 = 取り込み飽和土の体積**

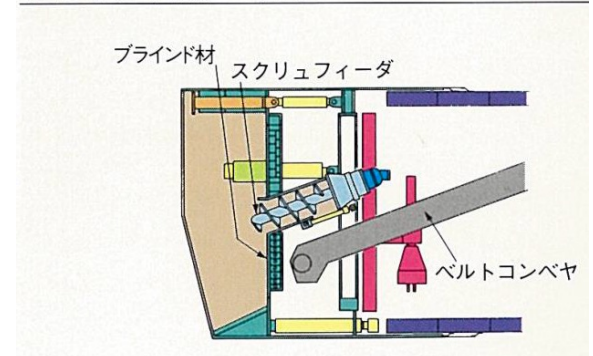
2)湿潤土や不飽和地盤におけるシールド掘削プロセス

⇒排水状態での掘削変形プロセス

⇒掘削変形における土の体積変化あり

⇒**湿潤土や不飽和土の掘削体積 ≠ 取り込み湿潤土や不飽和土の体積**

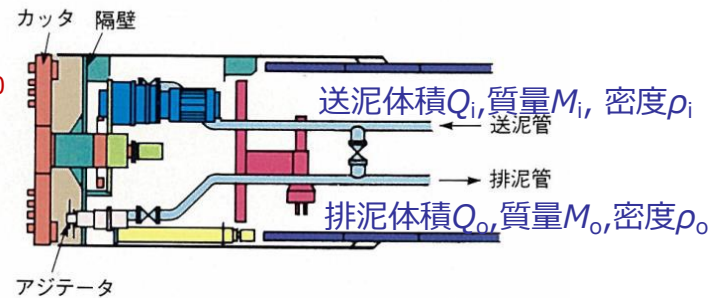
ブラインド式シールド



質量管理：泥水式シールドの場合

泥水式シールド

理論掘削土量：体積 V_0 ，湿潤質量 M_0
 $V_0 = AL$ （ A ：断面積， L ：掘削長）
 $M_0 = \rho_t V_0$ （ ρ_t ：湿潤密度）
含水比 w_0



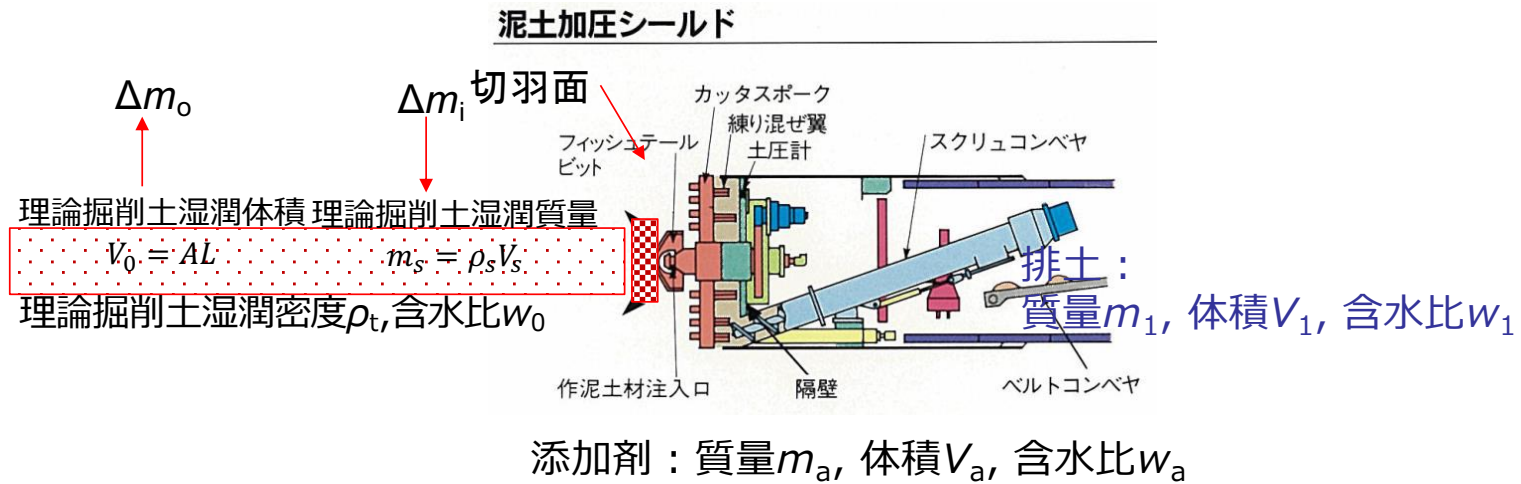
切羽掘削土乾燥質量： m_s = 排泥乾燥質量： m_o - 送泥乾燥質量： m_i

$$m_s = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \{Q_o(\rho_o - \rho_w) - Q_i(\rho_i - \rho_w)\} : \text{乾砂量 (質量)}$$

$$\text{理論掘削土乾燥質量} : M_s = \frac{M_0}{1 + \left(\frac{w_0}{100}\right)} = \frac{\rho_t V_0}{1 + \left(\frac{w_0}{100}\right)}$$

$$\text{掘削土乾燥質量に基づく排土率} = \frac{m_s}{M_s} \times 100(\%)$$

質量管理：土圧式シールドの場合



$$\text{切羽掘削土乾燥質量: } m_s = \frac{m_1}{1 + \left(\frac{w_1}{100}\right)}$$

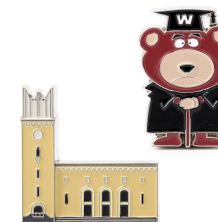
$$\text{理論掘削土乾燥質量: } M_s = \frac{M_0}{1 + \left(\frac{w_0}{100}\right)} = \frac{\rho_t V_0}{1 + \left(\frac{w_0}{100}\right)}$$

$$\text{掘削土乾燥質量に基づく排土率} = \frac{m_s}{M_s} \times 100(\%)$$

(4) まとめ

- 1) 地盤種別に応じて、シールド工事における切羽面の安定を支配する要因は変化する。
 - 2) シールド工事における切羽面の安定を考える場合には、地中連続壁における掘削壁面の安定状況を参考にすることができる。
 - 3) シールド工事におけるチャンバー内圧の設定にあたっては、掘削地盤内の間隙水圧が重要である。
 - 4) シールド工事におけるチャンバー内土砂の流動性には、気泡添加剤の場合には地盤掘削土砂の含水状態に応じた懸濁液の沈降分離、消泡現象が寄与する。
 - 5) 掘削土量の変化を支配するのは、切羽面の安定性である。掘削土量管理を考える場合には、掘削プロセスにおける物質収支を決定する質量管理が合理的である。
-
-

5. 今後の展望と御礼



1) 限界状態土質力学と土質力学に基づくシールド掘削プロセス管理の啓蒙

⇒地盤工学会誌特集号(2025年7月号), 土木学会トンネルライブラリー(2026年度)

2) 早大理工総研プロジェクト研究「高吸水性ポリマーを用いた地盤改良に関する研究」の推進と一般社団法人気泡工法研究会の再構成

3) 各種委員会活動の継続：外環，中央リニア新幹線，羽田アクセス線，東京メトロ大深度品川線

With many thanks.

