

令和4年(2022年)4月25日(月)16:15～17:45  
地盤工学会関東支部特別講演会

土の締固め  
—古い課題の新たな展開—

龍岡文夫  
東京大学名誉教授  
東京理科大学名誉教授

# 背景

「土の締固め」は、地盤工学の最古典問題の一つ

近年重要性を再認識、その背景は……

- ・従来からの「掘削土による盛土建設の必要性」に加えて、
- ・近年の新たな、相互に矛盾する要求：
  - 盛土の耐震性・維持管理性などの要求性能の向上
  - 締固めの施工・管理の省力化・迅速化の要求
- ・近年の新たな技術展開：
  - 締固め機械の能力向上
  - GNSS等IT技術による施工・管理の自動化・効率化

⇒締固めの施工法・管理法の刷新が求められている  
・刷新には、土の締固めの法則性の再検討が必要

# 講演概要

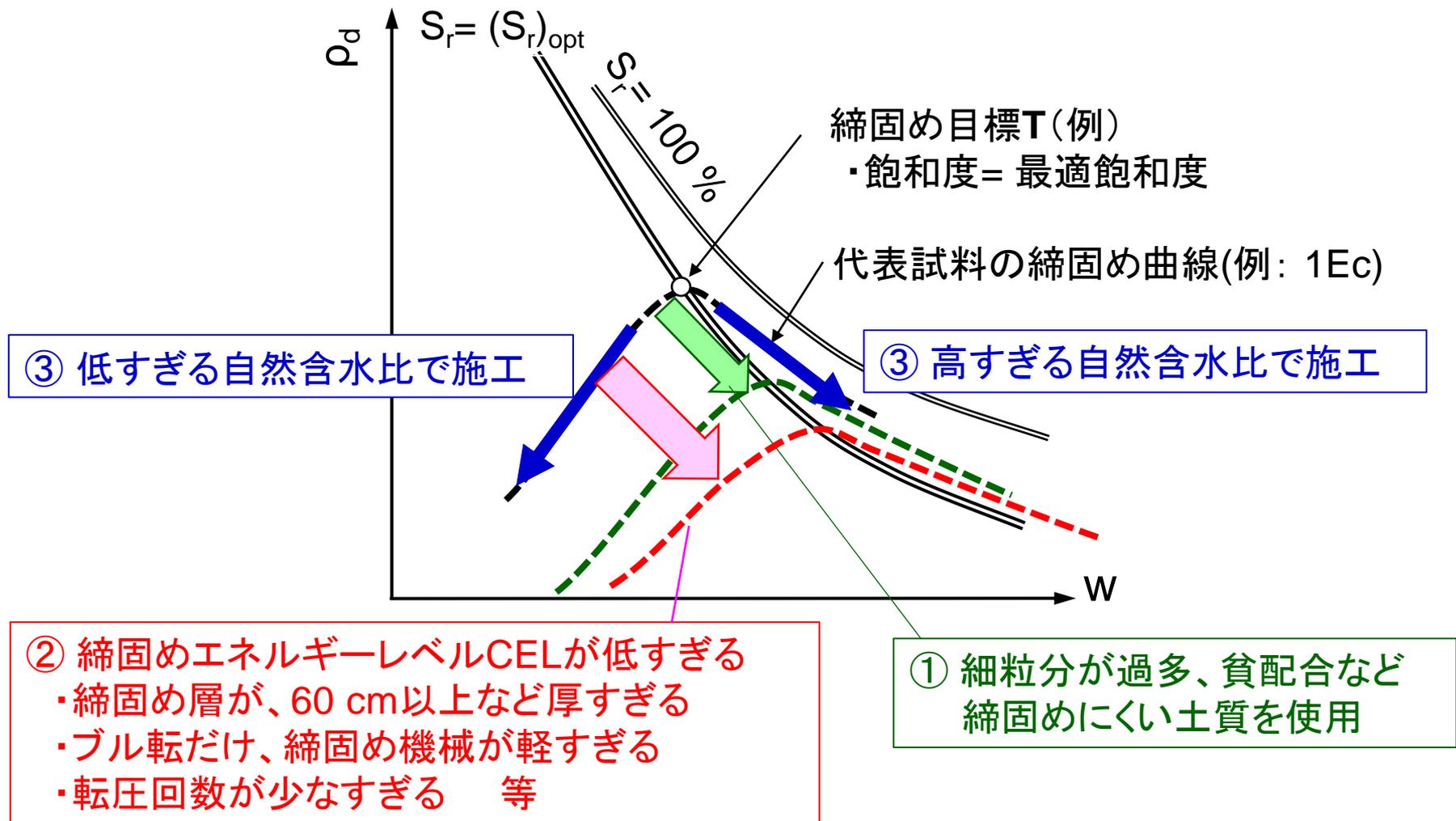
## 盛土の含水比管理の課題:

盛土材の含水比調整と締固めた盛土の含水比の測定・確認  
非常に重要であるが、締固め度管理と比較すると  
軽視・回避される傾向:

## 締固め管理の新たな展開:

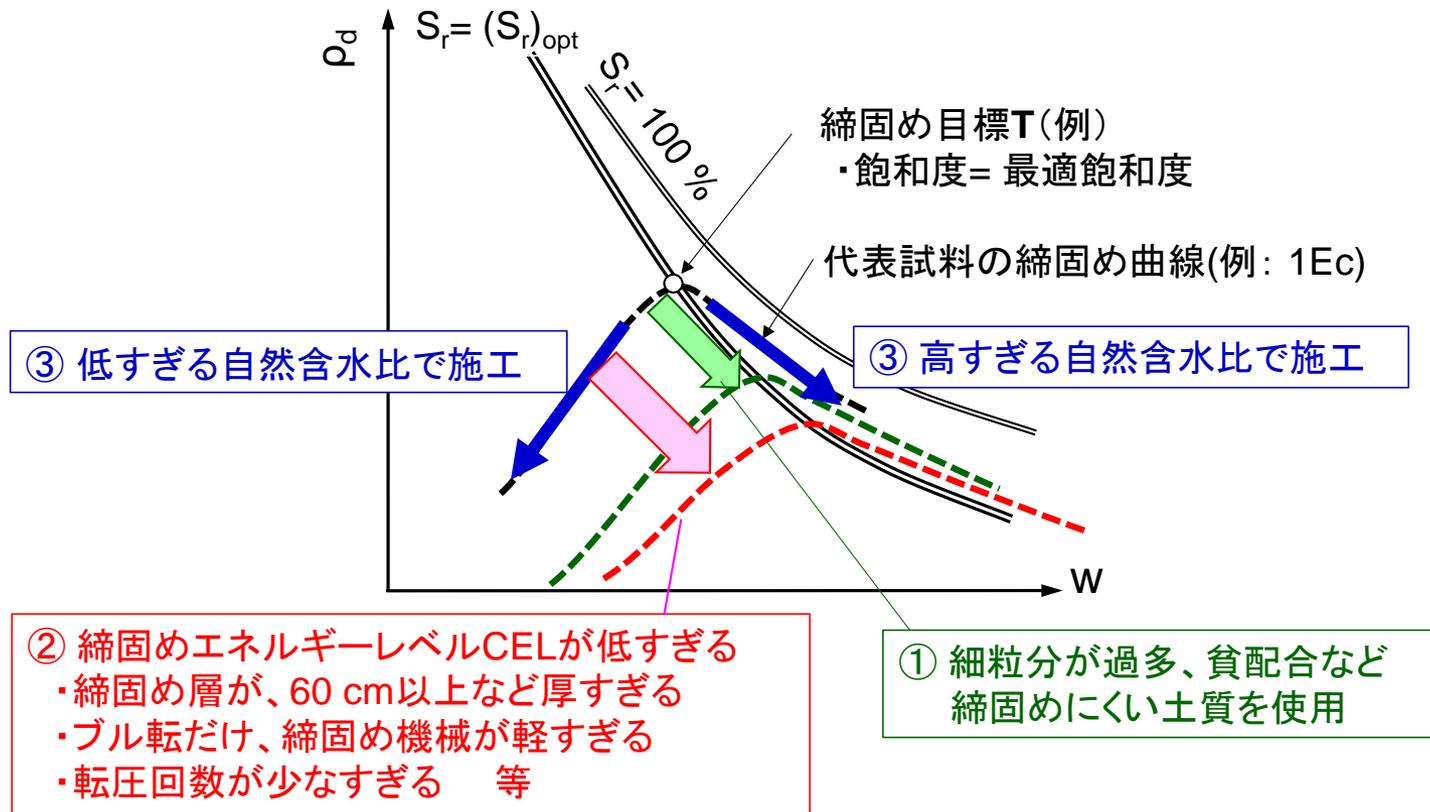
- ・ **最適飽和度**を目指す締固め管理体系  
(**最適飽和度**において、乾燥密度は極大、物性はほぼ最適値)
- ・ **適切な締固め度プラス最適飽和度の状態**を締固め目標と設定
- ・ 省力迅速化・面的締固め管理:  
締固めエネルギーと土質の管理を前提とした  
K値、CCVなどの**地盤剛性指標の上・下限値管理**  
(従来の地盤剛性指標の下限値管理を発展させた方法)

# 締固め土の品質を低下させる三大要因



①, ②, ③の何れか、あるいは複数が課題となる場合が多いなかでも、③盛土の含水比管理の課題は、難題

# 締固め土の品質を低下させる三大要因



③適切な盛土材の含水比調整と締固めた盛土の含水比の測定・確認 → 非常に重要であるが、締固め度管理に比して軽視・回避される傾向：

- (課題)・自然含水比での施工を許容する場合の対策
- ・空気間隙率管理の誤用と適切な運用

# 含水比の調整と管理の課題： 様々なレベルでの対応策

## ■ 自然含水比での施工を許容する場合（道路・鉄道盛土など）

### 次善の方策（次に説明）

- 対応策 1: 締固めた盛土の含水比 $w$ の測定・確認を義務付ける  
⇒ 盛土材の $w$ の調整が必要になる場合がある
- 対応策 2: 締固め度の許容下限値を、5%程度引き上げる

### 本格的で合理的な方策（後で説明）

- 対応策 3: 盛土材の土質と締固めエネルギーレベルの管理を前提とした  
締固めた盛土の**地盤剛性指標の上下限值管理**によって  
締固めた盛土の $(\rho_d, w)$ 状態を推定・確認、面的管理  
⇒ 道路・鉄道等の通常の盛土にも適用が可能

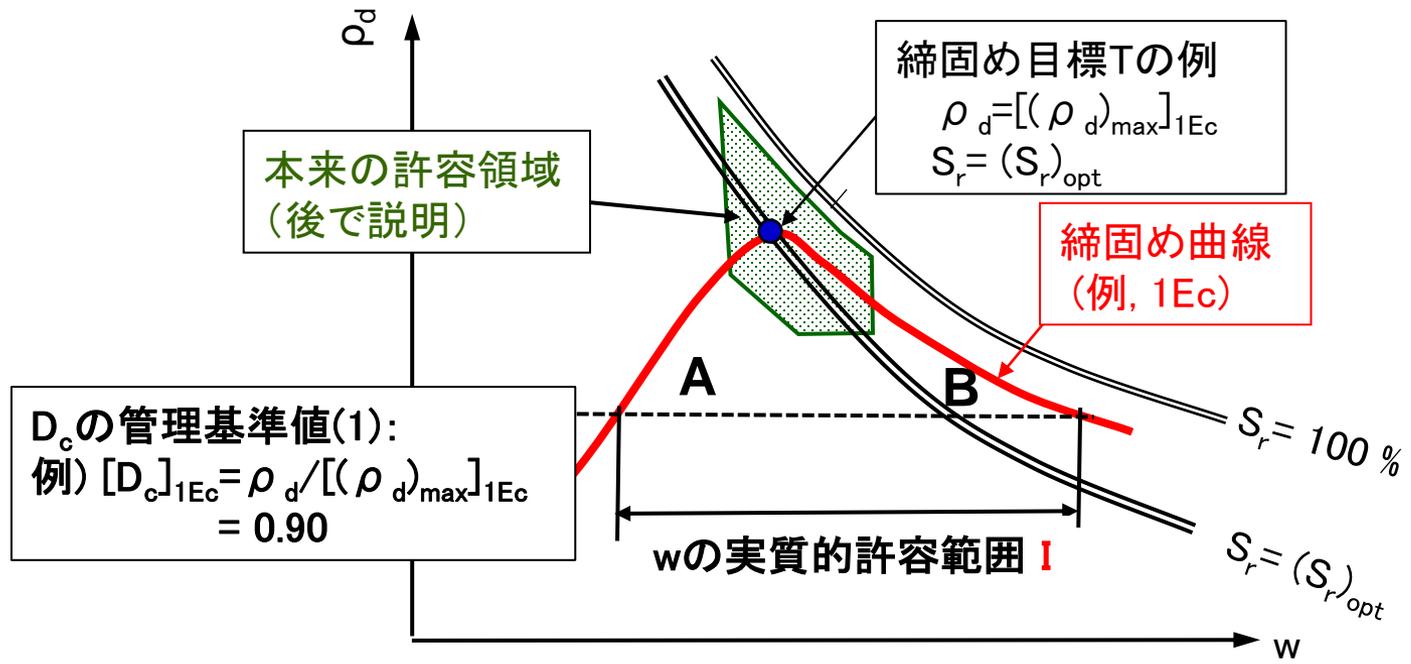
## ■ 盛土材の $w$ の調整と締固め土の $w$ の測定・確認を行う場合 （従来は、フィルダムのコア部等で実施）

- ① 従来の締固めた $(\rho_d, w)$ 状態の測定・確認 + **飽和度の確認**
- ② **対応策3の導入 ⇒ ①の実施数を大幅に低減した上で面的管理**
- ⇒ この場合についても、後で説明

# 締固め度は測定・管理するが、盛土材の含水比調整をせず自然含水比での施工を許容する場合

含水比  $w$  の許容範囲は、規定しないが、 $[D_c]_{1Ec}$  の許容下限値 = 90% の場合は実質的に **I** で、かなり広い  $\Rightarrow$  実現する  $[D_c]_{1Ec}$  の範囲は 90% ~ 100% 程度と広い  
 特に、A や B のように、本来の許容領域 (十分高い  $[D_c]_{1Ec}$ 、適切な範囲の含水比と飽和度) に到達していない状態を有効に排除できない

どうすれば良いのか？



# 含水比の調整・管理をせず、自然含水比での施工を許容する場合

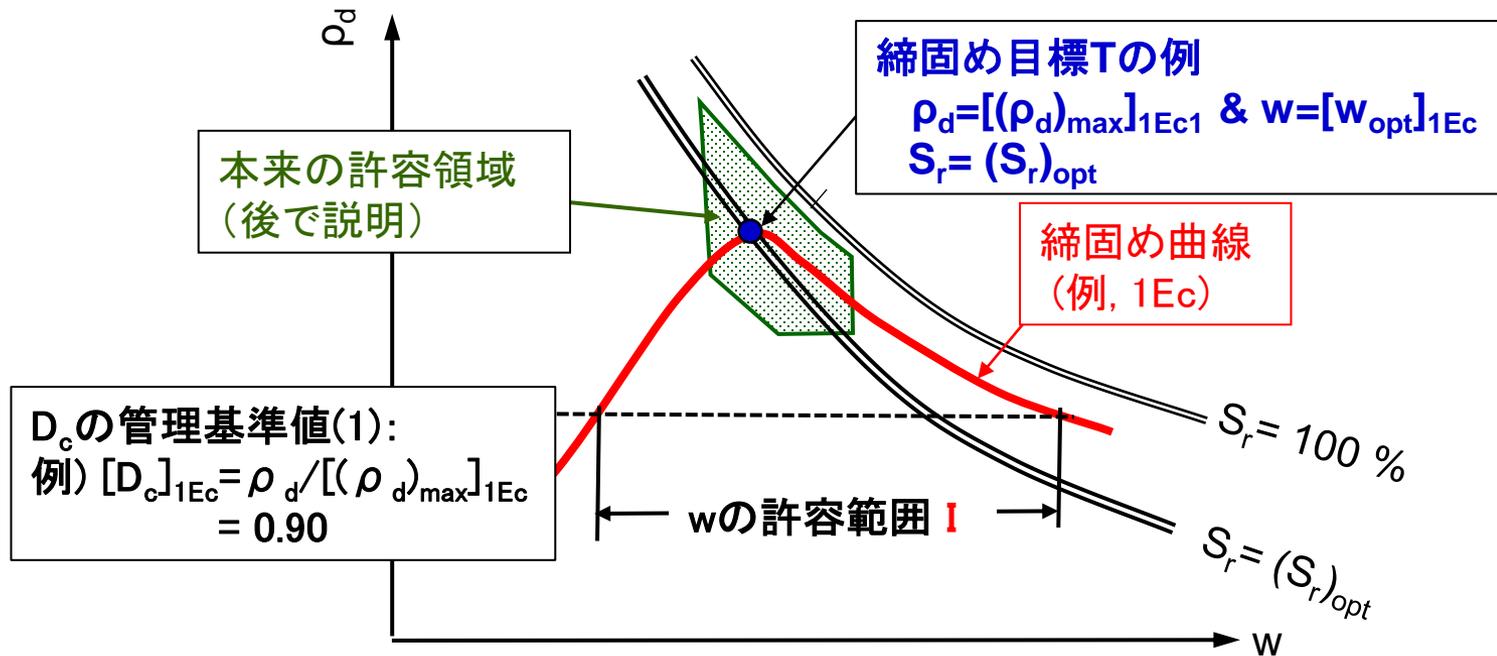
対応策 1:  $[D_c]_{1Ec}$  の管理基準値は、従来通り(例えば90%)

ただし、締固めた盛土の  $w$  の測定・確認を義務付ける

その結果、盛土材の含水比調整が必要となる場合が出てくる

⇒  $(w_{opt})_{1Ec}$  になるべく近い  $w$  での施工が促され、**本来の許容領域**に到達する傾向となることが期待できる！

[欠点] 「盛土材の  $w$  の調整と締固めた盛土の  $w$  の測定・確認」は、手間が掛かる ⇒ 歓迎されないのではないか？



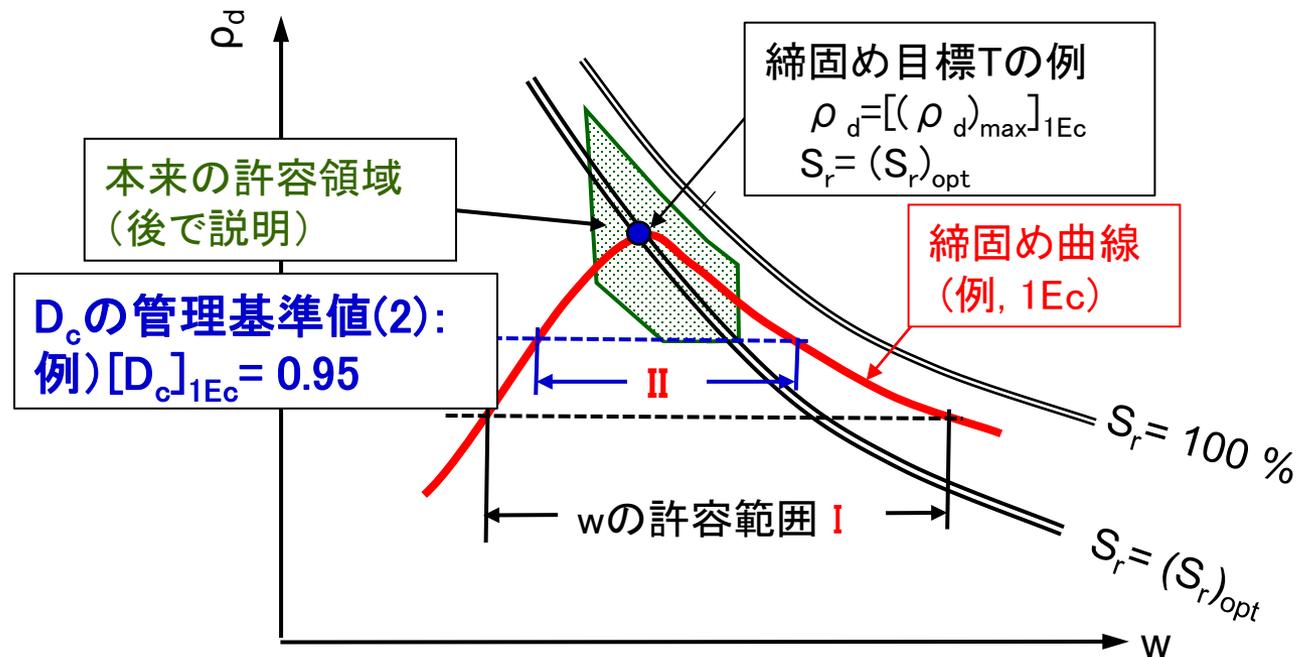
# 含水比の調整・管理をせず、自然含水比での施工を許容する場合

対応策2:  $[D_c]_{1Ec}$  の管理基準値を95%のように、従来よりも5%程度引き上げて、 $w$  の許容範囲を実質的に II と狭くする

⇒  $[D_c]_{1Ec}$  の実現範囲は95%以上と改善し、本来の許容領域に到達する傾向が強くなる！

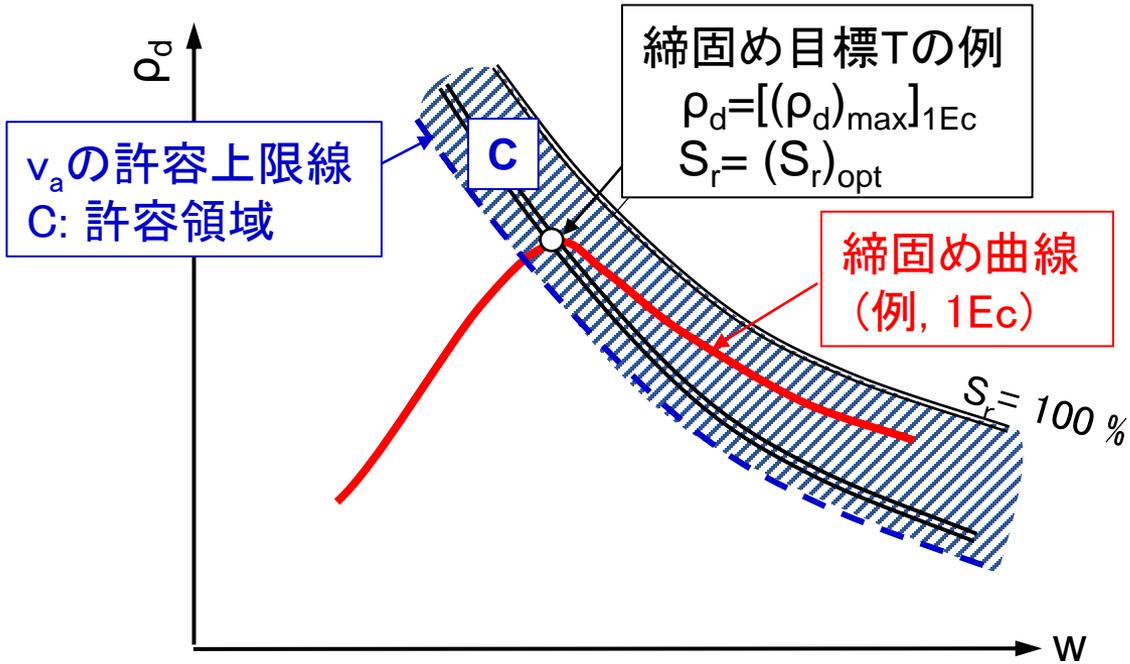
⇒ 次善の策として、対応策2は、対応策1よりも実行しやすいのではないかと？

■ 対応策1, 2を選択できるようにするのが、現実的ではないかと？



# 空気間隙率管理の誤用:

空気間隙率 $v_a$ の許容上限値(例、15%)に基づく管理  
 - 多くの指針等で規定  $\Rightarrow$  しばしば誤用

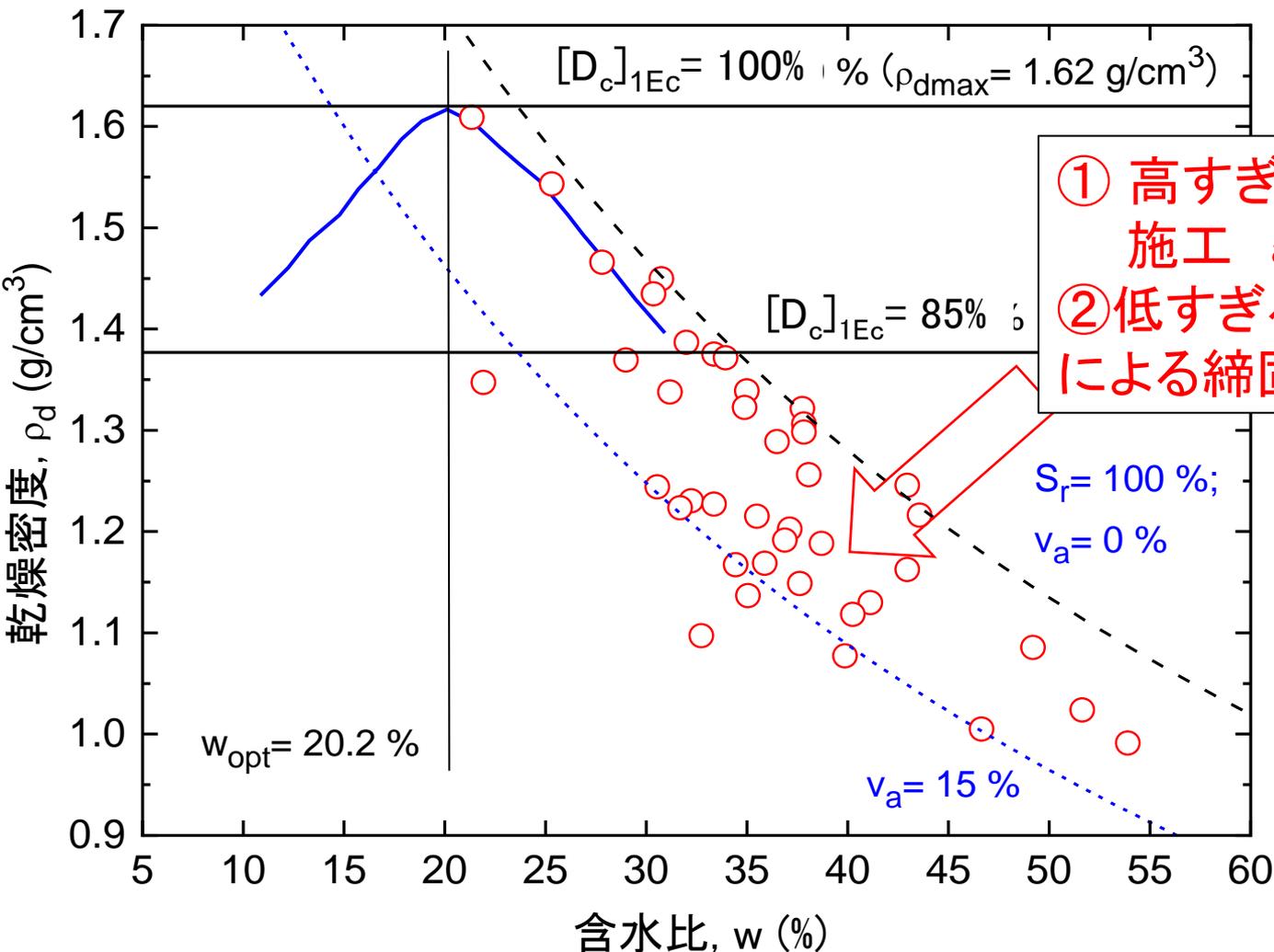


空気	$V_a$	体積
間隙水	$V_w$	
土粒子	$V_s$	
		(合計 $V$ )

空気間隙率:  $v_a = V_a / V$   
 飽和度:  $S_r = V_w / (V_a + V_w)$   
 $v_a$ の許容上限値管理は  
 $S_r$ の許容下限値管理と類似

$v_a$ 管理は、 $(\rho_d)_{max}$ を基準にしないので、盛土材の締固め試験が不要  
 $\Rightarrow$  締固め曲線が求めにくい土にも適用できる、迅速、省力化  
 しかし、誤用によって高含水比盛土材を使用できるようにする場合がある！  
 そもそも、  
 ・乾燥密度 $\rho_d$ は $v_a$ に独立  $\Rightarrow$   $v_a$ 管理単独では、 $\rho_d$ の管理はできない  
 ・ $\rho_d$ 一定で $v_a$ 減少 $\rightarrow$ 強度・剛性低下 $\Rightarrow$   $v_a$ 減少を目指す意味の理解で混乱

2011年東日本大震災において仙台市内南部の宅地被害が著しかった区域の盛土： 全体的に、締固め度は**非常に低い**  
 ⇒その状態でも、殆どのデータで空気間隙率 $v_a$ は15 %以下！



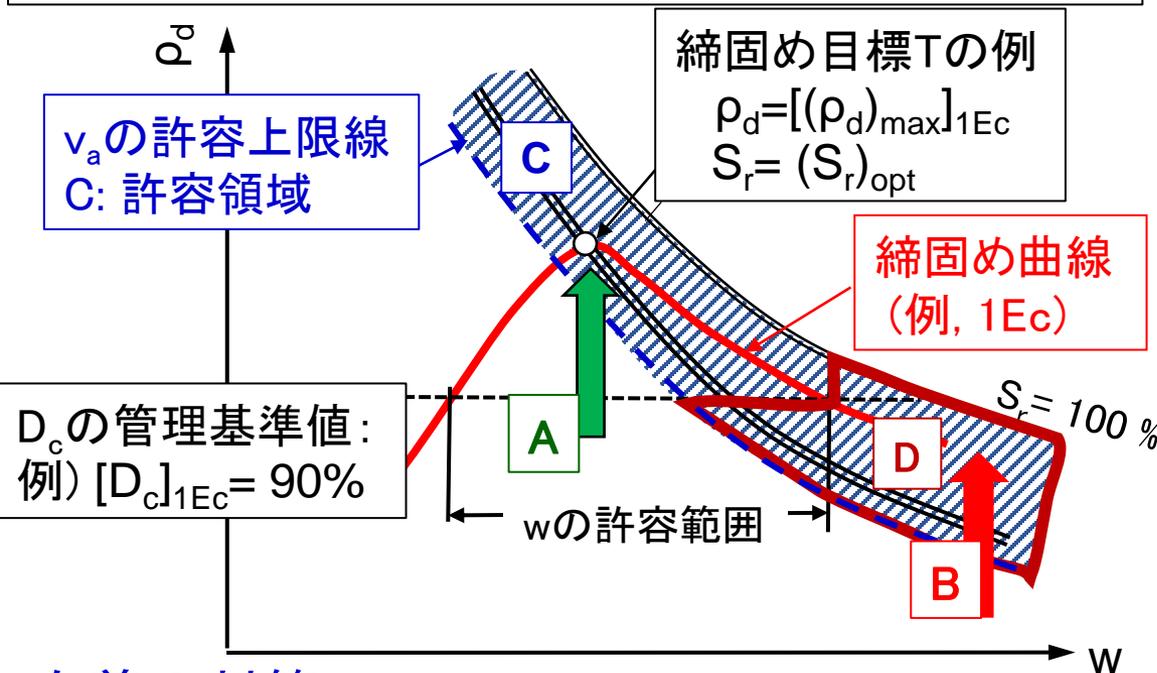
- ① 高すぎる自然含水比での施工 and/or
- ② 低すぎる締固めエネルギーによる締固め不良

佐藤真吾・栗谷将晴・南陽介(2014): 東北地方太平洋沖地震における谷埋め盛土造成宅地に被害と復旧課題、第47回地盤工学研究発表会、八戸、論文 E-08, 1477-1478頁

# 空気間隙率管理の誤用の回避:

空気間隙率 $v_a$ の許容上限値(例、15%)  
に基づく管理 - 多くの指針等で規定  
⇒ この規定の誤用を避ける必要がある

(本来) $v_a$ の減少の確認をする  
 $v_a$ 管理は、Aのように $w_{opt}$ に近い  
 $w$ において十分高いCELで施工  
することが前提



しかし、上記を無視して、「自然  
含水比が高くて規定された $w$ に  
調整できない土」を用いてBの  
ような施工を行い、 $v_a$ 管理で正  
当化する場合が少なくない  
⇒  $v_a$ 管理をしても、十分高い $\rho_d$ 、  
十分に高い強度は実現でき  
ない

## 次善の対策:

施工性と盛土の安定性から見て締固め不良となる領域Dを規定し排除!

- ① 領域Dを $D_c$ と $w$ の測定・管理によって排除 ⇒ この方法は、手間が掛かる
- ② 実施しやすい方法として、コーン貫入抵抗などの強度指標の許容下限値を規定 ⇒ 領域Dをできるだけ排除 (より本格的な方策は後ほど説明)

# 講演概要

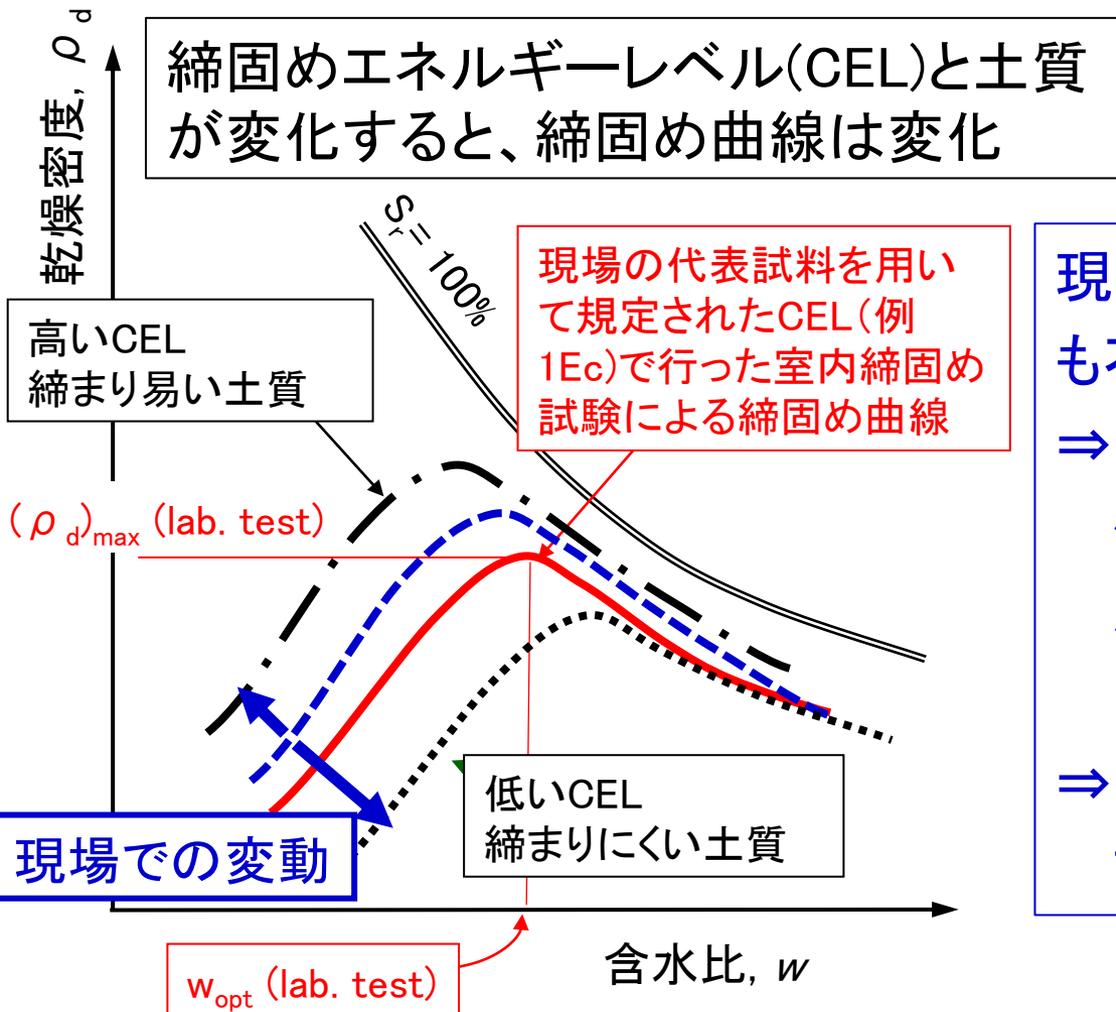
## 盛土の含水比管理の課題:

盛土材の含水比調整と締固めた盛土の含水比の測定・確認  
非常に重要であるが、締固め度管理と比較すると  
軽視・回避される傾向:

## 締固め管理の新たな展開:

- ・ **最適飽和度**を目指す締固め管理体系  
(**最適飽和度**において、乾燥密度は極大、物性はほぼ最適値)
- ・ **適切な締固め度プラス最適飽和度の状態**を締固め目標と設定
- ・ 省力迅速化・面的締固め管理:  
締固めエネルギーと土質の管理を前提とした  
K値、CCVなどの**地盤剛性指標の上・下限値管理**  
(従来の地盤剛性指標の下限値管理を発展させた方法)

# CELと土質の不可避的変動による締固め曲線の変動

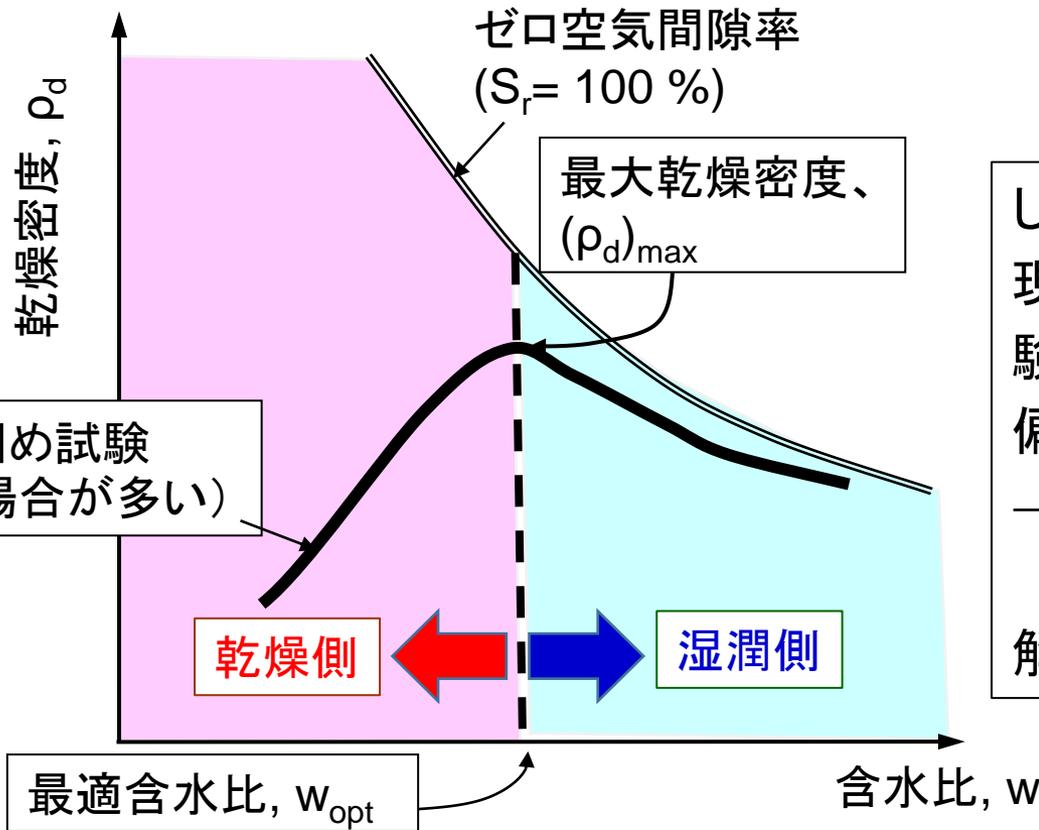


現場でのCELと土質は、管理しても不可避的に変動

⇒ 現場での $(\rho_d)_{\max}$ と $w_{\text{opt}}$ の正確な値は不明、室内試験での値からバラツキ、系統的に偏る場合も多い

⇒ Proctor法は、含水比に基づく諸問題に遭遇

# 従来の、含水比に基づく盛土の締固め管理の枠組み

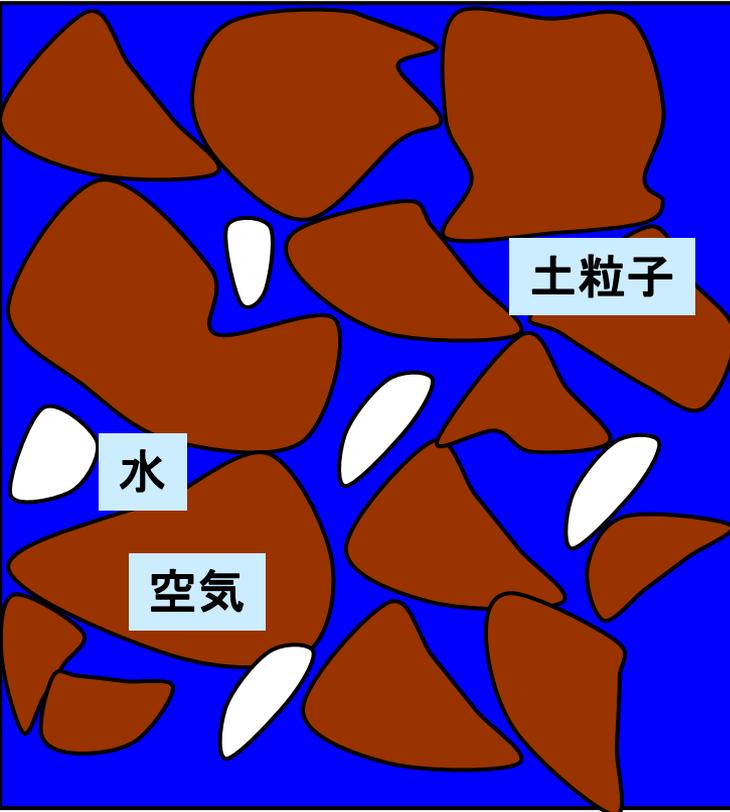


しかし、  
現場の $w_{opt}$ は、室内締固め試験による値に対して、ばらつき、偏るのが普通  
→ $w_{opt}$ に基づく乾燥側/湿潤側の区別は客観的ではない  
解決策は？

現場管理の例:  $D_c$ の全測定値  $\geq$  所定の管理値 の確認  
 $w + \alpha \geq w_{opt} \geq w_{opt} - \beta$  の確認

①最適飽和度 $(S_r)_{opt}$ と正規化締固め曲線 $(D_c)_t = \rho_d / (\rho_d)_{max} \sim S_r - (S_r)_{opt}$ 関係は、CELと土質の変動に安定、②強度・剛性、透水性等は、 $S_r = (S_r)_{opt}$ でほぼ最適化  
⇒高CELで $S_r = (S_r)_{opt}$ を目指す締固め管理は、客観的で、品質管理が容易

# 土



含水比:

$$w = \frac{\text{水の質量}}{\text{土粒子の質量}} \quad (\times 100 \%)$$

土粒子に対する水の質量状態だけを表現  
空気の状態を表現していない

飽和度:

$$S_r = \frac{\text{水の体積}}{\text{水と空気の体積}} \quad (\times 100 \%)$$

⇒ 水と空気の体積状態を表現

⇒ 締固め特性と締固め土の物性を制御する

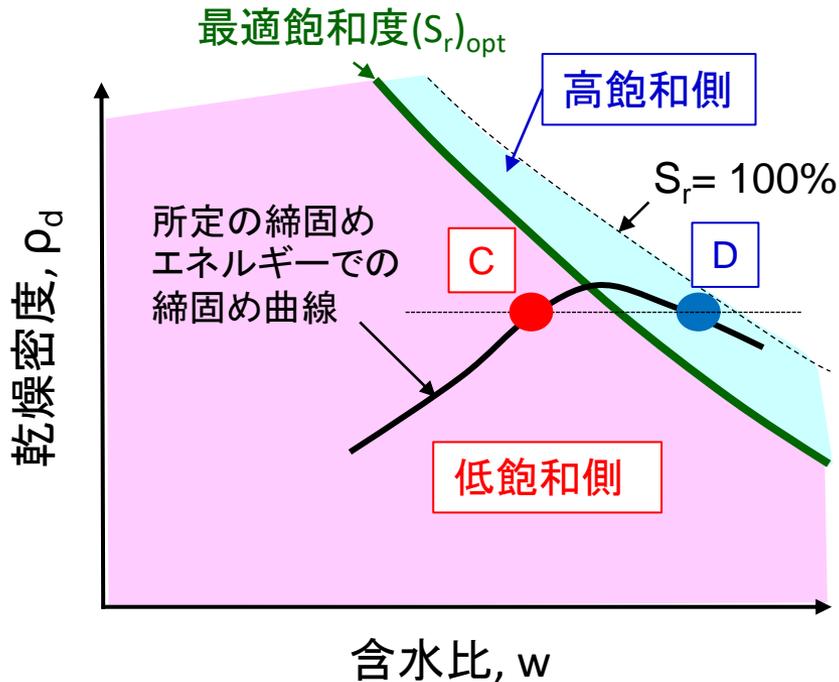
サクシオンは、 $\rho_d$ 及び $S_r$ の関数

$$S_r = \frac{w \cdot G_s}{e} = \frac{w}{\frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{1}{G_s}}$$

w一定でも、 $\rho_d$ が増加すると  
 $S_r$ は増加  
⇒ w管理と $S_r$ 管理は異なる

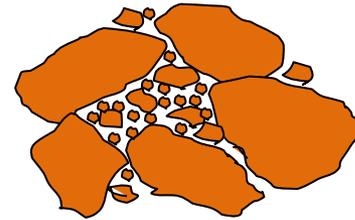
# 締固め特性と物性は締固め時の飽和度に支配される

## ⇒盛土の締固め管理の新しい枠組み



注：これらは模式図。良く締固めれば、細い粒子も浸透流に対して安定している構造になる

D

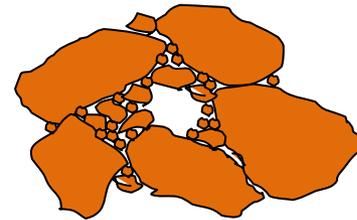


分散型 (dispersed)  
粒子骨格構造

サクシオン小 ⇒ 細粒子は粗粒子の間隙内で分散

- ・不安定な粒子骨格
- ・小さな透水係数

C



凝集型 (coherent)  
粒子骨格構造\*

サクシオン大 ⇒ 大粒子に細粒子が密着して、

- ・安定な粒子骨格
- ・大きな透水係数

\*乾燥側で締固めた粘性土の粒子構造を綿毛 (flocculated) 構造と呼ぶが、この概念は砂礫には適さない

サクシオン $s$ は締固め特性と物性を支配  
しかし、変数として用いない。理由は…

①サクシオン $s$ は、 $\rho_d$ と $S_r$ の関数:

$$s = f_s(S_r) \cdot g_s(\rho_d)$$

(右下図)この関数に基づく $s$ の等高線

⇒ $w$ が減少すると $s$ は増加して、強度・剛  
性が増加し締め固まりにくくなる

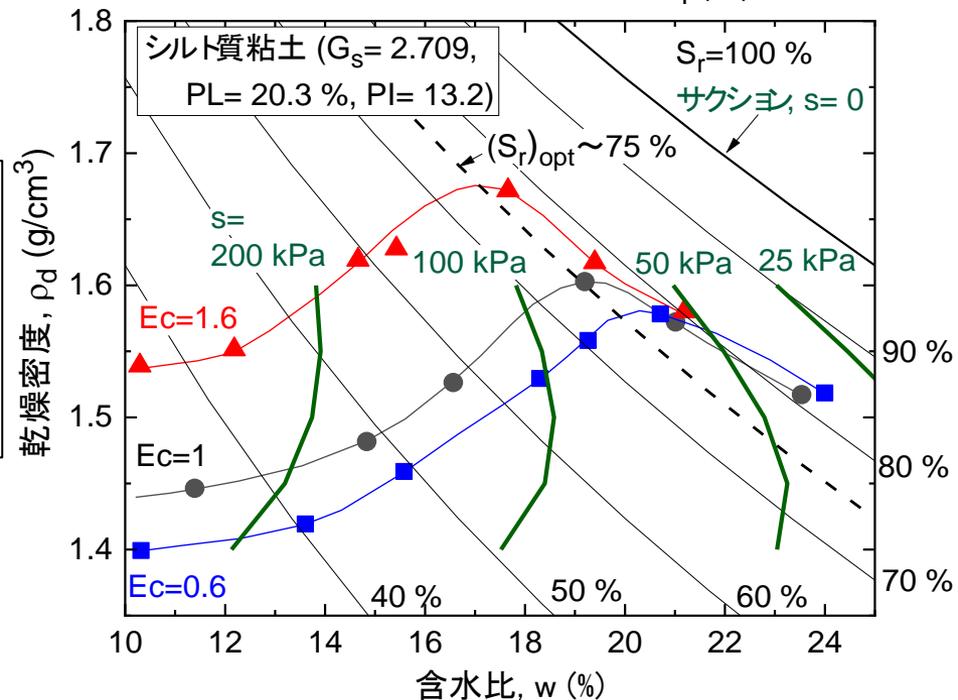
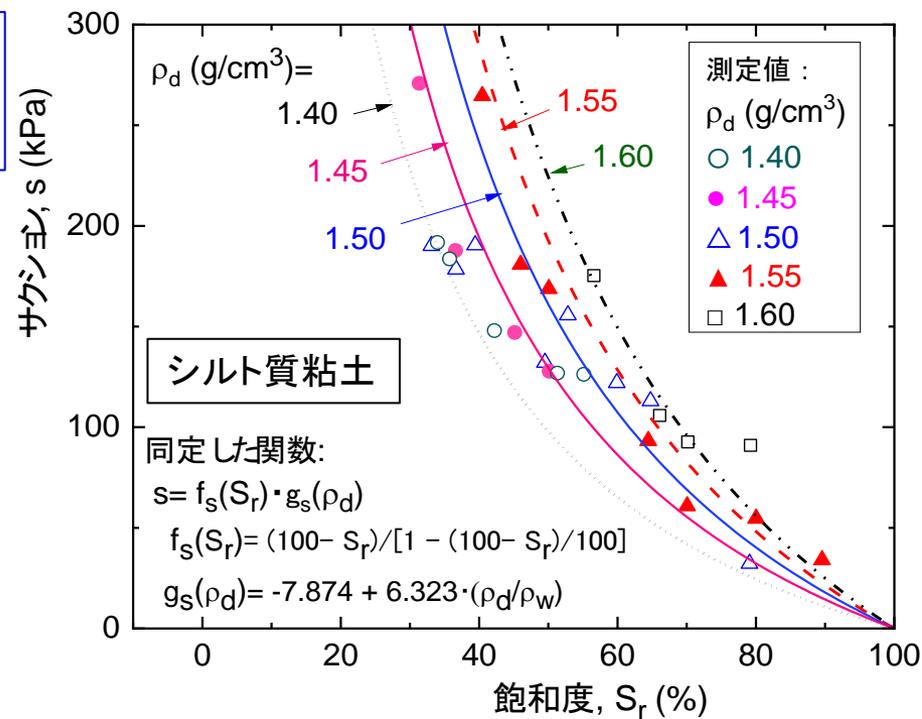
⇒同一のエネルギーで締め固めた場合  
 $w < w_{opt}$ では $\rho_d$ は低下

つまり…

②締固め特性と物性は、 $\rho_d$ と $s$ の関数

① + ② ⇒ 締固め特性と物性は、  
 $\rho_d$ と締め固め時 $S_r$ の関数、締め固め時  
サクシオン $s$ は変数として不要  
(サクシオンは、現場測定も困難)

データは、河井克之, 金銀羅, 流田寛之, 飯塚敦,  
本田道識: 不飽和土の力学を用いた締め固め土にお  
ける圧密降伏応力の簡易予測手法, 土木学会応用  
力学論文集, Vol.5, pp.785-792, 2002.



# 御母衣ダム

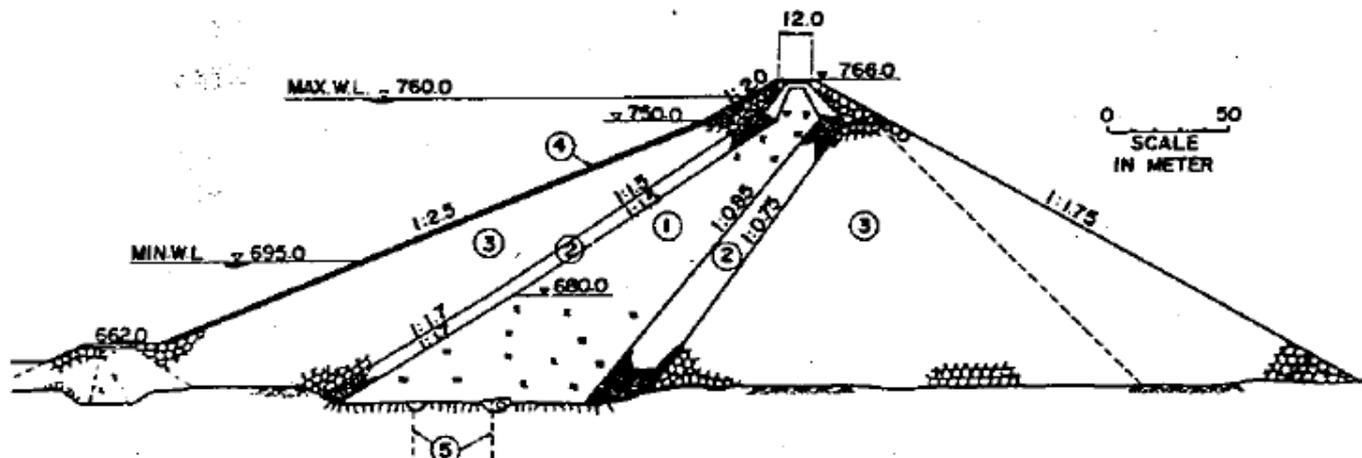
ロックフィルダム

高さ: 131 m

完成: 1961年

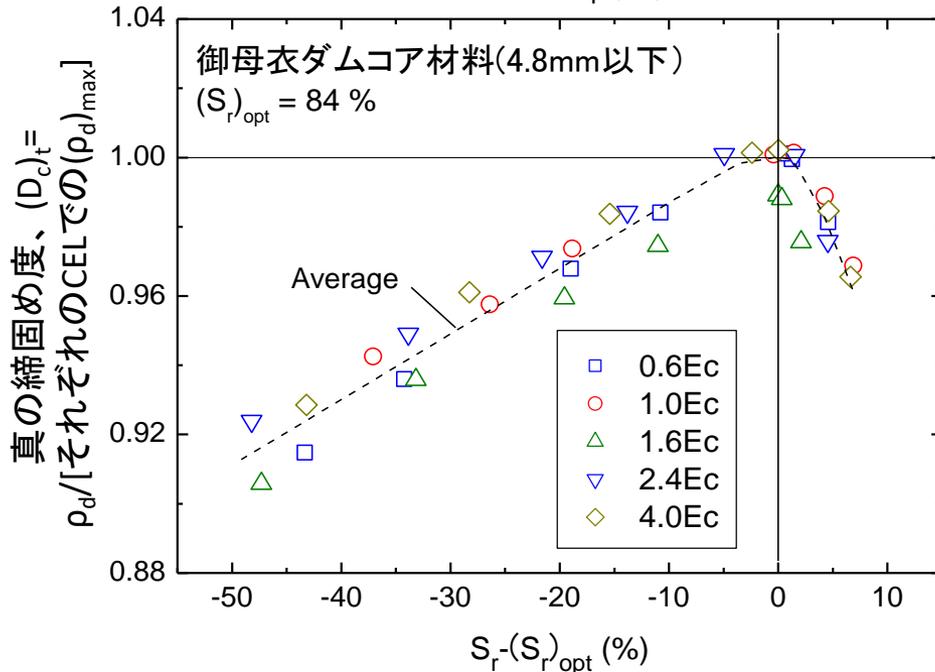
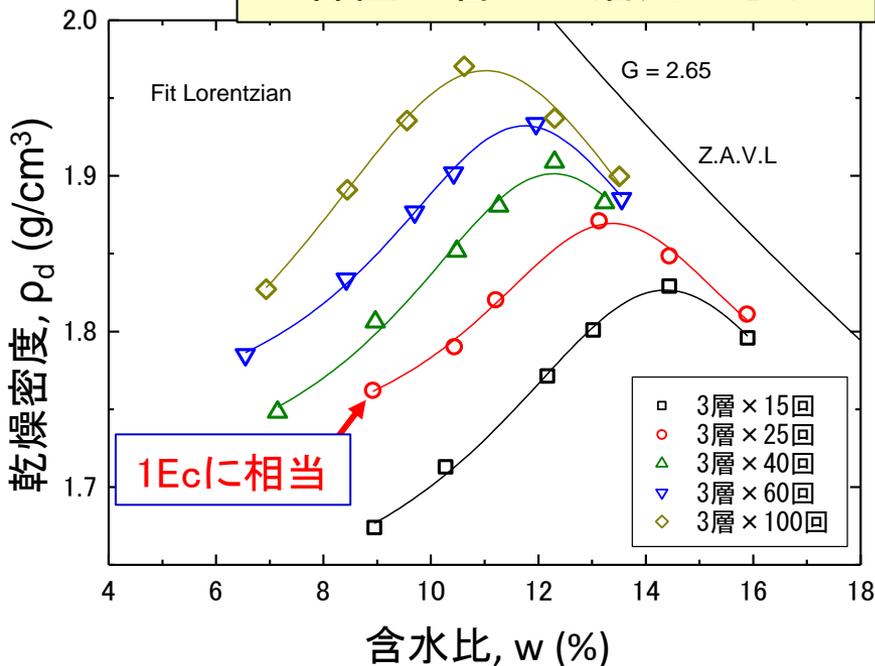
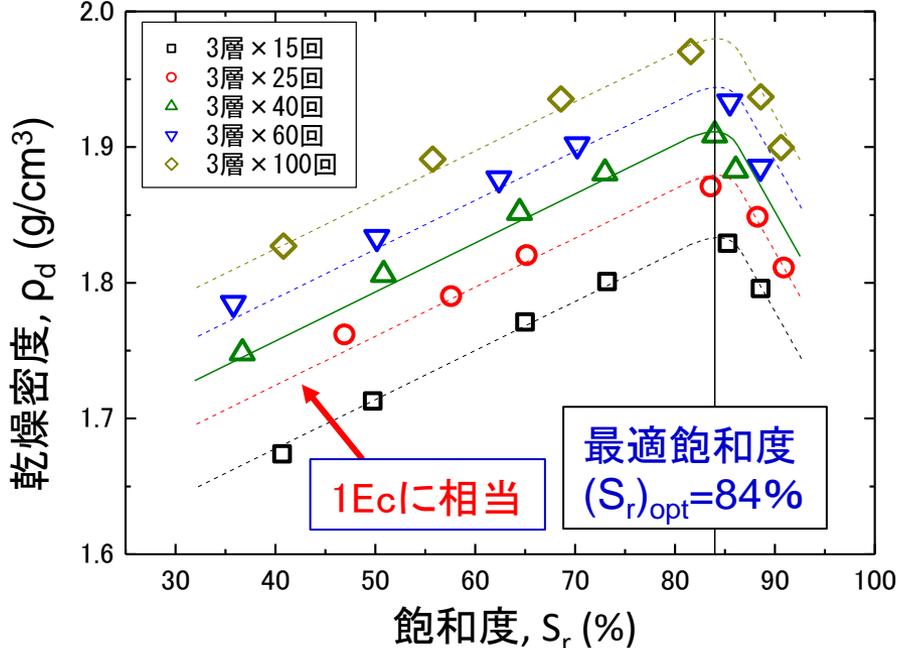
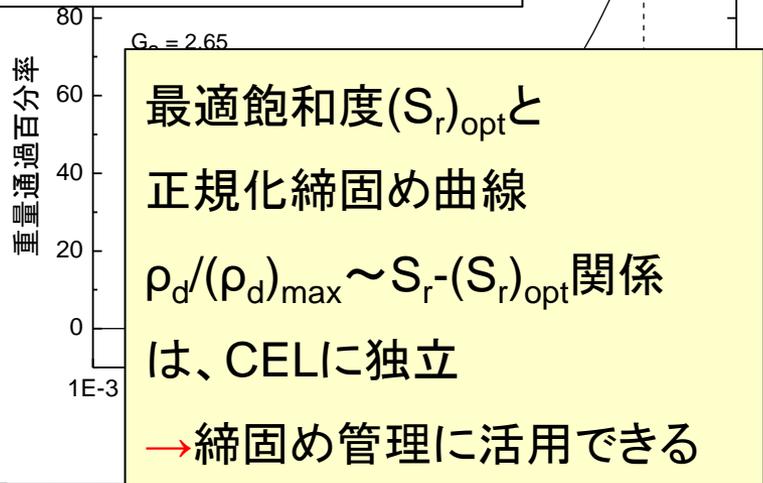
調査設計段階で、非常に系統的な土質試験を実施

⇒そのデータは、締固め特性と透水特性は締固め時の飽和度の関数であることを示している



- ① コア
- ② フィルター
- ③ ロックフィル
- ④ リップラップ
- ⑤ グラウトカーテン

# 御母衣ダム、 コア材料室内試験用試料

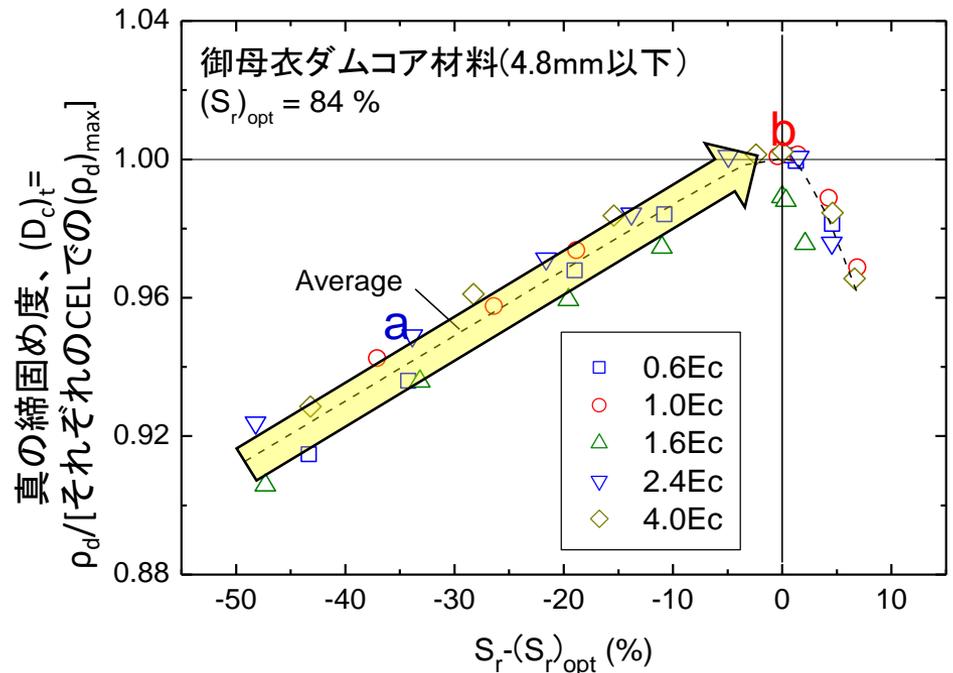
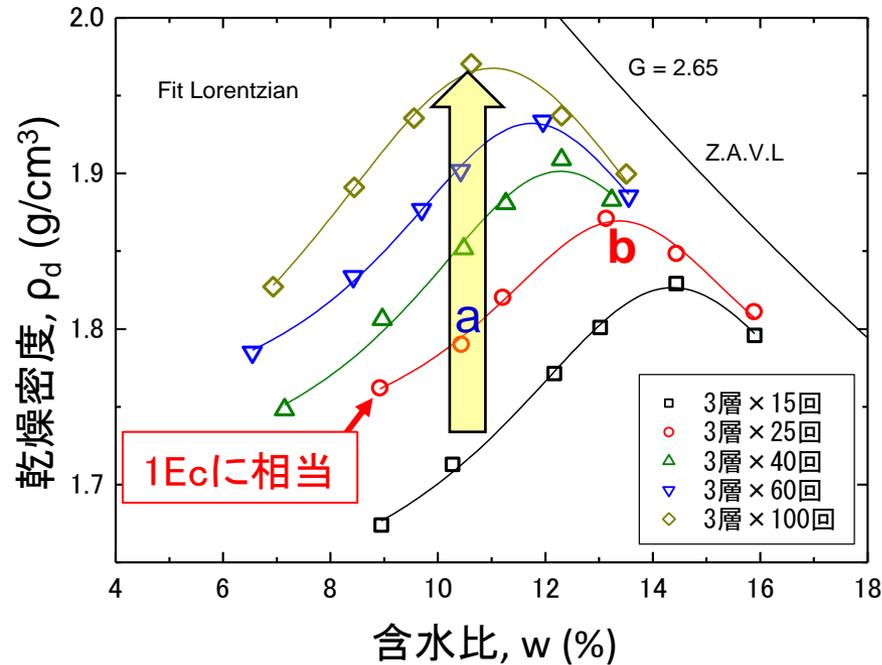


三国英四郎(1962): フィルダムしゃ水壁材料の性質と締固めに関する研究(その1)、土と基礎、10(1): 3-12

浅尾 格(1963): 御母衣ダムについて、第8回国際大ダム大会課題第31関係論文、大ダムNo.27, 33-33.

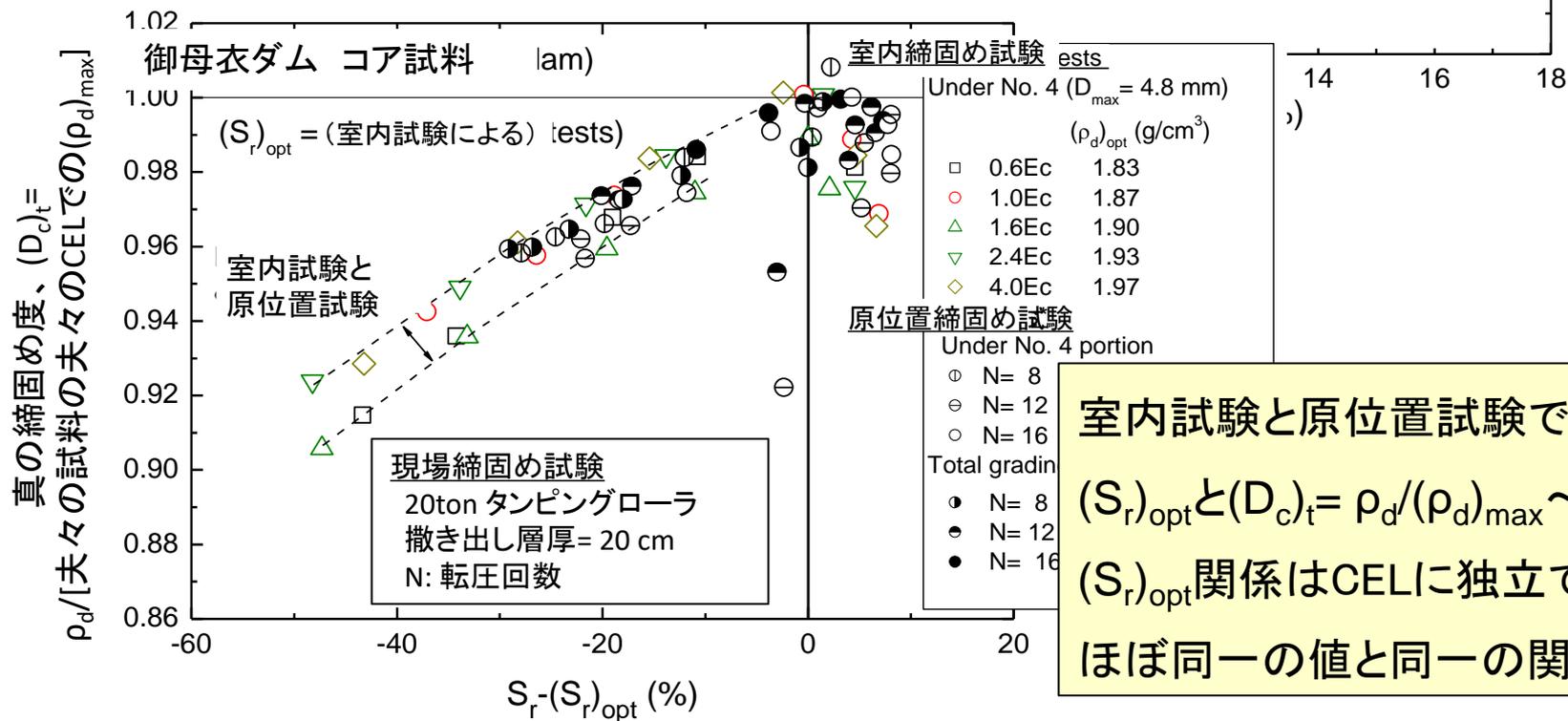
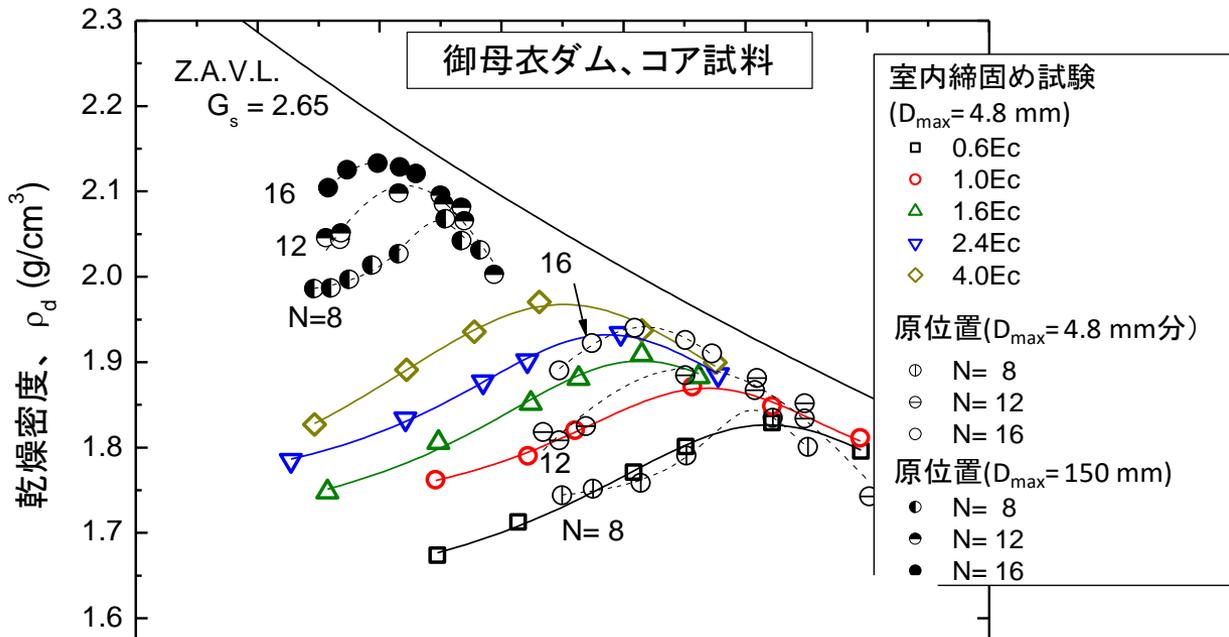
# 御母衣ダム、コア材、 室内試験用試料

- ・現場締固め過程では、通常 $w$ 一定で、 $S_r$ は低飽和度状態で増加して $(S_r)_{opt}$ に接近
- ・低飽和度側の $(D_c)_t = \rho_d / (\rho_d)_{max} \sim S_r - (S_r)_{opt}$  関係は、CELが増加しても同じ関係
- ⇒現在の正確なCELが不明でも、例えば点**a**での $S_r - (S_r)_{opt}$ の測定値から、現在の締固め状態の指標： $(D_c)_t = [\text{点aでの}\rho_d] / [\text{点bでの}(\rho_d)_{max}]$ が分かる
- ⇒所定の $CEL_f$  (例えば1Ec)における点**b**での $(w_{opt})_{1Ec}$ が推定できて、次の1Ecでの締固めでは、 $w$ を $(w_{opt})_{1Ec}$ に調整することによって点**b**での状態に到達できる



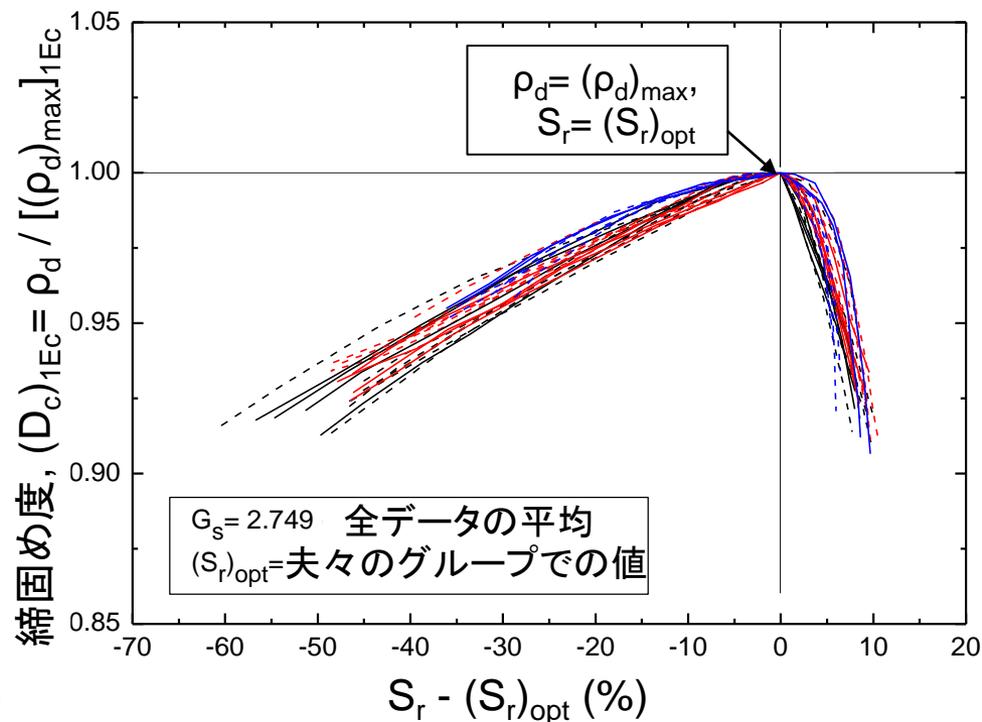
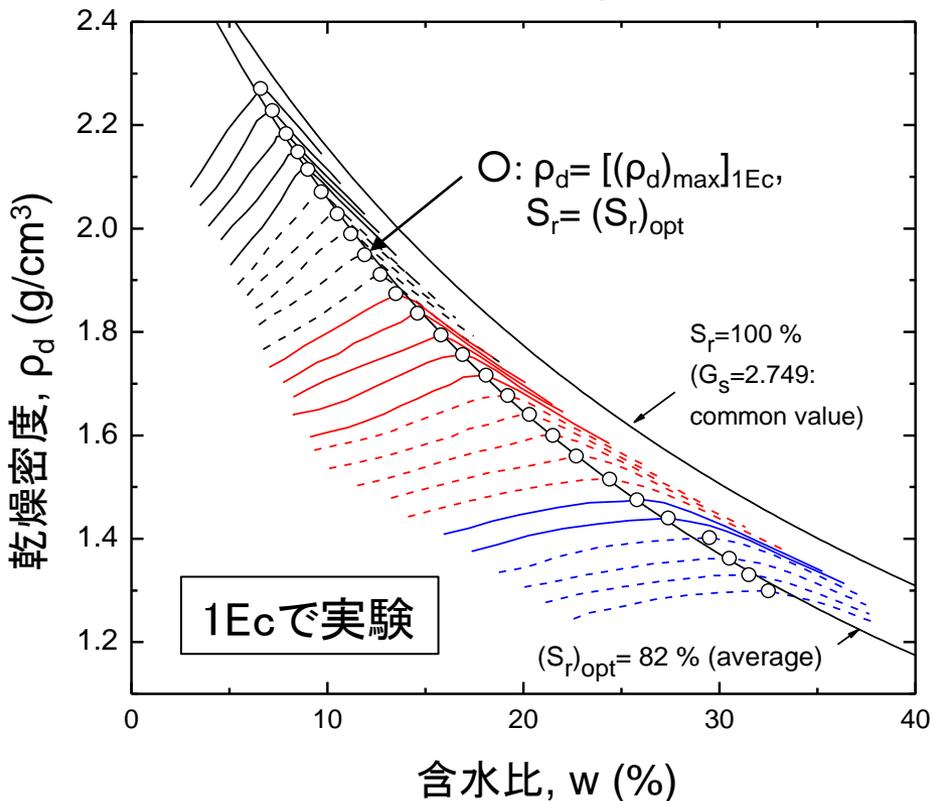
# 御母衣ダム、コア材料 室内締固め試験 原位置締固め試験

三国英四郎(1962): フィルダムしゃ水壁材料の性質と締固めに関する研究(その1)、土と基礎、10(1): 3-12  
浅尾 格(1963): 御母衣ダムについて、第8回国際大ダム大会課題第31関係論文(論文番号R.13), 大ダムNo.27, 33-33.



室内試験と原位置試験で共通して、  
 $(S_r)_{opt}$  と  $(D_c)_t = \rho_d / (\rho_d)_{max} \sim S_r$   
 $(S_r)_{opt}$  関係はCELに独立であり、  
ほぼ同一の値と同一の関係

# 米国オハイオ州道路局での膨大な締固め試験(1Ec): 10,000の試料の締固め曲線を26のグループに分類して平均化



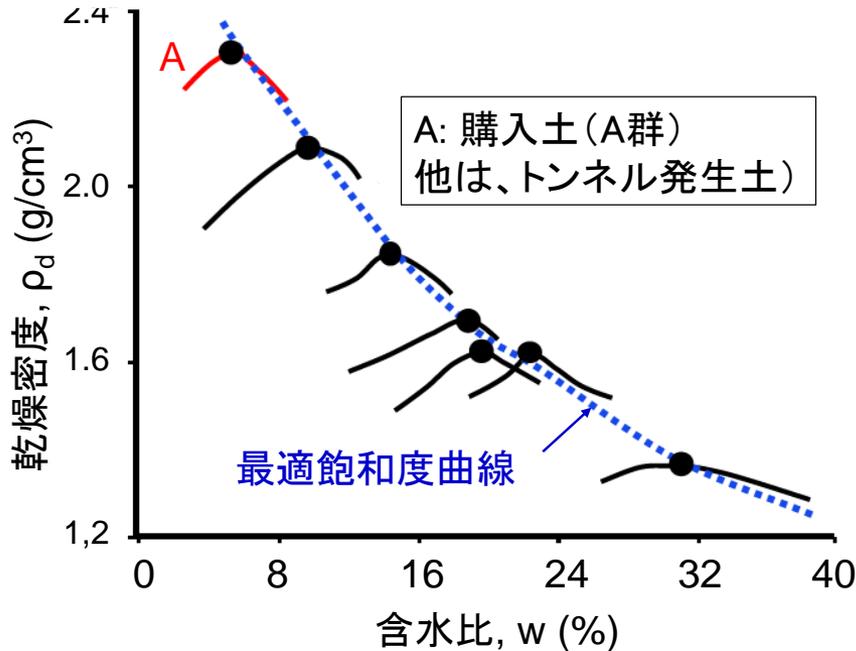
Joslin, J. G. (1959): Ohio's typical moisture-density curves, *ASTM STP239, Proc. of Symposium on Application of Soil Testing in Highway Design and Construction*, 111-118.

非常に広い土質に対して、  
最適飽和度  $(S_r)_{\text{opt}}$  と  
 $(D_c)_{1Ec} = \rho_d / [(\rho_d)_{\max}]_{1Ec} \sim S_r - (S_r)_{\text{opt}}$  関係  
は、非常に安定

# 鉄道トンネル発生土等の( $D_{max} \leq 37.5$ mm)の剪頭粒度試料

締固め曲線(E-b法 4.5Ec)

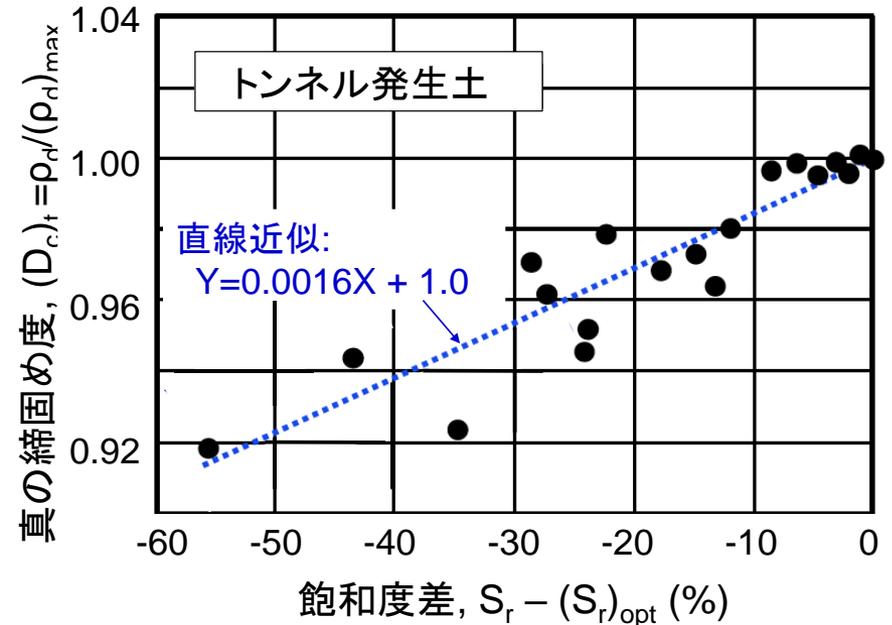
$\Rightarrow (S_r)_{opt}$  はほぼ一定



低飽和度側での正規化締固め曲線:

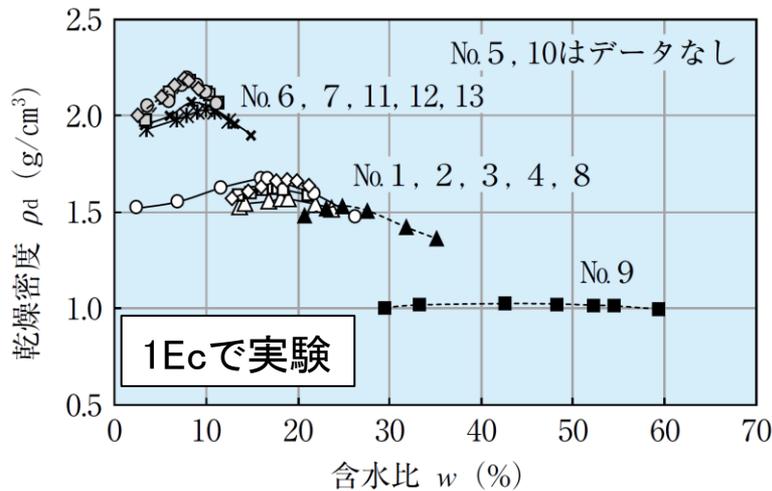
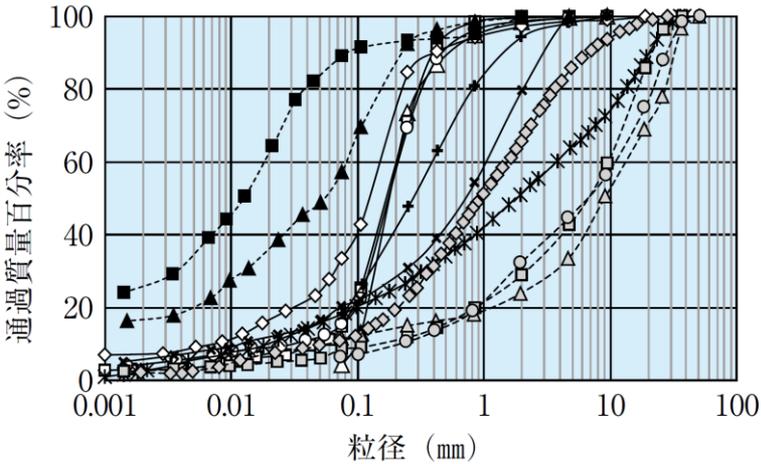
$(D_c)_t = (\rho_d / (\rho_d)_{max}) \sim S_r - (S_r)_{opt}$  関係  
(B-b法(1Ec)とE-b法(4.5Ec))

$\Rightarrow$  ほぼ一義的



白根岳・藤本達貴・中島進・川中島寛幸・曾我大介・磯谷敦実: 新幹線土構造物における盛土材料の分類見直しに関する研究(その4)トンネル発生土を用いた盛土の施工管理方法の提案、第55回地盤工学研究発表会, 京都, 2020.

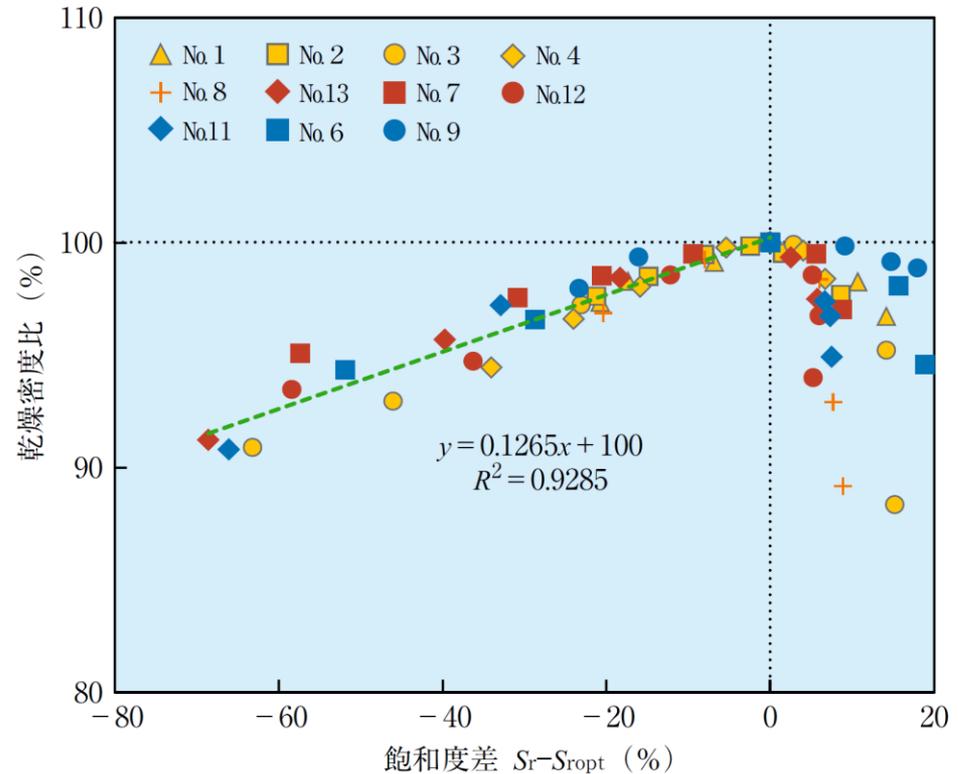
# 広範囲の盛土試料 (土木研究所)



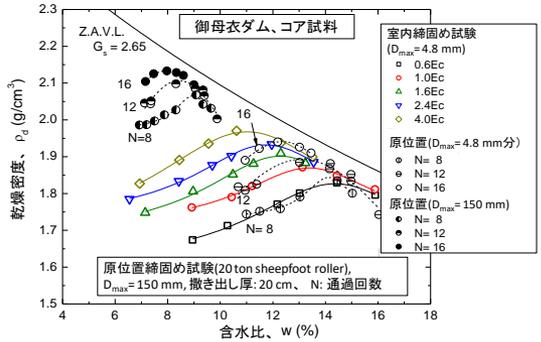
低飽和度側の  $(D_c)_t = \rho_d / (\rho_d)_{\max} \sim S_r - (S_r)_{\text{opt}}$  関係は、異なる土質に対して一義性が高い

→ 現在の正確な土質が不明でも、 $S_r - (S_r)_{\text{opt}}$  の値だけから、現在の締固め状態の指標:

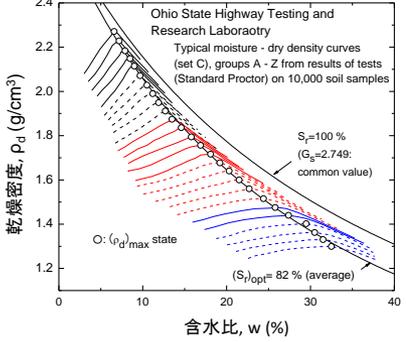
$$(D_c)_t = \rho_d / (\rho_d)_{\max} \text{ が分かる}$$



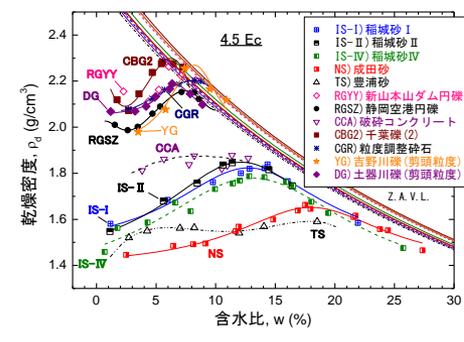
# 非常に多数の室内と現場の締固め試験のまとめ



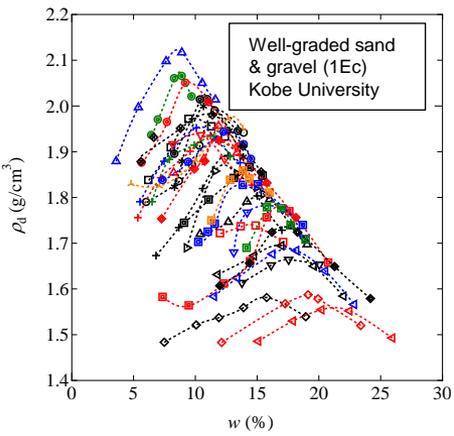
御母衣ダムコア材



米国オハイオ州

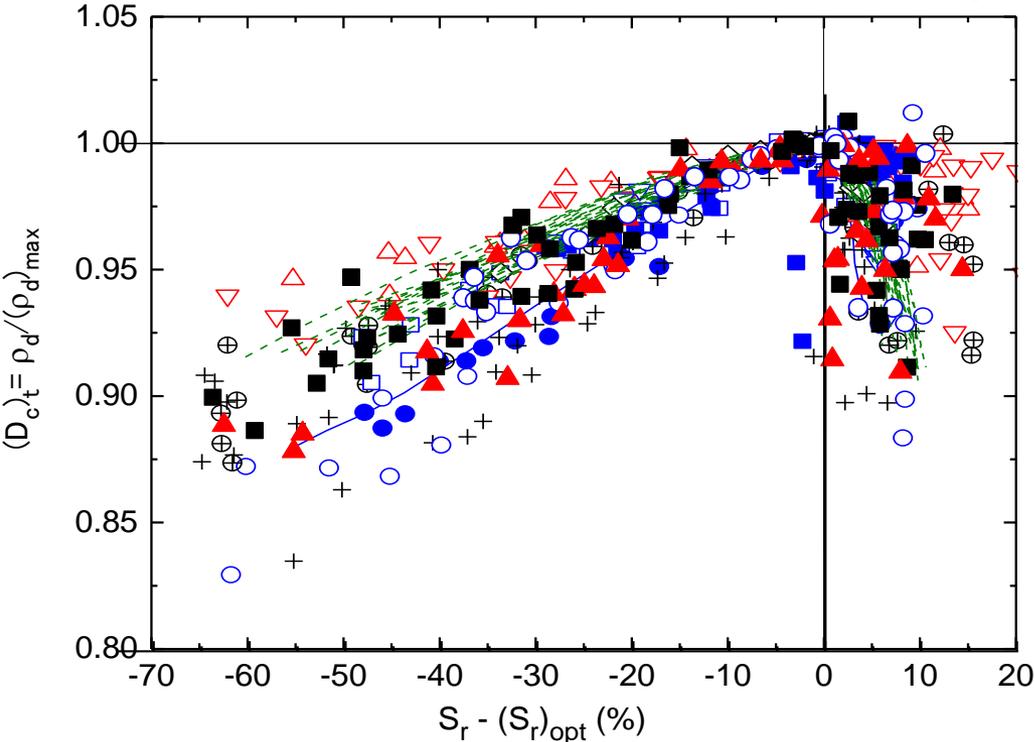


東京理科大学



神戸大学

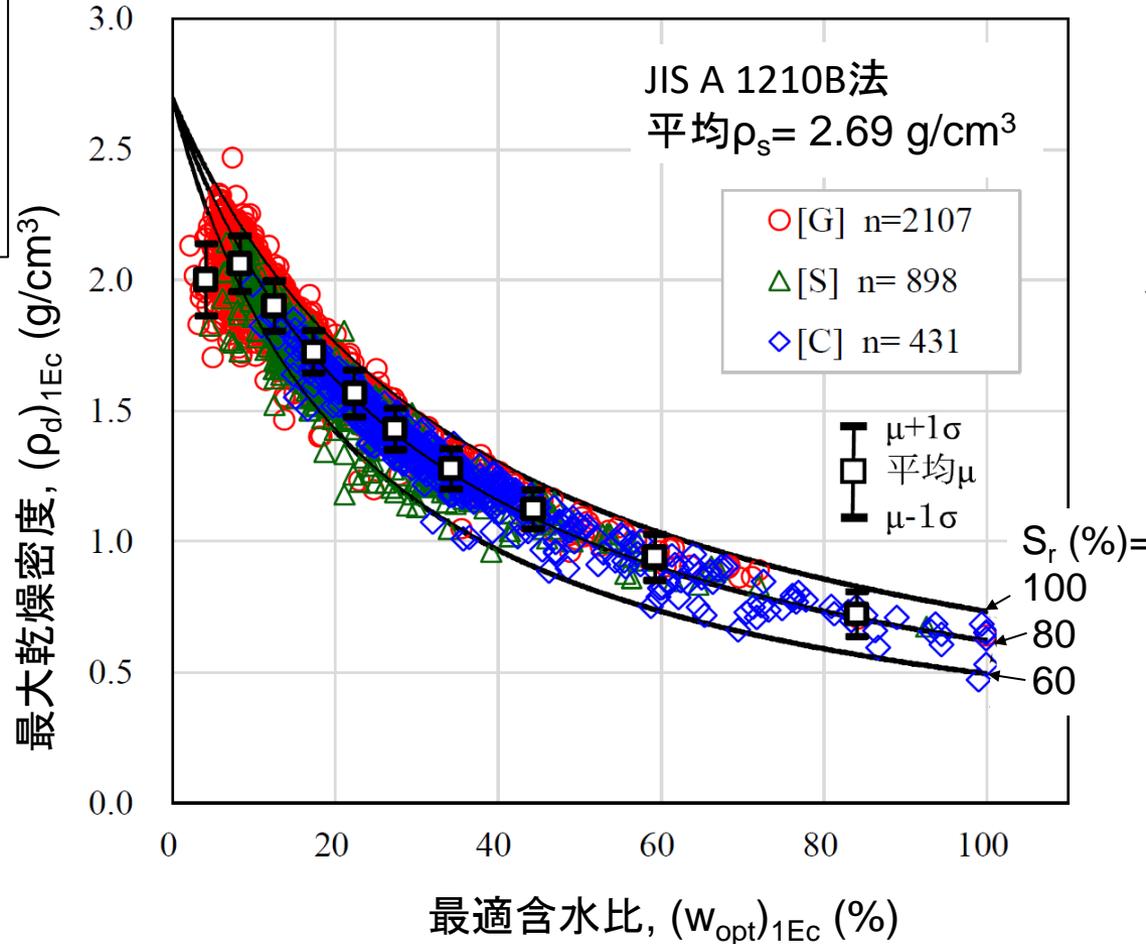
+他のデータ



- $(D_c)_t = \rho_d / (\rho_d)_{max} \sim S_r - (S_r)_{opt}$  関係は、土質、CEL、現場/室内に関らず類似。ただし、低飽和側の勾配は、 $(\rho_d)_{max}$  が小さいほどやや大きくなる傾向。
- 土質とCELは管理されて変動が限定された個々の現場では、 $(D_c)_t = \rho_d / (\rho_d)_{max} \sim S_r - (S_r)_{opt}$  関係の安定性は高く、一定と仮定できる

最適飽和度( $S_r$ )<sub>opt</sub>:  
 非常に広い土質に対して、  
 変動しているが、  
 平均的に、ほぼ一定  
 (NEXCO)

全国高速道路建設(2000-2017年)で行われた  
 室内締固め試験(B、E法)による( $\rho_d$ )<sub>max</sub> ~  $w_{opt}$   
 関係(データ総数6,116)

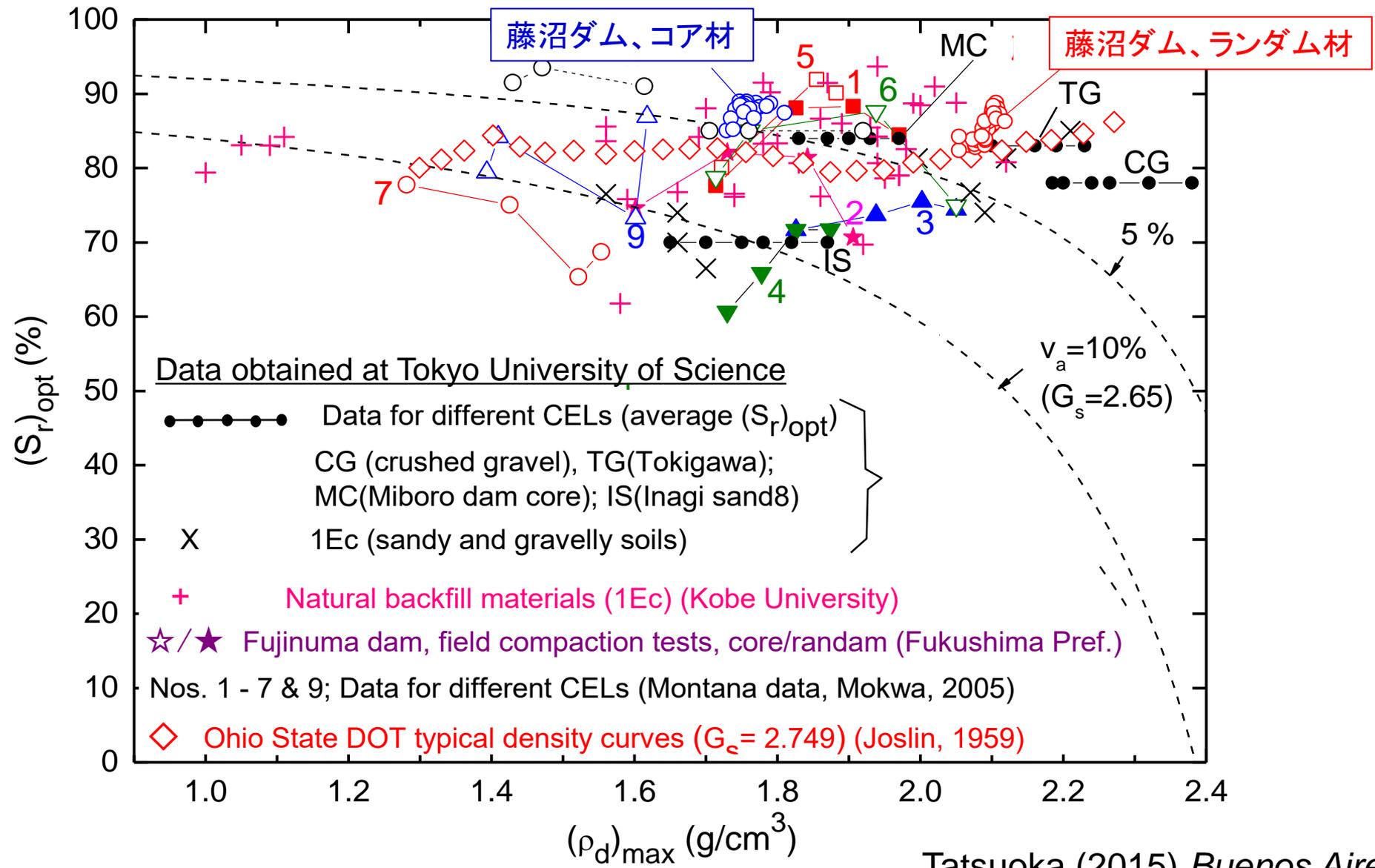


中村洋丈・日下寛彦: 突固め試験の統計分析による土質材料ごとの締固め特性、第55回地盤工学研究発表会、京都、2020.

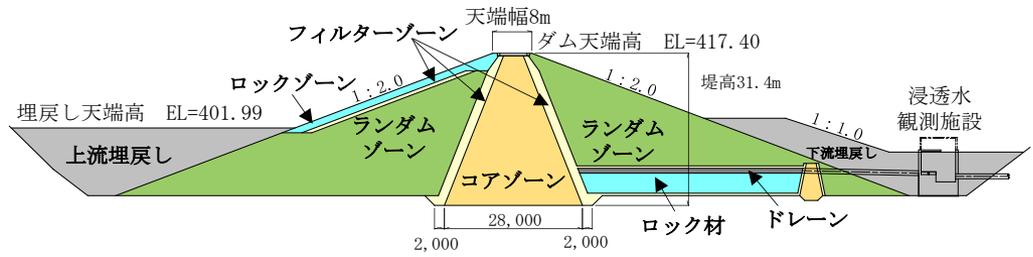
以下の報文でも同様な報告:

青山祥吾・宮下千花(2022): 盛土材の土質と締固め試験方法が締固め試験結果に与える影響、特集締固め土の物性と設計・施工管理、雑誌基礎工、4月号、40-44頁

①最適飽和度( $S_r$ )<sub>opt</sub>は、多種多様な土質とCELに対して、バラツキはあるが、全体として一定の傾向： ②個々のprojectでは、ほぼ一定

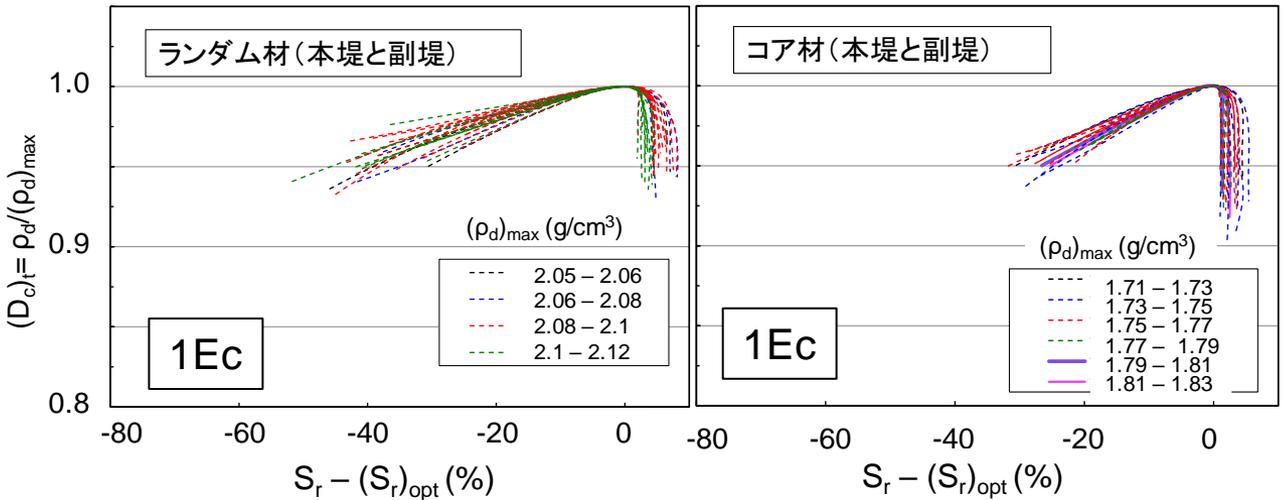
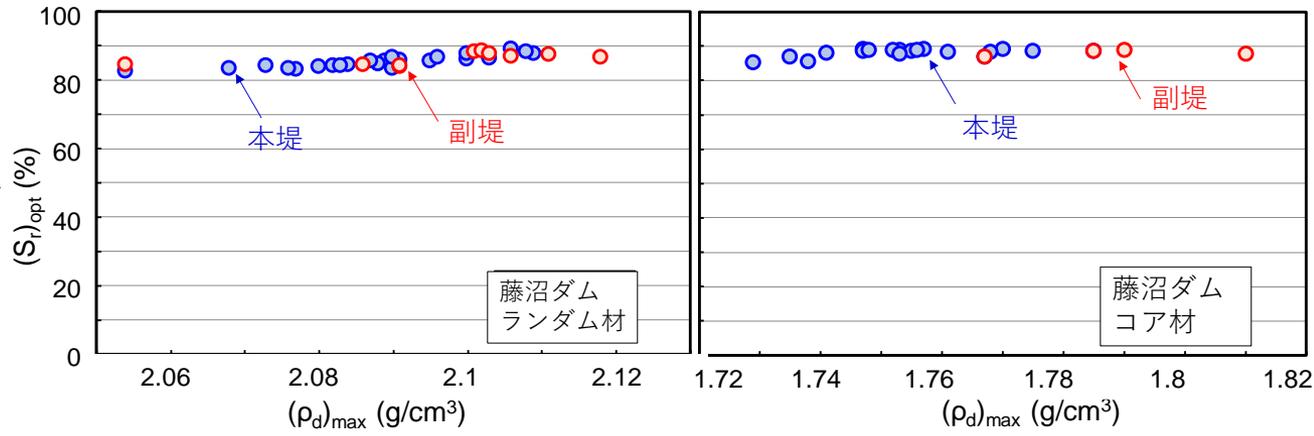


# 強化復旧した藤沼ダム



長期の建設の間、一定の範囲で土質が変化して $(\rho_d)_{max}$ は変化。しかし、コア材とランダム材のそれぞれで、最適飽和度 $(S_r)_{opt}$ と正規化締固め曲線 $(D_c)_t = \rho_d / (\rho_d)_{max} \sim S_r - (S_r)_{opt}$  関係はほぼ一定

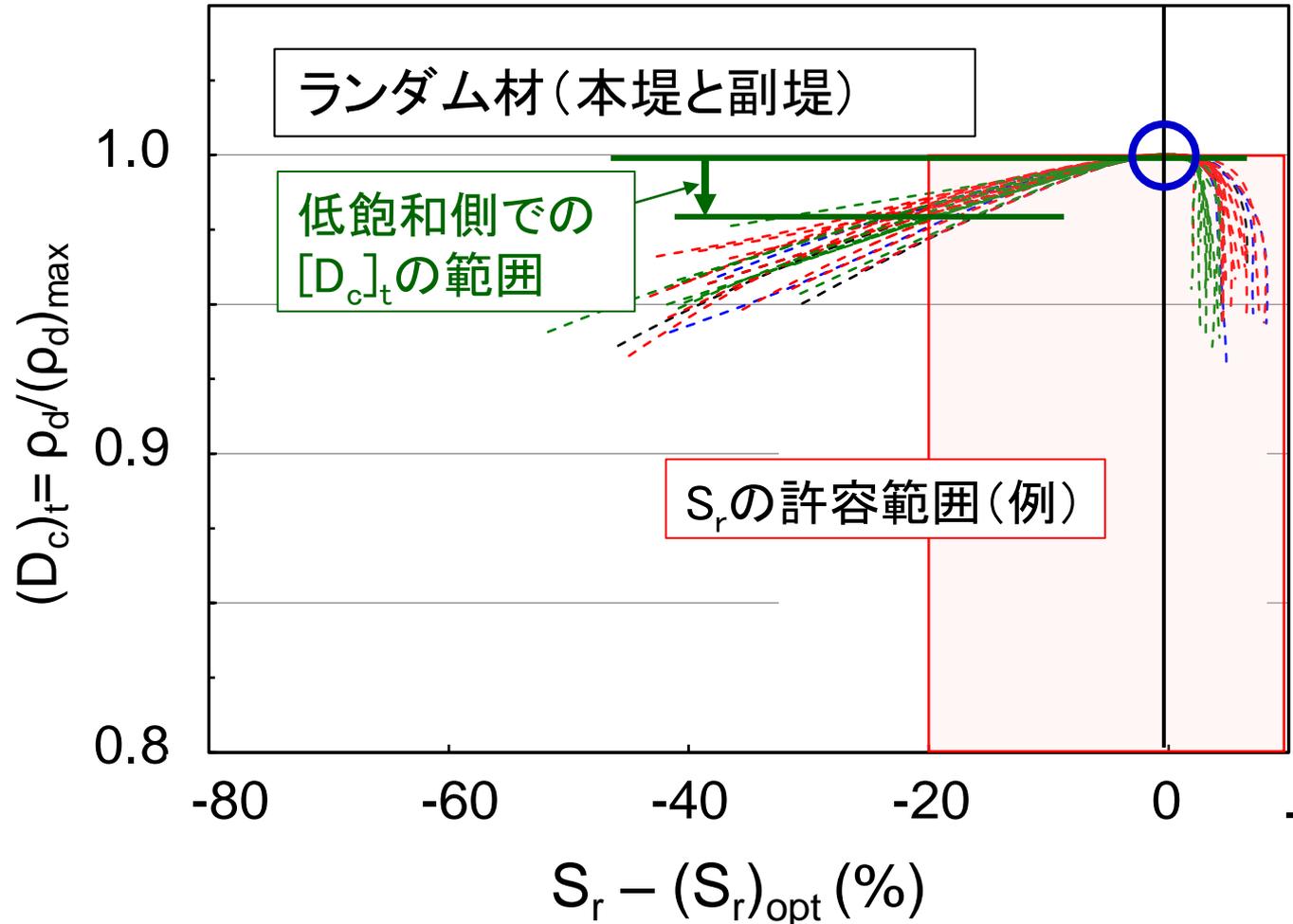
⇒それぞれの現場で、同種の土質に対して、一定と見なせる



三浦亨・龍岡文夫・田中忠次・毛利栄征・石本敏樹・三反畑勇: フィルダムでの飽和度管理を重視した締固め実施例、第53回地盤工学研究発表会、大宮, 2019.

現場 $S_r$  を  $(S_r)_{opt} - 20\% \sim (S_r)_{opt} + 10\%$  とかなり広い幅で管理した場合でも、  
 $\Rightarrow$ CELと土質に一定のばらつきがあっても、  
 低飽和度側で $S_r$ が増加する締固め過程で、  
 真の締固め度 $[D_{c,t}] = \rho_d / [\text{現在のCELでの}(\rho_d)_{max}] = 0.98-1.0$  と、  
 非常に狭い範囲で高い値を実現

$S_r \sim (S_r)_{opt}$  を実現すれば  $\rightarrow [D_{c,t}] \approx 1.0$   
 一方、現場CEL大  $\rightarrow$   
 現場 $(\rho_d)_{max}$  大  
 $\Downarrow$   
 $\rho_d = [D_{c,t}] \cdot (\rho_d)_{max} \approx (\rho_d)_{max}$  大  
 $\Downarrow$   
 締固め管理指標  
 $[D_{c,t}]_{1Ec} = \rho_d / [(\rho_d)_{max}]_{1Ec}$   
 を大きく保てる

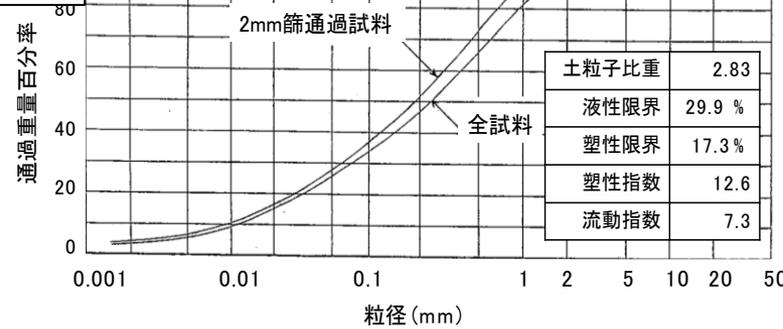


# 強度・剛性も、乾燥密度と飽和度の関数

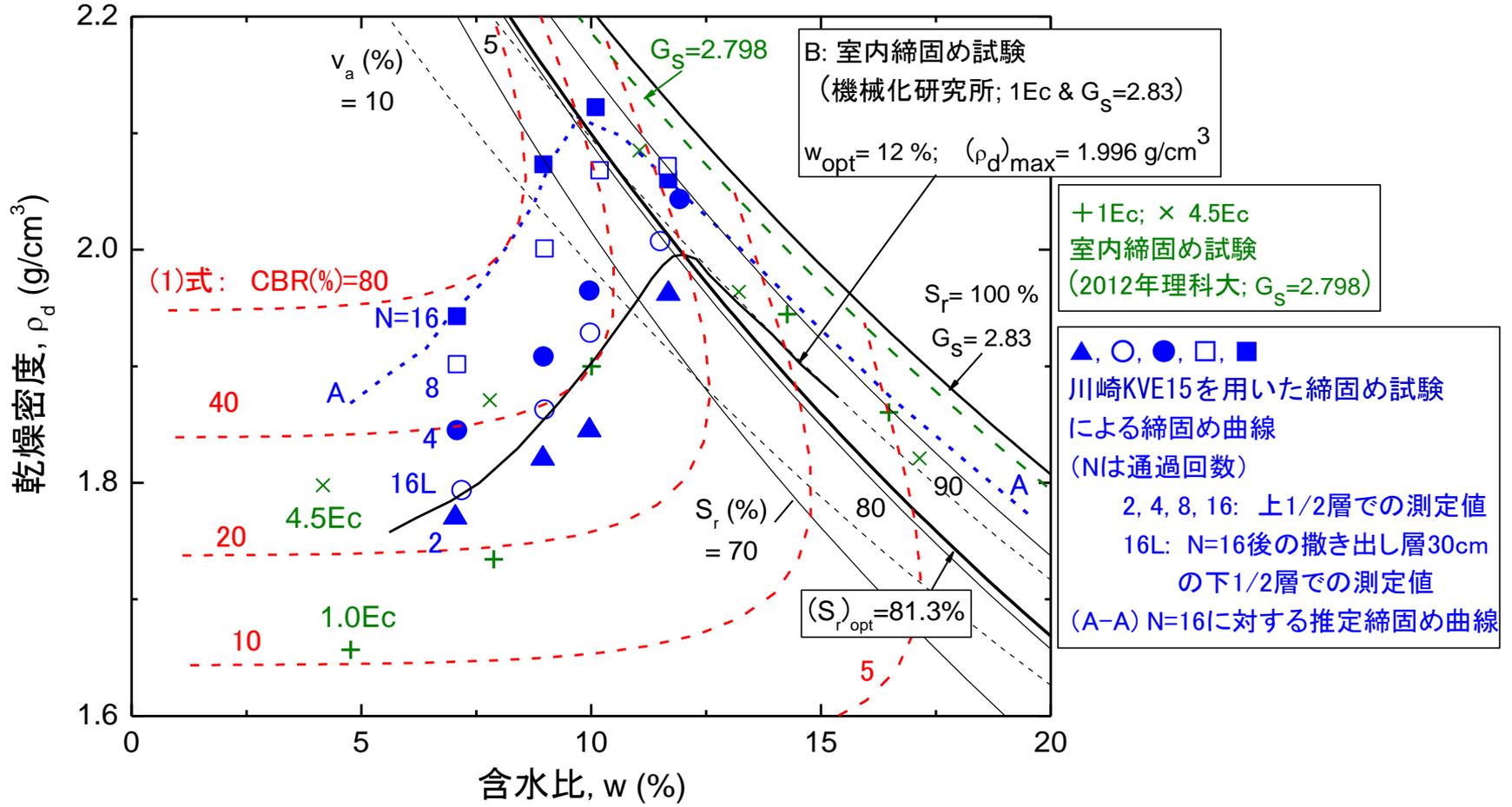
## 旧建設機械化研究所での実大締固め試験 (1965-1990年)： 178もの試験土層で実験！

(原データ)根本忠・佐々木隆男: 土の締固め特性, 創立303周年論文集, 建設機械化研究所, pp.45-58, 1994.

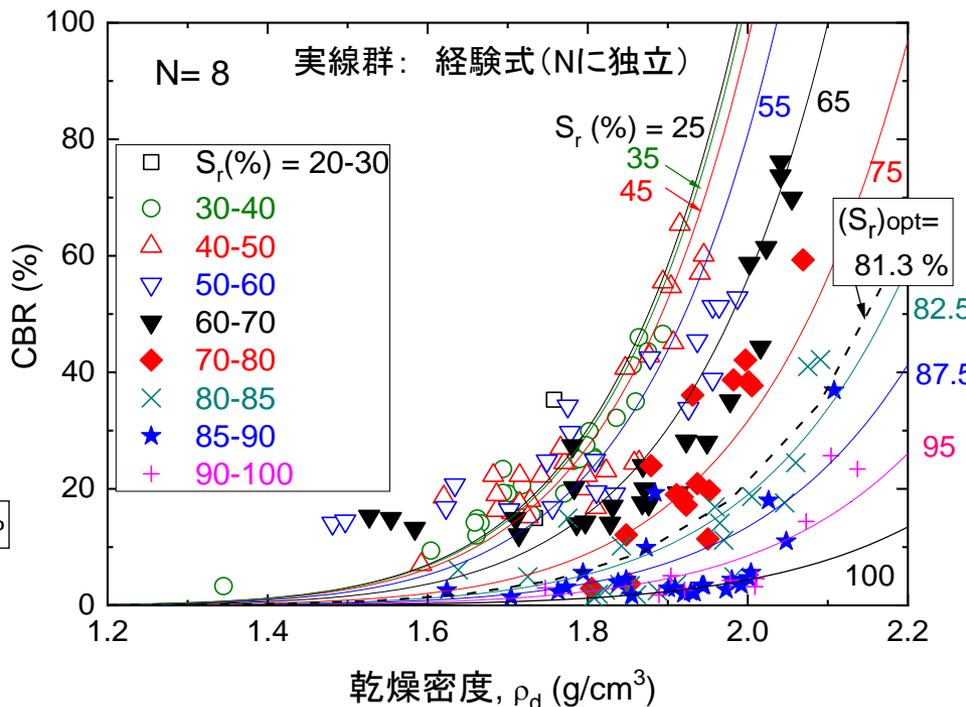
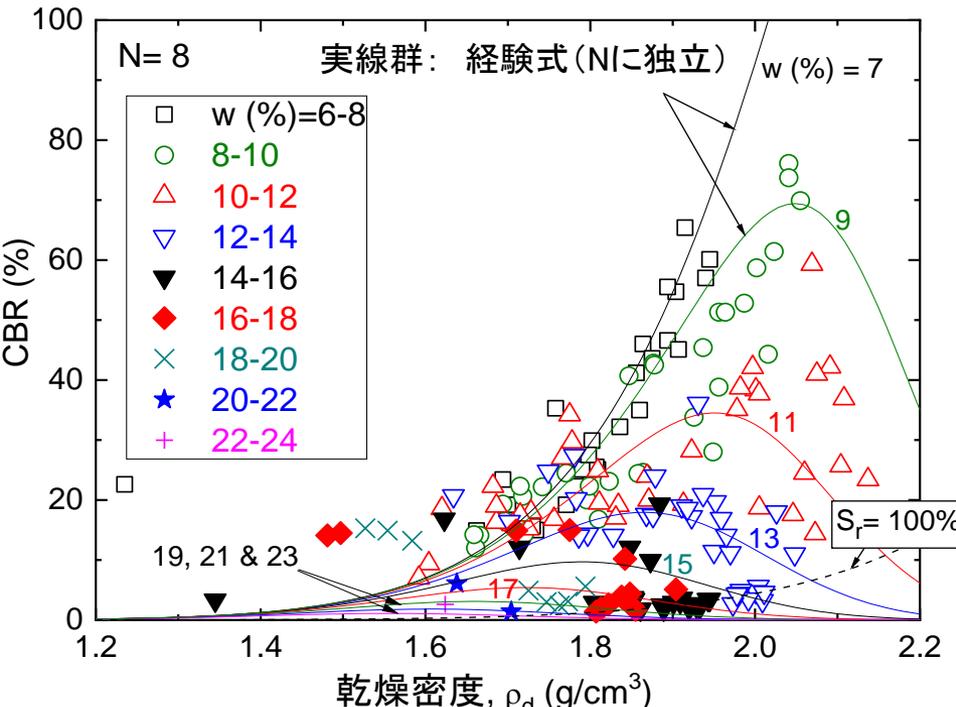
### 砂質ローム



## (典型的結果) 特定の締固め機械を用いて、四種の含水比で締固めた場合



# 様々な含水比で作製した178の試験土層で、大型振動ローラ等の44種の締固め機械を用いた実大締固め試験(旧建設機械化研究所)



施工機械通過回数N=8での含水比wをパラメータとしたCBR~ $\rho_d$ 関係

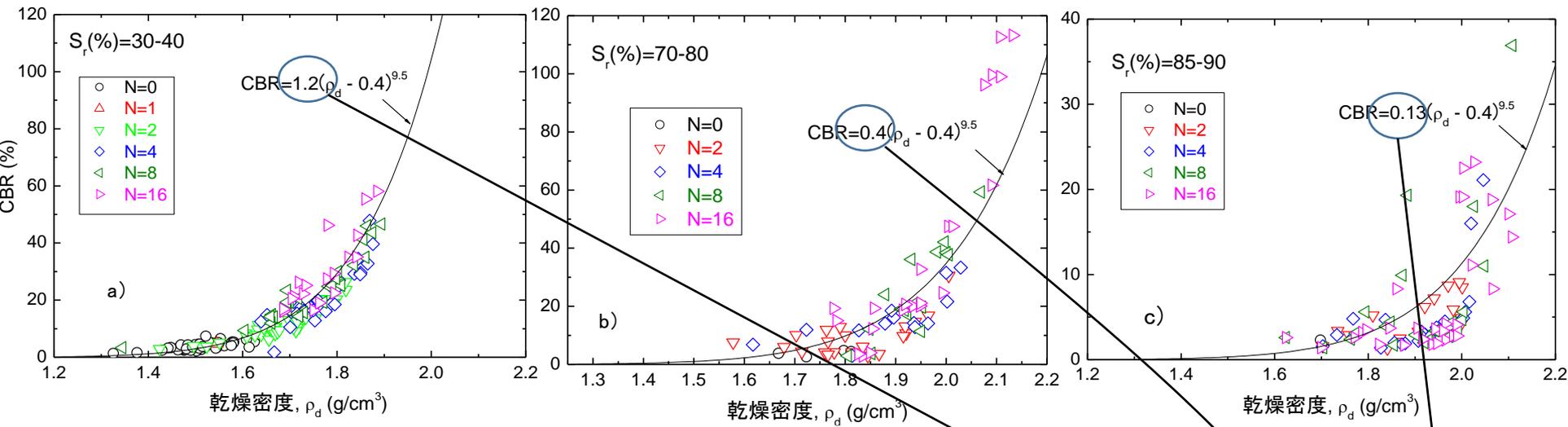
- ・CBR~ $\rho_d$ 関係は、wに強く影響される  
⇒ CBRだけでは、 $\rho_d$ を推定できない
- ・w > 10%では、w一定で $\rho_d$ がある値以上に増加すると CBRは減少(これは、 $\rho_d$ の増加に伴う $S_r$ の増加のため)

飽和度 $S_r$ をパラメータとしたCBR- $\rho_d$ 関係

- ・ $S_r$ 一定で $\rho_d$ が増加すると、  
⇒ CBRは常に同じ法則性で増加
- ・ $\rho_d$ 一定で $S_r$ が増加すると、  
⇒ CBRは常に同じ法則性で減少、  
 $S_r > 60 \sim 70\%$ で急減  
⇒  $S_r$ が本質的なパラメータ

締固め機械の重量, 通過回数N等の諸条件が異なりCELが異なっても、

- ①同じ $S_r$ ならば、 $CBR \sim \rho_d$ 関係は同一、
- ②この関係の形状は $S_r$ が異なっても同一
- ③この関係の係数は、 $S_r$ が増加すると低下！



CBRは、「CELに関わらず、 $\rho_d$ と $S_r$ を変数とした分離関数の積である(1)式」で表現できる:

$$CBR = f_{CBR}(S_r) \cdot (\rho_d / \rho_w - b)^c \quad (1)$$

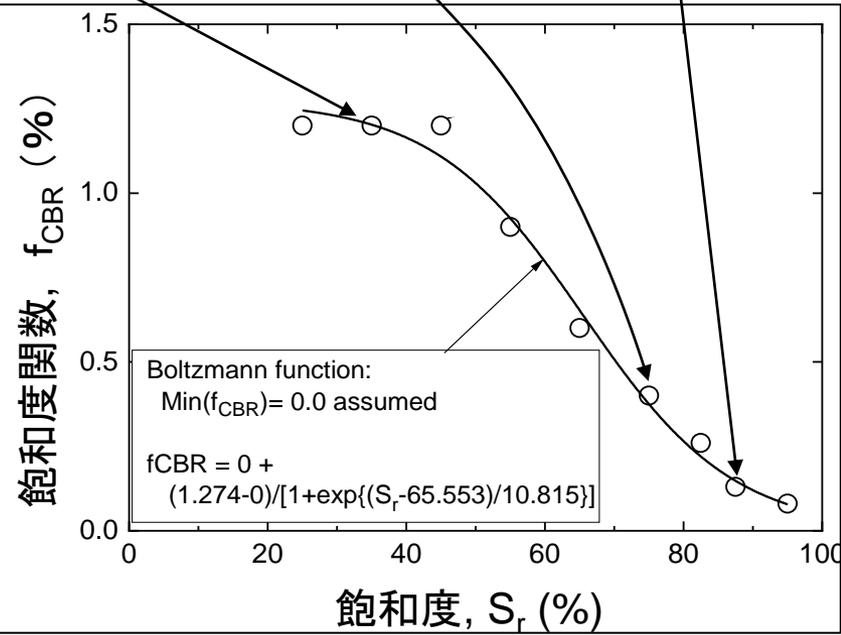
$f_{CBR}(S_r)$ :  $S_r$ の単調減少関数

$(\rho_d / \rho_w - b)^c$ :  $\rho_d$ の単調増加関数

$\rho_w$ : 水の密度

$b = 0.4$ ;  $c = 9.5$  (土の種類等の関数)

・wを変数とすると、非常に複雑な式になる

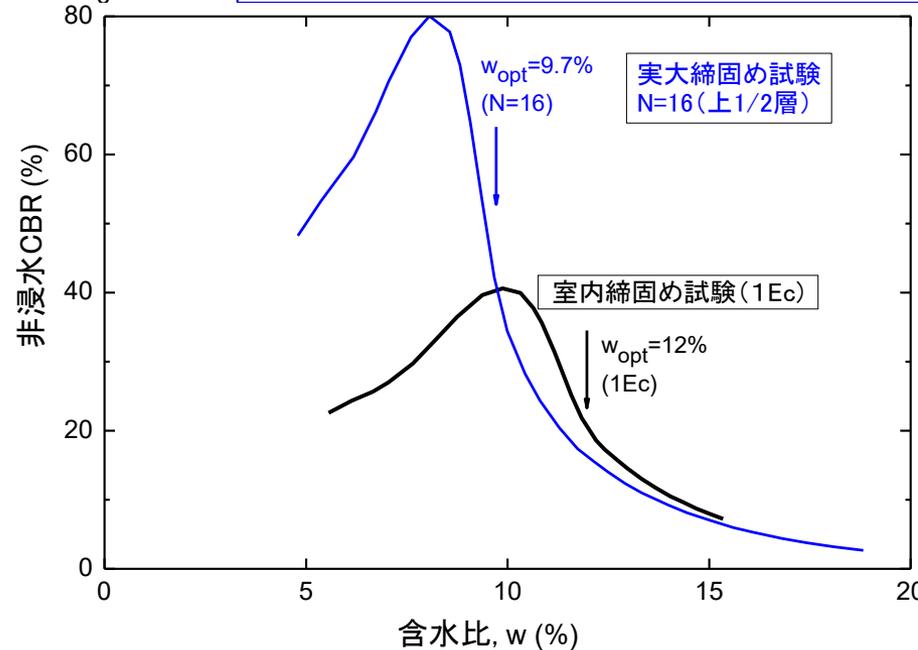
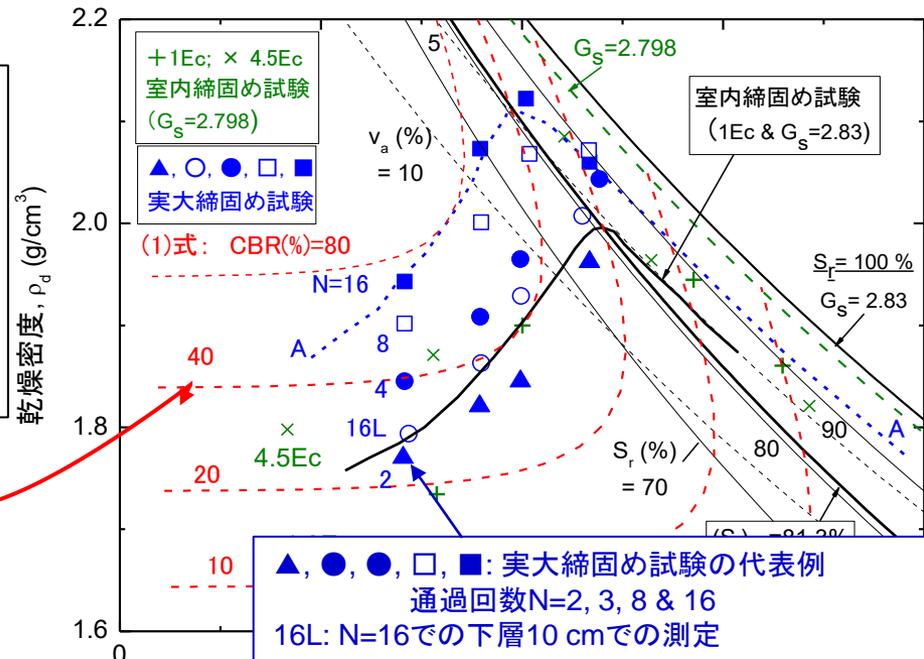


$$\text{CBR} = f_{\text{CBR}}(S_r) \cdot (\rho_d / \rho_w - b)^c \quad (1)$$

→  $\rho_d \sim w$ 面上でのCBRの等高線群

→ CEL一定 (1Ecの室内締固め試験と  
N=16の実大締固め試験)で得られ  
た締固め曲線に沿ったCBR~w曲線

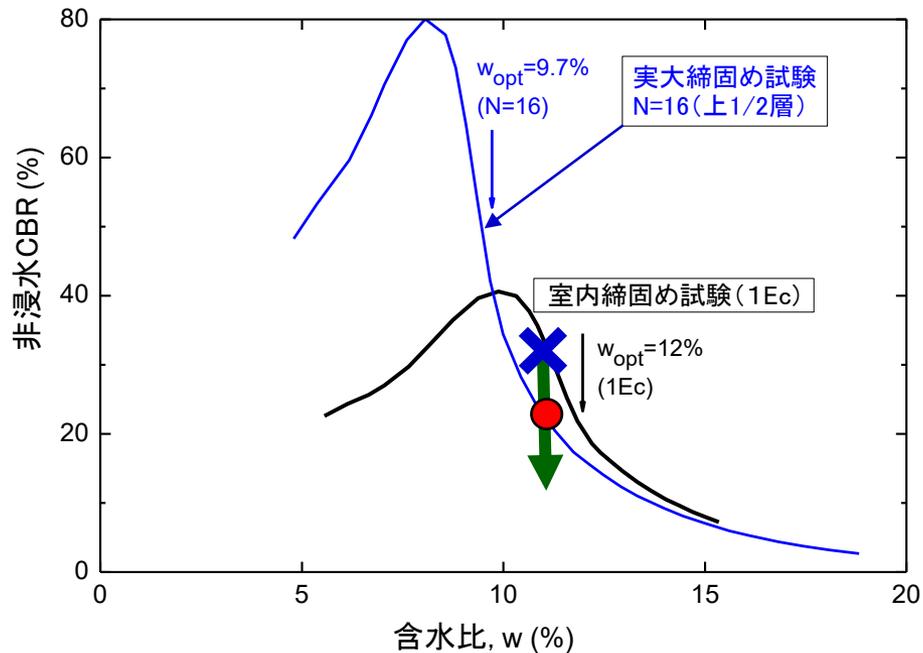
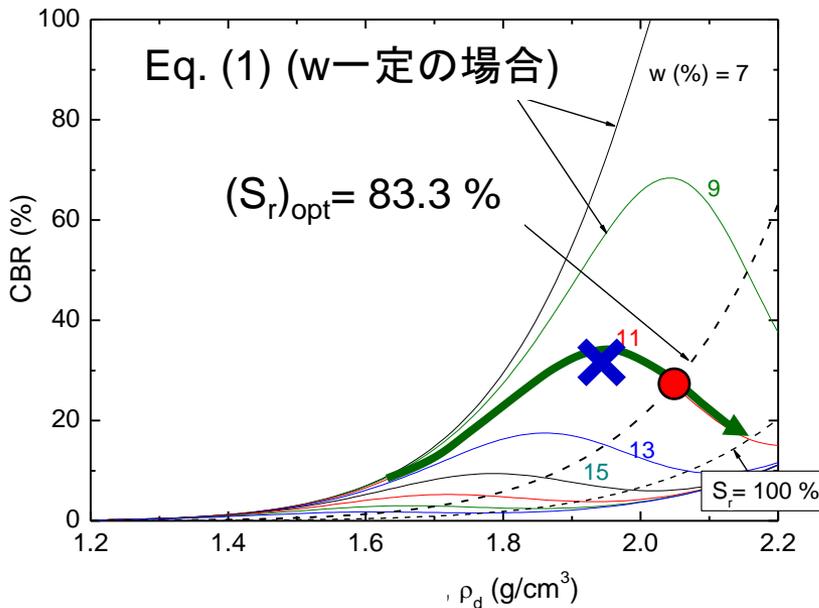
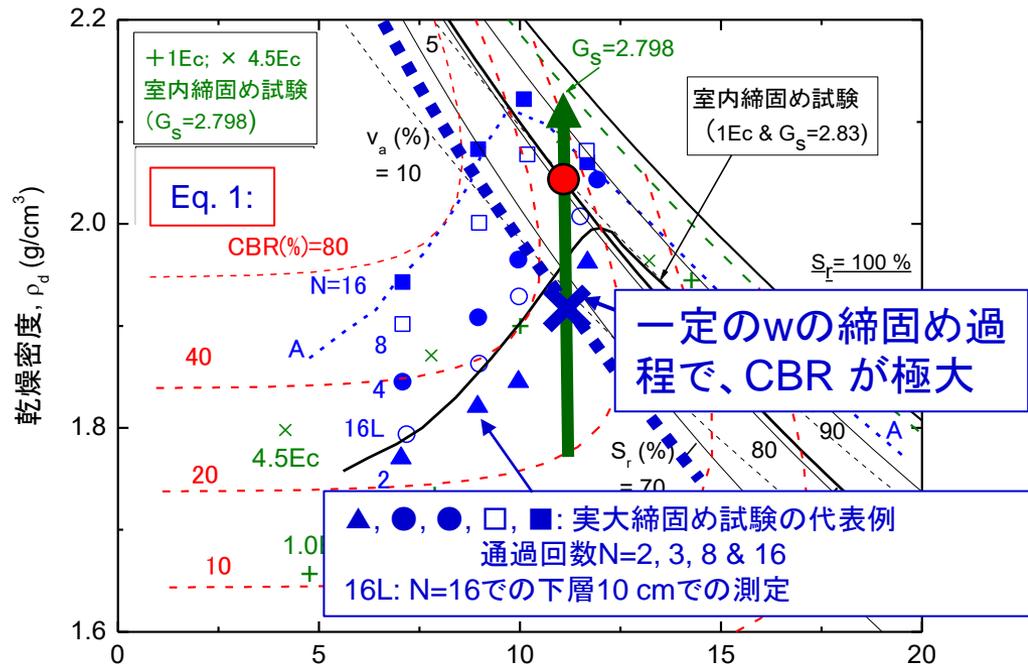
Tatsuoka, F., Hashimoto, T. and Tateyama, K.:  
Soil stiffness as a function of dry density and the  
degree of saturation for compaction control, *Soils  
and Foundation*, Vol.61, pp.989-1002, 2021.



w一定の締固め過程では、

- ・点xで、CBRは極大
- ・その後CBRは減少して、点●で  $(\rho_d)_{max}$  と  $(S_r)_{opt}$  が得られる

⇒「CBRが大きくなるほど締固めが良くなる」のではない



# 締固め時の水浸前CBRと 水浸後CBR値(供用時の地盤剛 性の指標)の比較

CELに関わらず……

$S_r < (S_r)_{opt}$ : 非水浸状態では強度は  
高い、しかし水浸で大きく低下

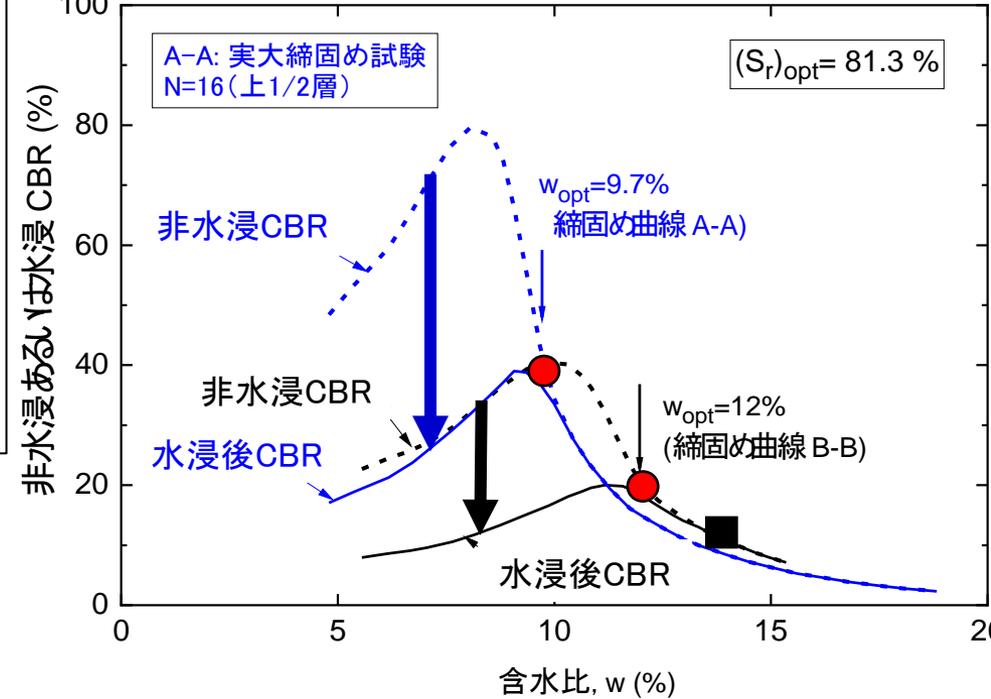
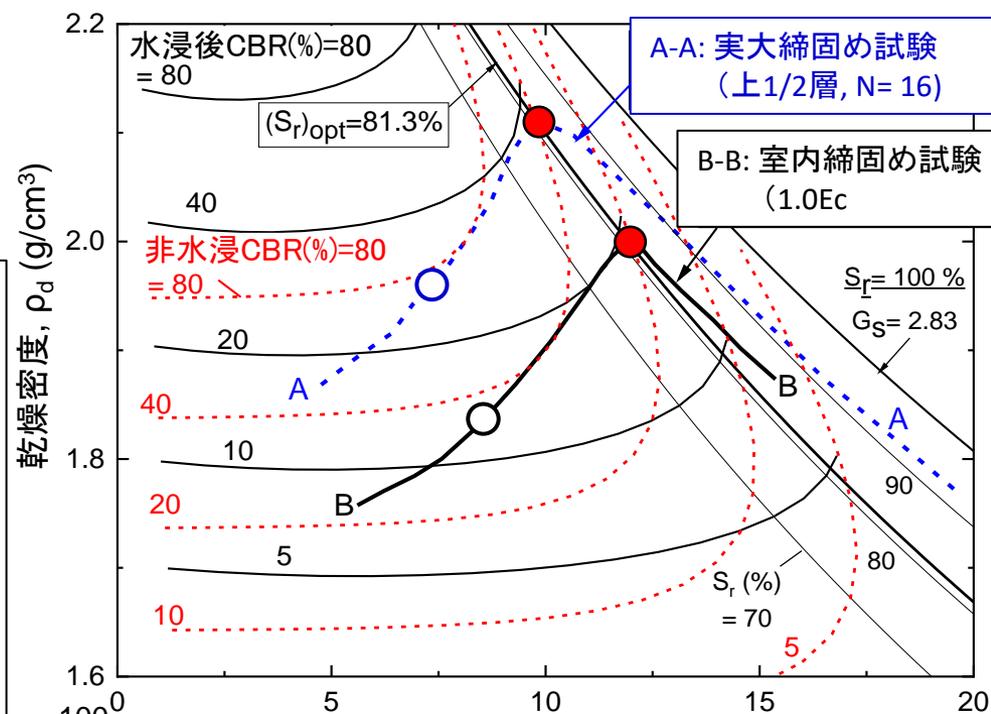
$S_r \sim (S_r)_{opt}$ : 水浸による強度低下は  
小さく、水浸後の強度は高い

$S_r > (S_r)_{opt}$ : 水浸による強度低下は  
殆どないが、常に強度は低すぎる

・Proctorは、締固め直後の強度・剛性を  
信用せず、 $(\rho_d)_{max}$ の実現を目指す締  
固め管理の意義を強調

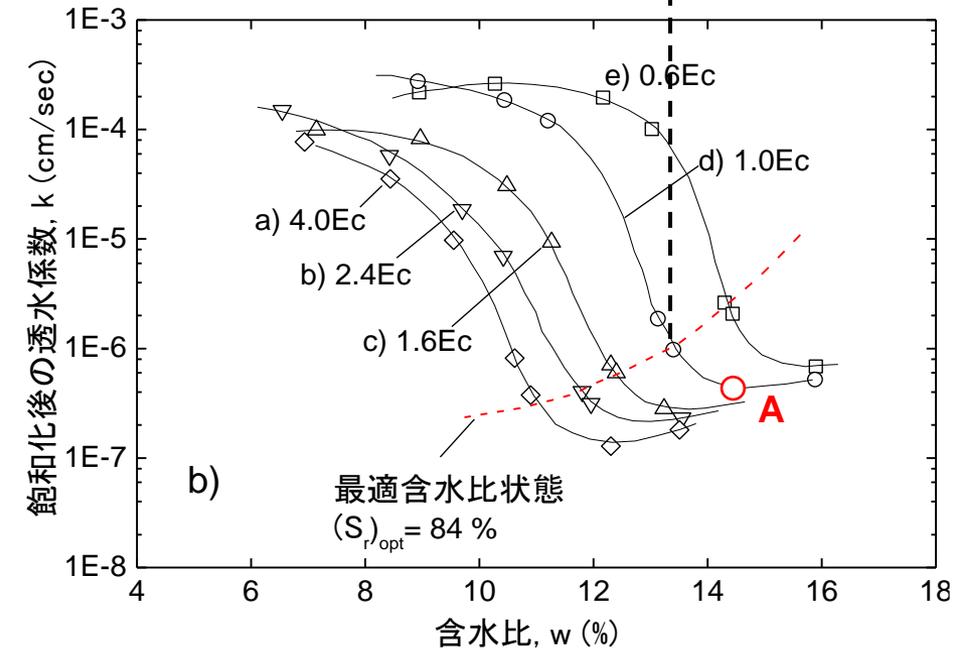
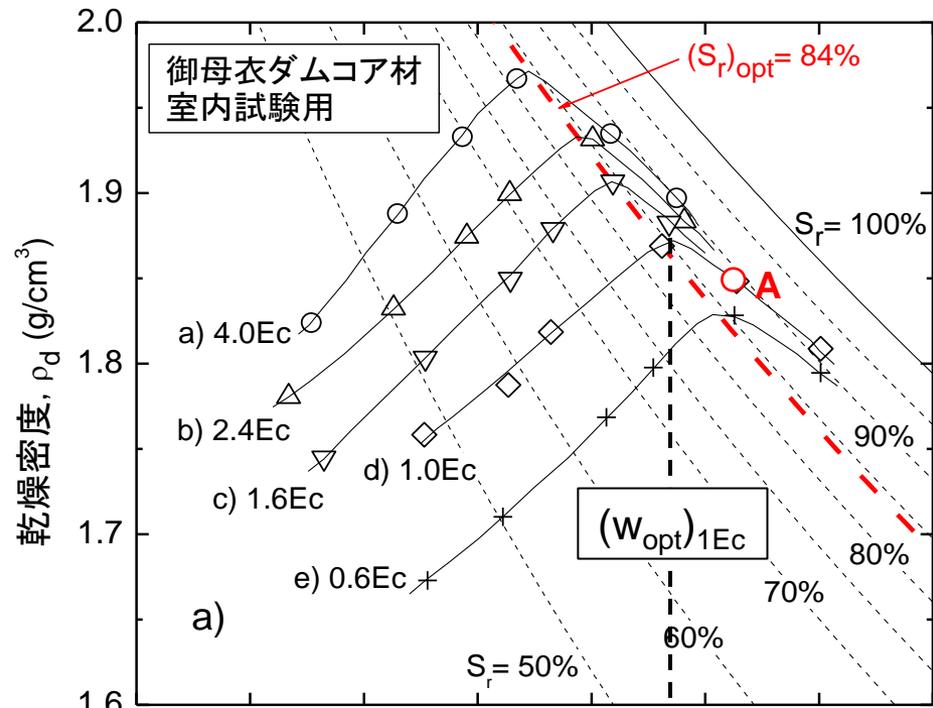
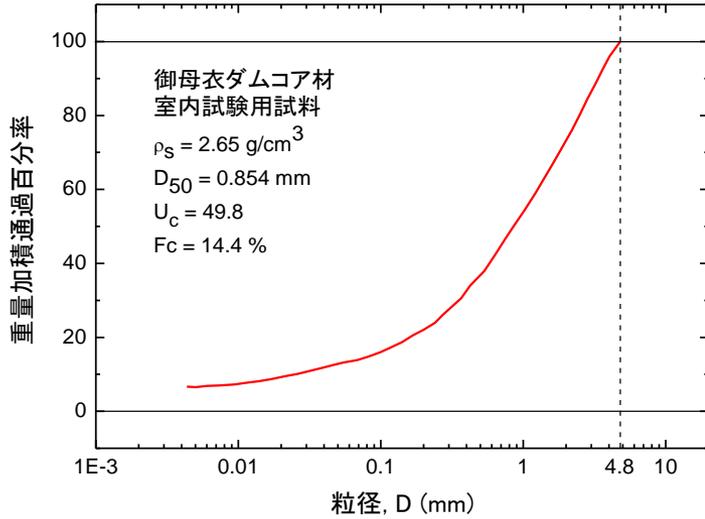
・この意義は「久野悟郎(1972):土の締固  
め、土と基礎 20-6: 5-10頁」でも強調

⇒最適飽和度  $(S_r)_{opt}$  状態は、CEL  
によらず、適切な締固め目標



# 御母衣ダムコア材の 室内締固め試験と透水試験

三国英四郎(1962): フィルダムしゃ水壁材料の性質と締固めに関する研究(その1)、土と基礎、10(1): 3-12



● 1Ecでの締固めでは、湿潤側の点Aで「飽和化後透水係数k」は極小

→ 従来の通常の遮水盛土の締固め管理:

- ・ 1Ecでの最適含水比  $(w_{opt})_{1Ec}$  よりも乾燥側での施工は許容しない

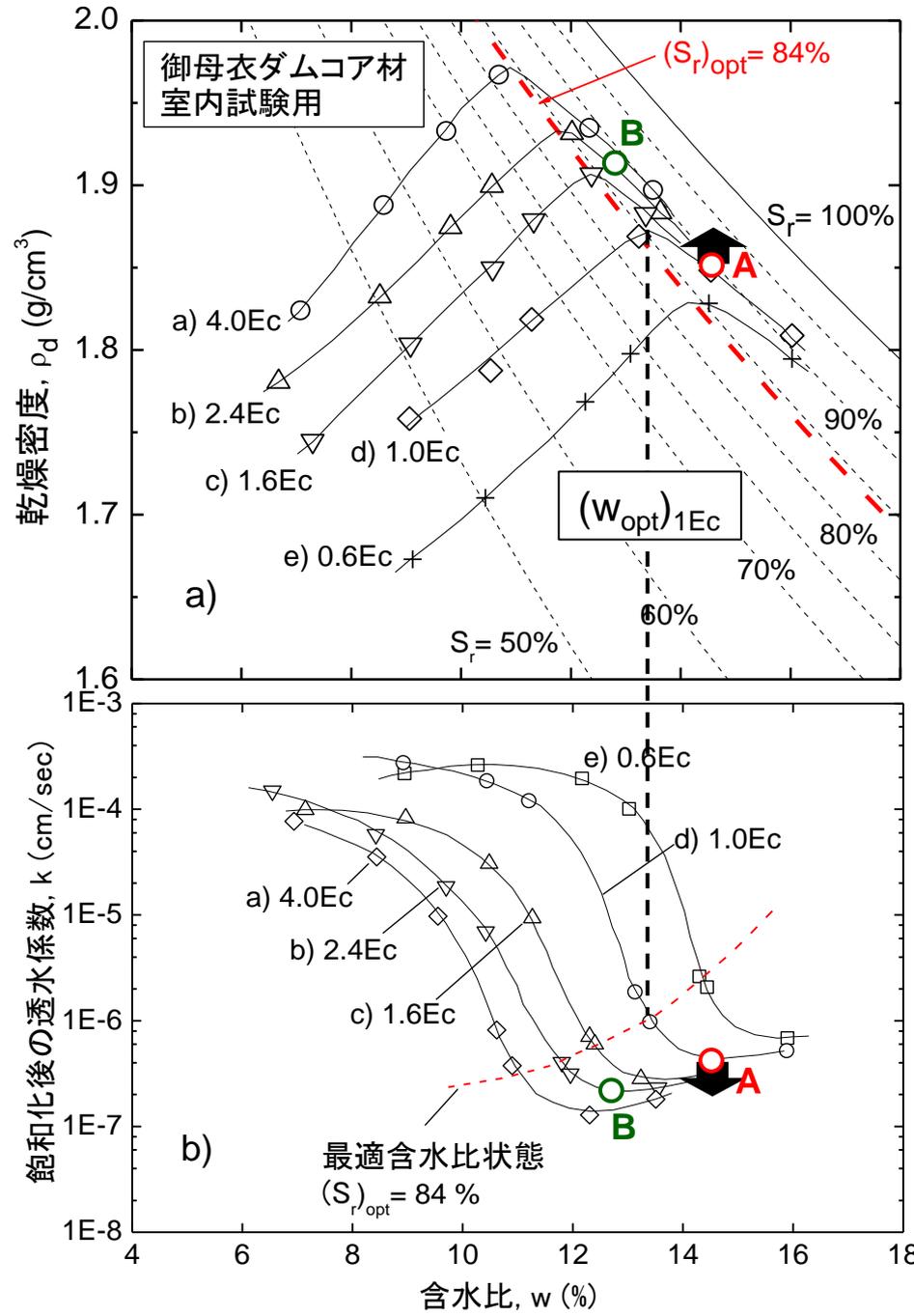
- ・ A点:  $w = (w_{opt})_{1Ec} + 2\%$  程度で施工

しかし、この規定は合理的か?

近年、 $1E_c$ を超える $CEL_f$ での施工は容易になった。しかし、点Aの $w$ で $1E_c$ を超える $CEL_f$ によって施工をすると、 $\rho_d$ は微増、 $k$ は微減するだけ、過転圧の危険性もある

仮に、 $CEL = 2.4E_c$ で施工した場合、点Bでは、 $w < (w_{opt})_{1E_c}$ であるが、より大きな $\rho_d$ と、より小さな $k$ が得られる

⇒現場 $CEL = 2.4E_c$ が容易ならば、点B、もしくはその周辺が合理的な施工目標



そもそも、夫々の締固め曲線に沿った  
“飽和化後 $k \sim$ 締固め時 $w$ ”曲線は、

1) CELに依存  $\Rightarrow$  通常現場のCELは不明

$\Rightarrow k$ 管理の基本情報である

現場 $k \sim w$ 曲線は不明！

2)  $\log(k) \sim (w, \rho_d)$ 関係は非常に複雑

$\Rightarrow$  法則性を把握できない

$\Rightarrow$  十分小さい飽和化後 $k$ の実現を目指

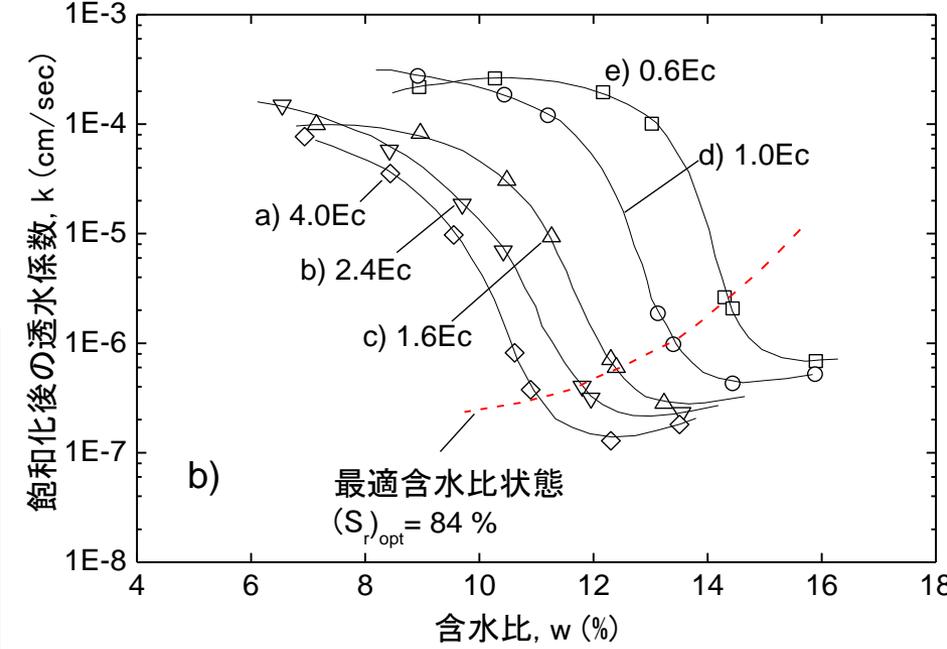
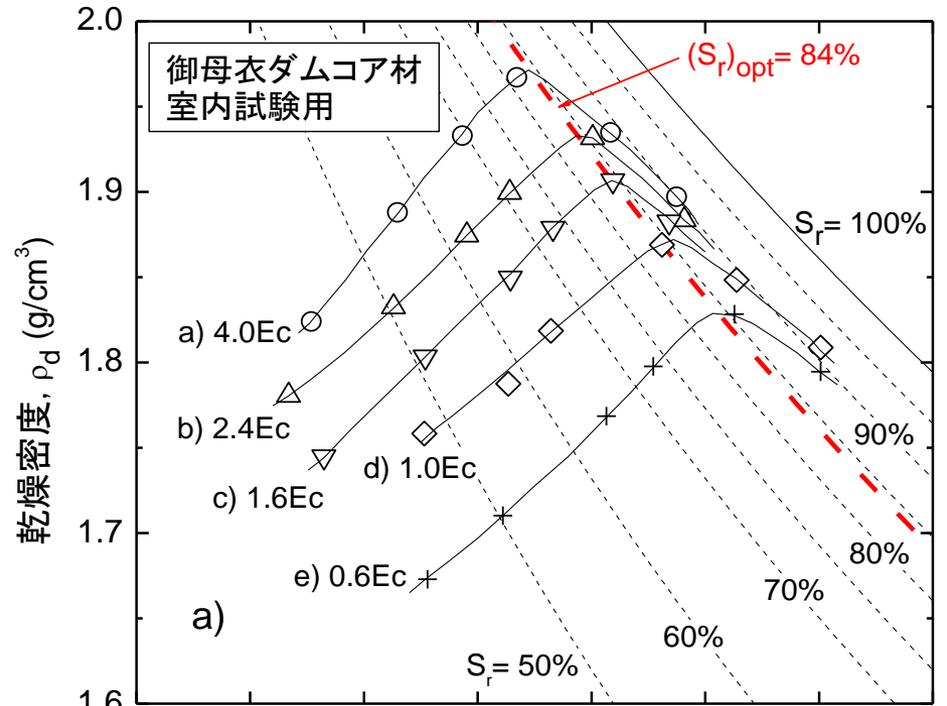
す締固め管理は、含水比 $w$ に基づく

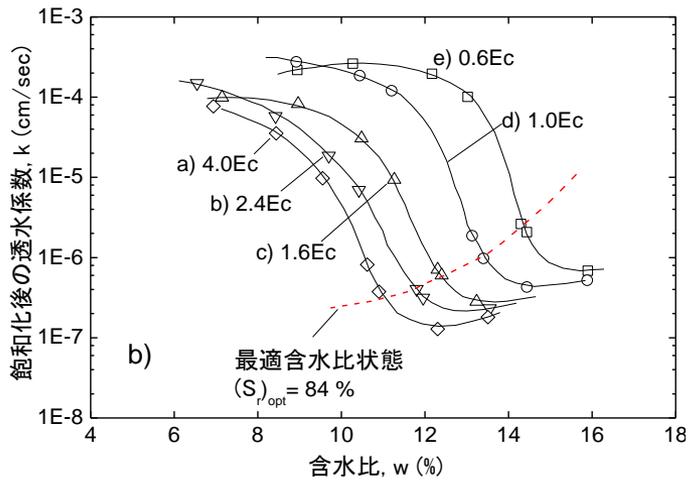
複雑になる

一方、 $k \sim (S_r, \rho_d)$ 関係は簡明で  
CELに独立！

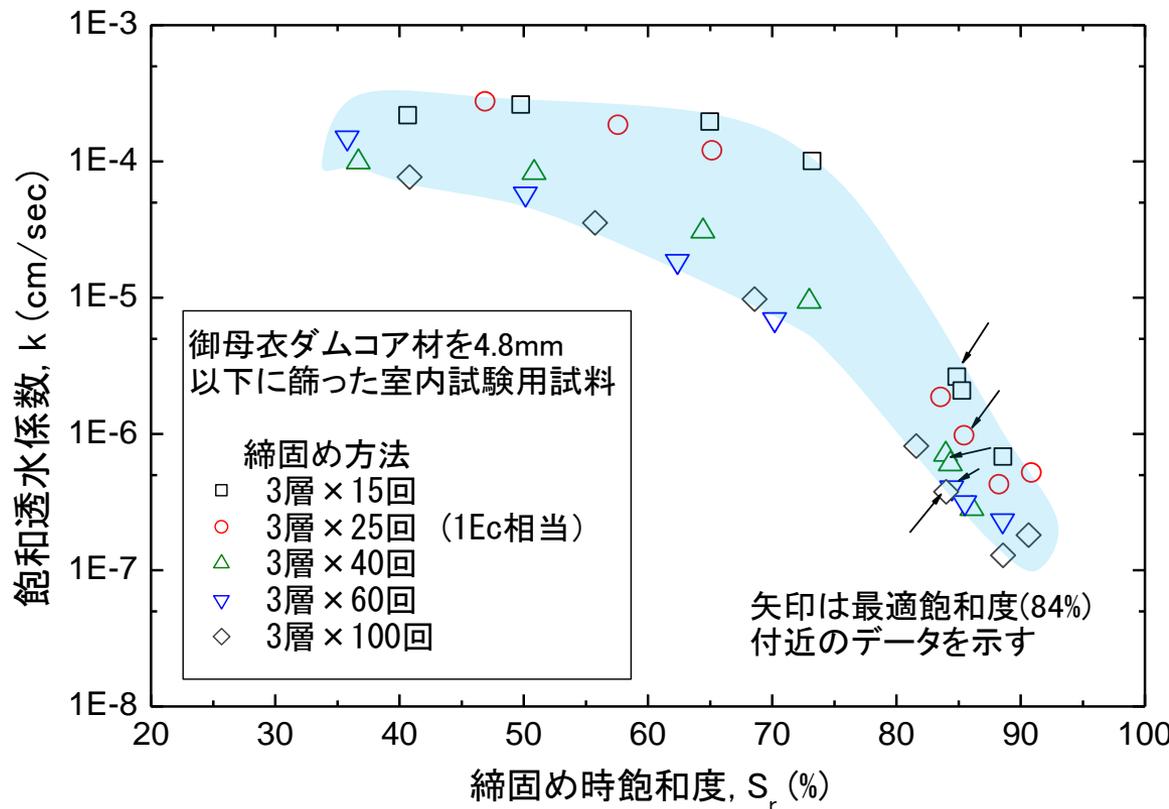
$\Rightarrow$  締固め管理は、 $S_r$ に基づく

と簡明で効率的になる





それぞれのEcにおける締固め曲線に沿ったk - w関係は、非常に複雑であるが.....



k -  $S_r$  関係は簡明:

- $S_r > 70\%$  → kは急減(最大1/1,000倍も)、という明白な法則性
- データのばらつきは、乾燥密度 $\rho_d$ のばらつきによるもの

Tatsuoka, F. (2015): Compaction characteristics and physical properties of compacted soil controlled by the degree of saturation, *Proc. 15<sup>th</sup> Pan-American Conf. on SMGE & 6<sup>th</sup> IC on Deformation Characteristics of Geomaterials*, Buenos Aires, 40-76.

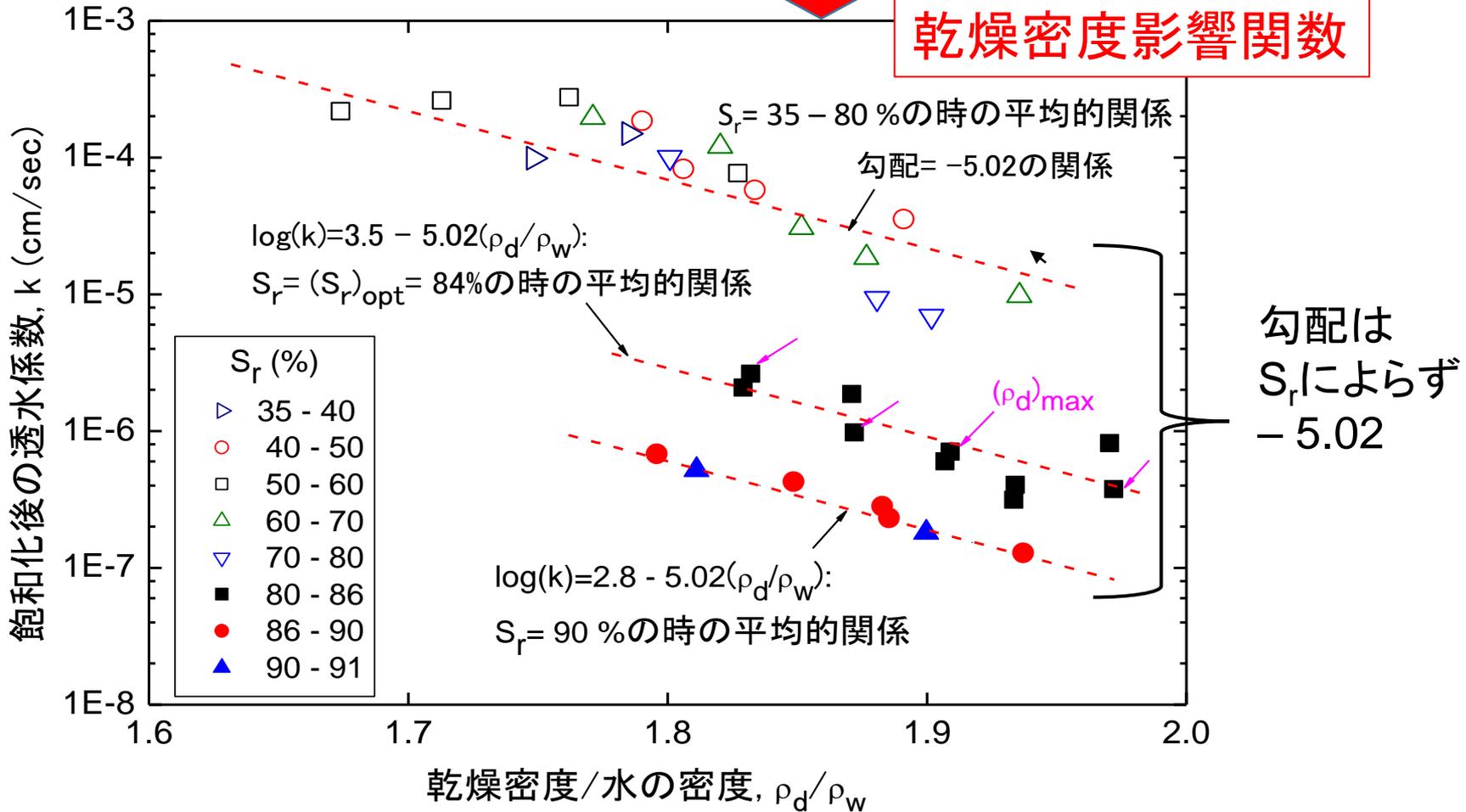
Tatsuoka, F. & Gomes Correia, A. (2018): Importance of controlling the degree of saturation in soil compaction linked to soil structure design, *Transportation Geotechnics* 17, 3-27.

飽和化後kは( $\rho_d$ , 締固め時 $S_r$ )の簡明な関数、  
CELを変数として含まない

$$k = f_k(S_r) \cdot 10^{5.02 \cdot (1.872 - \rho_d / \rho_w)}$$

$$\log k = \log f_k(S_r) + 5.02 \cdot (1.872 - \rho_d / \rho_w)$$

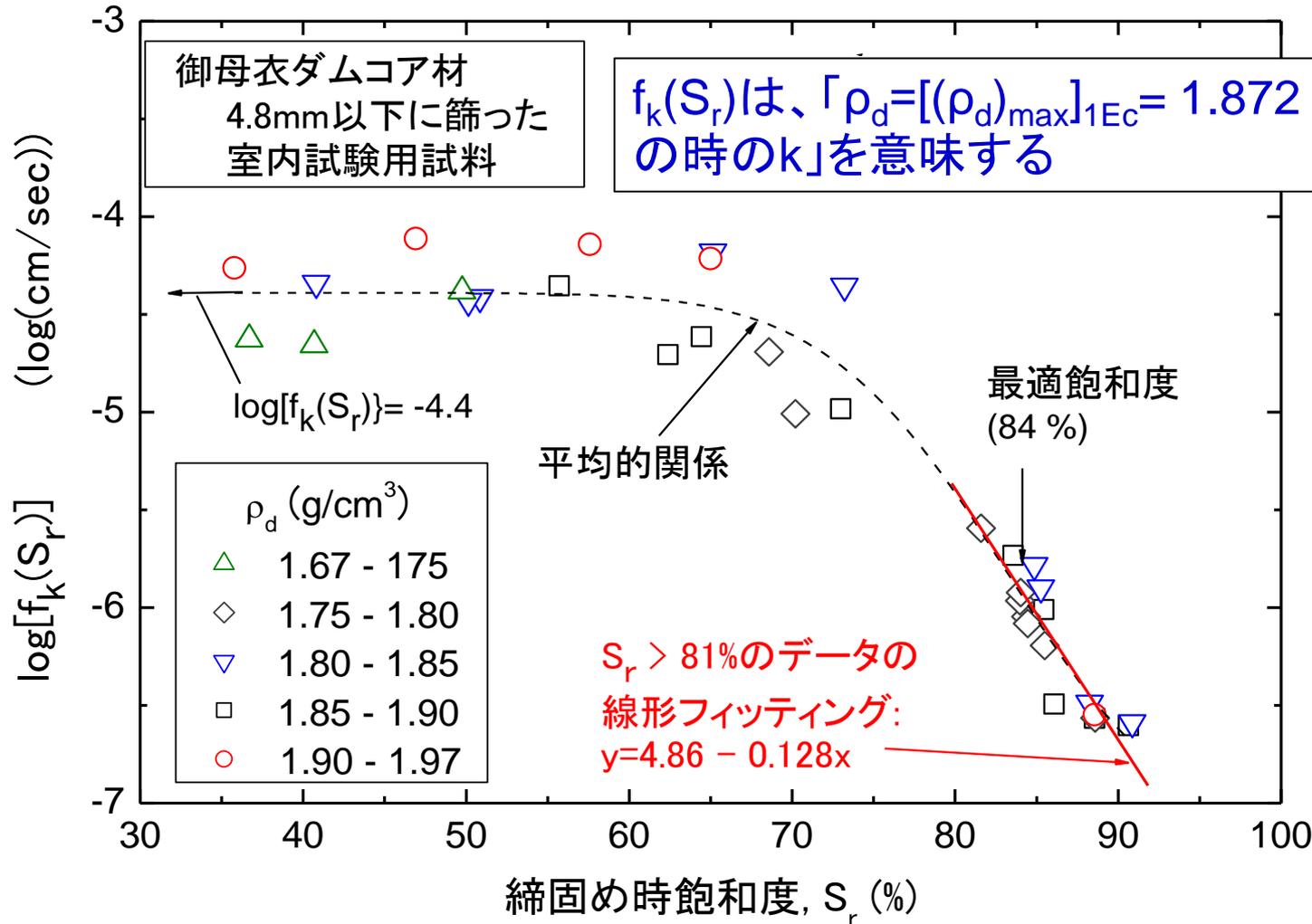
乾燥密度影響関数



# 飽和度影響関数

$$k = f_k(S_r) \cdot 10^{5.02 \cdot (1.872 - \rho_d / \rho_w)}$$

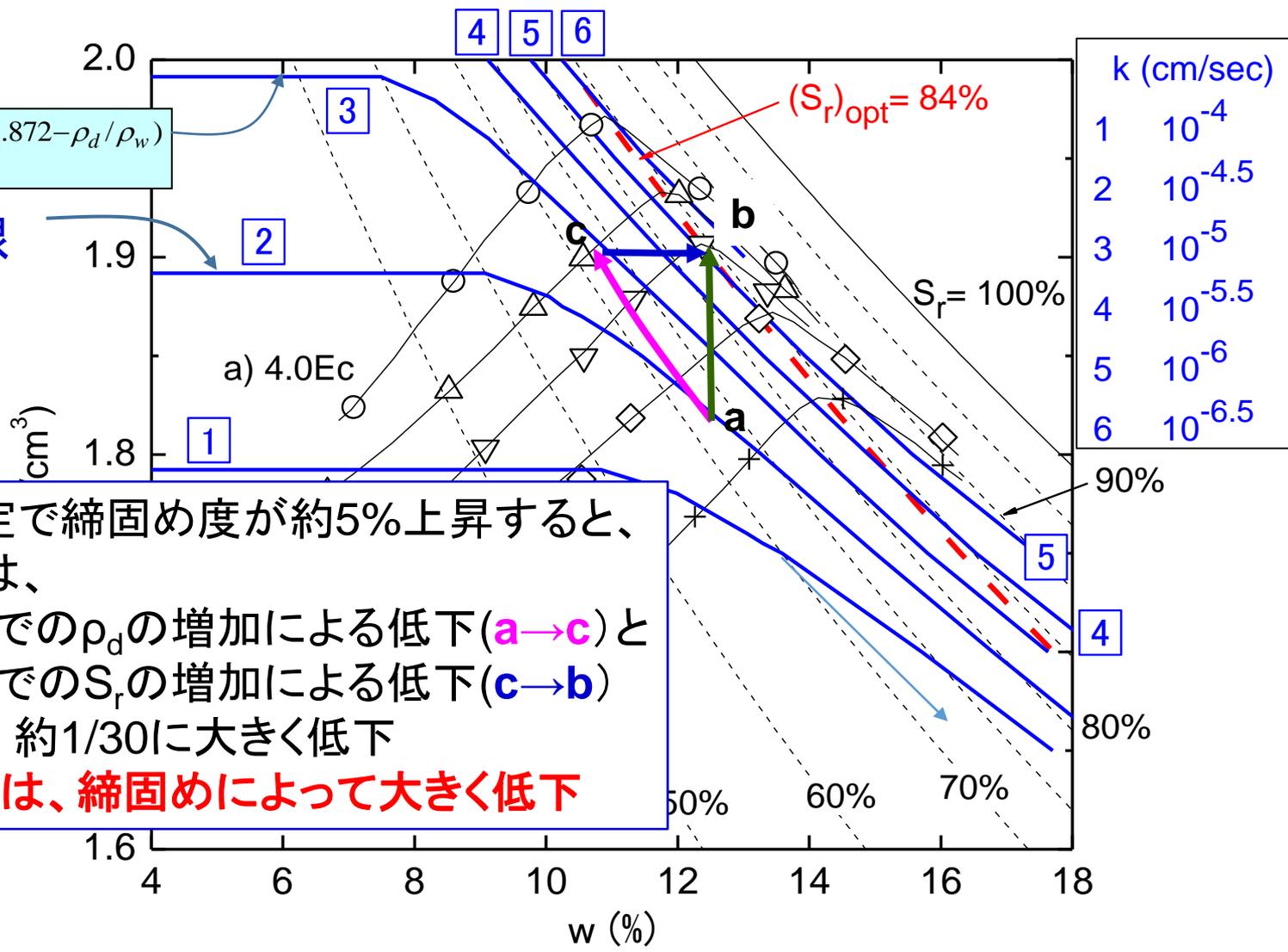
$$\log k = \log f_k(S_r) + 5.02 \cdot (1.872 - \rho_d / \rho_w)$$



$k$ は、CELを変数として含まない( $\rho_d, S_r$ )の簡明な関数  
→現場CELが不明でも、この式によって $\rho_d$ と $S_r$ の測定値から $k$ の値を推定できる。

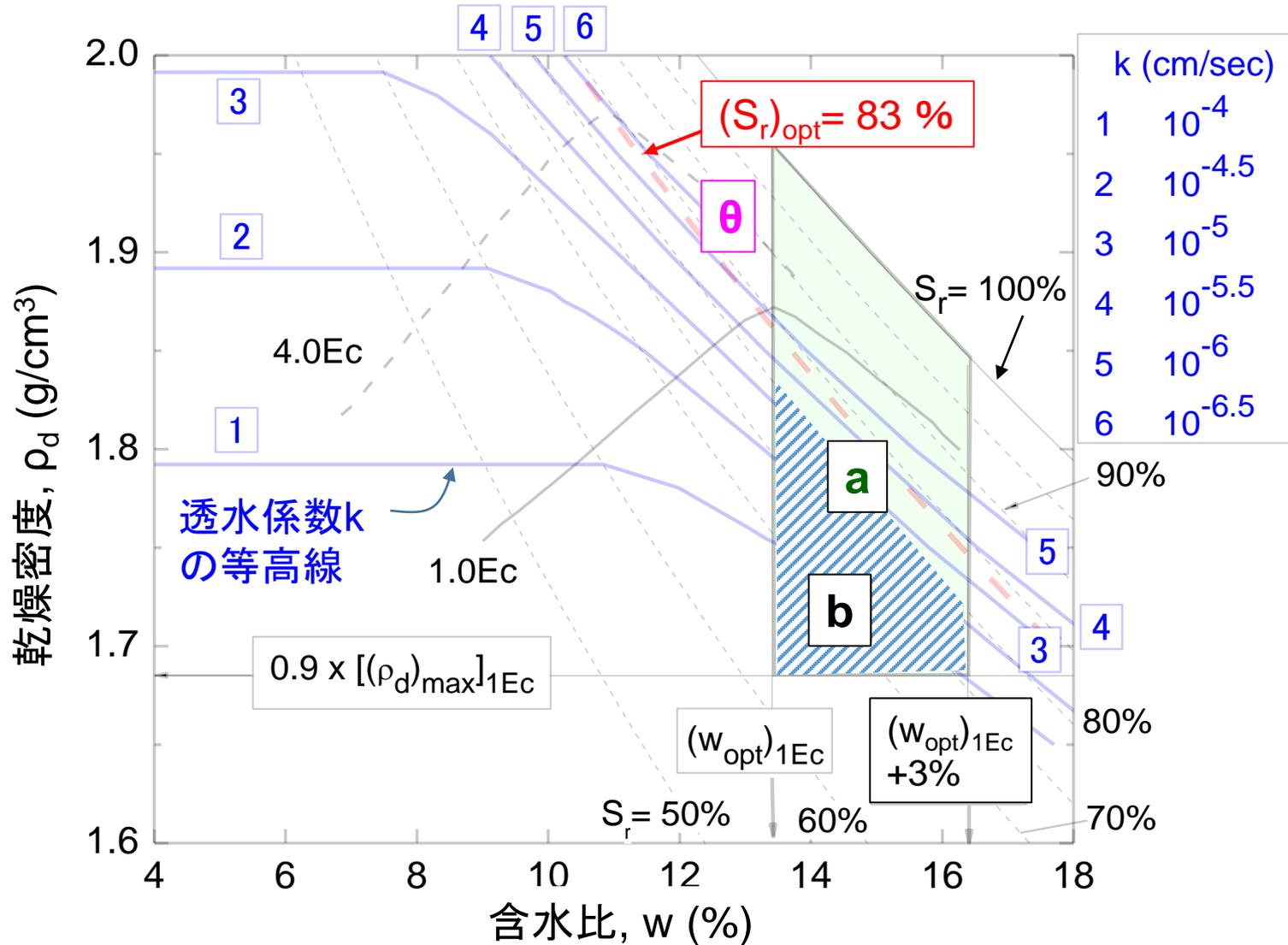
$$k = f_k(S_r) \cdot 10^{5.02 \cdot (1.872 - \rho_d / \rho_w)}$$

に基づく等高線



**a→b:** w一定で締固め度が約5%上昇すると、  
 透水係数kは、  
 ①一定の $S_r$ での $\rho_d$ の増加による低下(a→c)と  
 ②一定の $\rho_d$ での $S_r$ の増加による低下(c→b)  
 が重畳して、約1/30に大きく低下  
**⇒透水係数は、締固めによって大きく低下**

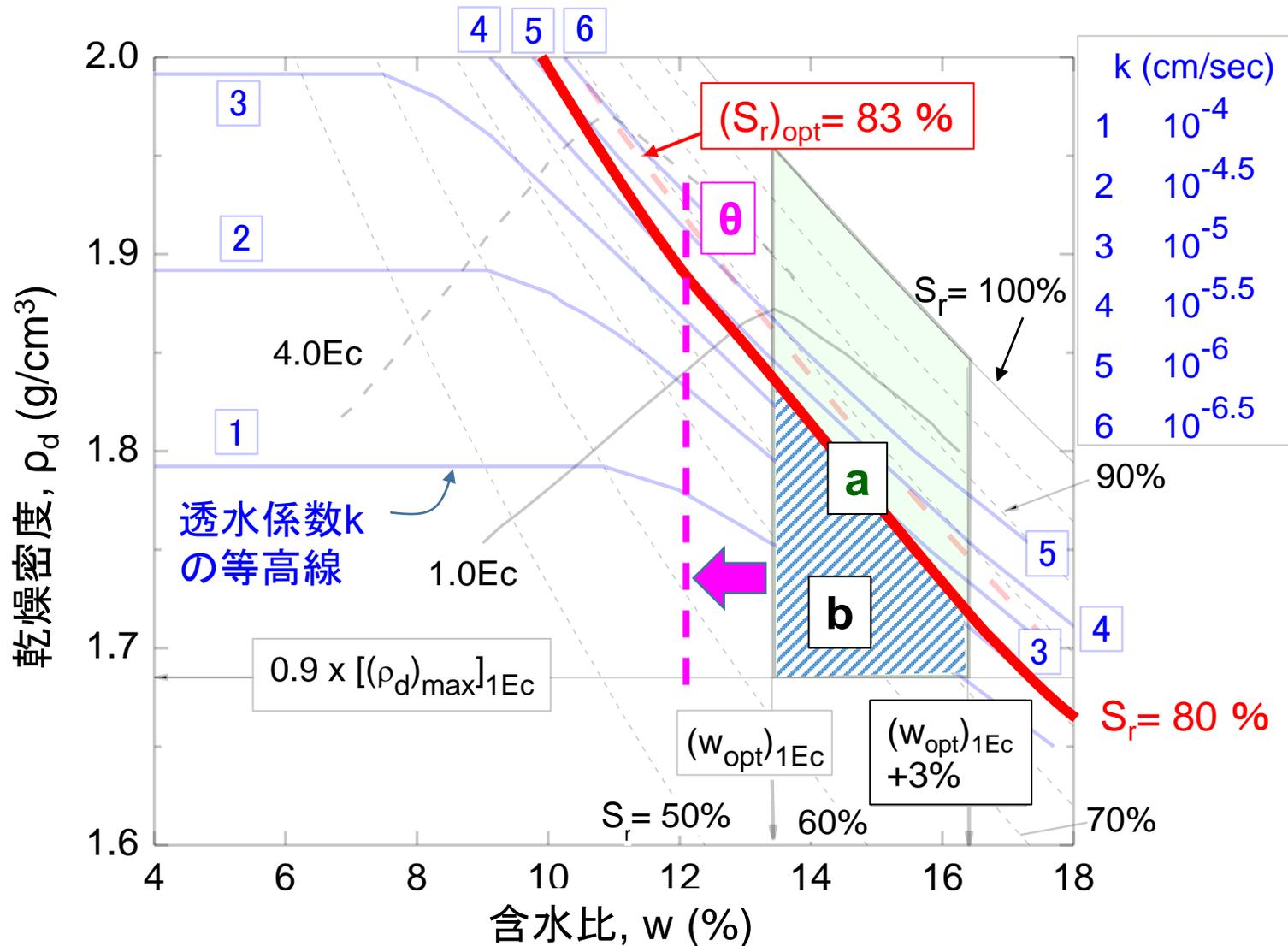
$S_r > 70\%$ では、kに対する $S_r$ の影響は決定的 ⇒ kの管理には $S_r$ の管理が必須  
 $S_r = (S_r)_{opt}$ 状態では、①全般的にkは小さく、② $\rho_d$ が高くなるとkは確実に低下。  
 ⇒  $S_r = (S_r)_{opt}$  及び「要求性能を実現できる $\rho_d$ 」を締固め目標とできる(例、点b)



従来の「1Ecの締固め試験の結果に基づく締固め管理」の例:

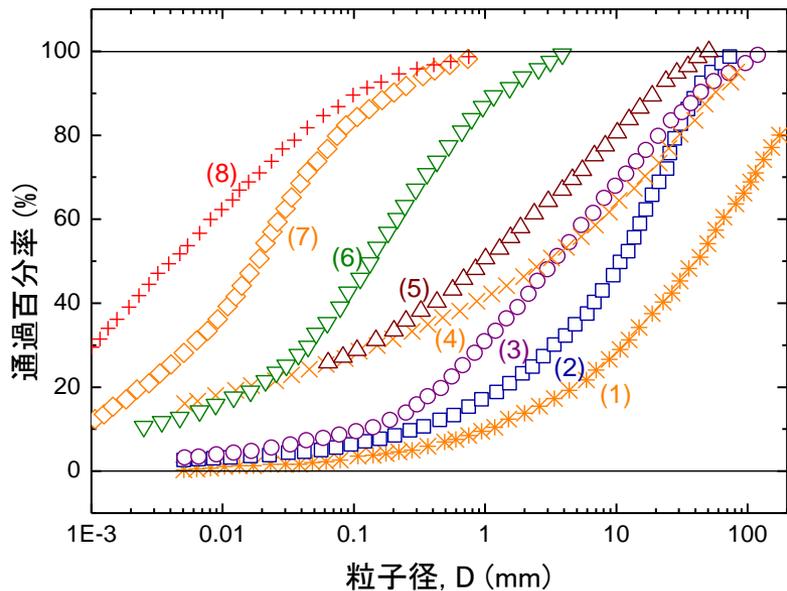
・許容領域aは、 $[w = (w_{opt})_{1Ec} + 0 \sim 3\% \ \& \ [D_c]_{1Ec} \geq \text{管理値} 90\%]$

⇒ しかし、①aの左下の領域bでは、強度・剛性と透水係数の要求性能は満足されず、水浸コラプスは大の可能性、②締固めが良い領域θに到達できない⇒不合理

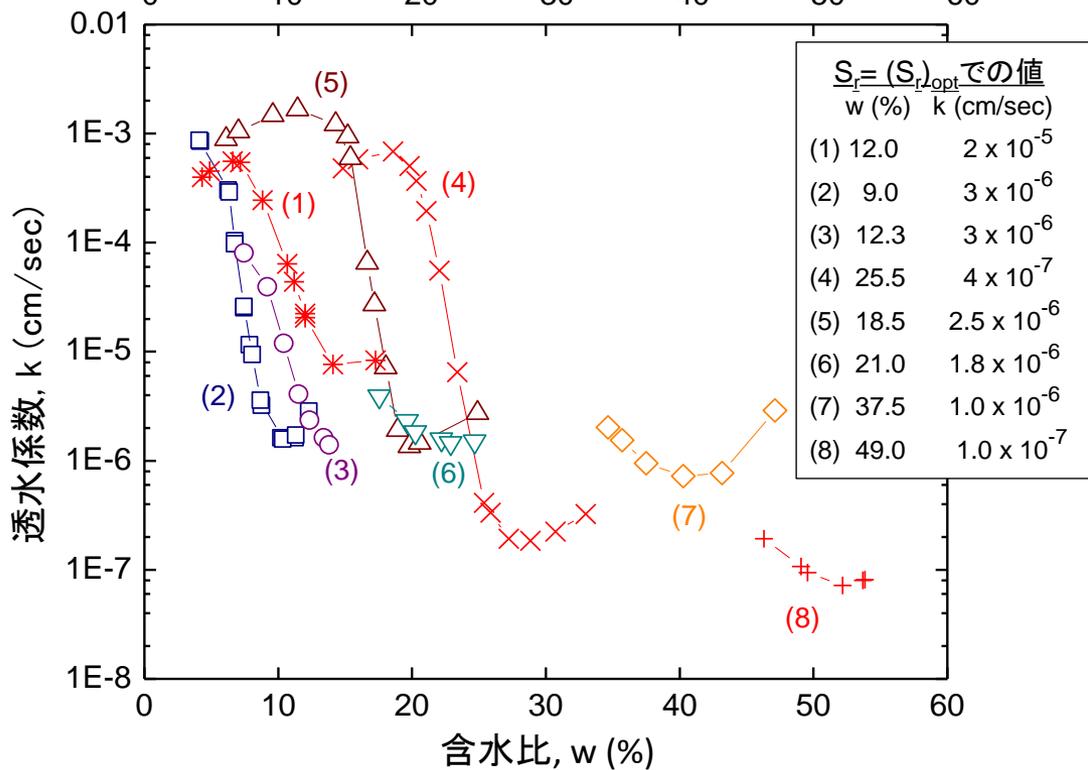
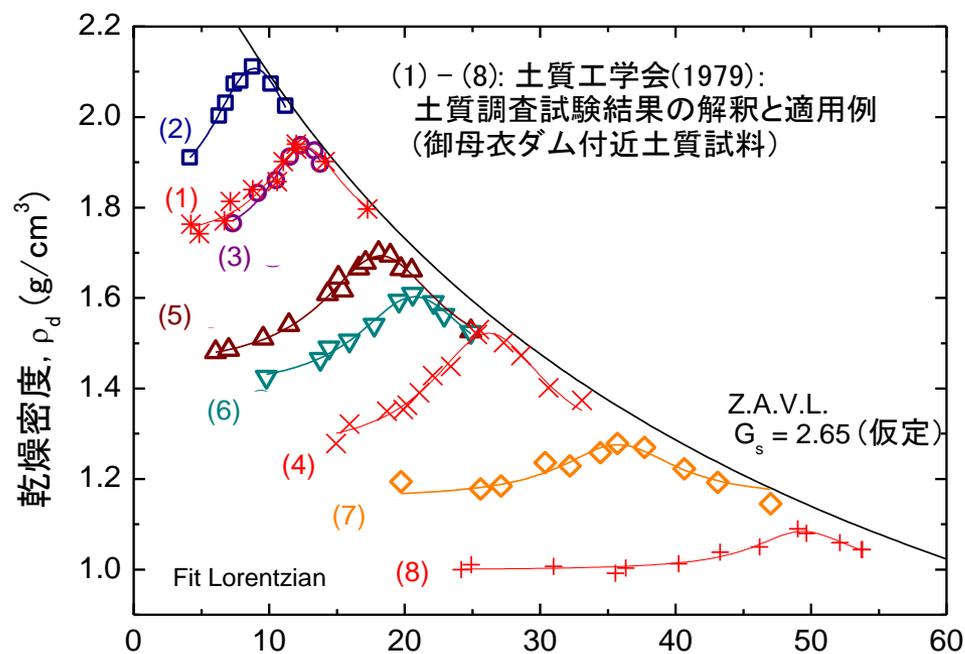


[対応策] 例えば、 $S_r \geq 80\%$  という下限値管理を導入すれば、  
 ①領域bを排除できる上に、②含水比 $w$ の許容下限値を従来の値  $(w_{opt})_{1Ec}$  よりも下げて締固めが良い領域 $\theta$ に到達できるようになる

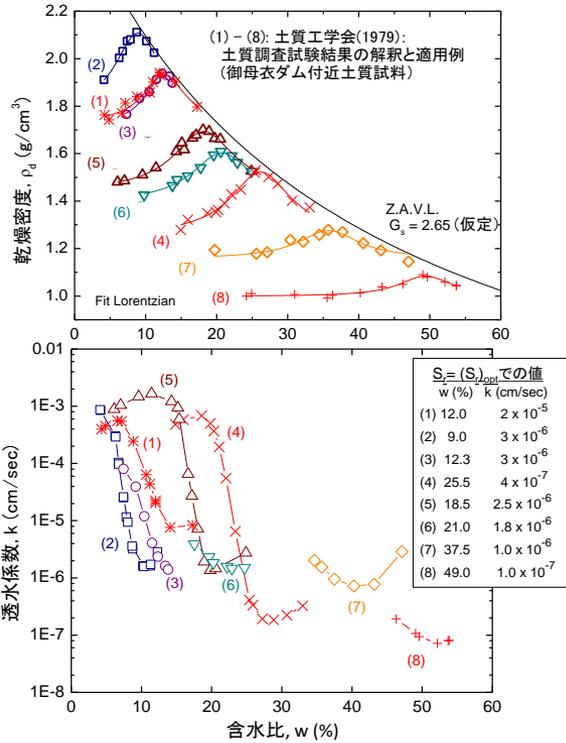
土質材料の透水係数は、 $\rho_d$ と締固め時 $S_r$ に加えて、  
 粒径の関数！



1Ecの締固め曲線に沿った  
 「飽和化後の $k \sim w$ 関係」:  
 ・異なる土質で異なり、複雑  
 ・法則性は不明



# 粒径が大きくなると、平行的な関係が上方に移動

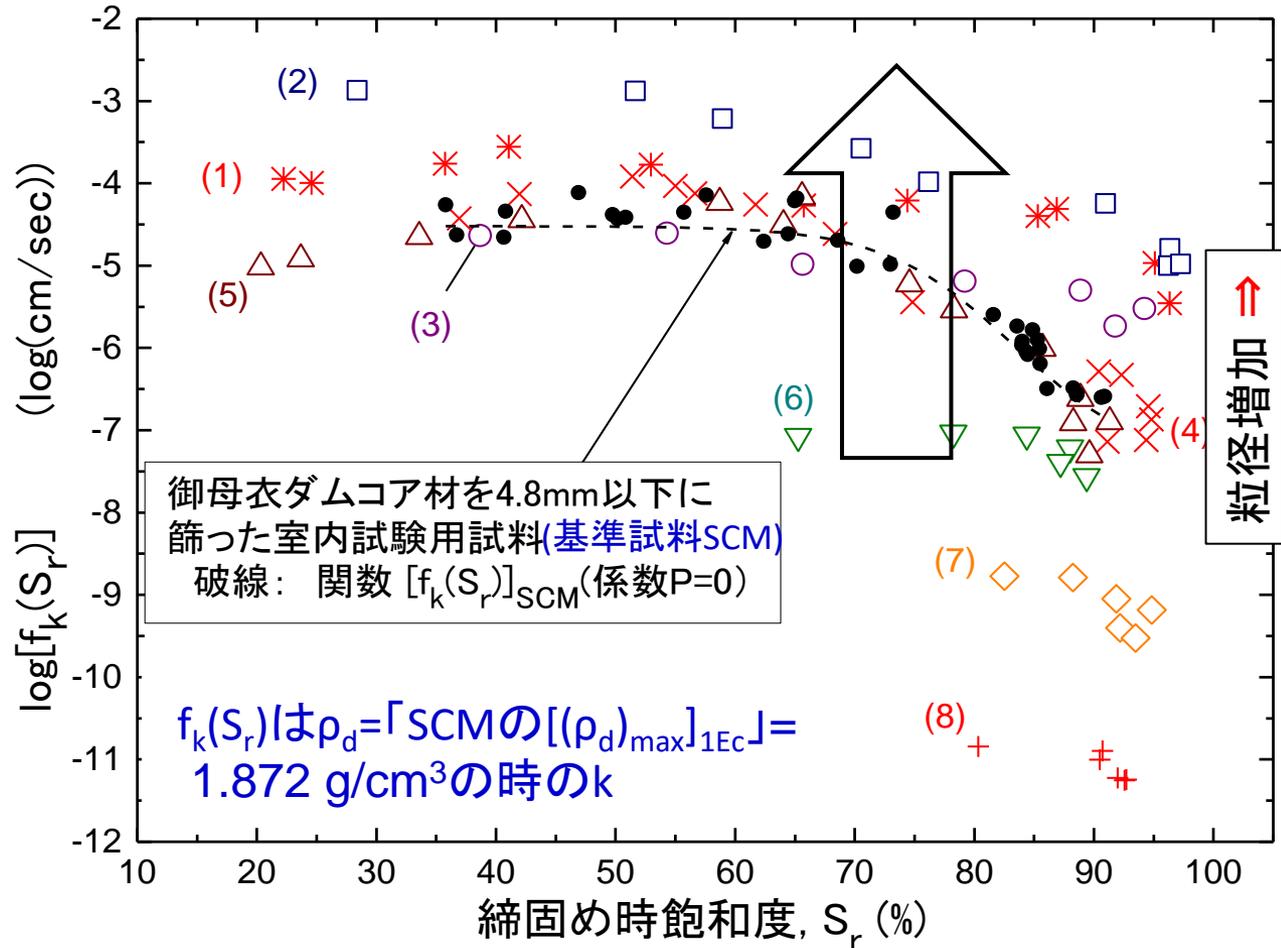


関数 $f_k(S_r)$ に粒径効果  
パラメータ $P$ を導入

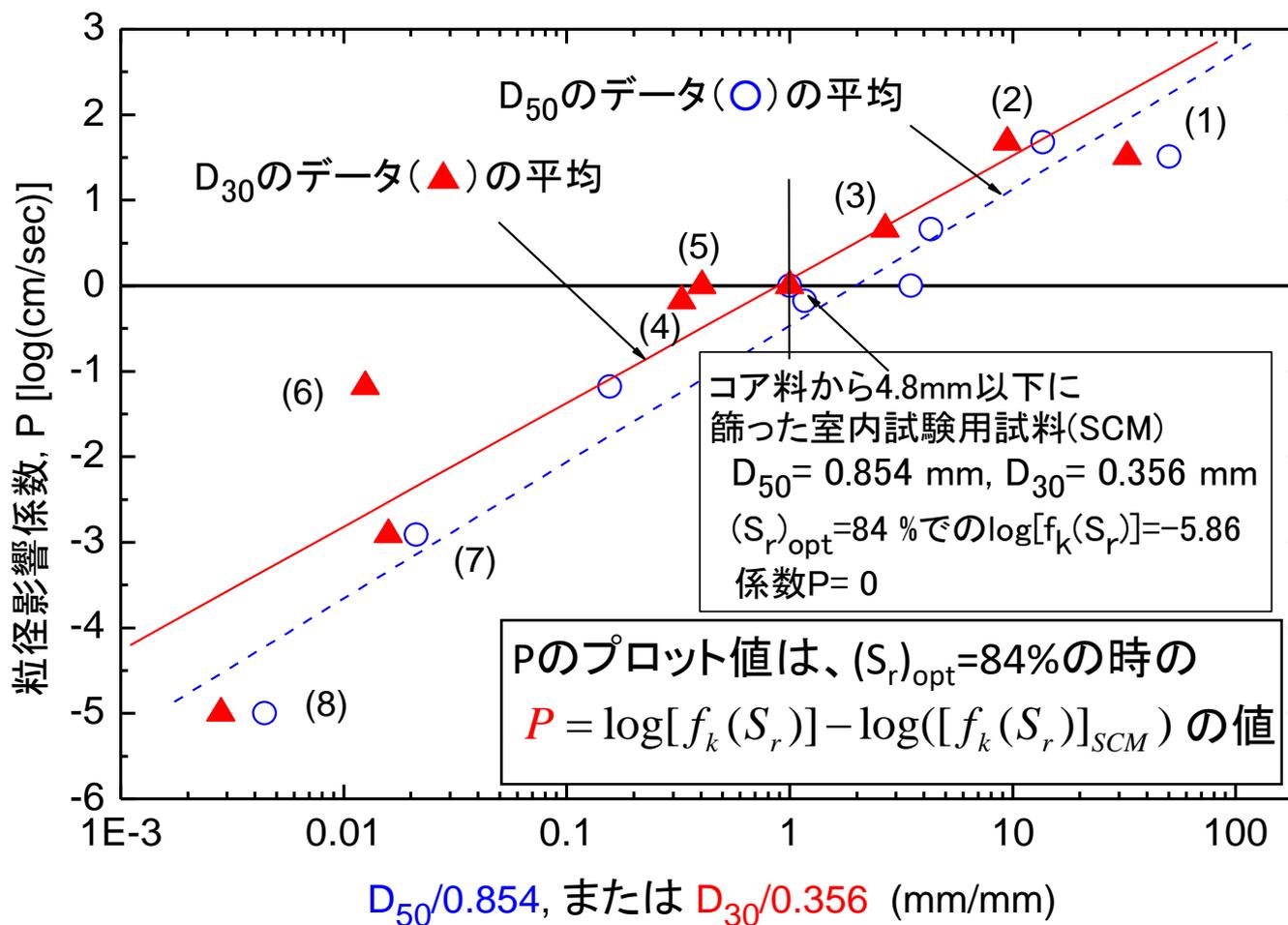
$$\log k = \log[f_k(S_r, P)] + 5.02(1.872 - \rho_d / \rho_w)$$

$$\log[f_k(S_r, P)] = P + \log([f_k(S_r)]_{SCM})$$

$$k = 10^P \cdot [f_k(S_r)]_{SCM} \cdot 10^{5.02(1.872 - \rho_d / \rho_w)}$$



粒径増加  $\Rightarrow P$ 増加  
 $\Rightarrow f_k(S_r, P)$ 増加  $\Rightarrow k$ 増加



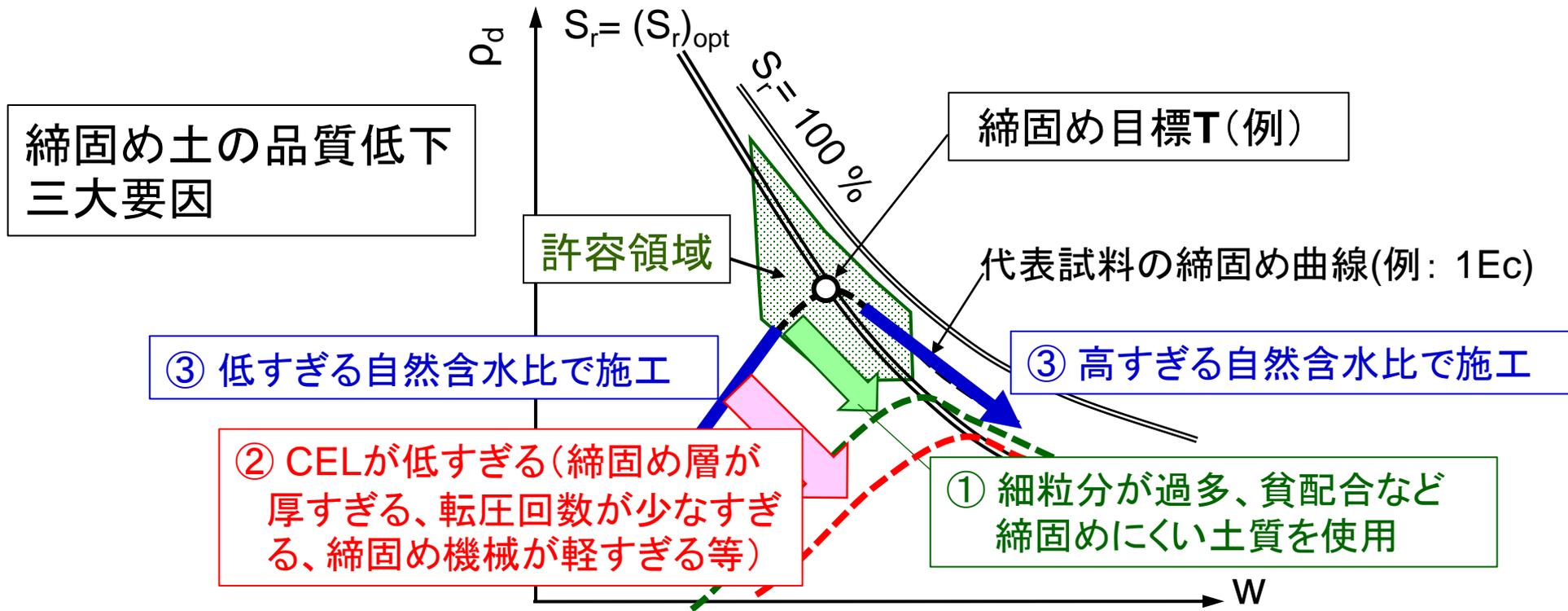
$$\log k = P + \log([f_k(S_r)]_{\text{SCM}}) + 5.02(1.872 - \rho_d / \rho_w)$$

$$k = 10^P \cdot [f_k(S_r)]_{\text{SCM}} \cdot 10^{5.02(1.872 - \rho_d / \rho_w)}$$

粒径増加  $\Rightarrow P$ 増加  $\Rightarrow k$ 増加

$k$  は、 $(\rho_d, \text{締固め時 } S_r, \text{ 粒径})$  の簡明な関数、CELを変数として含まない  
 $\Rightarrow$  締固め土の粒径、 $\rho_d$ 、締固め時  $S_r$  を測定すれば、飽和化後  $k$  の値を推定できる。

# 飽和度管理を重視した締固め管理



## 対応策:

1. 適切な盛土材の準備と含水比の調整によって、要因①と③を抑制!

2. 適切な施工管理で、要因②, ③を抑制:

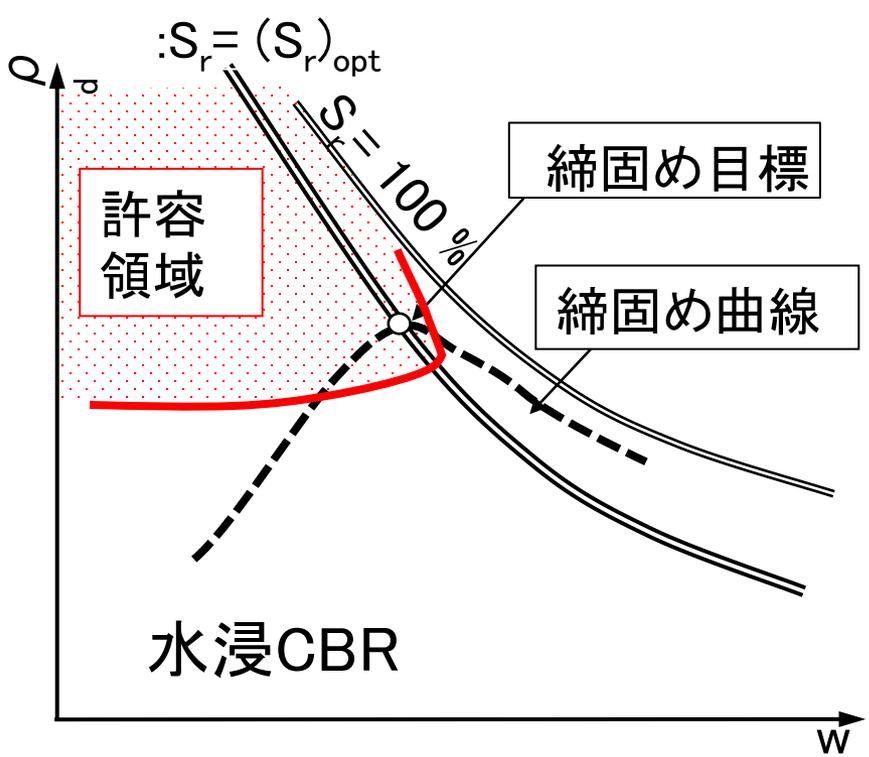
1) **締固め目標T**の設定:  $S_r = (S_r)_{opt}$  & 盛土の要求性能を保証する $\rho_d$ を実現\*  
(\*そのために、十分大きな現場CELを維持して要因②を抑制する必要)

2) 現場締固め状態( $\rho_d, w$ ) に対する**許容領域**の設定: 土質, CEL,  $w$ のばらつきによる締固め状態のばらつきを一定程度以下に抑制するために、締固め目標Tを中心に、 $\rho_d, w$ の管理境界及び **$S_r$ の管理境界**を設定

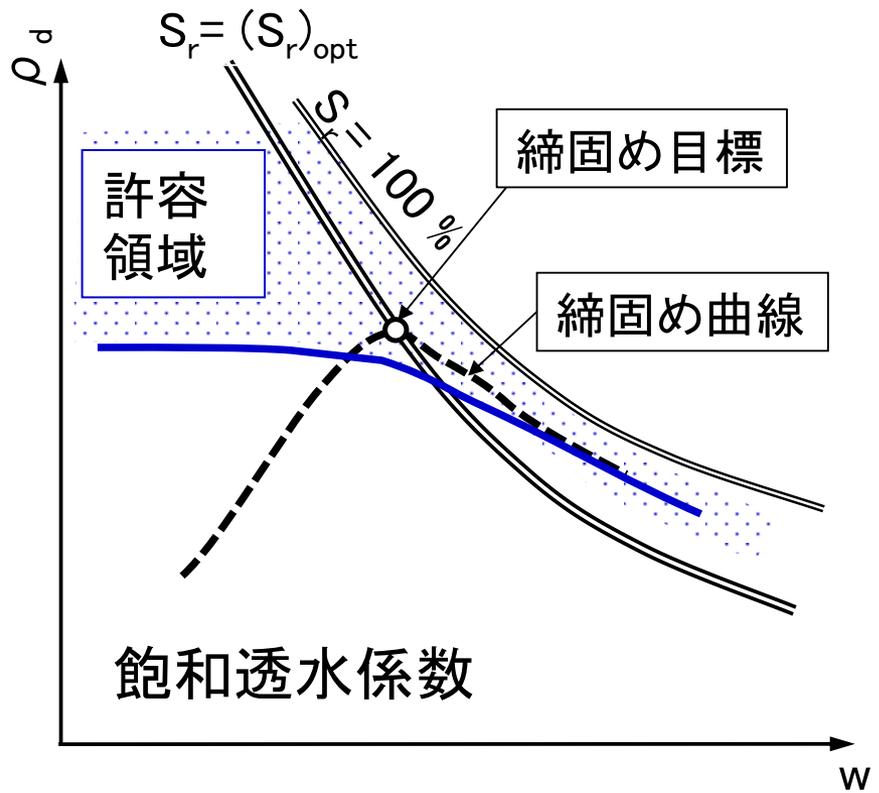
# 設計で要求する土質特性を保証できる締固め目標を設定:

- ① 基本的に  $S_r = (S_r)_{opt}$
- ② 設計で設定した物性を保証する許容領域内で、十分大きな  $\rho_d$  を実現

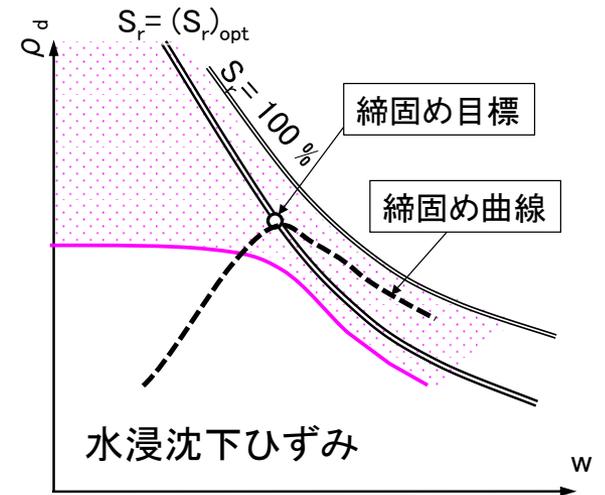
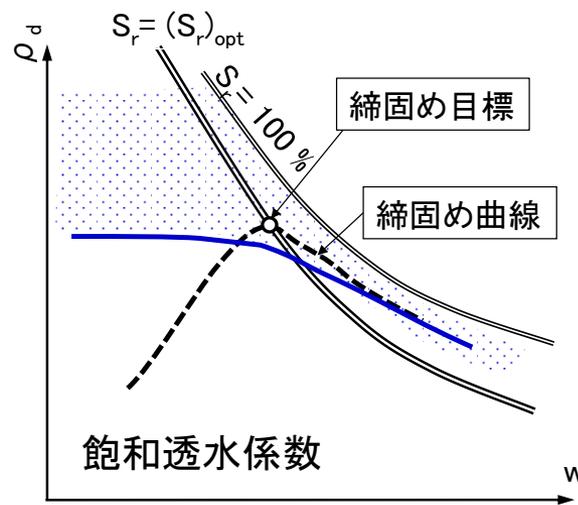
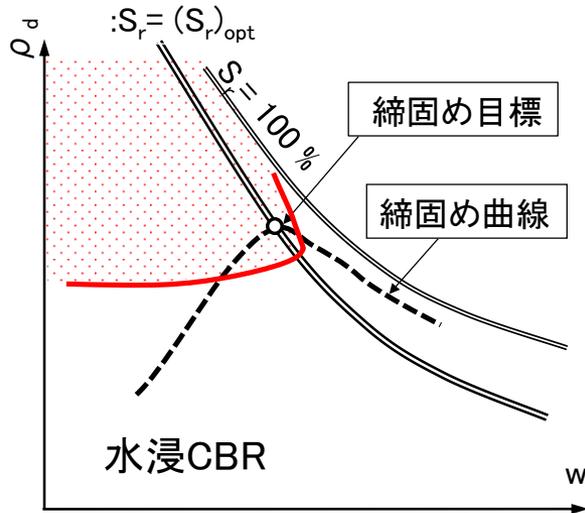
例1) 供用時の強度・剛性の指標としての水浸後CBRの許容限界線と許容領域



例2) 飽和状態での透水係数の許容限界線と許容領域



# 「各種物性の許容領域」⇒「締固め目標」⇒「各種管理境界」



## 要求性能に基づく締固め管理境界

盛土の要求性能と 要求物性 管理境界		施工性の確保/ 過転圧の防止⇒ 締固め時の高い 強度・剛性	供用中の高い安定 性と小さい変形⇒ 湿潤・飽和化後の 高い強度・剛性	湿潤・飽和時の 沈下の抑制⇒水 浸時のコラップス 変形の抑制	供用時の遮 水性⇒十分 に低い飽和 透水係数
		盛土材の含水 比の調整(1&2)	1. 含水比下限線 WL		○
	2. 含水比上限線 WU	●	●		
締固めた土の 締固めた( $\rho_d$ , w)状態の測定 と管理(1~5)	3. 締固め度下限線 DL	○	●	○	○
	4. 飽和度下限線 SL			●	●
	5. 飽和度上限線 SU	●	○		

●: 要求物性の実現に非常に重要な管理境界; ○: 要求物性の実現に重要な管理境界

# 「各種物性の許容領域」⇒「締固め目標」⇒「各種管理境界」



・締固め時飽和度 $S_r$ は、締固め特性と締固め土の品質を左右する

・ $(S_r)_{opt}$ は、現場での土質とCELの変動と室内試験条件と現場条件の乖離の影響を受けにくく客観的

⇒締固め度と含水比の管理に $(S_r)_{opt}$ に基づき飽和度管理を追加することによって、締固め管理が確実となる

・含水比 $w$ は、締固め特性と物性の本質的なパラメータではない

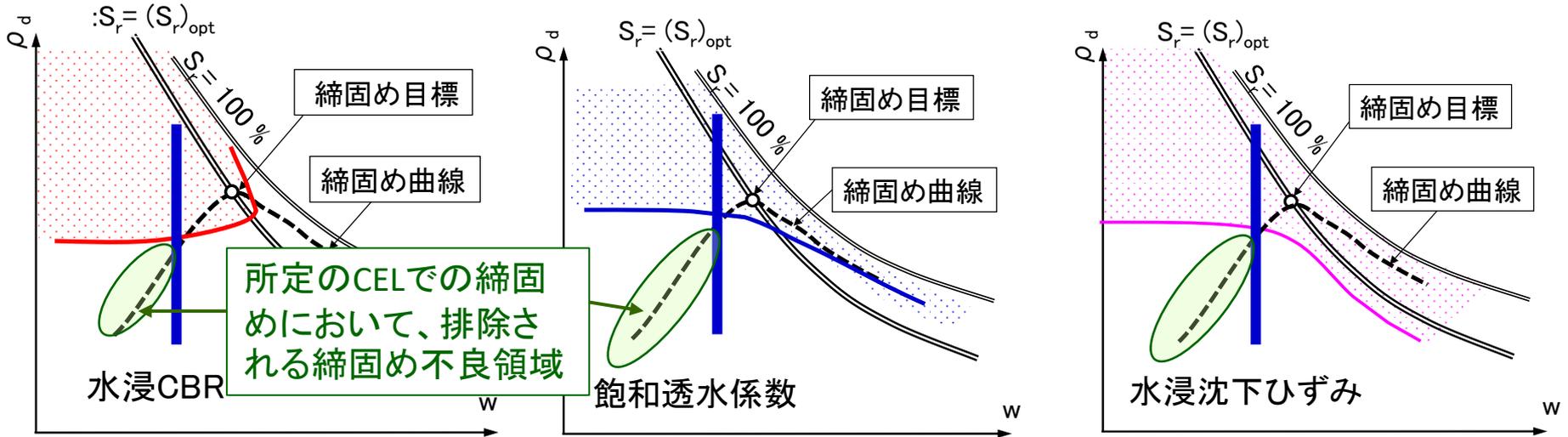
・現場での土質とCELの変動と室内試験条件との乖離のために、現場 $w_{opt}$ は変動し室内実験での値と乖離

⇒ $w$ 管理だけでは確実な締固め管理は困難

管理境界	盛土の要求性能と要求物性	施工性の確保/過転圧の防止⇒締固め時の高い強度・剛性	供用中の高い安定性と小さい変形⇒湿潤・飽和化後の高い強度・剛性	湿潤・飽和時の沈下の抑制⇒水浸時のコラップス変形の抑制	供用時の遮水性⇒十分に低い飽和透水係数
盛土材の含水比の調整(1&2)	1. 含水比下限線 WL		○	●	○
	2. 含水比上限線 WU	●	●		
締固めた土の締固めた( $\rho_d, w$ )状態の測定と管理(1~5)	3. 締固め度下限線 DL	○	●	○	○
	4. 飽和度下限線 SL			●	●
	5. 飽和度上限線 SU	●	○		

●: 要求物性の実現に非常に重要な管理境界; ○: 要求物性の実現に重要な管理境界

# 「各種物性の許容領域」と「締固め目標」及び「各種管理境界」の関連

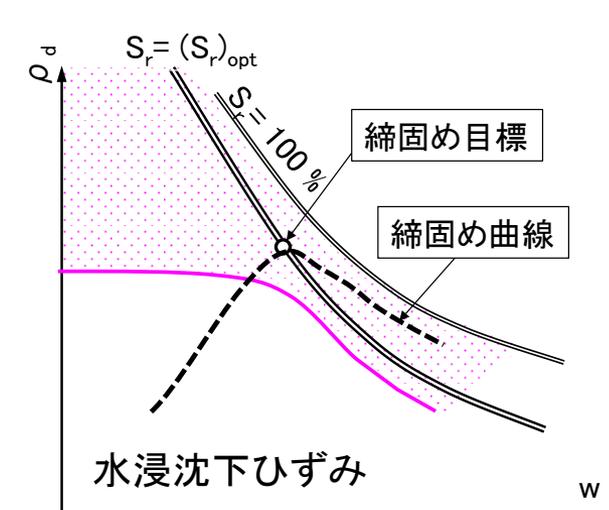
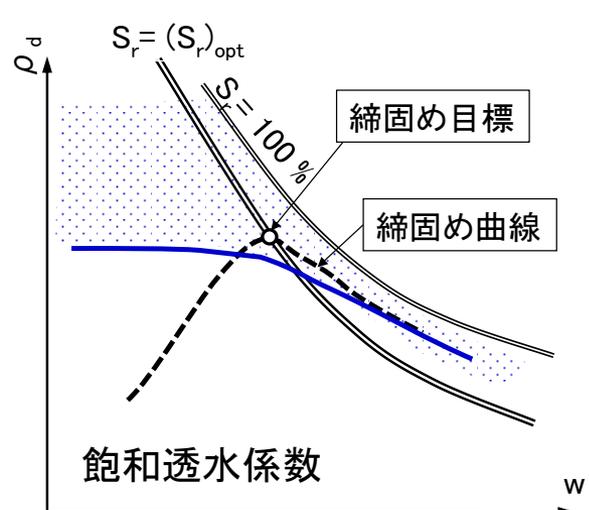
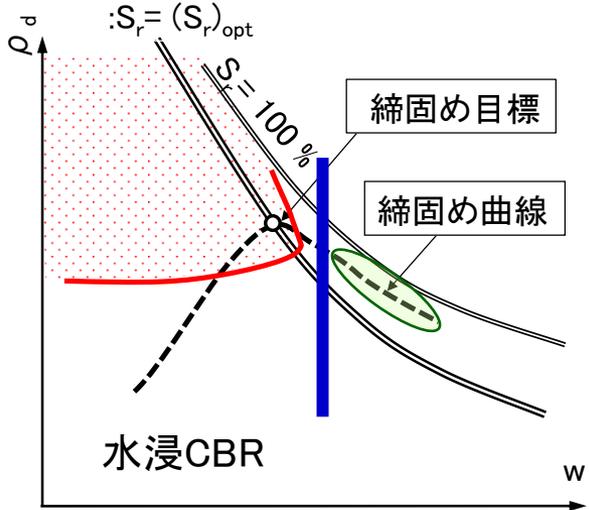


## 要求性能に基づく締固め管理境界

管理境界	盛土の要求性能と要求物性	施工性の確保/ 過転圧の防止⇒ 締固め時の高い 強度・剛性	供用中の高い安定 性と小さい変形⇒ 湿潤・飽和化後の 高い強度・剛性	湿潤・飽和時の 沈下の抑制⇒水 浸時のコラップス 変形の抑制	供用時の遮 水性⇒十分 に低い飽和 透水係数
盛土材の含水比の調整(1&2)	1. 含水比下限線 WL		○	●	○
	2. 含水比上限線 WU	●	●		
締固めた土の締固めた( $\rho_d, w$ )状態の測定と管理(1~5)	3. 締固め度下限線 DL	○	●	○	○
	4. 飽和度下限線 SL			●	●
	5. 飽和度上限線 SU	●	○		

●: 要求物性の実現に非常に重要な管理境界; ○: 要求物性の実現に重要な管理境界

# 「各種物性の許容領域」と「締固め目標」及び「各種管理境界」の関連

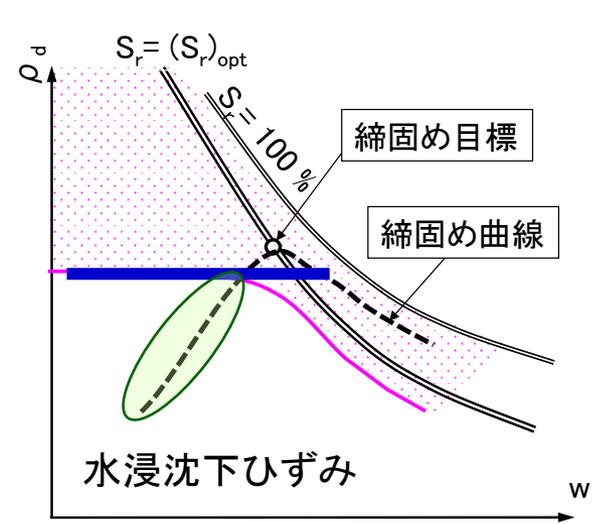
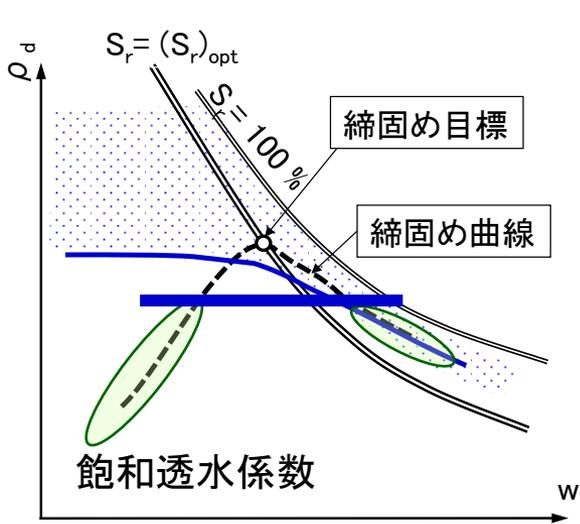
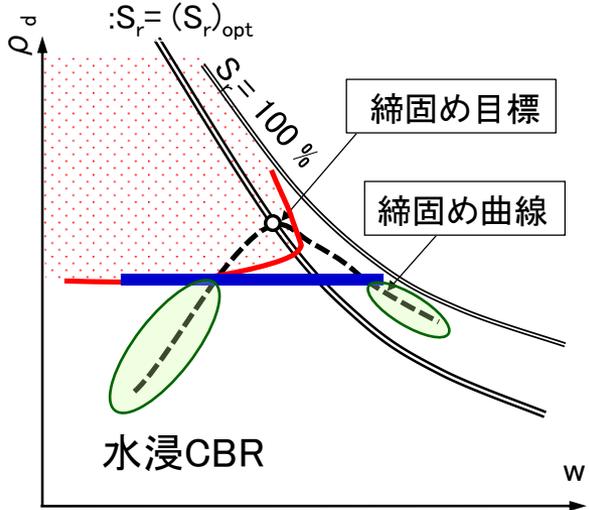


## 要求性能に基づく締固め管理境界

盛土の要求性能と 要求物性  管理境界		施工性の確保/ 過転圧の防止⇒ 締固め時の高い 強度・剛性	供用中の高い安定 性と小さい変形⇒ 湿潤・飽和化後の 高い強度・剛性	湿潤・飽和時の 沈下の抑制⇒水 浸時のコラップス 変形の抑制	供用時の遮 水性⇒十分 に低い飽和 透水係数
		盛土材の含水 比の調整(1&2)	1. 含水比下限線 WL		○
	2. 含水比上限線 WU	●	●		
締固めた土の 締固めた(ρ <sub>d</sub> , w)状態の測定 と管理(1~5)	3. 締固め度下限線 DL	○	●	○	○
	4. 飽和度下限線 SL			●	●
	5. 飽和度上限線 SU	●	○		

●: 要求物性の実現に非常に重要な管理境界; ○: 要求物性の実現に重要な管理境界

# 「各種物性の許容領域」と「締固め目標」及び「各種管理境界」の関連

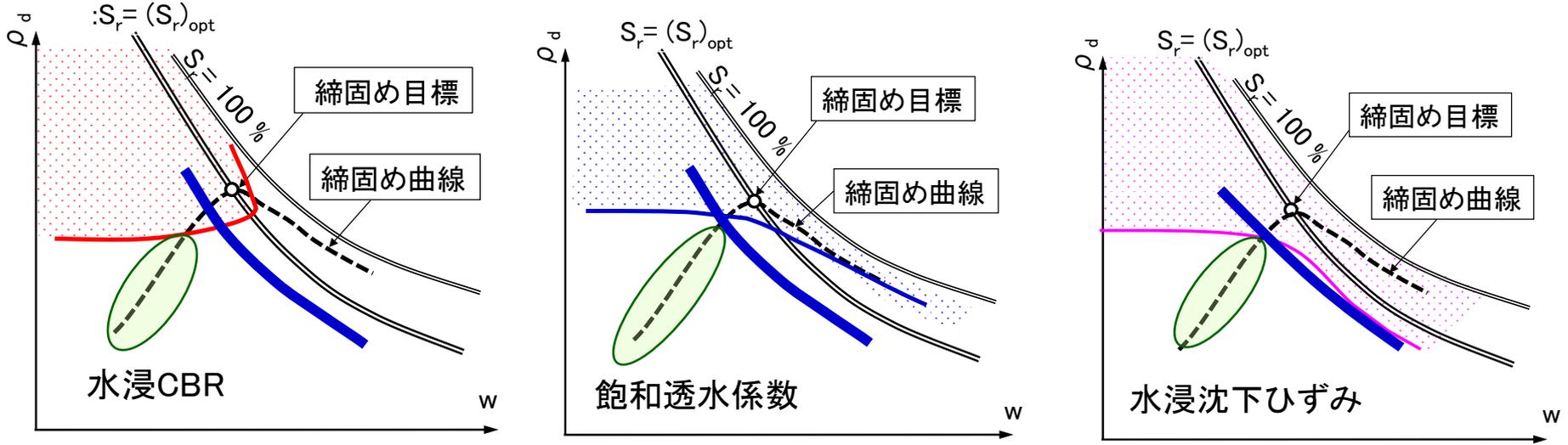


## 要求性能に基づく締固め管理境界

盛土の要求性能と 要求物性  管理境界		施工性の確保/ 過転圧の防止⇒ 締固め時の高い 強度・剛性	供用中の高い安定 性と小さい変形⇒ 湿潤・飽和化後の 高い強度・剛性	湿潤・飽和時の 沈下の抑制⇒水 浸時のコラップス 変形の抑制	供用時の遮 水性⇒十分 に低い飽和 透水係数
		盛土材の含水 比の調整(1&2)	1. 含水比下限線 WL		○
	2. 含水比上限線 WU	●	●		
締固めた土の 締固めた(ρ <sub>d</sub> , w)状態の測定 と管理(1~5)	3. 締固め度下限線 DL	○	●	○	○
	4. 飽和度下限線 SL			●	●
	5. 飽和度上限線 SU	●	○		

●: 要求物性の実現に非常に重要な管理境界; ○: 要求物性の実現に重要な管理境界

# 「各種物性の許容領域」と「締固め目標」及び「各種管理境界」の関連

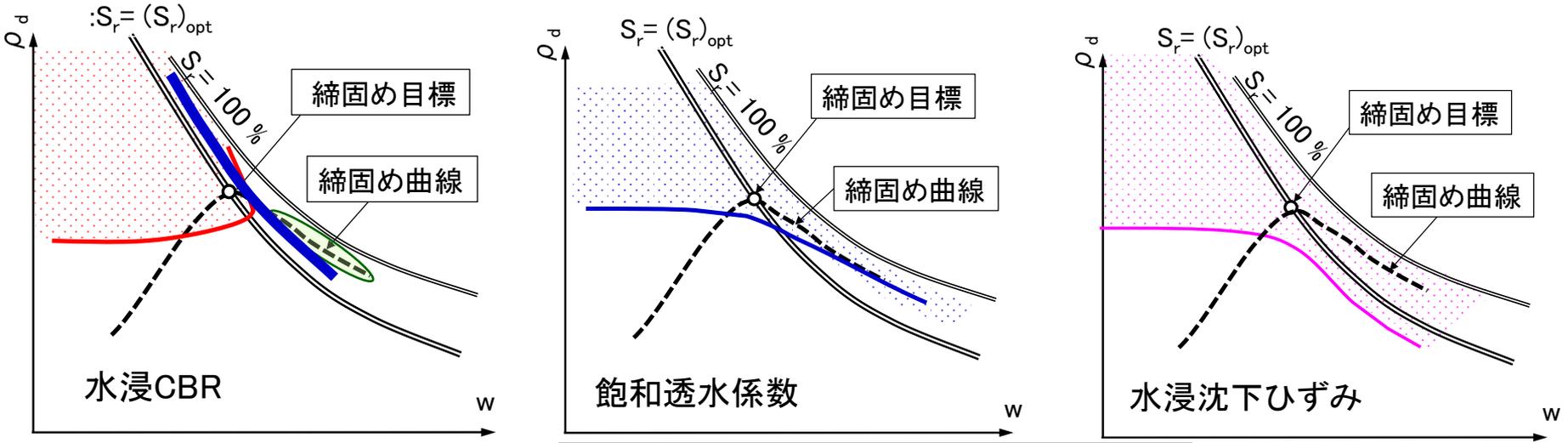


## 要求性能に基づく締固め管理境界

盛土の要求性能と 要求物性  管理境界		施工性の確保/ 過転圧の防止⇒ 締固め時の高い 強度・剛性	供用中の高い安定 性と小さい変形⇒ 湿潤・飽和化後の 高い強度・剛性	湿潤・飽和時の 沈下の抑制⇒水 浸時のコラップス 変形の抑制	供用時の遮 水性⇒十分 に低い飽和 透水係数
		盛土材の含水 比の調整(1&2)	1. 含水比下限線 WL		○
	2. 含水比上限線 WU	●	●		
締固めた土の 締固めた( $\rho_d$ , $w$ )状態の測定 と管理(1~5)	3. 締固め度下限線 DL	○	●	○	○
	4. 飽和度下限線 SL			●	●
	5. 飽和度上限線 SU	●	○		

●: 要求物性の実現に非常に重要な管理境界; ○: 要求物性の実現に重要な管理境界

# 「各種物性の許容領域」と「締固め目標」及び「各種管理境界」の関連

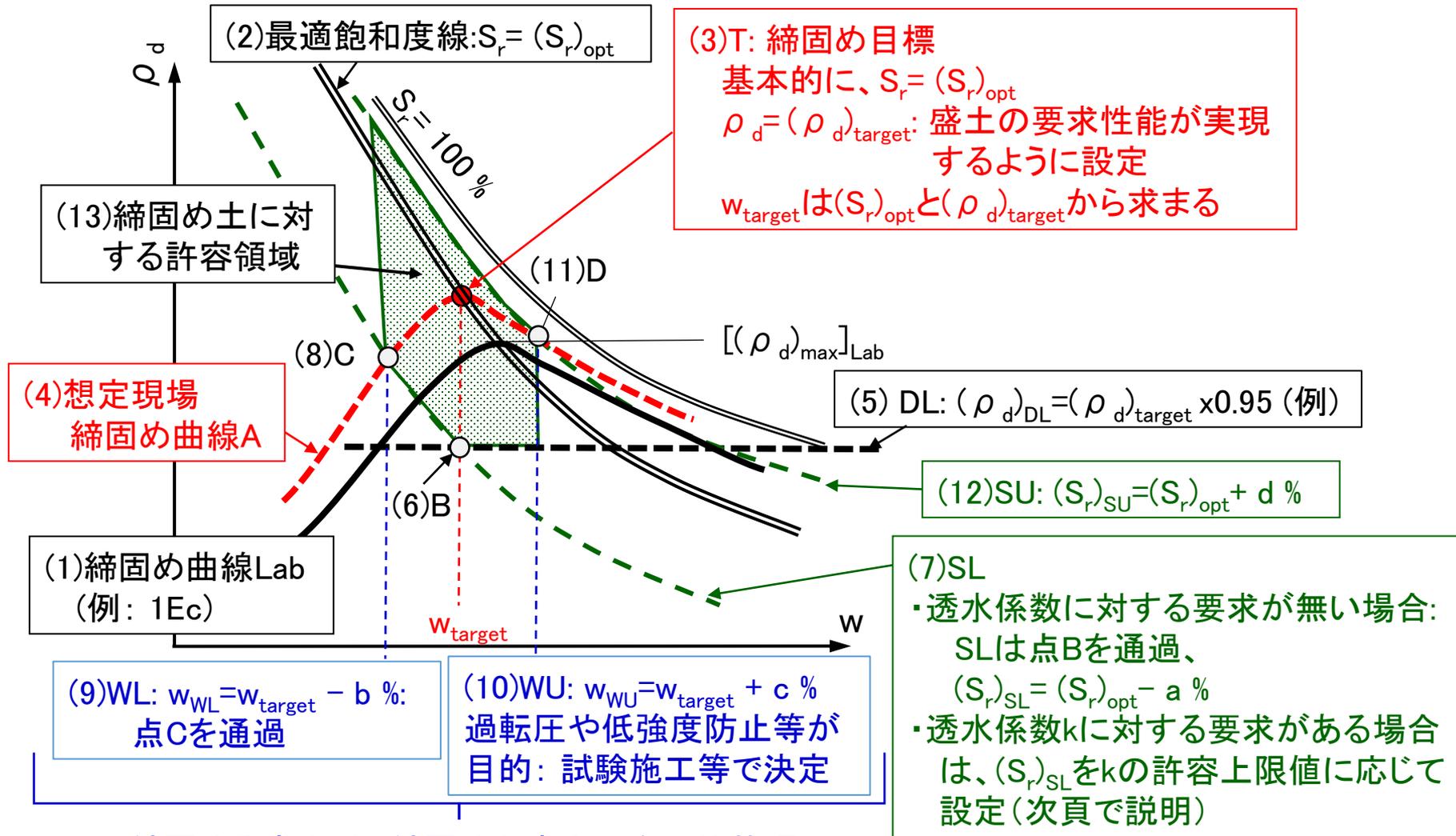


要求性能に基づく締固め管理境界

管理境界	盛土の要求性能と 要求物性	施工性の確保/ 過転圧の防止⇒ 締固め時の高い 強度・剛性	供用中の高い安定 性と小さい変形⇒ 湿潤・飽和化後の 高い強度・剛性	湿潤・飽和時の 沈下の抑制⇒水 浸時のコラップス 変形の抑制	供用時の遮 水性⇒十分 に低い飽和 透水係数
盛土材の含水 比の調整(1&2)	1. 含水比下限線 WL		○	●	○
	2. 含水比上限線 WU	●	●		
締固めた土の 締固めた(ρ <sub>d</sub> , w)状態の測定 と管理(1~5)	3. 締固め度下限線 DL	○	●	○	○
	4. 飽和度下限線 SL			●	●
	5. 飽和度上限線 SU	●	○		

●: 要求物性の実現に非常に重要な管理境界; ○: 要求物性の実現に重要な管理境界

# 提案する $(\rho_d, w, S_r)$ の総合的管理の手順



締固める盛土材と締固めた盛土の含水比管理

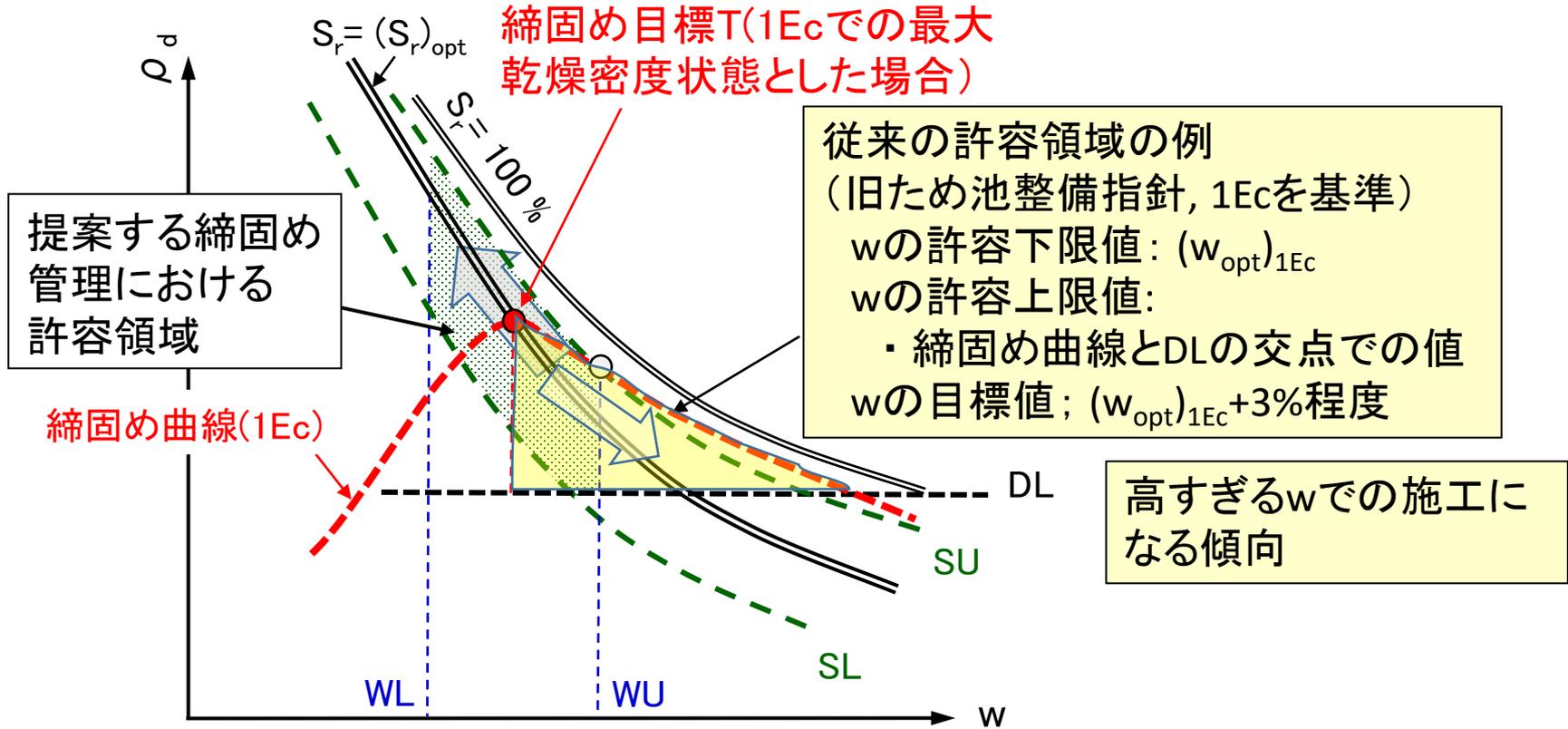
測定項目は、従来の締固め管理で実施する項目だけで良い



# 提案する( $\rho_d, w, S_r$ )の総合的管理

対

# 従来の管理法



## 提案する管理法の特長:

- $S_r$ の許容下限線SLの導入  $\Rightarrow$  含水比の許容下限値WLを従来よりも低く設定
- $\Rightarrow$  従来は回避された「乾燥側での、高いCELを活用した $S_r = (S_r)_{opt}$ を目指す施工」に誘導
- $\Rightarrow$  過転圧を回避、適切な $S_r$ での高い $\rho_d$ による高い品質を実現

# 2011東日本大震災 福島県の藤沼本堤

- 農業用灌漑ため池のアースフィルダム(H= 18.5 m; L= 133.2 m、均一型、中央・表面遮水壁は無い)
- 着工1937年4月; 第二次世界大戦で中断; 竣工1949年10月.
- 越流による破堤のため、死者7、行方不明1
- 福島県のため池総数 3,000\*. 約750が被災 (\* 全国で250,000)

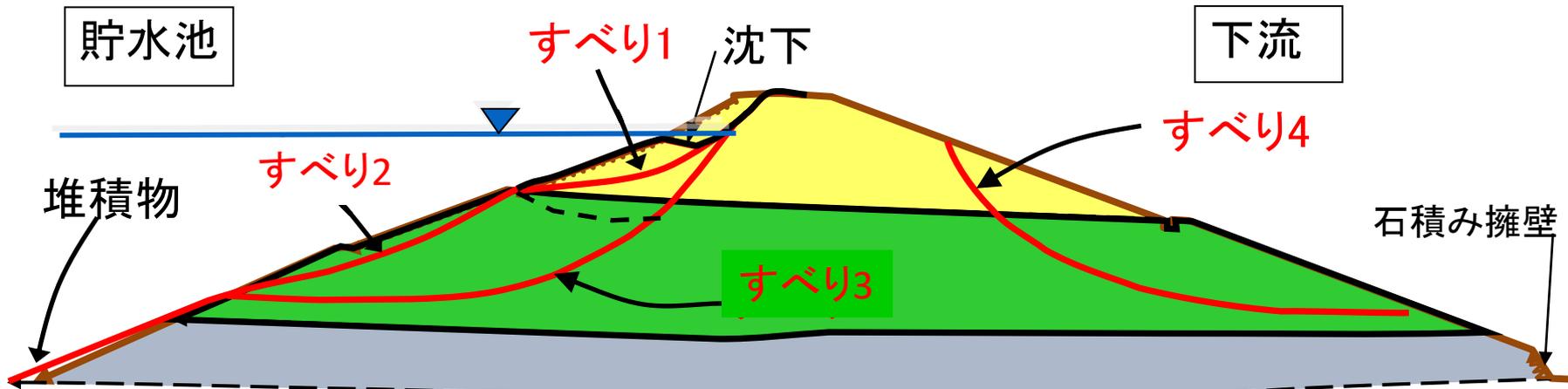


# 2011東日本大震災 福島県の藤沼本堤

- 農業用灌漑ため池のアースフィルダム(H= 18.5 m; L= 133.2 m、均一型、中央・表面遮水壁は無い)
- 着工1937年4月; 第二次世界大戦で中断; 竣工1949年10月.
- 越流による破堤のため、死者7、行方不明1
- 福島県のため池総数 3,000\*. 約750が被災 (\* 全国で250,000)



# 藤沼ダム： 推定されたすべりNo.1 ~4 (生起順)



- No.1, 2, .3の複合すべり
- 堤体が最も厚い滞筋の断面で、上部盛土ですべりNo.1が複数生じて断面全体が喪失し、越流開始
- すべりNo.1が生じなければ、越流は生じなかった可能性がある

石積み  
リップラップ

中部盛土  
(粘性土)

下部盛土(粘性土)

すべり1

上部盛土(砂質土)  
残存部の締固め度  
( $1E_c$ )= 88 %

侵食された部分

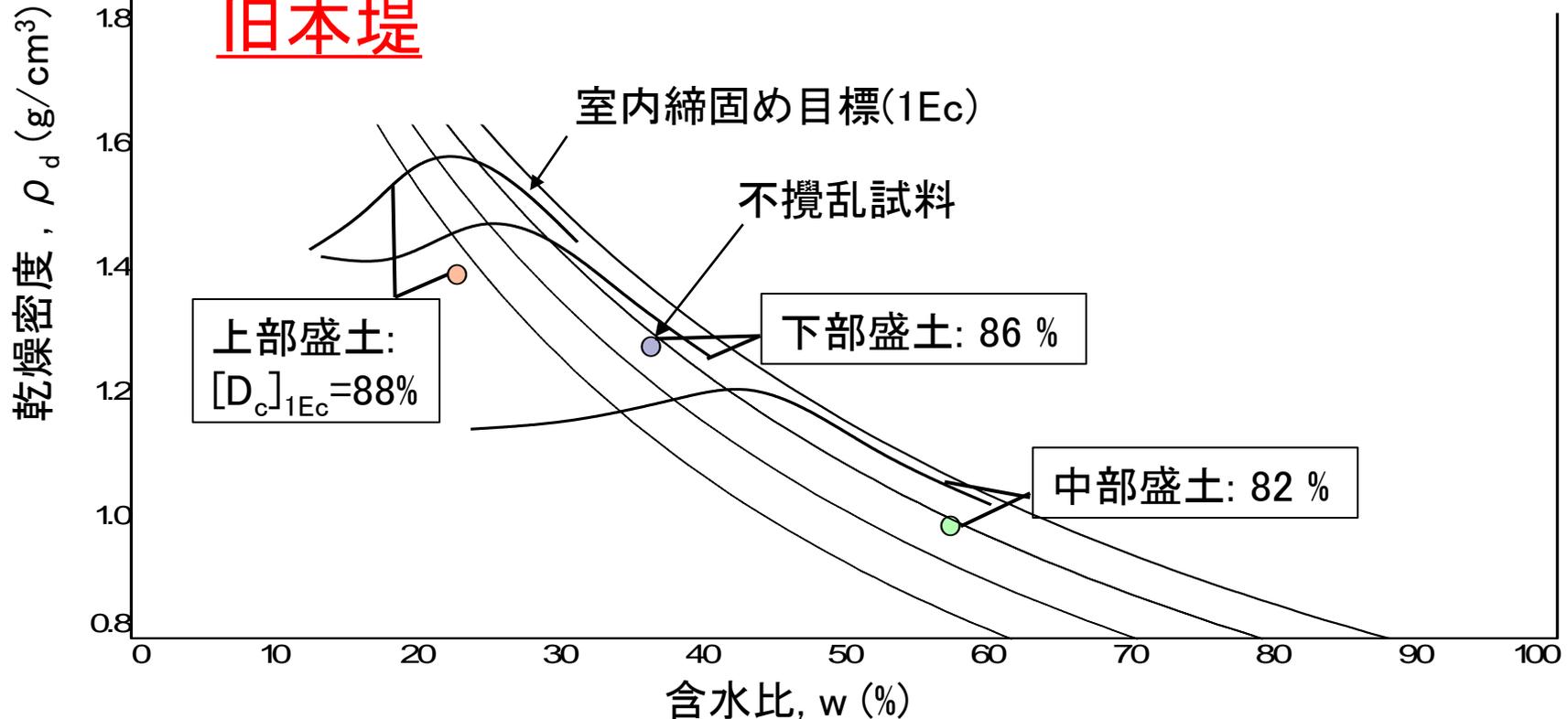
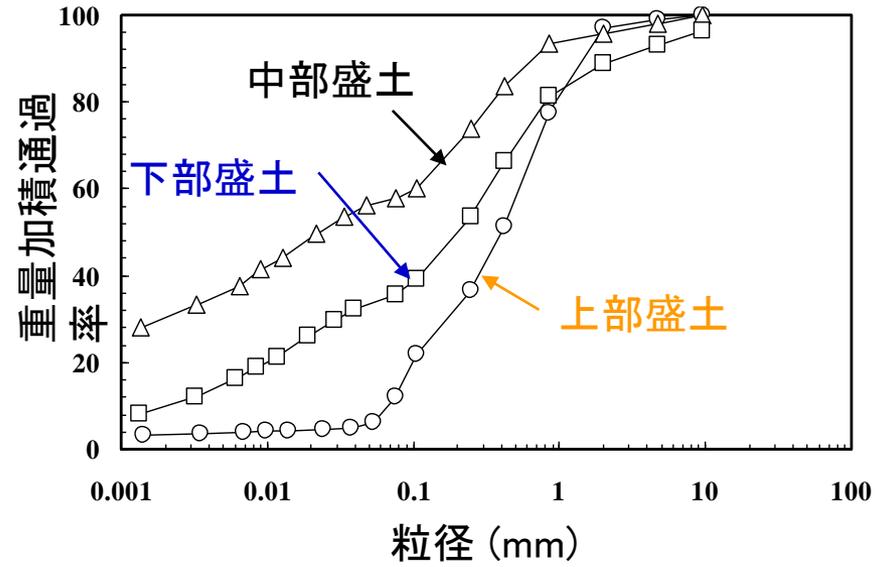
旧本堤:

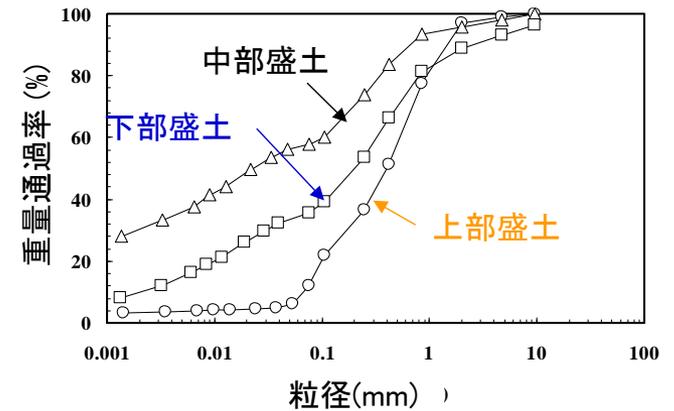
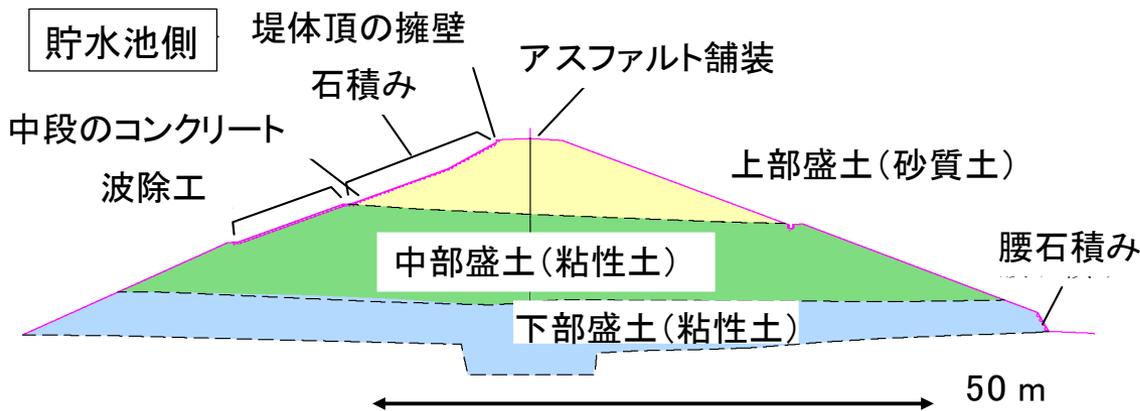
全体的に $(D_c)_{1Ec}$ は非常に低い

上部盛土: 非常に緩い砂質盛土

$$[D_c]_{1Ec} = 88\%$$

旧副堤も同様に緩い砂質盛土





## ■ 崩壊の原因(推定):

- 1) 全般的に締固め不足(近代的締固め基準と近代的締固め機械がなく、締固めエネルギーが不十分で含水比管理がない) ⇒ 全般的に強度不足
- 2) 上部盛土は、戦後の最も劣悪な条件で建設  
砂質土を使用 ⇒ 遮水性が低く侵食されやすく、締固め不足のため非排水繰返し载荷によって著しく弱化
- 3) 大規模すべりが上部盛・中部盛土を貫通して発生し、上部盛土ではすべりが多数発生 ⇒ 堤体が最も厚い滯筋の断面(上図)で堤頂部喪失・越流開始 ⇒ 早い速度で侵食が進展 ⇒ 破堤

■このような耐震診断・耐震補強が必要なため池は、全国で一万を超える！

# 藤沼ダムの強化復旧(2013~2017年)

- ・要求性能1: 旧本堤が崩壊した地震動に対しても安定
  - ・要求性能2: 適切な建設コスト、高い維持管理性能
- ⇒ 飽和度管理を重視した締固め管理で実現

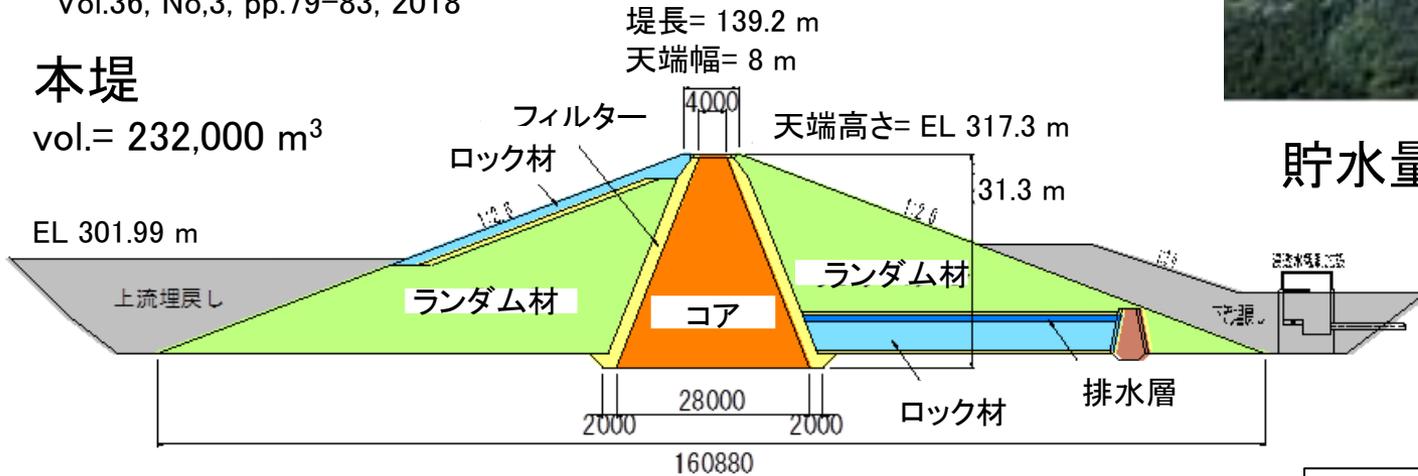


渡辺裕樹, 田中忠治, 龍岡文夫, 毛利栄征, 山岸明広, 三反畑勇, 三浦亨, 矢崎澄雄: 福島県藤沼ダムの強化復旧における新堤体の施工, 基礎工, 36-3, pp. 85-91, 2018.

渡邊伸一, 田中忠次, 龍岡文夫, 毛利栄征, デュッティン・アントワン, 矢崎澄夫, 三浦亨: 福島県藤沼旧堤体の崩壊解析を踏まえた新堤体の設計, 基礎工, Vol.36, No.3, pp.79-83, 2018

## 本堤

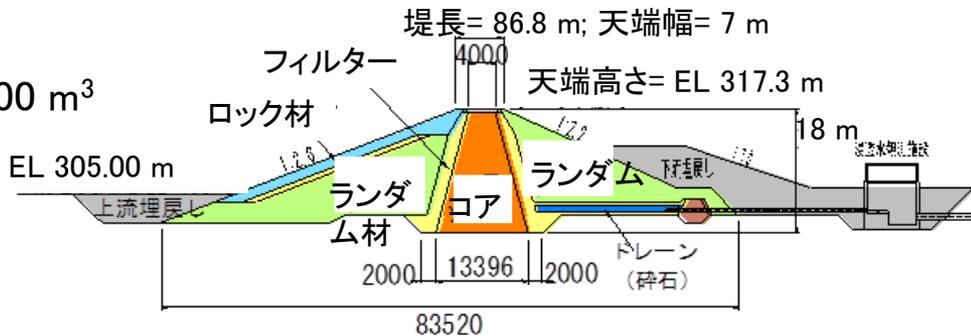
vol.= 232,000 m<sup>3</sup>



貯水量= 1,500,000 m<sup>3</sup>

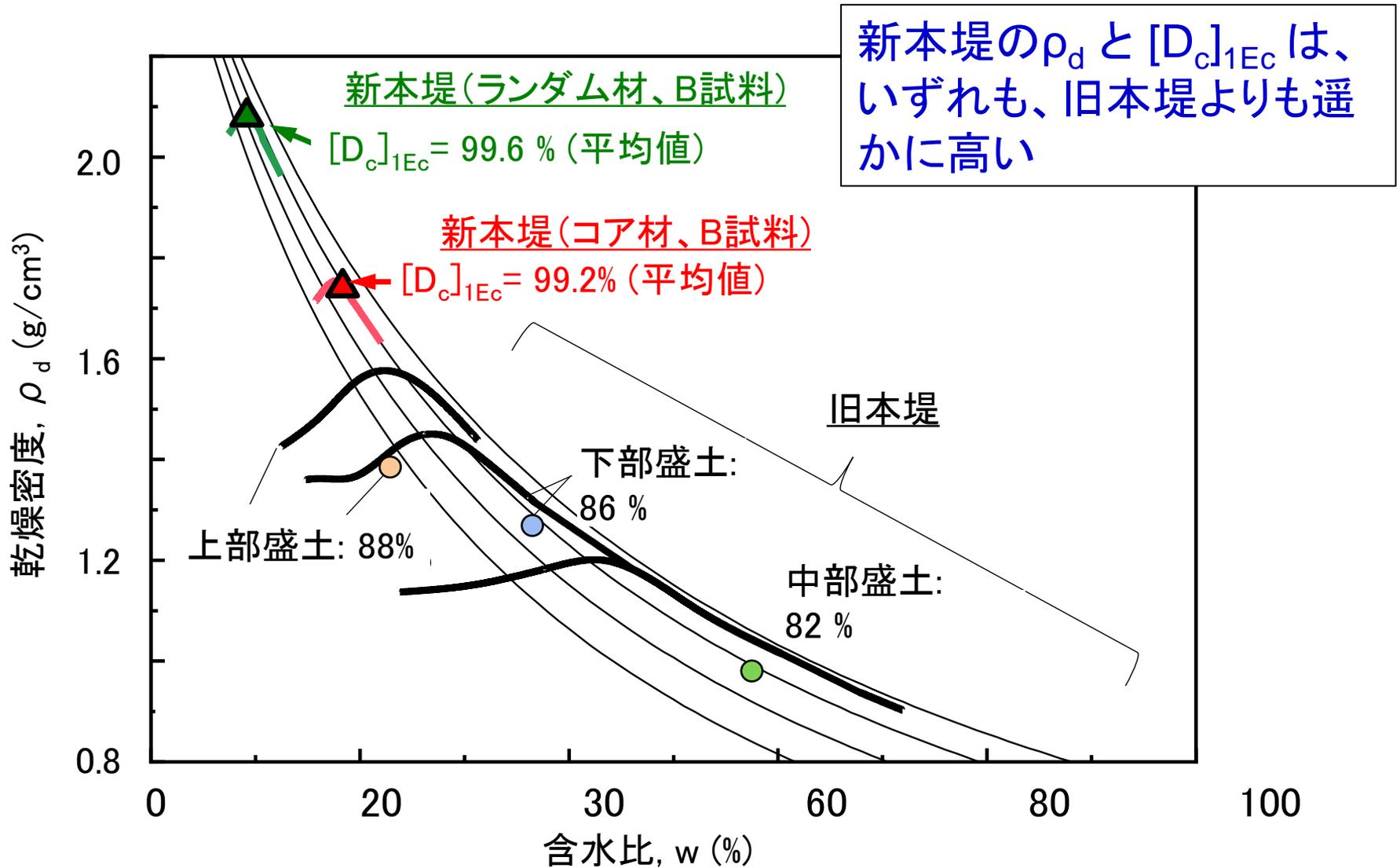
## 副堤

vol.= 38,000 m<sup>3</sup>



2021年2月13日の地震  
本堤基盤 102 gal  
2022年3月16日の地震  
本堤基盤 98 gal  
⇒いずれも、異常なし

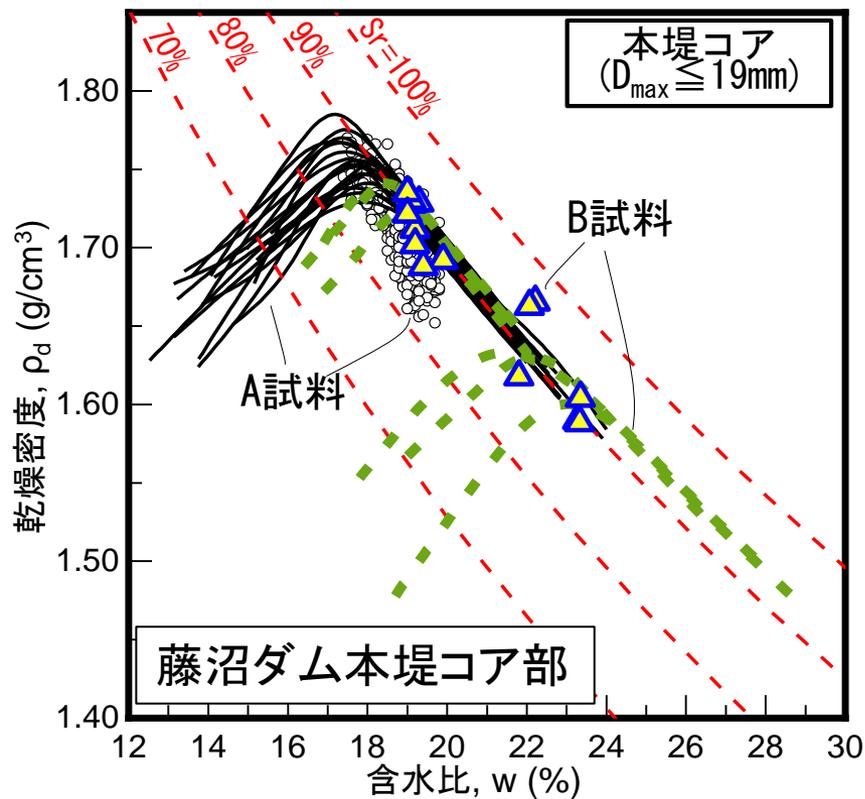
# 藤沼貯水池： 新旧本堤での締固め状態の比較



A試料: 施工中の管理データ、(実線)各  
 バッチ(約3,000m<sup>3</sup>)毎の代表試料の室  
 内締固め試験(1Ec)による締固め曲線と  
 (○印)現場締固め状態

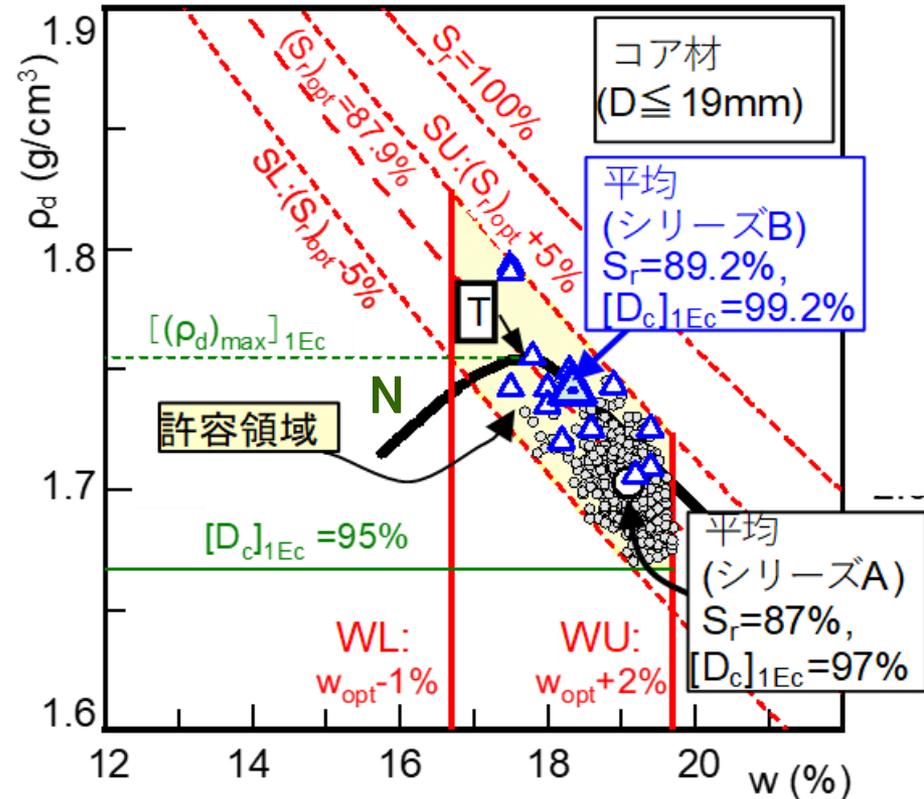
B試料: (△印)締固め度確認試験での現  
 場締固め状態と(破線)その測定地点か  
 ら採取した試料の室内締固め試験によ  
 る締固め曲線

⇒データは大きくばらつき、偏り、全体像  
 が把握できない



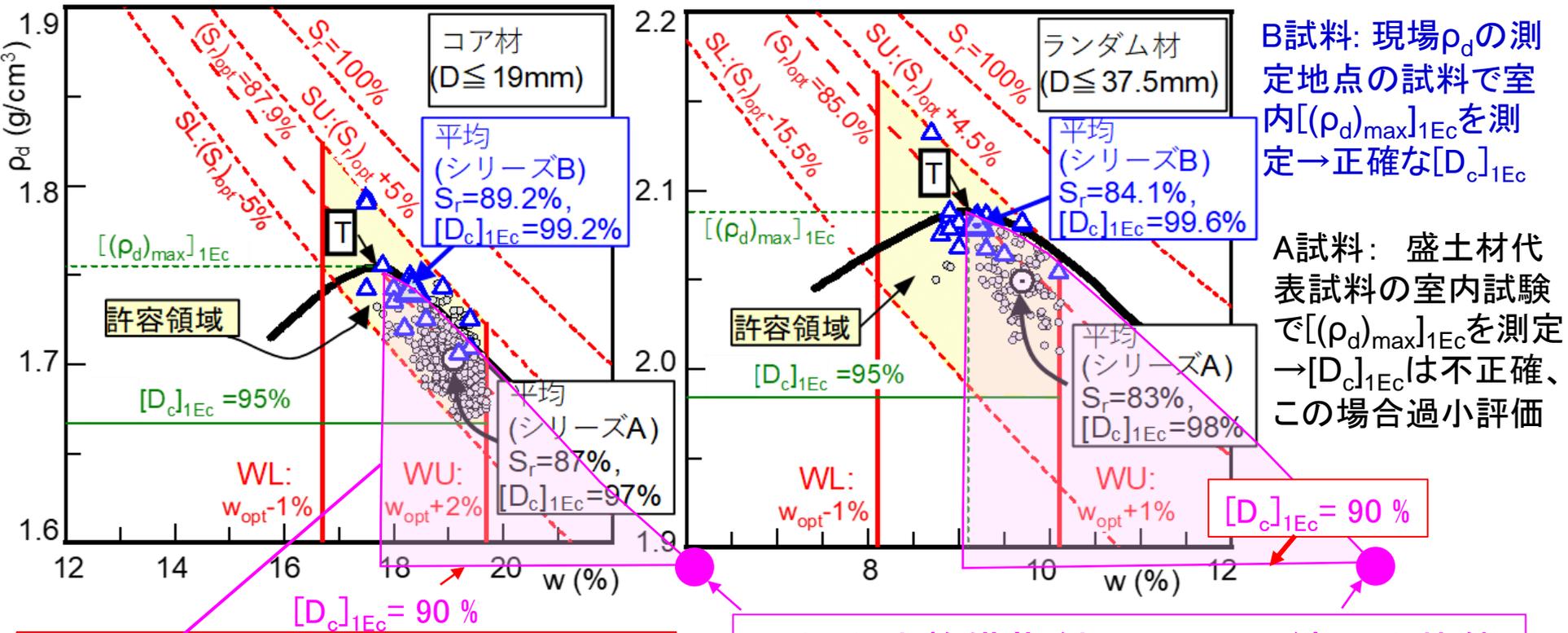
N: A試料での締固め曲線の平均曲線

○: A試料の個々の現場締固め状態:  
 現場 $S_r$ の値及び現場 $\rho_d$ を「代表試料の**室内  
 締固め試験で求めた $[(\rho_d)_{max}]_{1Ec}$** 」で除した  
 $[D_c]_{1Ec}$ の値を維持して、Nに対して再プロット  
 △: B試料の現場締固め状態: 上と同じ方法で  
 Nに対して再プロット。ただし、 $[D_c]_{1Ec}$ は「現場  
 $\rho_d$ 」を「**その測定地点で採取した試料の  
 室内締固め試験で求めた $[(\rho_d)_{max}]_{1Ec}$** 」で除  
 した値(A試料のデータよりも信頼できる)



# 新しい締固め管理と従来の締固め管理の比較

締固め目標Tの設定:  $w = \text{「試験施工(現場 } CEL_f \approx 1.5Ec) \text{ での } w_{opt}\text{」} + \alpha \approx (w_{opt})_{1Ec}$ ;  $\rho_d = [(\rho_d)_{max}]_{1Ec}$



旧ため池整備指針での許容領域

旧ため池整備指針では、この締固め状態において設計強度を評価

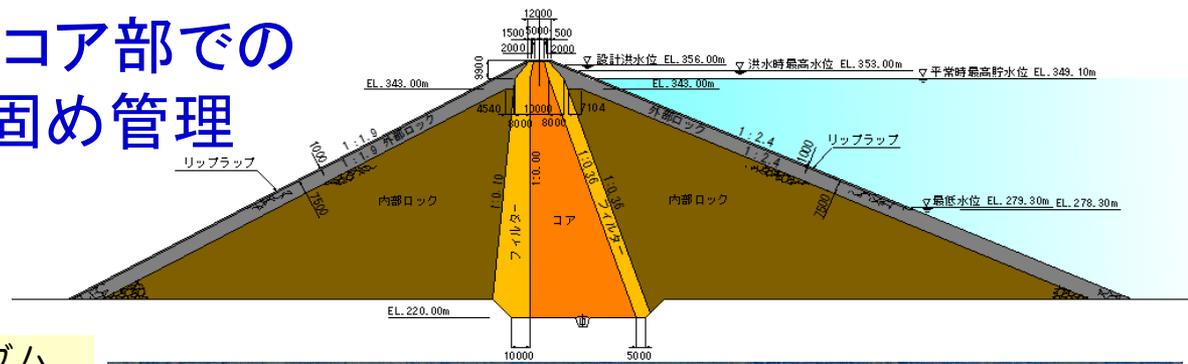
## ● 藤沼ダムの強化復旧:

飽和度管理を重視した締固め管理によって、通常の施工コストで、

- ① 崩壊した堤体よりも、遥かに良い締固め状態 (試料Bの締固め度  $[D_c]_{1Ec}$  の平均値  $\approx 100\%$  ⇒ 目標締固め状態Tをほぼ達成)
- ② 旧ため池整備指針に従った場合よりも、かなり良い締固めを実現

# 水資源機構小石原川ダムコア部での飽和度管理を重視した締固め管理

## 2019年7月11日天端到達

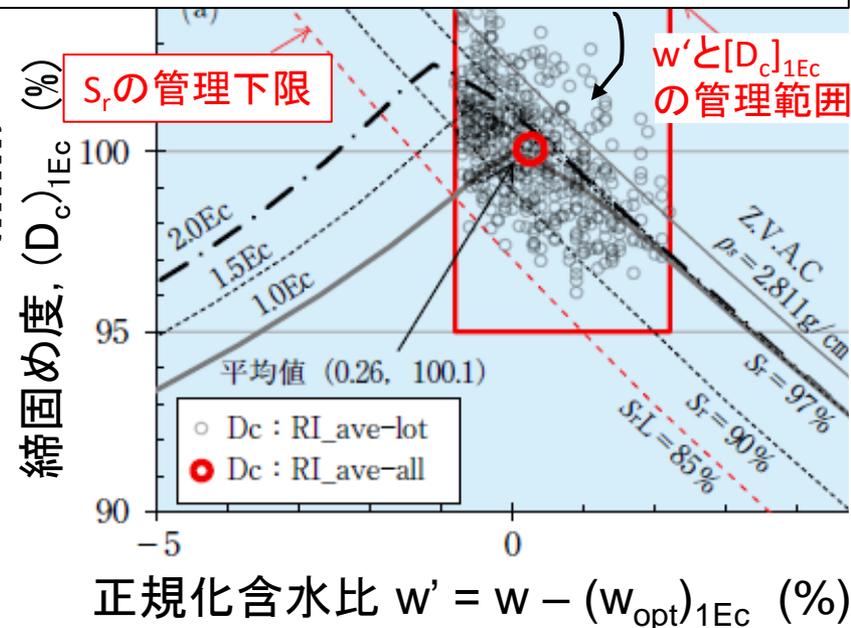
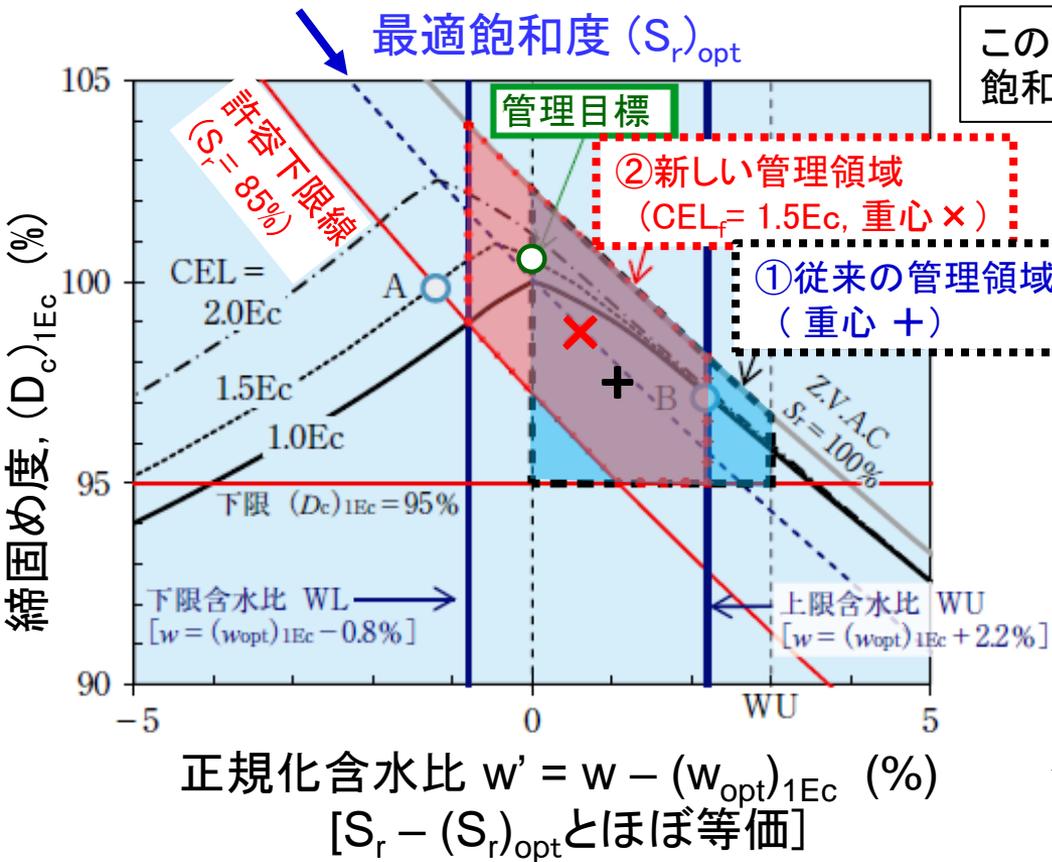


(完成写真: 坂本博紀氏)

型式	ロックフィルダム
堤高	139.0m
堤頂長	553.0m
堤体積	約 8,300,000m <sup>3</sup>
非越流部標高	EL.358.0m
ダム天端標高	EL.359.0m
ダム基礎標高	EL.220.0m
上流面勾配	1:2.4
下流面勾配	1:1.9

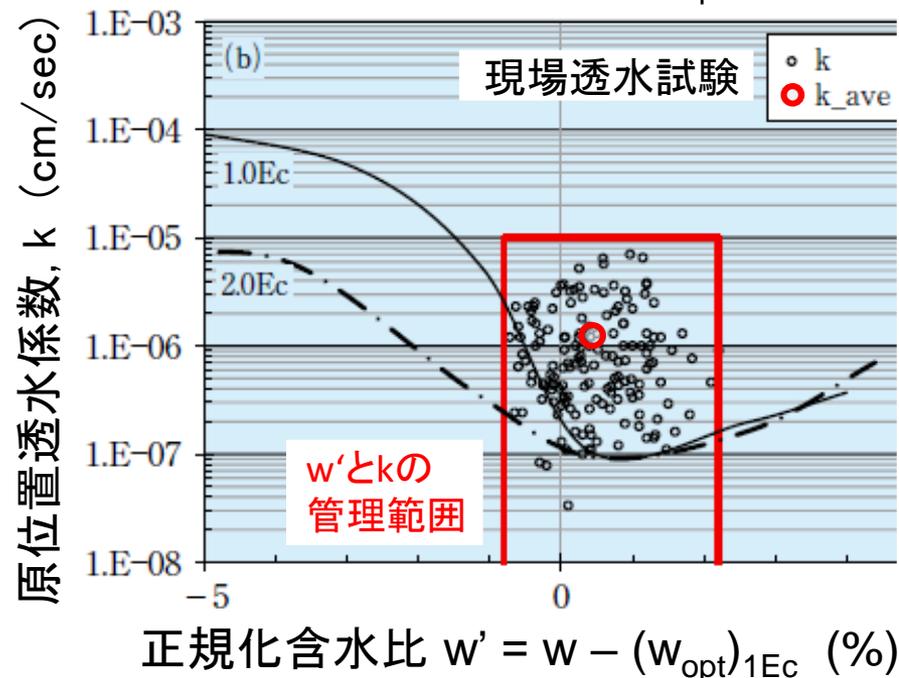
盛立数量		
コア		約 900,000m <sup>3</sup>
フィルター		約 800,000m <sup>3</sup>
ロック	内部ロック	約 5,000,000m <sup>3</sup>
	外部ロック	約 1,400,000m <sup>3</sup>
	リップラップ	約 200,000m <sup>3</sup>
	計	約 8,300,000m <sup>3</sup>

坂本博紀・小林弘明(2020): フィルダムコアゾーンの施工における新たな締固め管理、特集盛土締固め管理の新たな展開、雑誌基礎工、11月号, 58-61頁



- 1) 締固め管理目標を導入
- 2) 飽和度の許容下限線 ( $S_r = 85\%$ ) を導入
- 3) 品質管理領域を、従来よりも  $w$  が低く  $\rho_d$  が高い左上方へ移動 (重心:  $+$   $\Rightarrow$   $\times$ )

→ 高い  $(D_c)_{1Ec}$  ( $\sim 100\%$ ) と十分低い  $k$  ( $< 10^{-5}$  cm/sec) を達成



# 講演概要

## 盛土の含水比管理の課題:

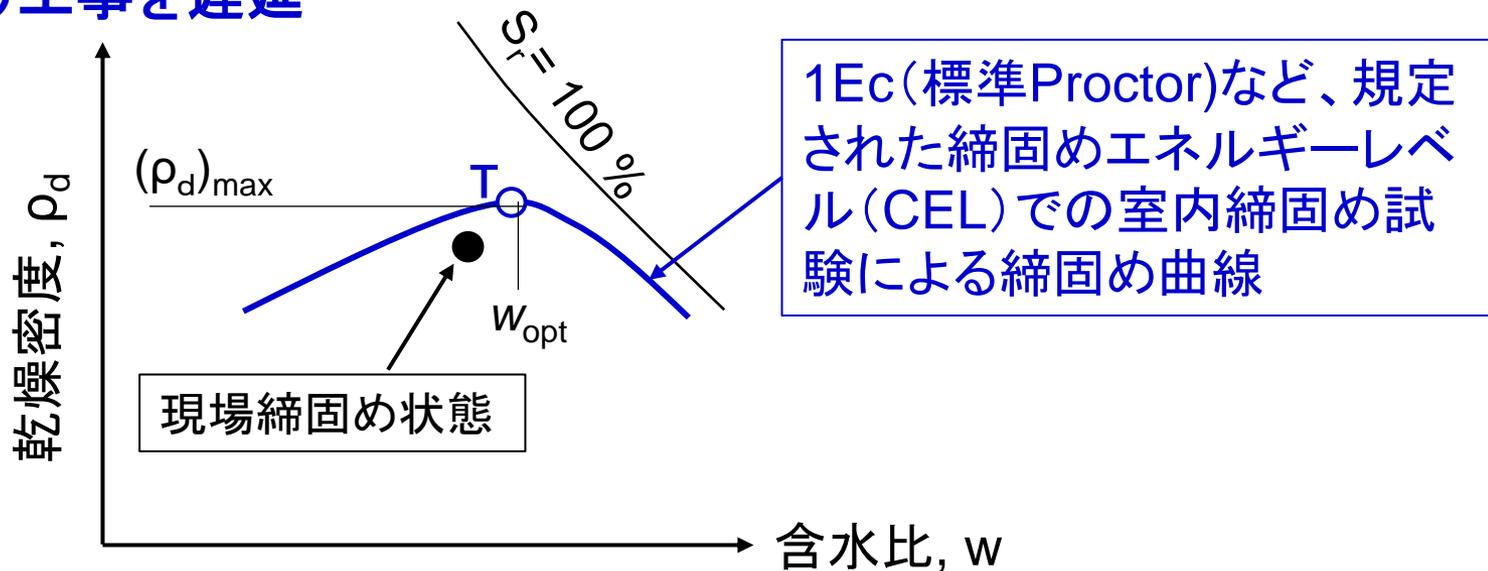
盛土材の含水比調整と締固めた盛土の含水比の測定・確認  
非常に重要であるが、締固め度管理と比較すると  
軽視・回避される傾向:

## 締固め管理の新たな展開:

- ・ **最適飽和度**を目指す締固め管理体系  
(**最適飽和度**において、乾燥密度は極大、物性はほぼ最適値)
- ・ **適切な締固め度プラス最適飽和度の状態を締固め目標**と設定
- ・ **省力迅速化・面的締固め管理:**  
締固めエネルギーと土質の管理を前提とした  
K値、CCVなどの**地盤剛性指標の上・下限値管理**  
(従来の地盤剛性指標の下限値管理を発展させた方法)

# 従来の現場 ( $\rho_d$ & $w$ ) に基づく締固め管理の問題点

- ①現場での  $(\rho_d)_{\max}$  及び  $w_{\text{opt}}$  は、代表試料を用いて特定のCELで行った室内締固め試験で得られた値に対してバラツキ、偏る ⇒ 飽和度管理で解決
- ②少数の代表箇所現場 ( $\rho_d$  &  $w$ ) を測定  
⇒ 離散的測定で締固めの面的管理ができない
- ③時間が掛かり工事を遅延

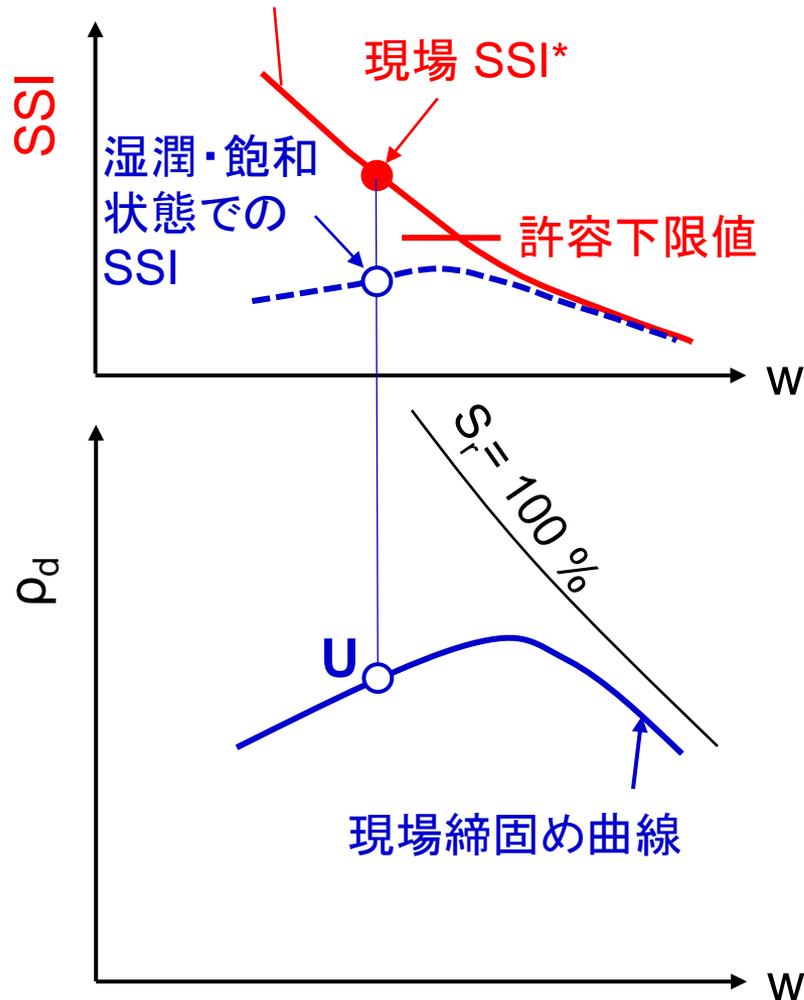


⇒ 迅速多数、あるいは連続的に測定した  $K_{P,FWD}$ ,  $E$ ,  $G_0$ ,  $CCV$  等の地盤剛性指標 (Soil Stiffness Index, SSI) に基づく面的締固め管理への移行  
しかし、様々な課題を解決する必要がある

# 従来の地盤剛性指標SSIの下限值管理の問題点

## 二つの方法

現場締め固め曲線に沿った  
SSI ~ w関係



方法 1: 「締め固め土で測定した不飽和状態  
でのSSI\*」を「供用中の土構造物(通常、湿  
潤飽和状態を想定)での剛性」と見なして、  
SSI\*の全測定値  $\geq$  許容下限値

を確認

⇒より乾燥側で締め固めた方が良いこと  
になる・・・本当か？

乾燥側で締め固めると、Uのように、  
「不飽和状態で測定したSSI\*」は、湿潤  
化飽和化によって大きく低下。透水係数  
も大きくなり、水浸コラップスも大きくなる。

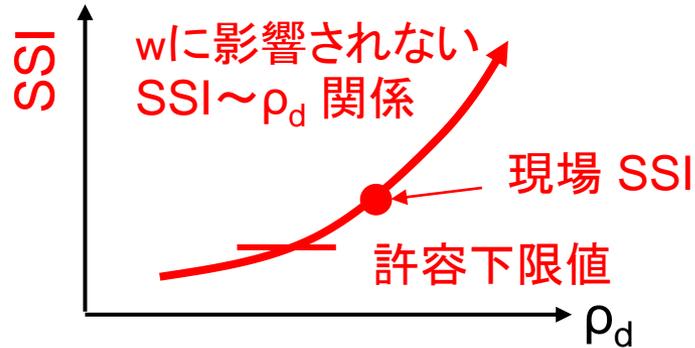
⇒方法1は、Uのような締め固め不良状態  
を許容することになる

# 方法 2: SSIから現場締固め状態を推定 ⇒ 設計物性値を推定

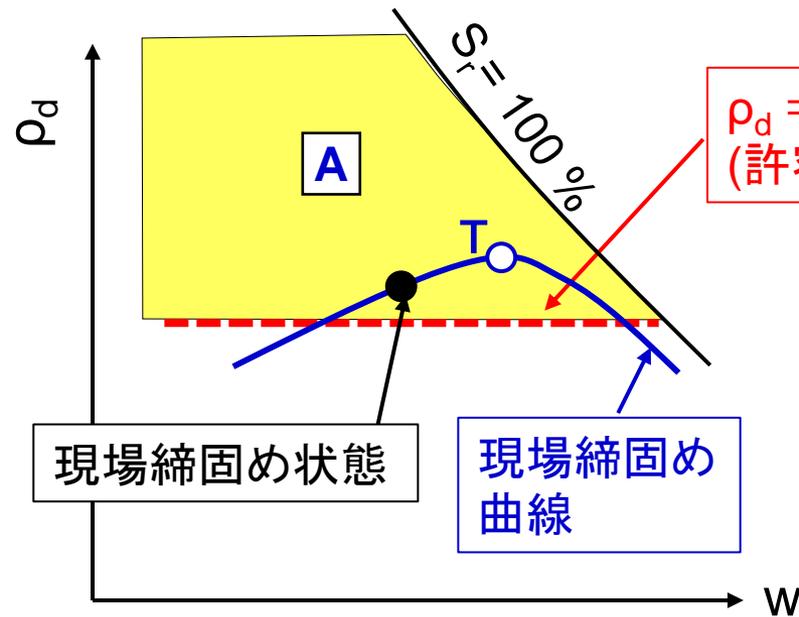
通常、暗黙の仮定:

- ・SSI $\sim\rho_d$  関係は含水比 $w$ に影響されない
- ・SSIの増加は、常に $\rho_d$ の増加を意味する

⇒  $\rho_d - w$  面でSSIの等高線は水平



全てのSSIの値  $\geq$  許容下限値 であれば、  
全ての締固め状態は許容領域 A の内部であり、  
 $\rho_d \geq$  許容下限値 を実現していると、想定

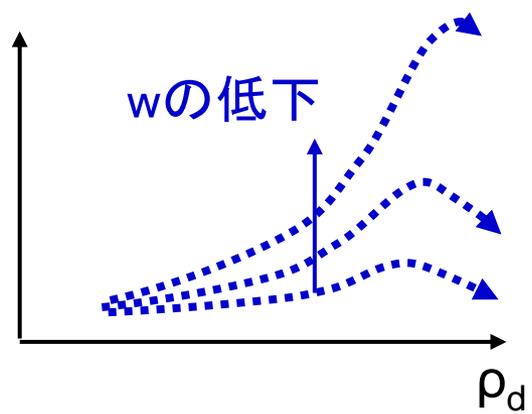
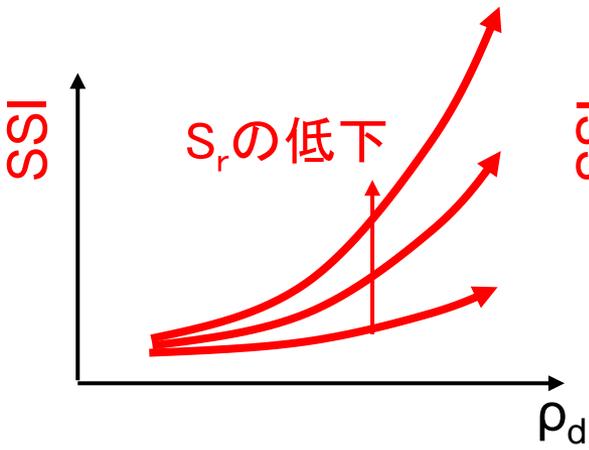


しかし、実際のSSIの等高線は、この仮定とは全く異なる。

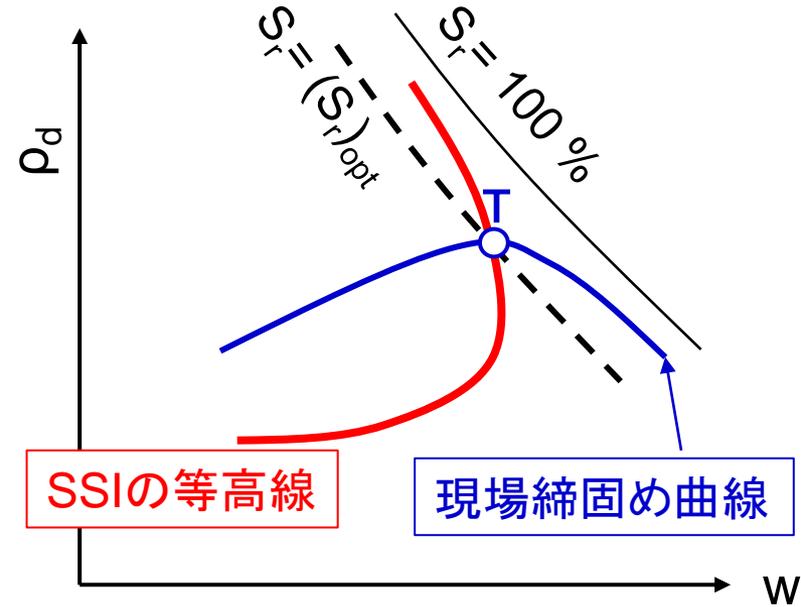
⇒ **方法 2 も機能しない**

# 実際のSSIの特徴:

$K_{P,FWD}$  (小型重錘落下試験); 原位置CBR;  
 $E$  (落球探査法);  $G_0$  (原位置せん断弾性波速度 $V_s$ );  
 CCV (振動ローラの応答加速度から求まる地盤剛性指標) 等々.



1) SSI-  $\rho_d$  関係は、 $S_r$  もしくは  $w$  に非常強く影響される  
 $\Rightarrow$  締固め状態は2変数( $\rho_d$ ,  $w$ )あるいは( $\rho_d$ ,  $S_r$ )で定義されるので、一変数(SSI)だけでは推定できない



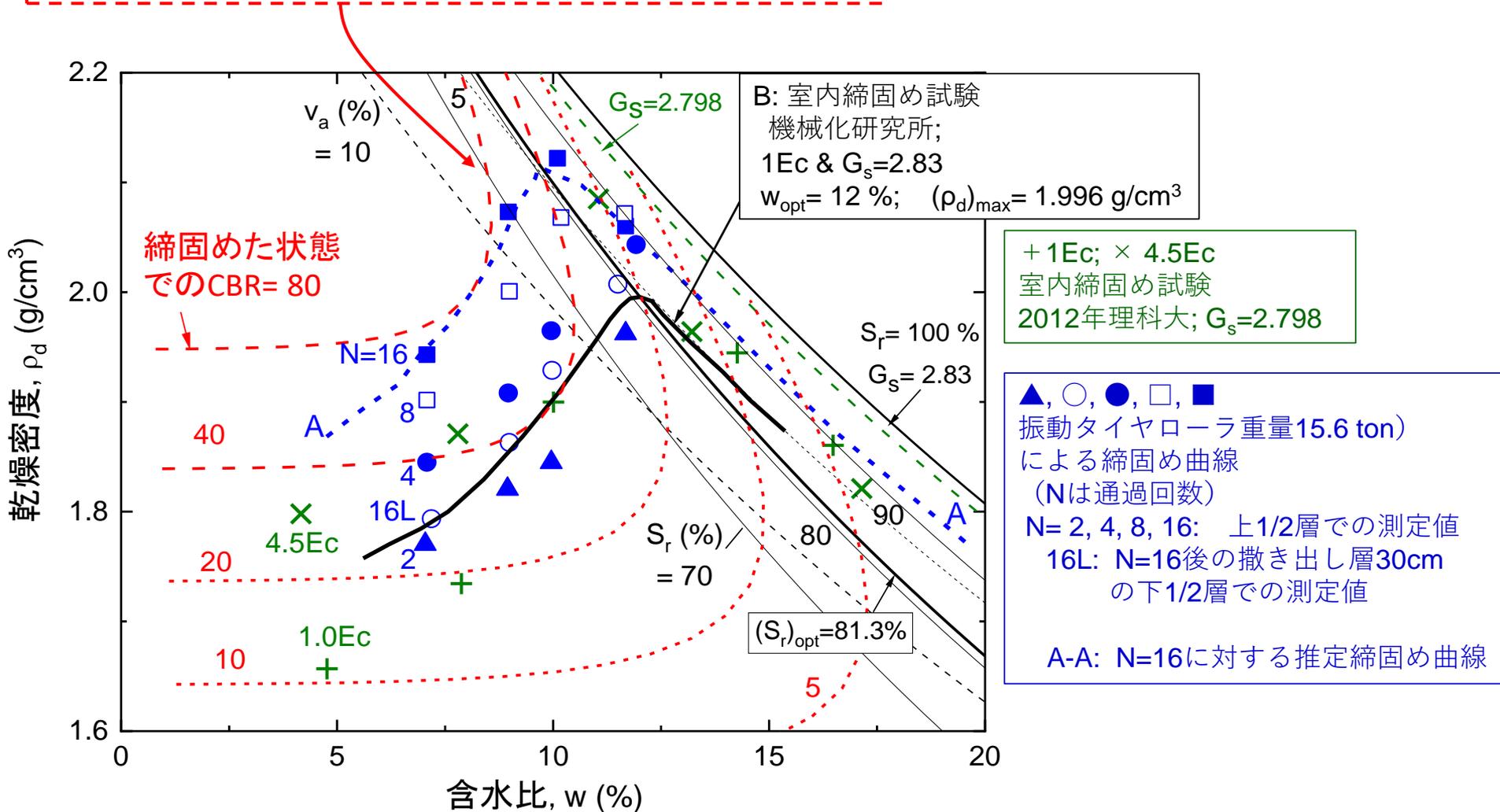
2) 締固め目標T (通常 $S_r = (S_r)_{opt}$ ) の周辺では、SSIの等高線は鉛直に近い  
 $\Rightarrow$  SSIの値から、 $\rho_d$ の値は推定できない!  
 むしろ、 $w$ の値が推定できる!

# 旧建設機械化研究所での実大締固め試験で測定されたCBR

$$CBR = f_{CBR}(S_r) \cdot (\rho_d / \rho_w - 0.4)^{9.5} \quad (1)$$

による  $\rho_d \sim w$  面上でのCBRの等高線群

形状に注目

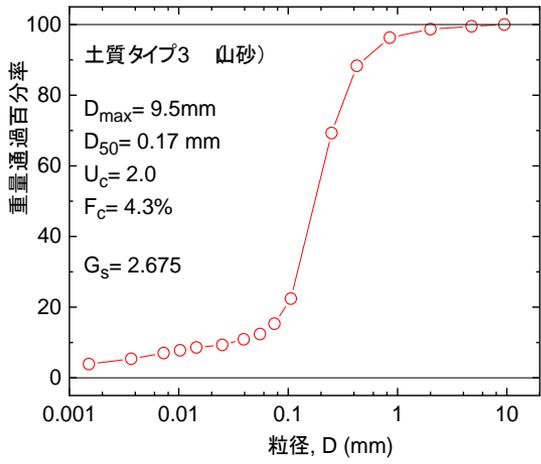


# 土木研究所での盛土締固め管理に関する共同研究(2011-2013年度)

- 実大締固め試験における小型重錘落下試験による $K_{P.FWD}$ の系統的な測定
- $K_{P.FWD}$ の締固め管理での活用法の検討

## 10種類の締固め機械を用いた実大締固め実験

山砂を使用



振動ローラSV512



タイヤローラ



振動ローラBW141



ブルドーザ8t



ランマ60kg



プレートコンパクタ



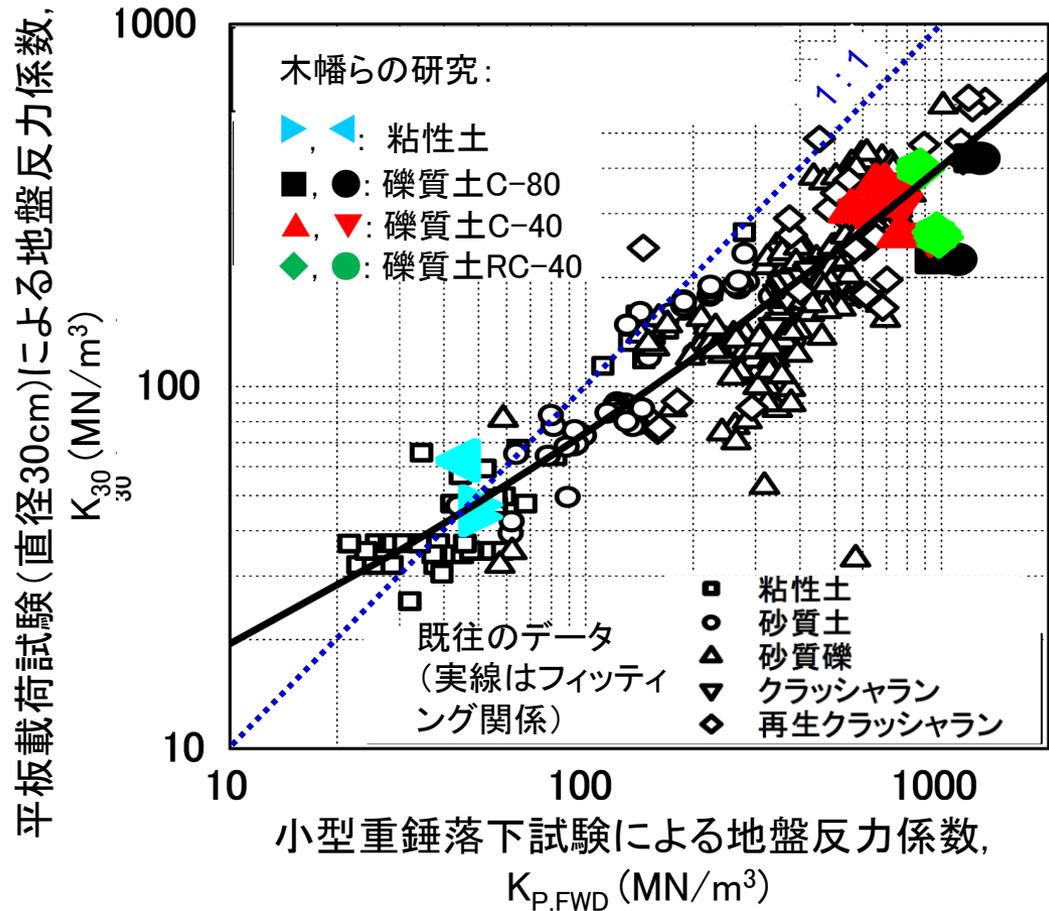
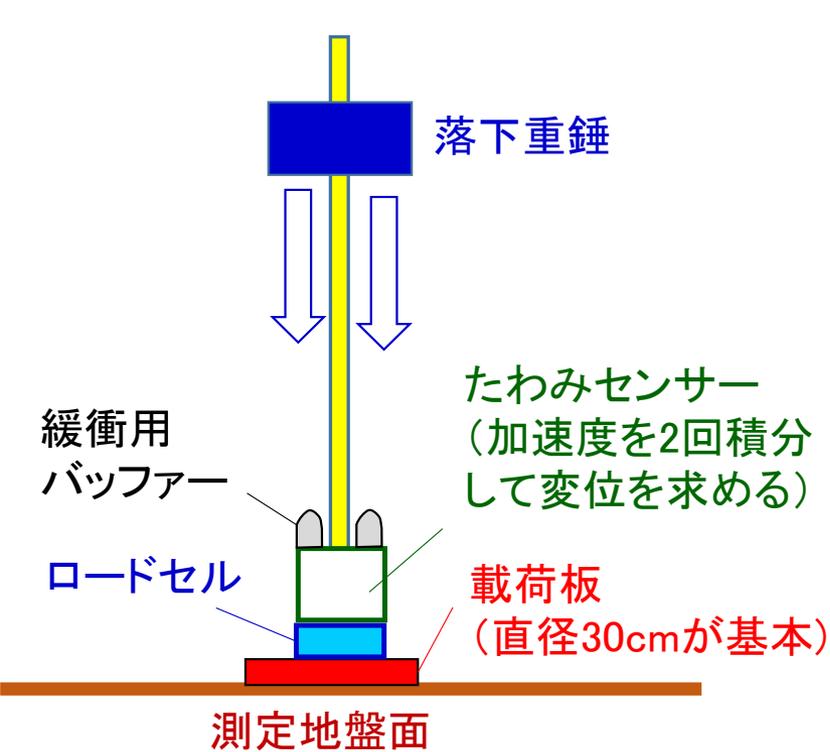
ハンドガイドローラ



前後進コンパクタ

Tatsuoka, F., Hashimoto, T. and Tateyama, K. (2021): Soil stiffness as a function of dry density and the degree of saturation for compaction control, *Soils and Foundations*, Vol.61, pp.989-1002.

# 小型重錘落下試験(Portable Falling Weight Deflecto-meter Test)



木幡行宏・アーマッド シャフィーク・山本健一・齋藤昌之: 小型FWD試験による道路地盤の剛性評価に関する検討, 土木学会舗装工学論文集, Vol.15, 12月号, pp.177-184, 2010.

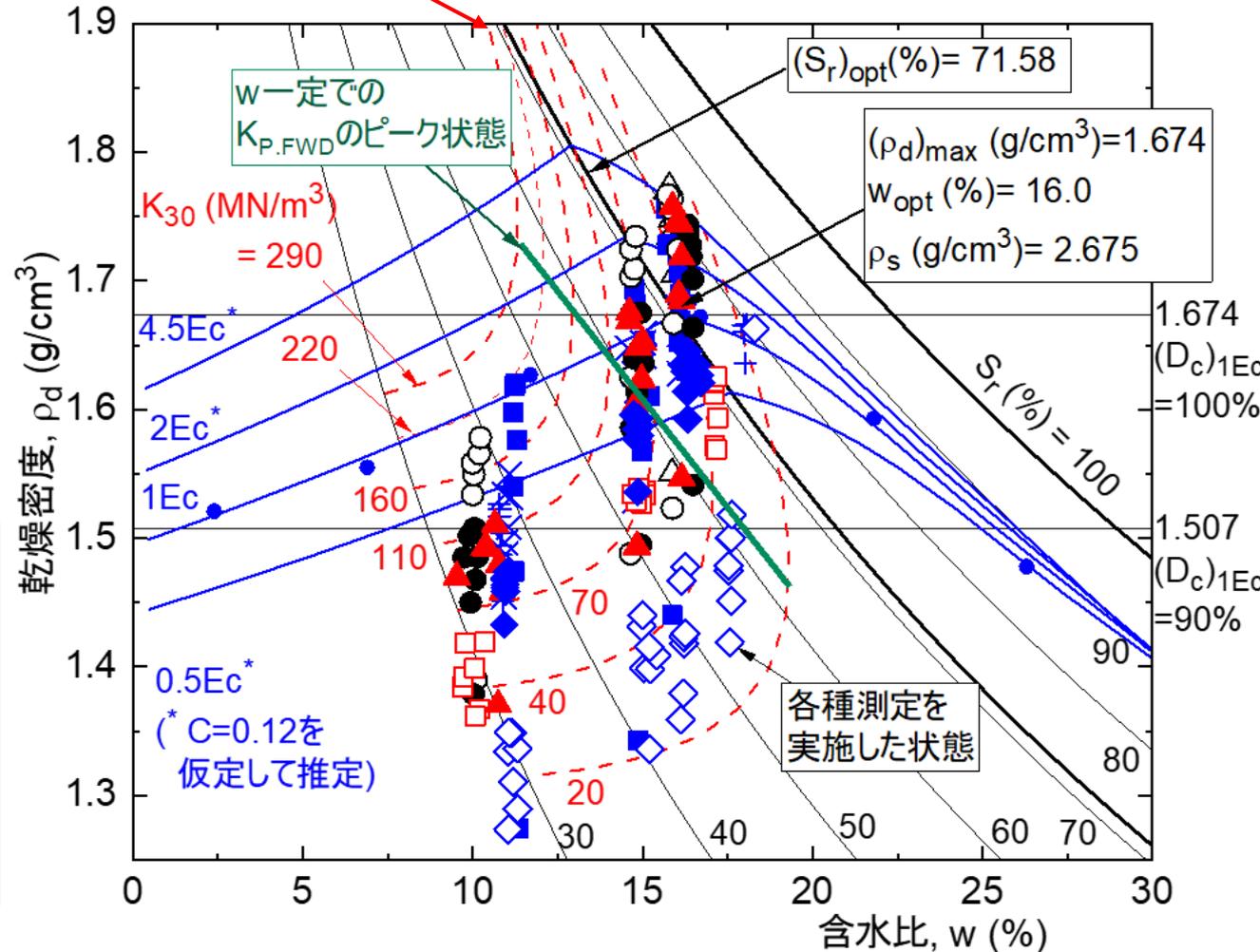
$$K_{P.FWD} = f_{P.FWD}(S_r) \cdot (\rho_d / \rho_w - 0.4)^{9.5} \quad (2)$$

による  $\rho_d \sim w$  面上での  $K_{P.FWD}$  の等高線群

CBRの等高線  
と同じ形状



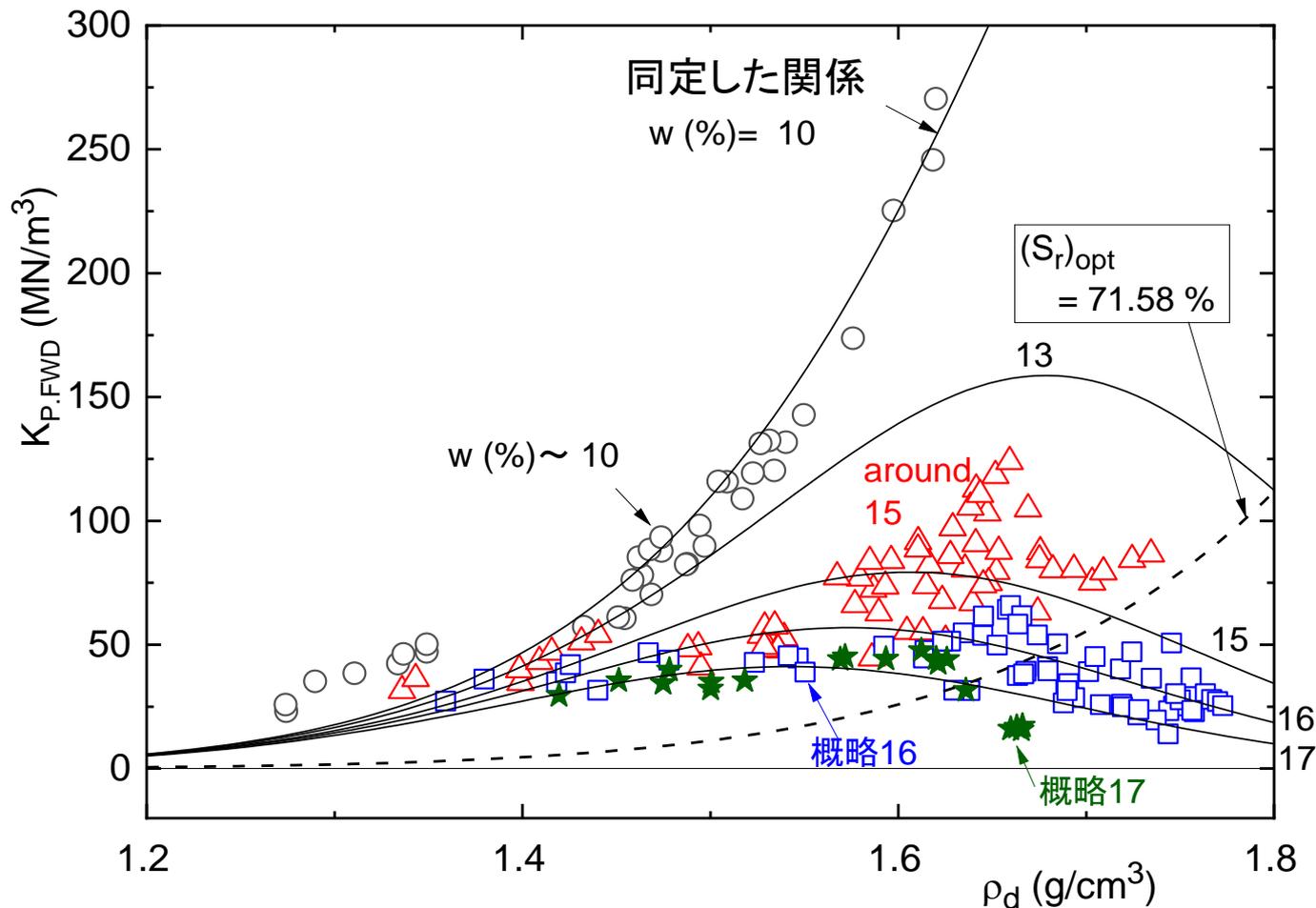
小型重錘落下試験



締固め回数  $N = 0, 2, 4, 6, 8, 12, 16$  回で、 $\rho_d$ ,  $w$ ,  $K_{P.FWD}$  等を測定

$K_{P.FWD}$  は、平板載荷試験による  $K_{30}$  とほぼ同等

# wで分類した $K_{P.FWD} \sim \rho_d$ 関係(実線・破線群は定式化した関数)



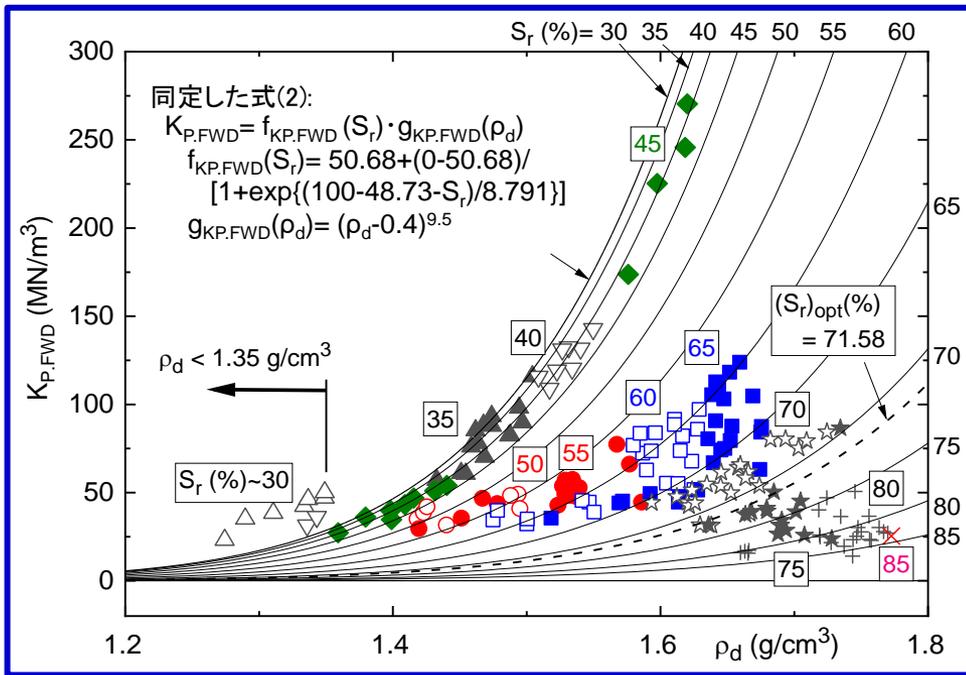
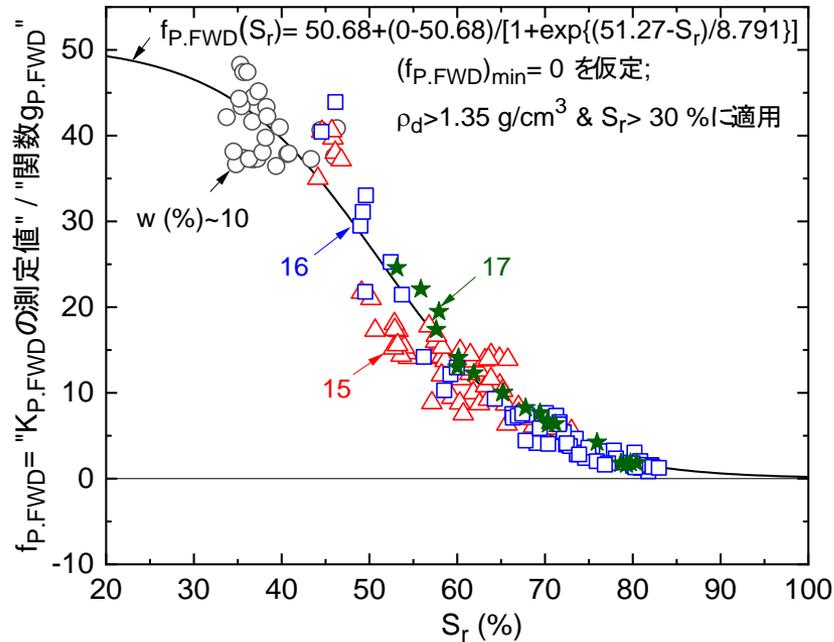
- w一定の条件で、 $\rho_d$ が一定程度以上に増加すると $K_{P.FWD}$ は減少し始める。
- ・これは、 $K_{P.FWD}$ の値だけでは $\rho_d$ を推定できないことを意味する。
  - ・この現象に遭遇すると、通常は困惑、 $K_{P.FWD}$ の活用法が見通せなくなる。
  - ・この現象は、 $\rho_d$ の増加に伴う $S_r$ の増加のため！

締固め機種、通過回数(すなわち、CEL)によらない、変数 $\rho_d$ と $S_r$ が分離された関数(CBRと同様):

$$K_{P.FWD} = f_{P.FWD}(S_r) \cdot g_{P.FWD}(\rho_d) \quad (2)$$

$f_{P.FWD}(S_r)$   
(実線の関係)

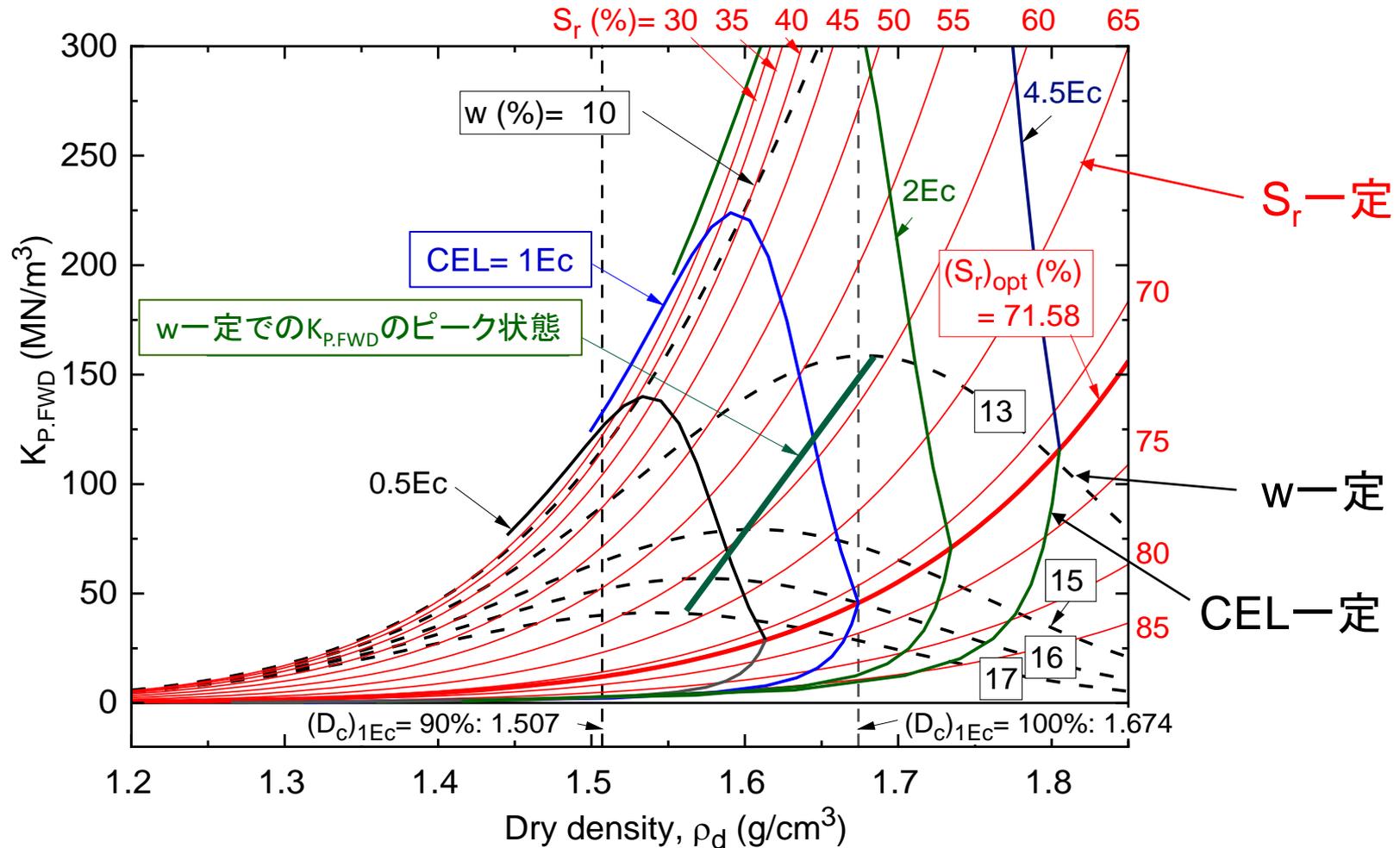
$g_{P.FWD}(\rho_d) = (\rho_d / \rho_w - 0.4)^{9.5}$   
(実線群の関係)



含水比の値に関わらず、一義的

データは飽和度で分類

関数  $K_{P.FWD} = g_{P.FWD} \cdot f_{P.FWD}$  に基づき、含水比  $w$ 、飽和度  $S_r$ 、締固めエネルギー  $CEL$  をパラメータとした  $K_{P.FWD} \sim \rho_d$  関係



$K_{P.FWD} \sim \rho_d$  関係が  $S_r$  に依存しなければ、これらの曲線は全て一つになる  
 しかし実際は  $S_r$  に依存し、 $K_{P.FWD}$  の値だけから  $\rho_d$  の値は推定できない

$$K_{P.FWD} = f_{P.FWD}(S_r) \cdot (\rho_d / \rho_w - 0.4)^{9.5} \quad (2)$$

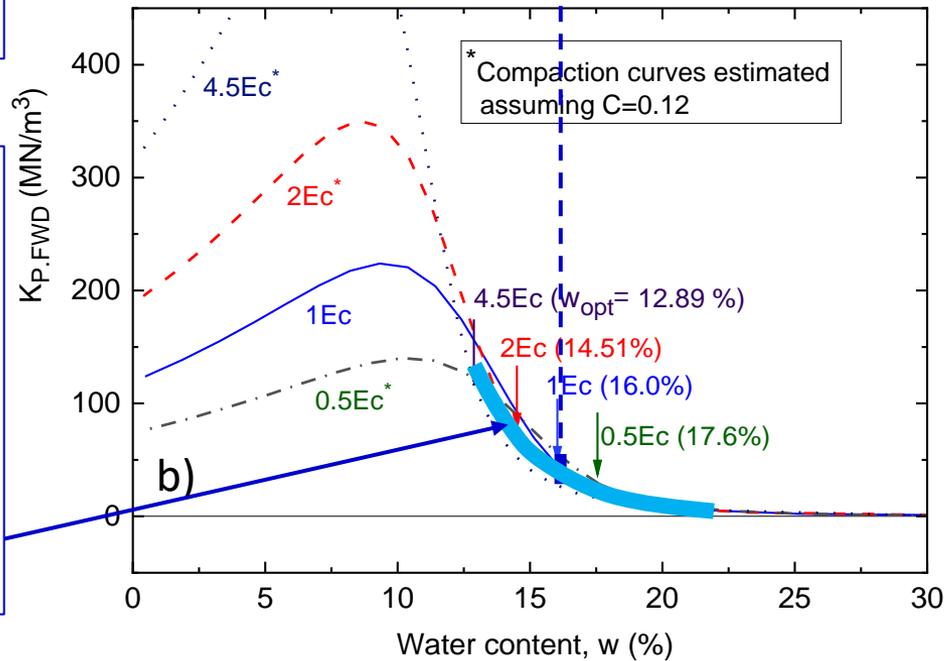
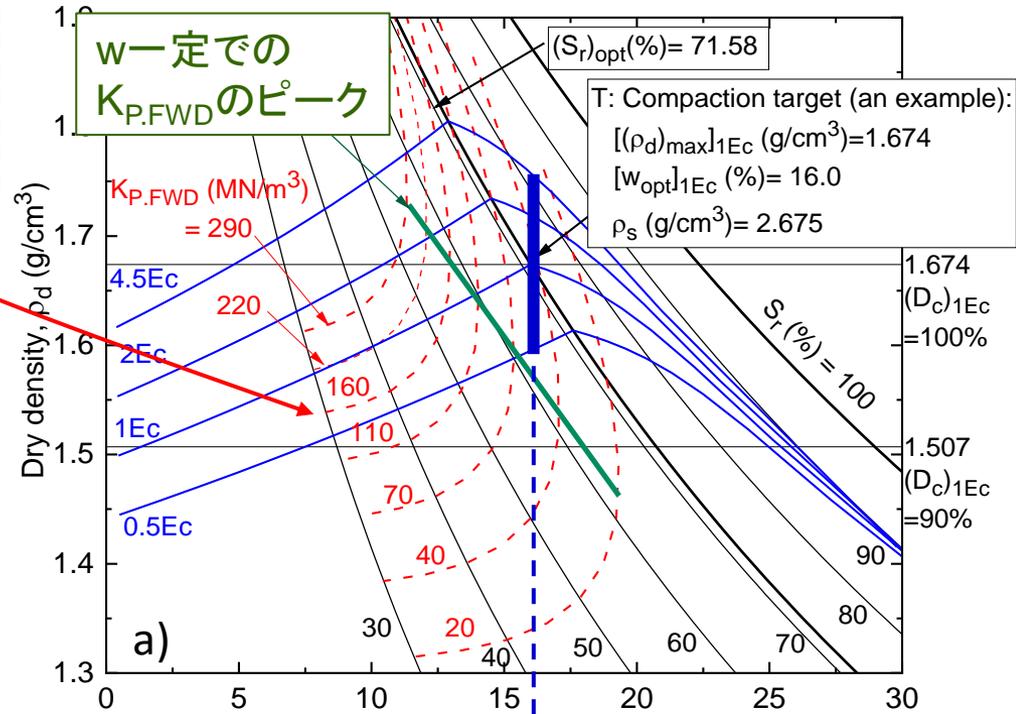
による  $\rho_d \sim w$  面上での  $K_{P.FWD}$  の等高線群

CBRの等高線と同じ形状

w一定の締固め過程において、  
 $K_{P.FWD}$  はCELによらないでほぼ一定、  
 つまり、 $\rho_d$ によらないでほぼ一定  
 $\Rightarrow K_{P.FWD}$  はwの指標となっている

CELによらない  $K_{P.FWD} \sim w$  関係：  
 $\Rightarrow$  この関係に  $K_{P.FWD}$  の測定値を代  
 入すれば、CELの値に関わらず、  
 wの概略値を推定できる！

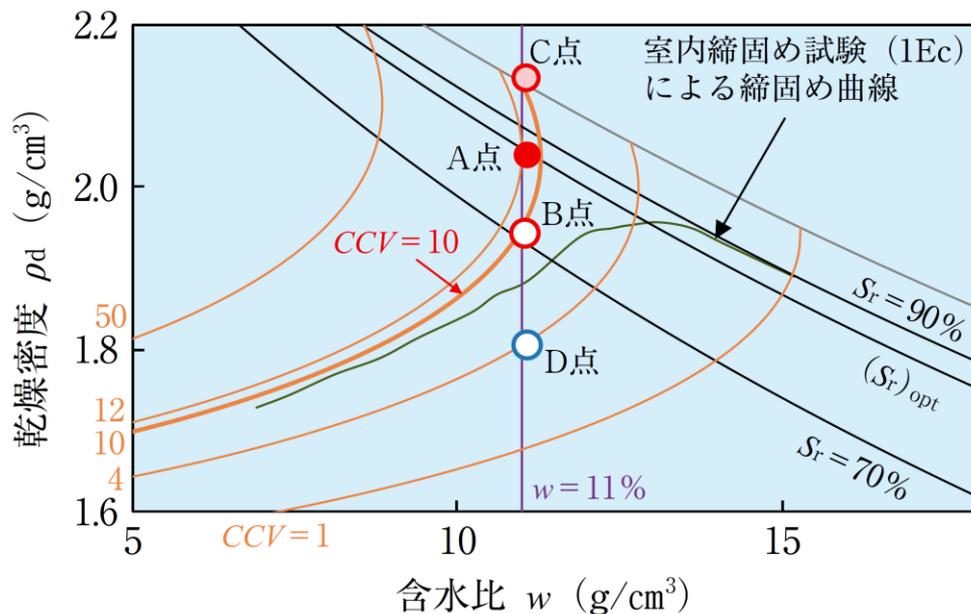
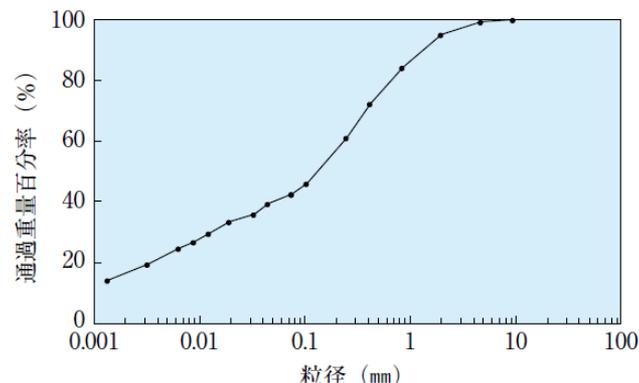
$\Rightarrow K_{P.FWD}$  の測定・管理は、実質、  
 wの測定・管理を意味する





# 運行中の振動ローラの応答加速度によるCCVに基づく 即時連続締固め管理⇒面的締固め管理

永井裕之・真壁淳・野田翔兵・兵動太一・菊池喜昭・龍岡文夫(2022): 振動ローラ加速度応答法を用いた盛土の締固め管理、特集締固め土の物性と設計・施工管理、雑誌基礎工、4月号、83-86頁



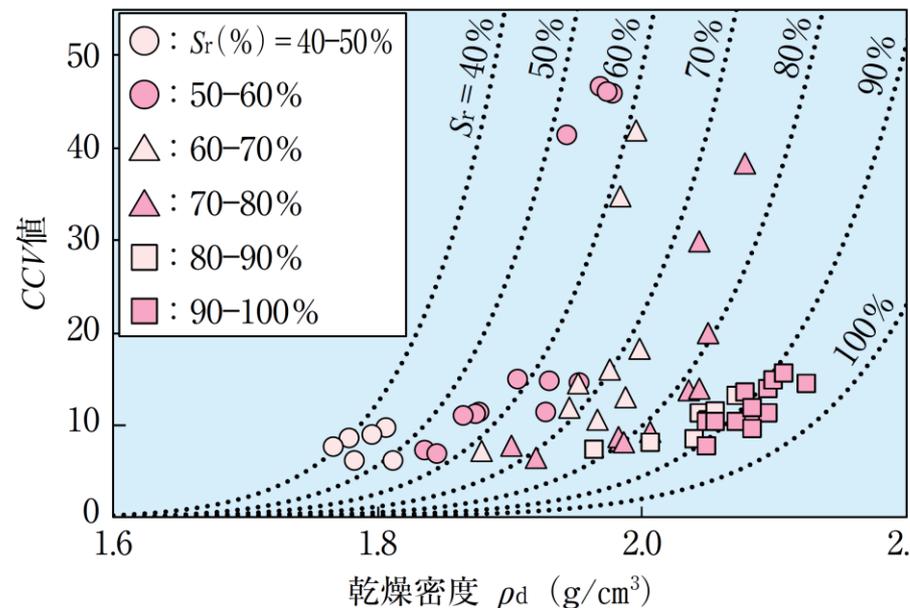
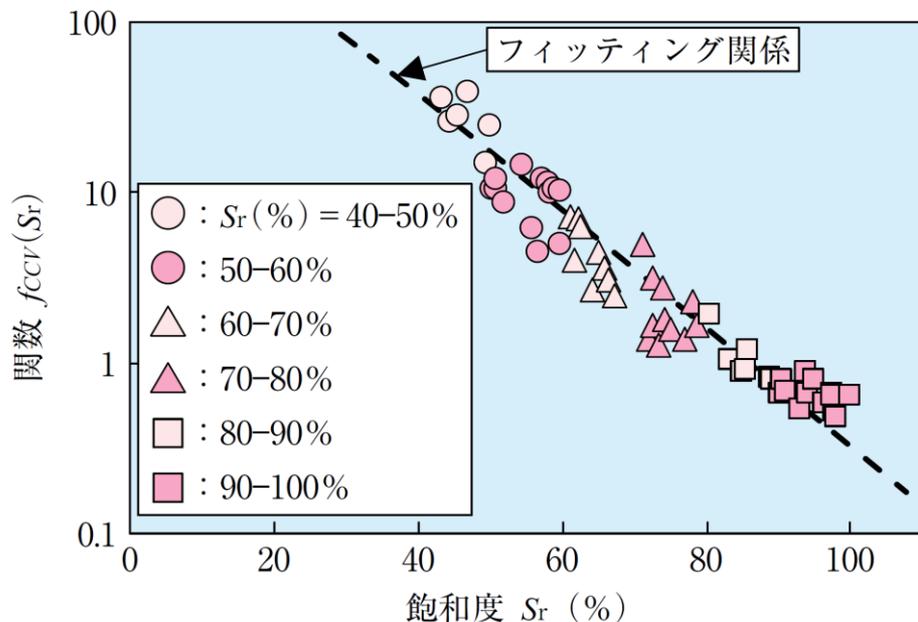
次式によるCCVの等高線:

$$CCV = f_{CCV}(S_r) \cdot (\rho_d / \rho_w - b)^c$$

これらの経験式及び等高線は、  
CBRと $K_{P,FWD}$ の同じ形式

# 運行中の振動ローラの応答加速度によるCCVに基づく即時連続締固め管理⇒面的締固め管理

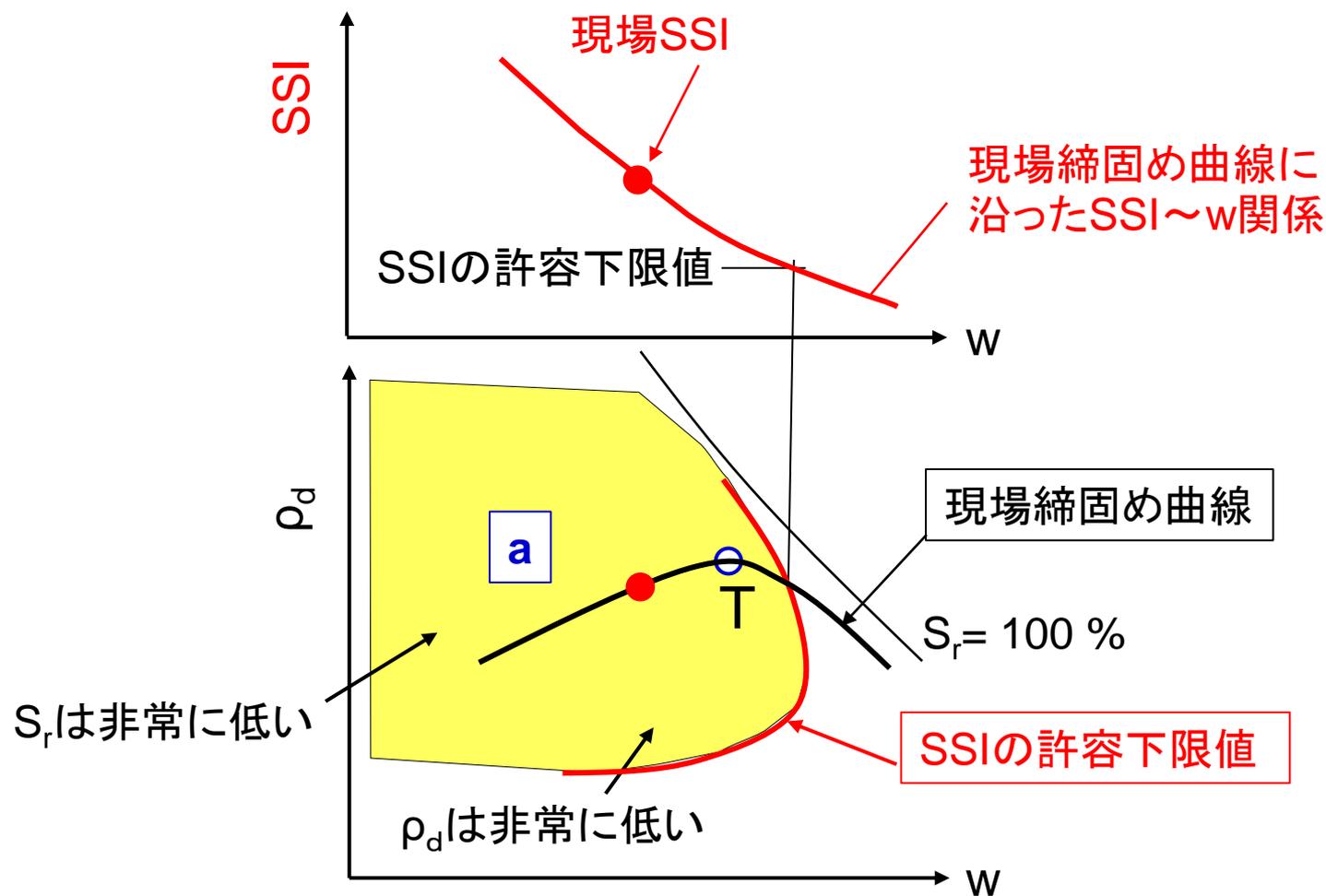
経験式:  $CCV = f_{CCV}(S_r) \cdot (\rho_d / \rho_w - b)^c$



これらの乾燥密度影響関数 $g_{CCV}$ と飽和度影響関数 $f_{CCV}$ は、他のSSI(非水浸 CBR、 $K_{P,FWD}$ 、せん断剛性率 $G_0$ など)の関数と類似

地盤剛性指標(Soil Stiffness Index, SSI)の等高線は、  
締固め目標Tの近傍ではほぼ鉛直

⇒ 従来のSSIの許容下限値管理は、aのような許容領域を意味する  
しかし、領域aは広すぎて、 $\rho_d$ が低すぎたり $S_r$ が低すぎる領域を含む



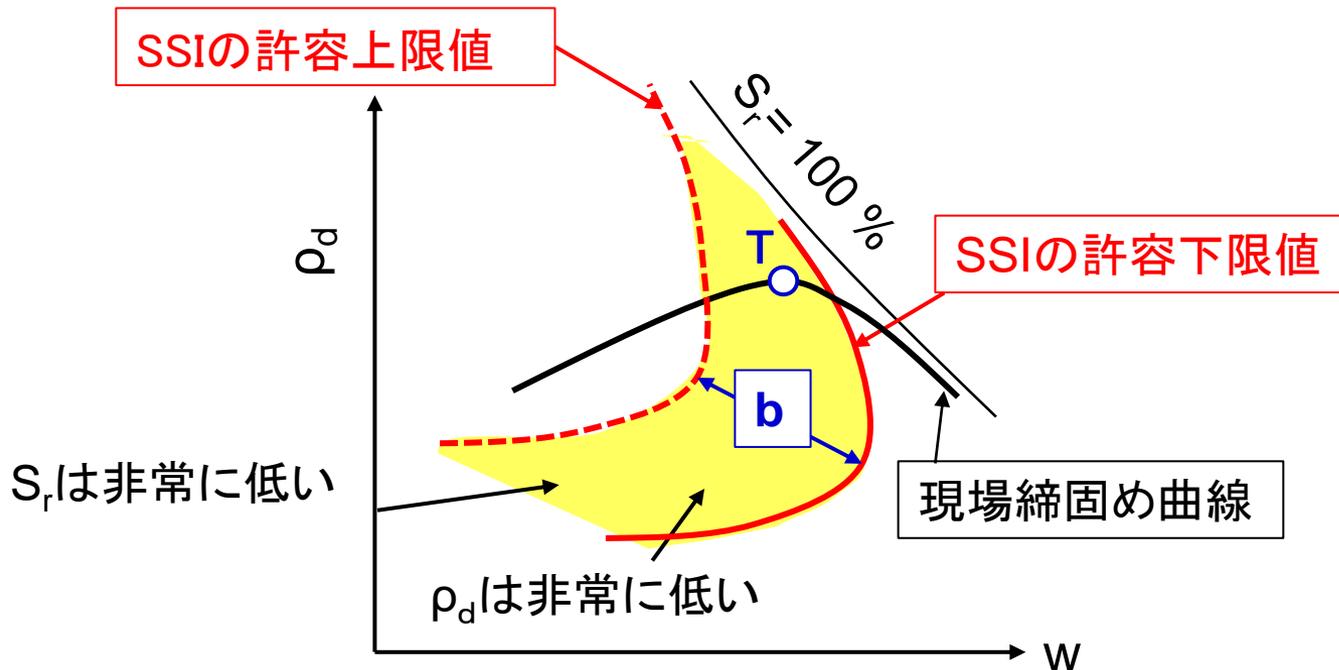
SSIの上限値管理 + 下限値管理 を行った場合は……

⇒ 許容領域は**b**となる。

領域**b**には、締固め不良領域を広く含む

⇒ SSIの上下限値管理も、それだけでは機能しない

では、どうすれば良いのか？



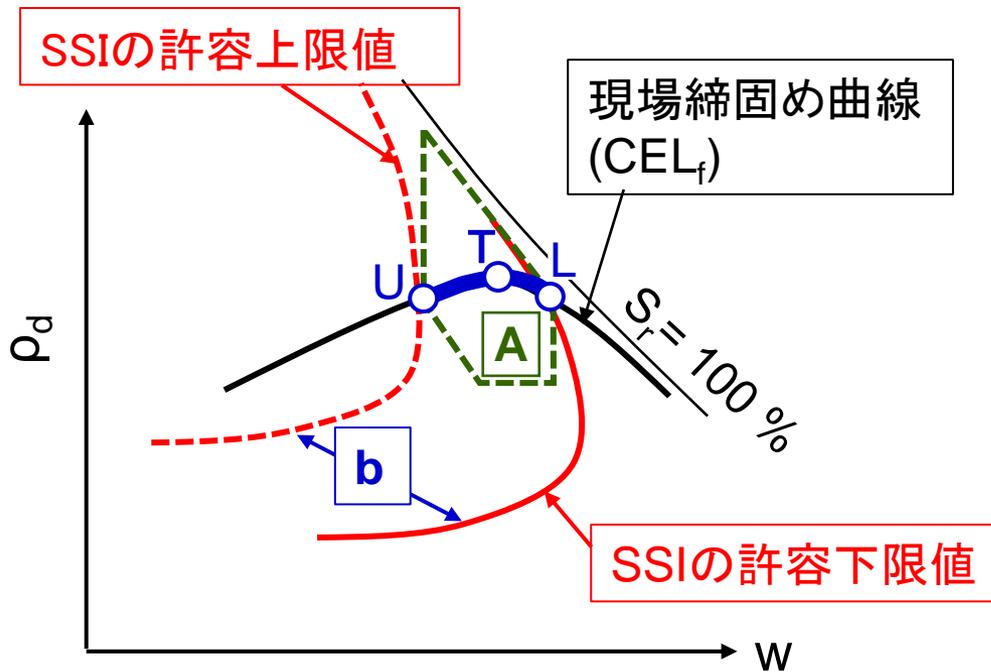
## 答は、現場締固め曲線の固定 プラス SSIの上下限值管理

1) 盛土材の土質を管理し、締固め機械の機種・走行、撒き出し厚の管理によって現場締固めエネルギーを管理 ⇒ 現場締固め曲線を固定

2) 許容上限値  $\geq$  現場SSIの全測定値  $\geq$  許容下限値 を確認、  
⇒ 全ての締固め状態が許容領域bの内部であることを確認

**1) + 2) ⇒ 現場締固め状態を、目標状態Tに近接したU-T-Lに誘導**

⇒ 水資源公団小石原川ダムコア部、災害廃棄物由来の土砂に適用



このような地盤剛性指標の上下限值管理は、以下の報文で紹介されている

坂本博紀(2022): 現場と室内で締め固めた礫混じり粘性土の変形特性と締固め管理への反映、特集締固め土の物性と設計・施工管理、雑誌基礎工、4月号, 69-72頁

吉田輝・龍岡文夫(2022): 締固め土の乾燥密度と飽和度の関数としての強度・剛性と締固め管理への適用、特集締固め土の物性と設計・施工管理、雑誌基礎工、4月号, 48-52頁

中村吉男・鴫田稔・肴倉宏史(2022): 災害廃棄物由来の分別土砂の締固め特性、特集締固め土の物性と設計・施工管理、雑誌基礎工、4月号, 100-103頁

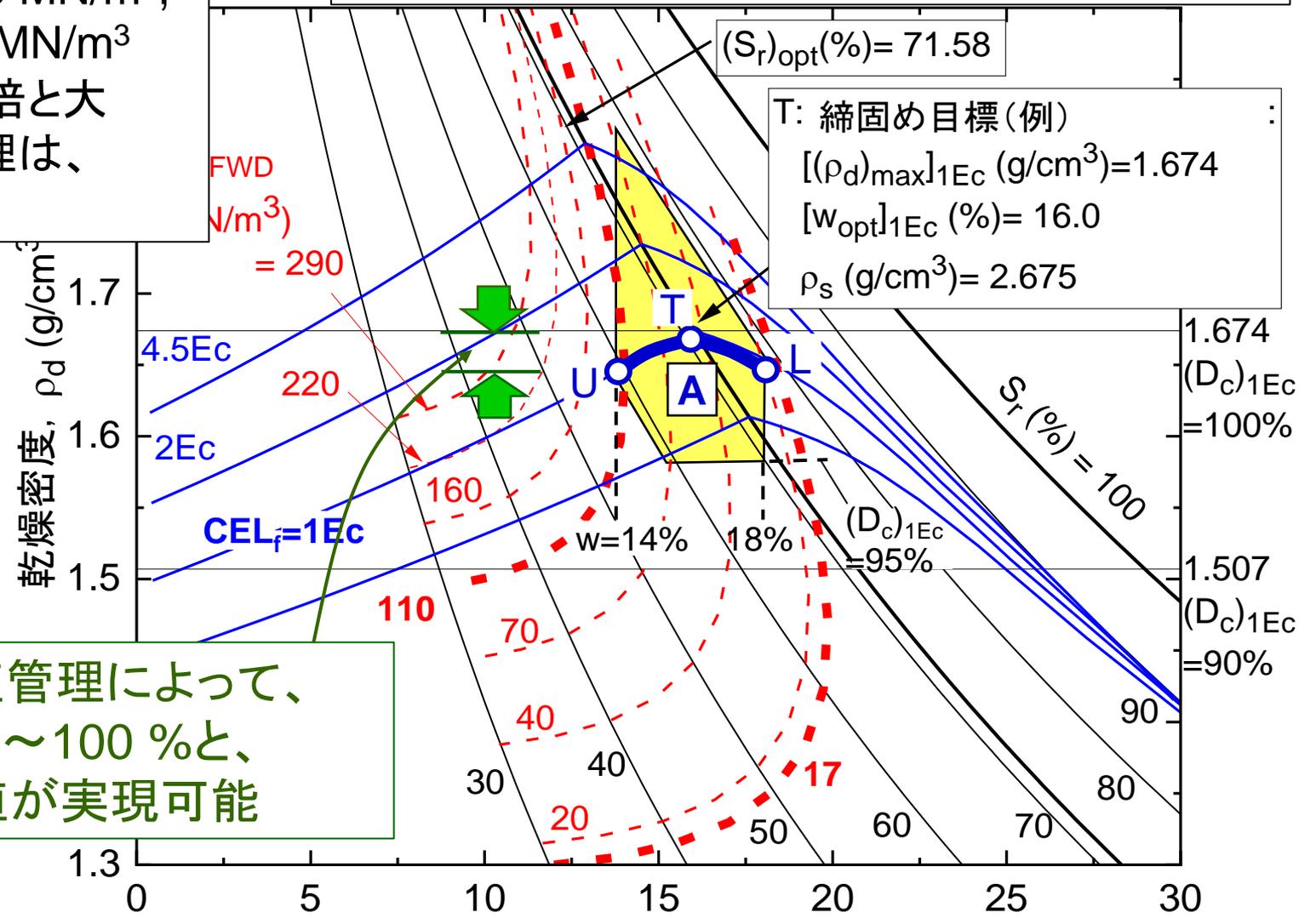
$K_{P.FWD} = f_{P.FWD}(S_r) \cdot g_{P.FWD}(\rho_d)$  の等高線に基づく締固め管理図の例

この例では、  
 $(K_{P.FWD})_{UB} = 110 \text{ MN/m}^3$ 、  
 $(K_{P.FWD})_{LB} = 17 \text{ MN/m}^3$   
 両者の比は6.5倍と大  
 $\Rightarrow$  上下限值管理は、  
 十分実施可能

A: 許容領域  
 U-T-L: 許容 $\rho_d$ -w 関係( $CEL_f = 1Ec$ を想定)

$(S_r)_{opt}(\%) = 71.58$

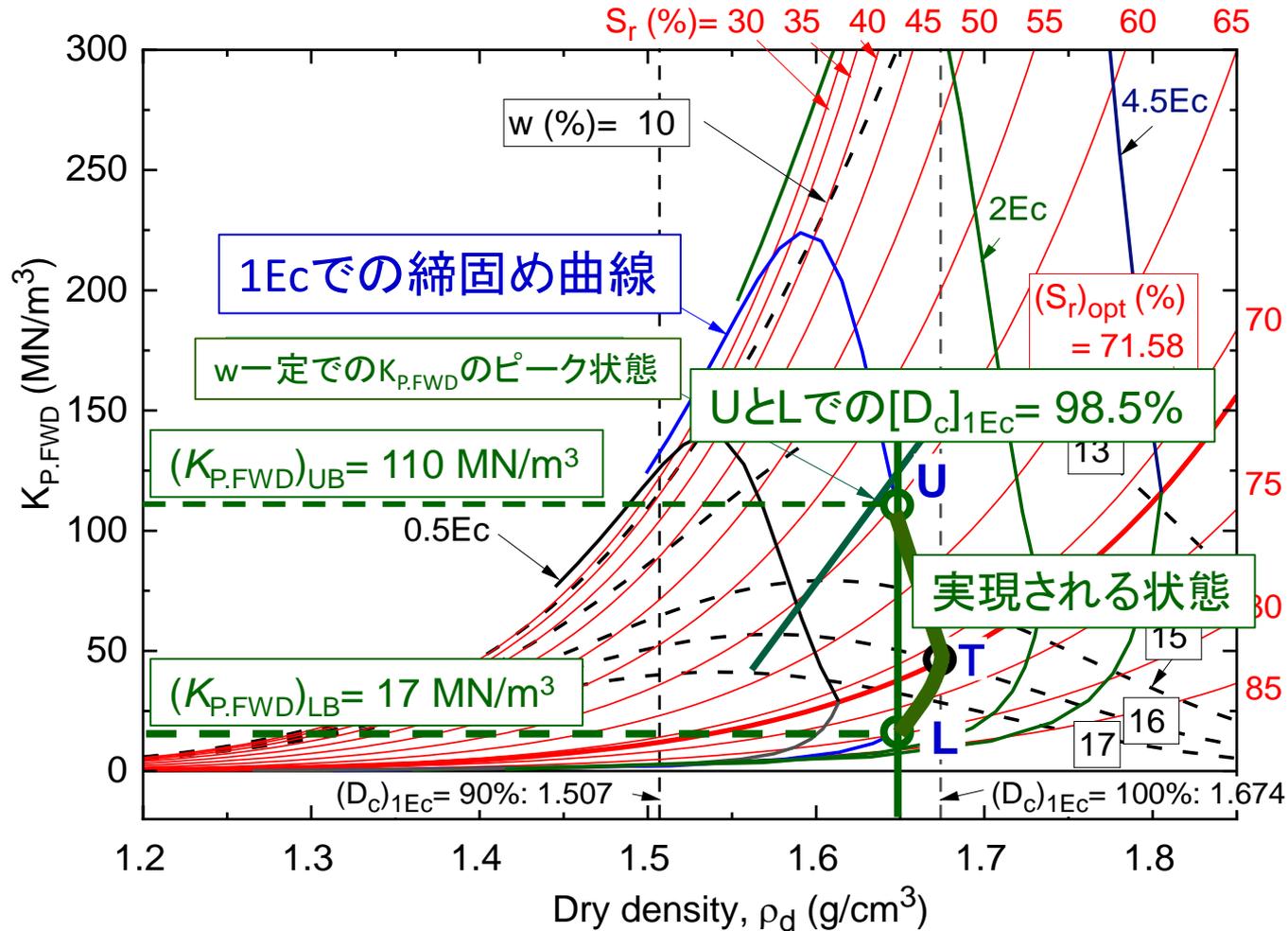
T: 締固め目標(例)  
 $[(\rho_d)_{max}]_{1Ec} (\text{g/cm}^3) = 1.674$   
 $[w_{opt}]_{1Ec} (\%) = 16.0$   
 $\rho_s (\text{g/cm}^3) = 2.675$



この上下限值管理によって、  
 $(D_c)_{1Ec} = 98.5 \sim 100 \%$ と、  
 非常に高い値が実現可能

含水比, w (%)

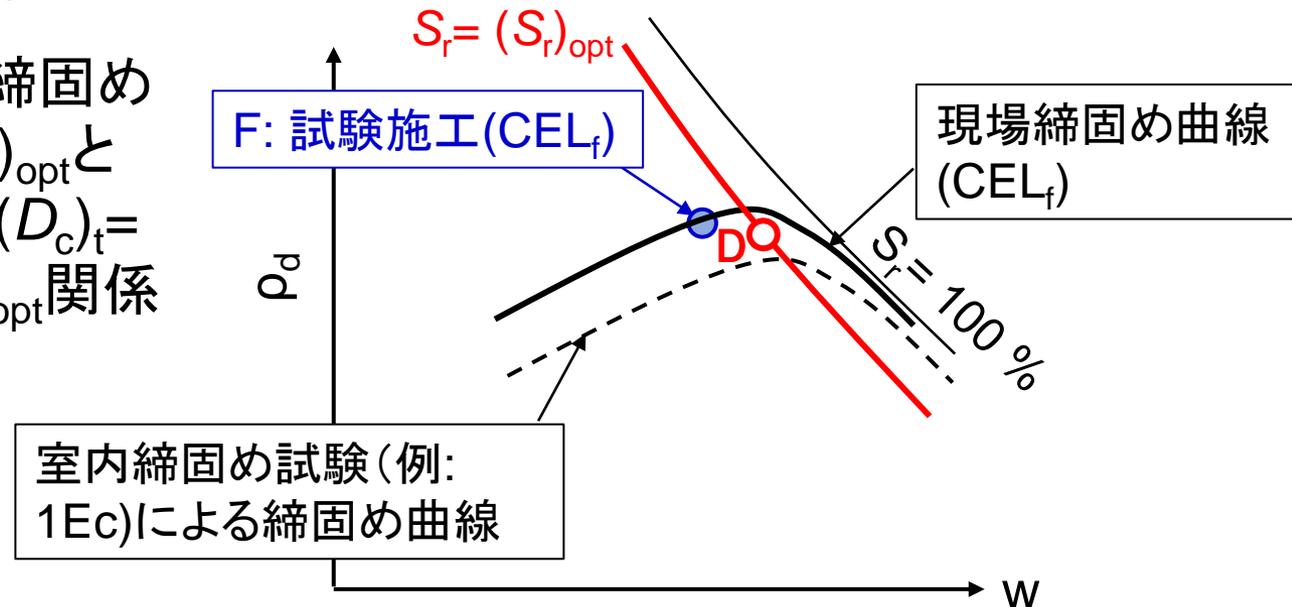
この例では、 $CEL_f = 1Ec$ で  $110 \text{ MN/m}^3 \geq K_{P.FWD} \geq 17 \text{ MN/m}^3$  を維持できれば、 $(D_c)_{1Ec} = 98.5\% \sim 100\%$ と非常に高い値が実現



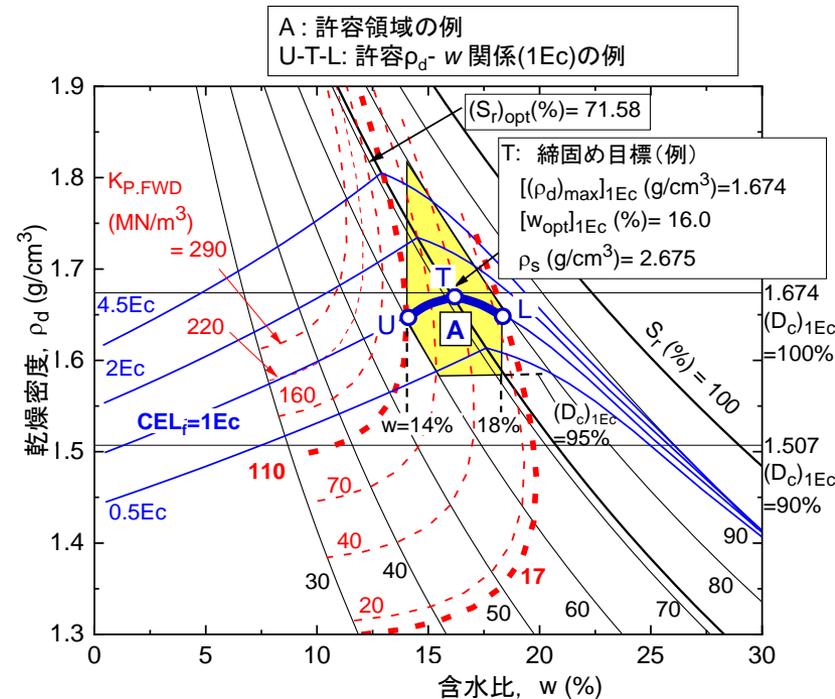
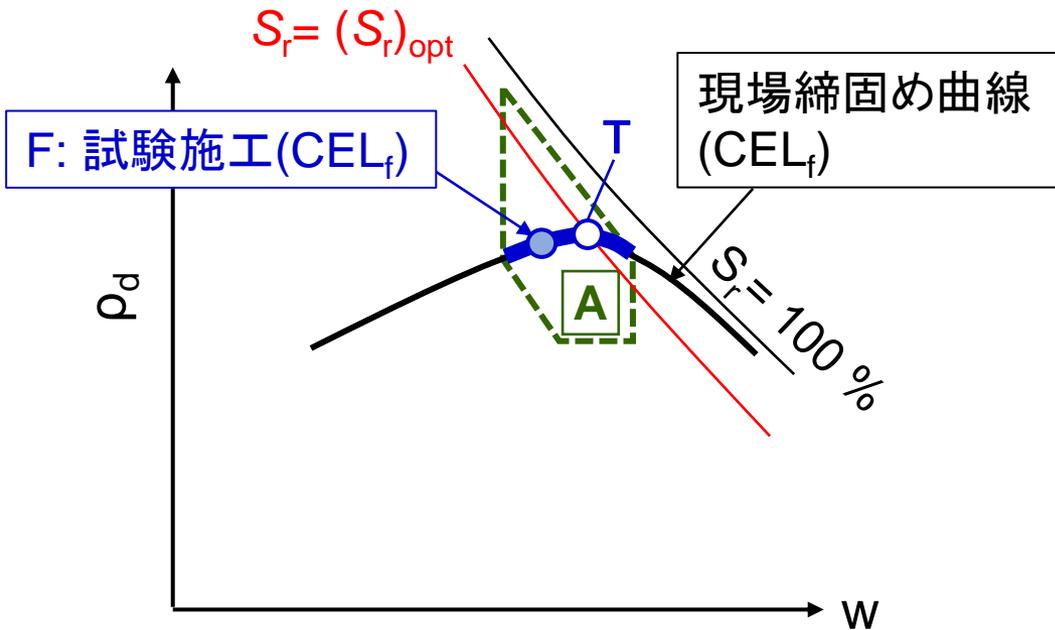
# 現場締固め曲線の固定 プラス SSIの上下限值管理の手順

- ① 代表試料で室内締固め試験(通常1Ec)を行い、締固め曲線を得る
- ②  $S_r = (S_r)_{opt}$  曲線上に設計条件を満足する締固め状態 **D** を求め、点 **D** と室内締固め曲線の相対的位置から点 **D** を実現する施工時  $CEL_f$  を推定(この図では  $CEL_f > 1Ec$  としているが、 $CEL_f = 1Ec$  と設定する場合も多いと思われる)。
- ③ 試験施工を、本施工で使用予定の盛土材、上記設定値の  $CEL_f$  で実施。盛土材の  $w$  を調整して点 **F** のように出来るだけ  $S_r = (S_r)_{opt}$  に近い状態を実現し、締固め状態  $(\rho_d)_f$ 、 $(S_r)_f$  を計測

- ④ 点 **F** を通過する現場締固め曲線を、①で得た  $(S_r)_{opt}$  と正規化締固め曲線:  $(D_c)_t = \rho_d / (\rho_d)_{max} \sim S_r - (S_r)_{opt}$  関係に基づいて推定



- ⑤ 締固め目標  $T$  を設定 (この例では、  
 $T$  は現場締固め曲線のピークに設定)  
 $\Rightarrow T$  に基づいて管理領域  $A$  を設定



締固め目標  $T$  を締固め曲線 (1Ec) のピークに設定した例

⑥ SSIを選択し、その測定法と盛土材の土質に適合するSSIの関数を推定

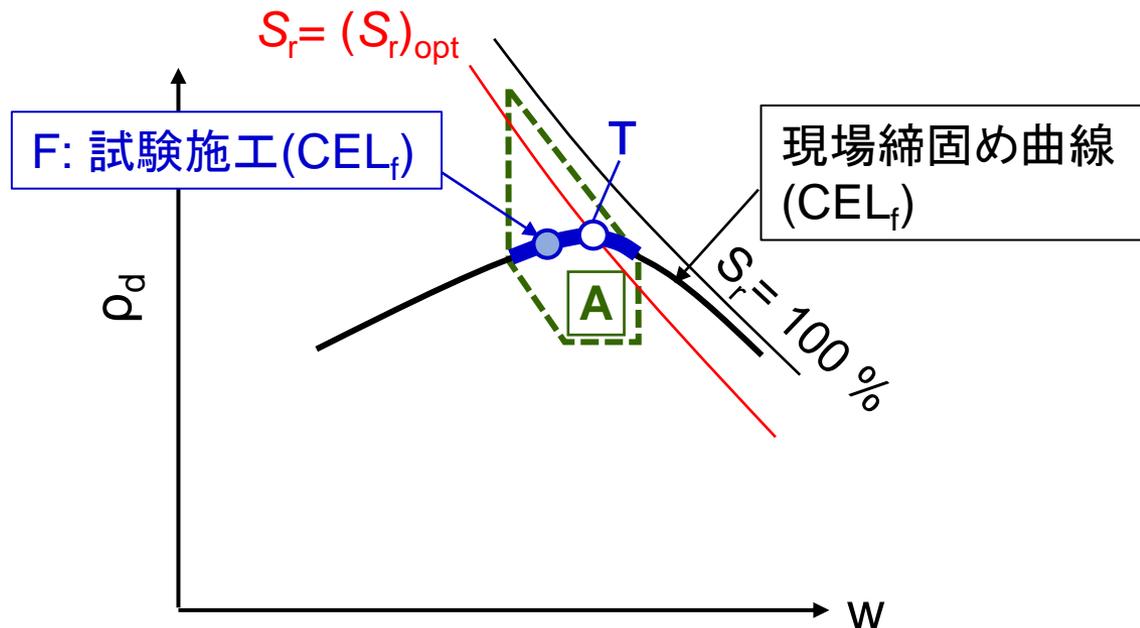
例)  $K_{P.FWD} = f_{P.FWD}(S_r) \cdot g_{P.FWD}(\rho_d) \quad (1)$

点Fでの測定値( $K_{P.FWD})_f$ ,  $(\rho_d)_f$ ,  $(S_r)_f$ を式1に代入して補正係数:

$$\alpha_{P.FWD} = (K_{P.FWD})_f / f_{P.FWD} [(S_r)_f] \cdot g_{P.FWD} [(\rho_d)_f]$$

を得る。

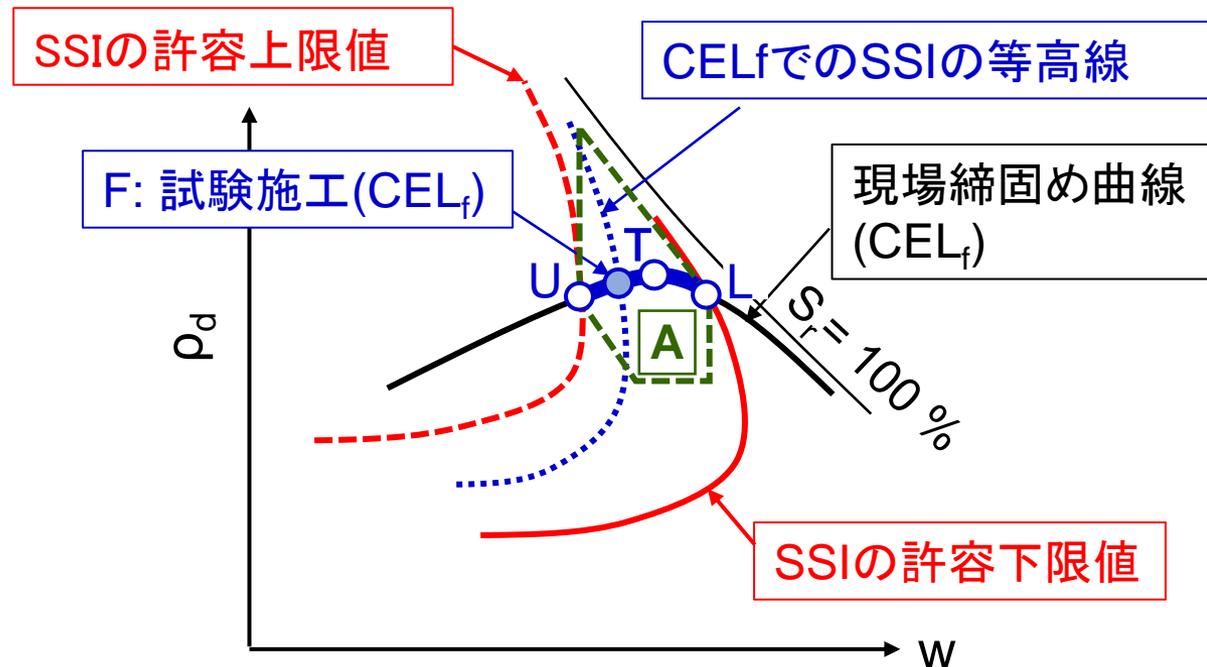
締固め過程で点Fに至る途中の段階でも同様な測定をすれば、補正係数  $\alpha_{P.FWD}$  の推定精度は高まる。



- ⑦現場締固め曲線( $CEL_f$ )と許容領域Aの境界線との交点U, Lでの( $\rho_d$ ,  $S_r$ )の値を算定して式2に代入し、許容上・下限値( $K_{P.FWD})_{UB}$ , ( $K_{P.FWD})_{LB}$ を推定。

$$K_{P.FWD} = \alpha_{P.FWD} \cdot f_{P.FWD}(S_r) \cdot g_{P.FWD}(\rho_d) \quad (2)$$

試験施工を点U, Lに近い状態でも実施できれば、( $K_{P.FWD})_{UB}$ , ( $K_{P.FWD})_{LB}$ の推定精度は高くなる。

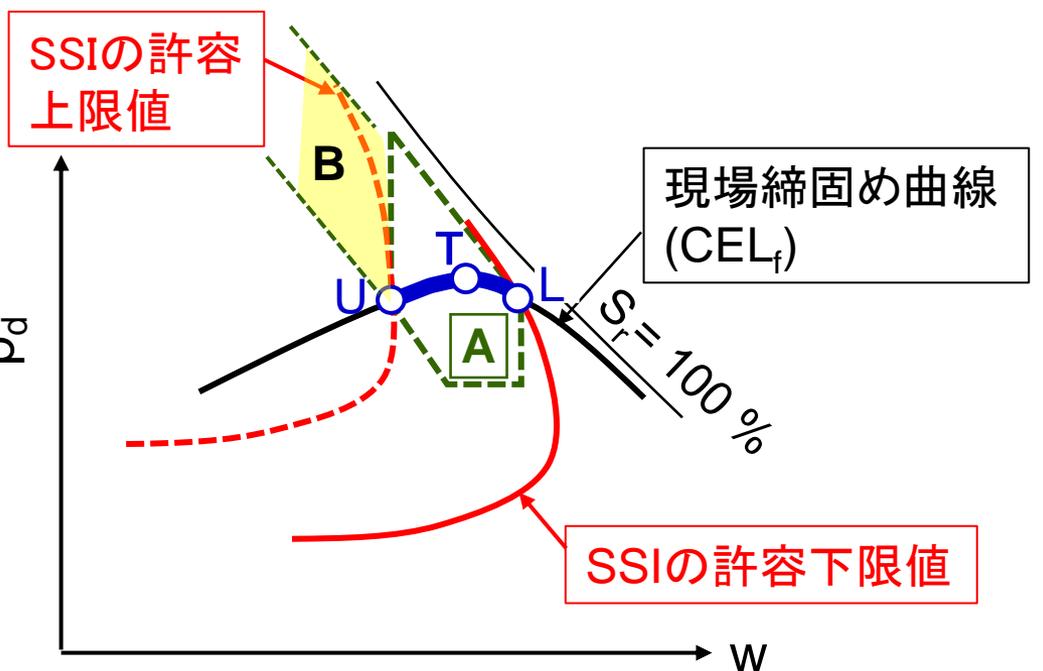


⑧ 本施工: 盛土材の土質の管理と撒き出し厚、締固め機械の機種・転圧回数等の管理による現場 $CEL_f$ の維持管理によって現場締固め曲線の変動を抑制した上で、高頻度・連続的に測定したSSIが許容上・下限値内であることを確認して、現場( $\rho_d, w$ )状態が許容範囲U-T-L内であることを確認

⑨ ⑧においてSSIの測定値が許容範囲を外れた場合はその箇所において、及び一定の体積を締固める毎に代表地点において、 $\rho_d$ と $w$ を計測して現場締固め状態が許容領域Aの内部であることを直接確認

ただし、測定した締固め状態が許容領域Aの左上領域Bの内部に位置し $S_r$ が許容範囲である場合は、剛性が特に高すぎなければ、許容される

⑩ ⑨において推定・測定した締固め状態が許容範囲の外的場合は、  
 a)追加転圧、あるいは  
 b)含水比調整後に追加転圧が必要(具体的方法の決定には、各種工学的判断が必要)



# 各種のSSIの締固め度関数と飽和度関数：

夫々の現場に適合するSSIの経験式を、ここで説明したCBRや $K_{p.FWD}$ の場合のように系統的な実験に基づいて同定するのは、通常は困難  
⇒類似な条件でのSSIの実績を参考にして経験式を推定し、試験施工によって検定・補正することになる。  
⇒その推定の参考となるように、多数の既往データを整理。

できるだけ一般化した式となるように、独立2変数として、

① $1E_c$ 基準の締固め度 $(D_c)_{1E_c}$ と

②飽和度差 $\Delta S_r = S_r - (S_r)_{opt}$

を選択

$$SSI = C_{SSI} \cdot G_{SSI} [(D_c)_{1E_c}] \cdot F_{SSI} (\Delta S_r)$$

$C_{SSI}$ :  $(D_c)_{1E_c} = 100\%$ で $\Delta S_r = 0$ の時のSSIの値

土質とSSI測定時のひずみレベル、拘束圧等に依存

$G_{SSI}$ :  $(D_c)_{1E_c}$ の関数、 $(D_c)_{1E_c} = 100\%$ の時 $G_{SSI} = 1.0$

$F_{SSI}$ :  $\Delta S_r$ の関数、 $\Delta S_r = 0$ の時 $F_{SSI} = 1.0$

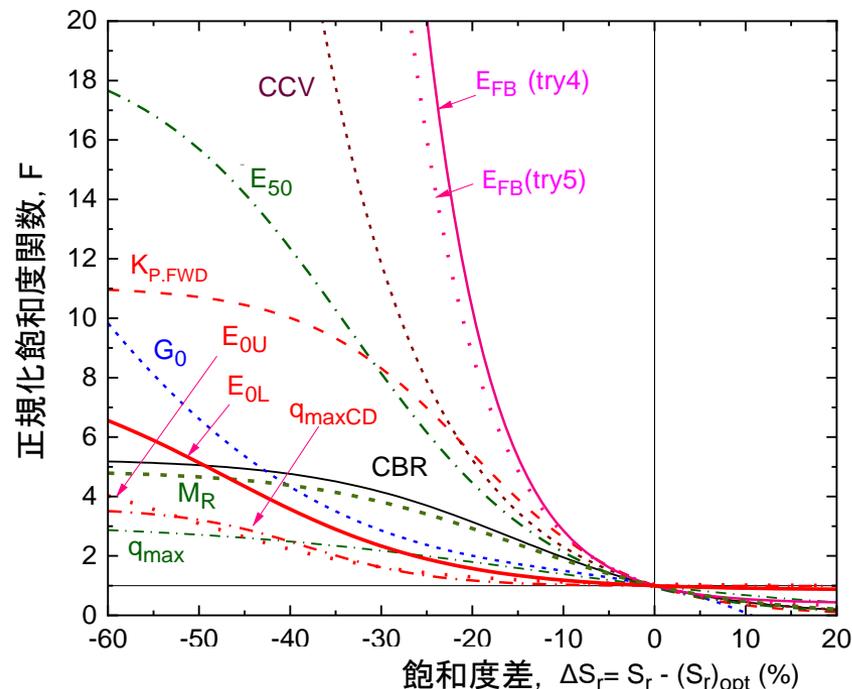
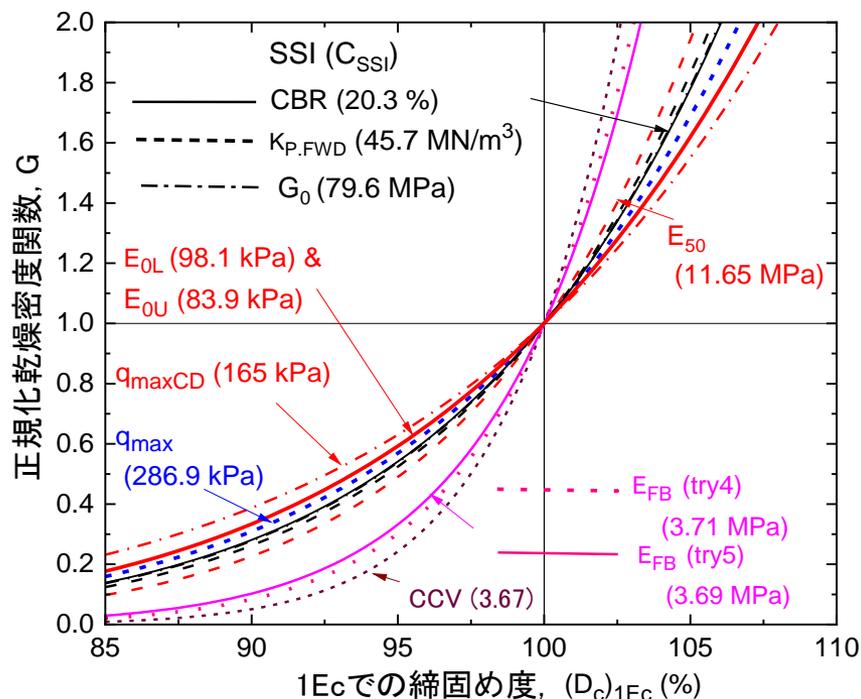
$$SSI = C_{SSI} \cdot G_{SSI} [(D_c)_{1Ec}] \cdot F_{SSI} (\Delta S_r)$$

$C_{SSI}$ :  $(D_c)_{1Ec} = 100\%$ で $\Delta S_r = 0$ の時のSSIの値

土質とSSI測定時のひずみレベル、拘束圧等に依存

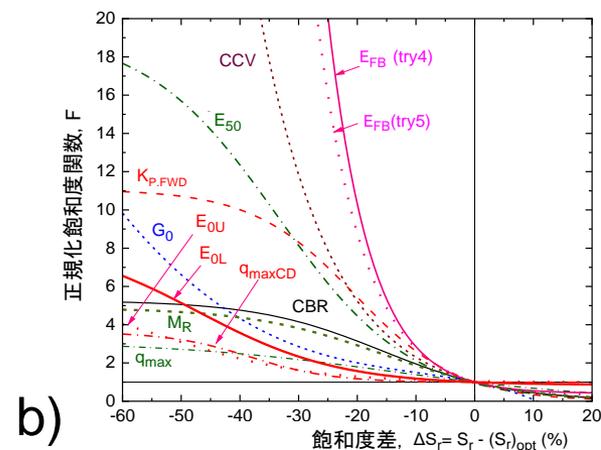
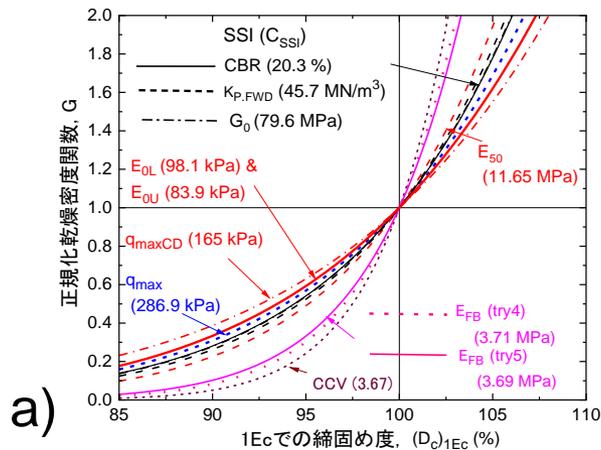
$G_{SSI}$ :  $(D_c)_{1Ec}$ の関数、 $(D_c)_{1Ec} = 100\%$ の時 $G_{SSI} = 1.0$

$F_{SSI}$ :  $\Delta S_r$ の関数、 $\Delta S_r = 0$ の時 $F_{SSI} = 1.0$



①両者ともに、土質とSSIの種類に関わらず、全て同じ傾向

②土質とSSIの種類の影響は、 $G_{SSI}$ では比較的小さい、 $F_{SSI}$ では非常に大きい  
両者とも、 $U_c$ が大きく $[(\rho_d)_{max}]_{1Ec}$ が大きいほど、SSI測定時のひずみが小さいほど、変化率が大きい傾向



## SSIのa)正規化乾燥密度関数と $C_{SSI}$ の値: b)正規化飽和度関数のまとめ:

- 非水浸CBR: 室内実大締固め試験、砂質ローム
- $K_{P,FWD}$ : 小型重錘落下試験(平板径30cmでの値)
- $G_0$ : 室内無拘束Bender Element試験、シルト質砂
- CCV: 実大締固め試験、大型振動ローラ、砂質土
- $E_{50}$ と $q_{max}$ :  
小石原川ダムコア材剪頭試料の室内締固め試料のUU三軸圧縮試験(拘束圧30kPa)
- $E_{FB}$ : 小石原川ダムコア部落球探査法ヤング率
- $M_R$ : CU繰返し三軸試験と中空ねじり試験でひずみ~0.01%程度でのせん断剛性率。  
細粒分混じり砂
- $E_{0,U}$ (乱れのある上層)と $E_{0,L}$ (乱れの少ない下層)と $q_{maxCD}$ (下層):  
稻城砂(FC= 8.4%,  $U_c=2.8$ )の原位置締固め試験での不攪乱試料のCD三軸圧縮試験、  
拘束圧50kPa)

これらのデータの原文献は、以下の文献に示した

龍岡文夫(2022): 盛土の締固め目標の設定と締固め管理による実現、特集「締固め度の物性と設計・施工管理」、雑誌基礎工、4月号、2-9頁

# まとめ1/3

1. 「土の締固め」は、地盤工学の最古典問題の一つであるが、近年重要性が再認識されている。その背景は：
  - ・従来からの、掘削土による盛土建設の必要性、  
に加えて、
  - ・近年の新たな、相互に矛盾する要求として、
    - 盛土の耐震性・維持管理性などの要求性能の向上
    - 締固めの施工・管理の省力化・迅速化の要求
  - ・近年の新たな技術展開として、
    - 締固め機械の能力向上
    - GNSS等IT技術による施工・管理の自動化・効率化がある。

その結果、締固めの施工・管理の刷新が求められている。  
その刷新には、土の締固めの法則性の再検討が必要である。

## まとめ 2/3

2. 良い締固めの三条件は、

- ① 良い盛土材（盛土材を選択できない場合が多いが）
- ② 十分な締固めエネルギー（薄層締固め、重機、十分な転圧回数）
- ③ 盛土材の含水比調整と締固めた盛土の含水比の測定・確認

特に、③は非常に重要であるにも関わらず、締固め度管理に比して軽視・回避される傾向がある。

・自然含水比での施工を許容する場合が多いが、この場合に対して、

① 次善の方策として、

締固めた盛土の含水比の測定と確認の義務化、あるいは締固め度の許容下限値の引き上げ

② より有効な本格的な方策は、「盛土材土質と現場CELの一定管理 プラス 地盤剛性指標の上下限值管理」

・空気間隙率管理の誤用があり、それを防ぐ必要がある。

# まとめ 3/3

## 3. 締固め管理の新たな展開:

- ・締固め特性と締固め土の物性は、乾燥密度と**締固め時飽和度**の関数  
なお、サクシオンは、締固め特性と物性に強く影響するが、追加の変数としては不要  
**最適飽和度**において、乾燥密度は極大に、物性はほぼ最適値になる
- ・**最適飽和度を指す締固め管理体系**の提案  
締固め度が十分に大きな**最適飽和度状態**を**締固め目標**として設定し、その実現のために、従来通りの締固め度と含水比の管理に加えて、**飽和度の上下限值管理**を実施する
- ・締固めた盛土の①乾燥密度と②含水比の直接測定に替わる方法として、また省力化した迅速な面的締固め管理を実現する方法として、
  - ①締固めエネルギーと土質の管理を前提とした、
  - ②従来のK値、CCVなどの**地盤剛性指標**の下限値管理を発展させた**地盤剛性指標の上・下限値管理**が有効である。

盛土の建設と土の締固め管理の決定版！

# 土の締固め管理

—現状・新たな展開・展望—

◆ A4判・300ページ／オールカラー  
◆ 定価6,050円(税込)／送料実費  
2022年2月25日発行：総合土木研究所

土の締固め管理  
—現状・新たな展開・展望—

編集：公益社団法人地盤工学会関東支部  
土構造物の要求性能の実現を目指した盛土締固め管理の  
合理化に関する研究委員会

総合土木研究所

## 目次

巻頭言	6章 締固め工の管理法
1章 土の締固めの目的・意義・方法	7章 特殊土の締固め
2章 締固め管理の現状と課題	8章 改良土の締固め
3章 締め固めた土の工学的性質	9章 新たな締固め管理基準を用いた 施工事例
4章 盛土の締固め施工管理基準の設 定法	10章 海外における締固め管理の現 状と最近の動向
5章 転圧機械による現場締固めのメ カニズムと諸問題	索引

編集：(公社)地盤工学会関東支部

土構造物の要求性能の実現を目指した盛土締固め管理の  
合理化に関する研究委員会 委員長：龍岡文夫

ご注文は  
総合土木研究所

〒113-0034 東京都文京区湯島 4-6-12 湯島ハイタウンB-222  
電話：03(3816)3091 FAX：03(3816)3077  
E-mail：sogodoboku@kisoko.co.jp URL：https://www.kisoko.co.jp

【土木・建築基礎工事と機材の専門誌】

# 最新情報

# 基礎工

2022  
Vol.50, No.4

THE FOUNDATION ENGINEERING &  
EQUIPMENT, Monthly

4

特集 ▶ 締固め土の物性と設計・施工管理



# 特集 締固め土の物性と設計・施工管理

龍岡 文夫 委員長  
総括編集：松尾 修 委員  
三反畑 勇

<b>巻頭言</b>	進化する土の締固め .....	建山 和由	1
<b>総 説</b>	盛土の締固め目標の設定と締固め管理による実現 .....	龍岡 文夫	2
<b>各 論</b>	室内・原位置試験による締固め土の諸物性と設計・締固め管理への反映 .....	澁谷 啓・片岡沙都紀・野並 賢・堀田 崇由	10
〃	鉄道盛土施工への災害発生土や改良土の適用性評価の取組み .....	中島 進・藤本 達貴・笠原 康平・富田 佳孝	14

<b>各 論</b>	高速道路盛土の締固め管理に関する現状と取組み .....	安部 哲生	18
〃	河川堤防の締固め管理に関する現状と取組み .....	石原 雅規・山木 正彦	22
〃	振動ローラ加速度応答法を利用した現場締固め管理の現状と展望 .....	石黒 健・建山 和由	26
〃	締め固めた砂礫の乾燥密度に対する礫率補正法の検討 .....	井原 壮・野田 翔兵・菊池 喜昭・龍岡 文夫	33
<b>報 文</b>	盛土材の土質と締固め試験方法が締固め試験結果に与える影響 .....	青山 翔吾・宮下 千花	40
〃	散乱型RI水分計を用いた含水比測定と締固め管理への活用 .....	中村 洋丈・池永 太一・谷口 龍	45
〃	締固め土の乾燥密度と飽和度の関数としての強度・剛性と締固め管理への適用 .....	吉田 輝・龍岡 文夫	49
〃	突固め試験による砂質土の締固め特性の把握 .....	平川 大貴	53
〃	雨水浸透が路盤の支持力に及ぼす影響 .....	佐藤 研一・岡崎 紅・藤川 拓朗・古賀千佳嗣	57
〃	現場と室内で締め固めた砂質土の強度変形特性と設計・締固め管理への反映 .....	富田 佑一・古関 潤一	61
〃	鶴川ダム建設工事における飽和度管理を重視した現場品質管理の効率化と高度化の試み .....	石黒 健	65
〃	現場と室内で締め固めた礫混り粘性土の変形特性と締固め管理への反映 .....	坂本 博紀	69
〃	放射性廃棄物処分施設におけるベントナイト系バリア材の締固め特性および透水性の評価方法 .....	千々松正和・山田 淳夫・小峯 秀雄	73
〃	大型・小型転圧機械による現場締固めエネルギーの評価と予測 .....	石黒 健・永井 裕之	77
〃	振動ローラ加速度応答法を用いた盛土の締固め管理 .....	永井 裕之・眞壁 淳・野田 翔兵・兵動 太一・菊池 喜昭・龍岡 文夫	83
〃	ICTを活用した盛土材料管理システムによる締固め管理技術の合理化 .....	椎葉 偉久・小泉 圭吾・澁谷 啓	87
〃	那覇空港増設滑走路建設における盛土の転圧施工 .....	知念 正尚・山田 和弘・菅野 雄一・森 晴夫	91
〃	スコリアを含む盛土材料の土質特性と施工事例 .....	佐藤 靖彦・真田 昌慶・山田 宏道	96
〃	災害廃棄物由来の分別土砂の締固め特性・締固め管理 .....	中村 吉男・鴫田 稔・肴倉 宏史	100
〃	高炉水砕スラグの硬化特性に及ぼす飽和度の影響 .....	原 弘行	104
〃	吸水比を用いたPS灰改質材の細粒分混り礫の配合設計と改質土の強度特性 .....	早野 公敏・山内 裕元	108

# 「土の締固め管理の合理化に関するシンポジウム」のご案内

主催：地盤工学会関東支部  
土構造物の要求性能の実現を目指した盛土  
締固め管理の合理化に関する研究委員会

本委員会では、近年の「土構造物の耐震性・耐洪水・豪雨性の向上、維持管理の低減等の要求性能の高度化」、「締固め機械の性能及びGNSS等による締固め機械運用管理レベルの向上を活用した締固め管理の省力化・効率化」の要求に応えるため、土の締固め管理法を総合的に検討しました。各種施工管理指針の総括とともに、締固め特性の法則性、締め固めた土の強度変形特性・透水係数等の物性と締固め状態との関連、小型重錘落下法や振動ローラの応答加速度等による地盤剛性指標に基づく迅速な面的締固め管理法を検討し、さらにこれらに基づいて効率的・効果的な締固め管理法を施工例に基づき検討して一定の成果を挙げました。

この度、これらの成果をとりまとめ、書籍「土の締固め管理－現状・新たな展開・展望－、297頁、総合土木研究所」を発刊しました(2022年2月25日発刊)。

この書籍の説明と質疑応答とともに最近の関連した研究成果の発表・討論の場として、下記の要領でシンポジウムを開催します。関東支部のみならず全国の会員各位からの参加を歓迎します。多数の研究論文の応募をお待ちしております。

【日 時】	2022年12月8日(木)～9日(金) 2日間
【形 態】	オンライン形式 (Zoom ミーティング)
【参加費】 書籍を購入する方	¥10,000(会員, 非会員)・¥7,000(学生)
	投稿料は無料ですが、シンポジウムにご参加される方には参加費をご負担頂きます。 参加費には、論文概要集(PDF版：ダウンロード)・委員会報告のPPT資料のPDF版(ダウンロード)、および委員会の成果書籍(印刷版：¥6,050+送料)が含まれます。
【参加費】 書籍を購入しない方	¥7,000(会員, 非会員)・¥4,000(学生)
	投稿料は無料ですが、シンポジウムにご参加される方には参加費をご負担頂きます。 参加費には、聴講と概要集・委員会報告(PPT資料のPDF版)のダウンロードが含まれます。
<b>参加費は事前に下記へお振込みをお願いします(手数料は払込者負担) 入金〆切：12月1日</b>	
みずほ銀行(0001) 駒込支店(559) 口座番号 普通8091364 名 義 (社)地盤工学会関東支部 : シャ)ジバンコウガクカイカントウシブ	
<b>書籍「土の締固め管理-現状・新たな展開・展望-」(2月25日発行)好評発売中!</b> <a href="#">→ 詳細はこちら</a>	
土の締固めに関する施工と管理及び関連した土構造物の調査・設計についての研究/技術成果。	