

## 性能設計と信頼性設計

### 第22回中部地盤工学シンポジウム

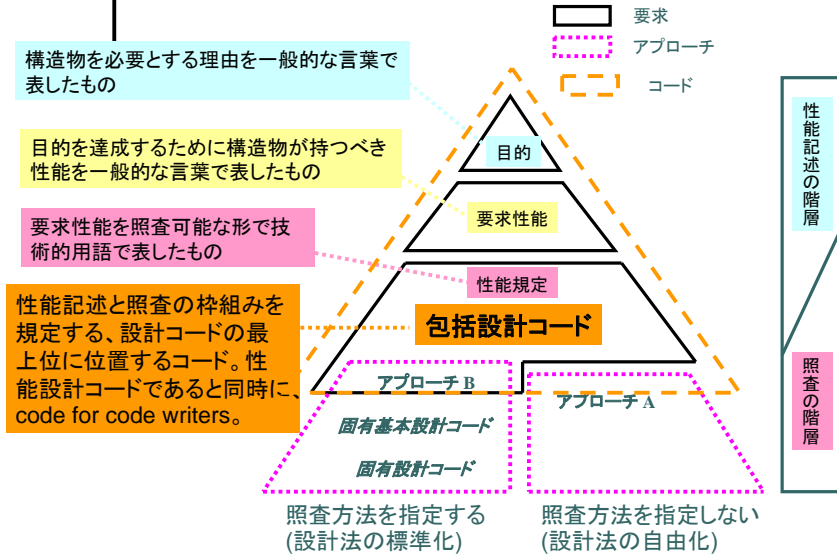
2010年8月6日  
 岐阜大学 工学部  
 本城勇介

## 「性能設計」の定義

「性能設計(Performance Based Design): 構造物をその仕様によってではなく, その社会的に要求される性能から規定し設計する, 設計の考え方」

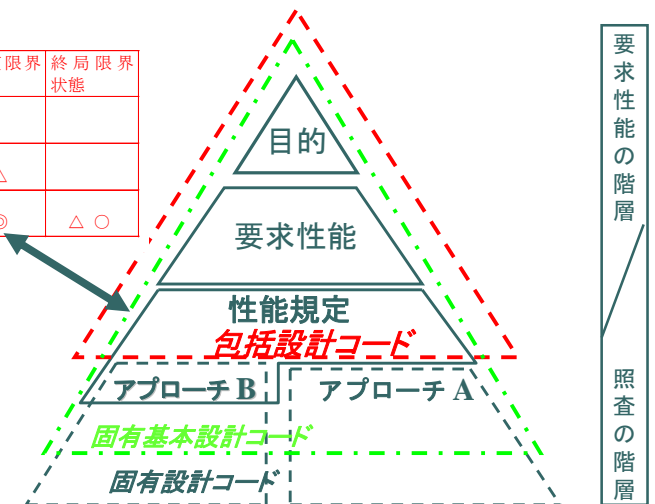
「性能規定型設計コード(Performance Based Design Codes): 構造物をその仕様によってではなく, その社会的に要求される性能から規定する, 構造物の設計コード」

## 性能記述の階層性



## 性能規定の方法: 地盤コード21

	使用限界状態	修復限界状態	終局限界状態
高頻度 ・小荷重	◎ ○ △		
中頻度 ・中荷重	◎ ○	△	
低頻度 ・大荷重		◎	△ ○



## 全体構成

- 第1部 性能規定型基準の登場(2003-2006)  
「港湾の施設の技術上の基準」(2007年4月改定)を中心として.
- 第2部 包括設計コードの開発(1997-2002):  
「基礎性能設計概念に基づく基礎構造物等の設計原則(地盤コード21)」と「code PLATFORM ver.1」の背景と開発経緯.
- 第3部 今後の展望(2007以後)

## 全体構成

- 性能設計
  - 性能設計による設計コード登場(2003-2006)  
「港湾の施設の技術上の基準」(2007年4月改定)を中心として.
  - 学会における包括設計コードの開発(1997-2002)  
「基礎性能設計概念に基づく基礎構造物等の設計原則(地盤コード21)」と「code PLATFORM ver.1」の背景と開発経緯.
  - 性能設計の将来
- 信頼性設計
  - 地盤工学独自の信頼性設計法の開発の必要

## 性能規定化設計基準の開発経緯

1995 WTO/TBT 協定施行  
1997 地盤工学会 新しい設計法と国際調和委員会  
1997 ISO2394「構造物の設計の基本」改訂完了  
1998 規制緩和3ヵ年計画の閣議決定  
2001 地盤コード21の第1次ドラフト完了.  
2001 規制改革推進3ヵ年計画の閣議決定  
2002 国土交通省公共事業コスト構造改革プログラム→  
「土木・建築にかかる設計の基本」完了, この基準に沿った基準類の改定  
道路橋の技術基準の検討, 港湾基準の性能規定化  
2003 土木学会 code PLATFORM ver.1  
(国総研・港湾部の受託プロジェクト)  
2004 地盤工学会 地盤コード21 基準化  
2007 「港湾の施設の技術上の基準」性能規定化の改訂版改正  
「道路橋示方書」は, 性能規定化の改定作業中.

## WTO/TBT協定:概要

- TBT協定は、1995年に発効したWTO一括協定で、すべてのWTO加盟国に適用される。
- TBT協定は、工業製品等の各国の規格及び規格への適合性評価手続きが貿易の技術的障害(Technical Barriers to Trade) とならないよう予防するための協定である。
  - 国際規格を基礎とした国内規格策定の原則、
  - 規格作成の透明性の確保

## WTO/TBT協定: 2.4項と2.8項 国際規格の尊重、性能による規定

2.4 加盟国は、強制規定を必要とする場合において、関連する国際規格が存在するとき又はその仕上がりが目前にあるときは、**当該国際規格又はその関連部分を強制規定の基礎として用いる。**（以下省略）

2.8 加盟国は、適当な場合は、デザイン又は記述的に示された特性よりも**性能(performance)**に着目した要件に基づき強制規格を定める。

## 政府の規制緩和策と技術基準・認証

行政改革推進本部(本部長, 総理大臣)下の規制緩和委員会が提案した「規制緩和3カ年計画」を1998年3月に閣議決定

- ①経済的規制は原則自由, 社会的規制は必要最小限の原則の元, 規制の撤廃または緩和,
- ②検査の民間移行等規制方法の合理化,
- ③規制内容の明確化, 簡素化,
- ④規制の国際的整合化,
- ⑤規制関連手続きの迅速化,
- ⑥規制制定手続きの透明化

## 政府の規制緩和策と技術基準・認証

行政改革推進本部下の規制改革委員会が提案した「規制改革推進3カ年計画」を2001年3月閣議決定

- ①経済活性化もよる持続的な経済成長の発展,
- ②透明性が高い公正で信頼できる経済社会の実現,
- ③多様な選択肢の確保された国民生活の実現,
- ④国際的に開かれた経済社会の実現,

等を図る観点から、行政の各般の分野について計画的に規制改革の積極的かつ抜本的な推進を図る。

## 政府の規制緩和策と技術基準・認証

「規制改革推進3カ年計画」(2001年3月)の基準・認証分野の基本方針:

個々の基準認証等について真に国が関与した仕組みとして維持する必要があるかについて抜本的な見直しを行い、国が関与した制度を維持する必要がある場合においても、行政の関与を最小限とする方向で、事業者の自己確認・自己保全を基本とした制度に移行、**基準の国際整合化、性能規定化、重複検査の排除等を推進する。**

## 行政面からの流れ

- 2001年3月閣議決定「規制改革推進3か年計画」  
→基準類の国際整合化, 性能規定化
- 2003年3月「国土交通省公共事業コスト構造改革プログラム」→  
「土木・建築にかかる設計の基本」に沿った基準類の改定  
土木工事共通仕様書の改定  
道路橋の技術基準の検討  
港湾基準の性能規定化

## 「港湾法」の一部改正

(2006年5月公布、2007年4月1日施行)

(港湾の施設に関する技術上の基準)

改定前

第五十六条の二の二 水域施設、外郭施設、係留施設その他の政令で定める港湾の施設は、他の法令の規定の適用がある場合においては当該法令の規定によるほか、国土交通省令で定める技術上の基準に適合するように、建設し、改良し、又は維持しなければならない。

改定後

第五十六条の二の二 水域施設、外郭施設、係留施設その他の政令で定める港湾の施設(以下、「技術基準対象施設」という)は、他の法令の規定の適用がある場合においては当該法令の規定によるほか、技術基準対象施設に必要とされる性能に関して国土交通省令で定める技術上の基準に適合するように、建設し、改良し、又は維持しなければならない。

## 港湾法の一部改正

- 港湾施行令(政令)の一部改正について  
技術基準対象施設の追加、登録認定機関の登録有効期間、…(2006/4/7)
- 港湾の施設の技術上の基準に定める省令の改正について(2007/1/15)  
要求性能、設計供用期間、…
- 同基準の細目を定める告示の改正について(2007/2/9)  
性能規定、性能規定の基本、性能照査の基本…

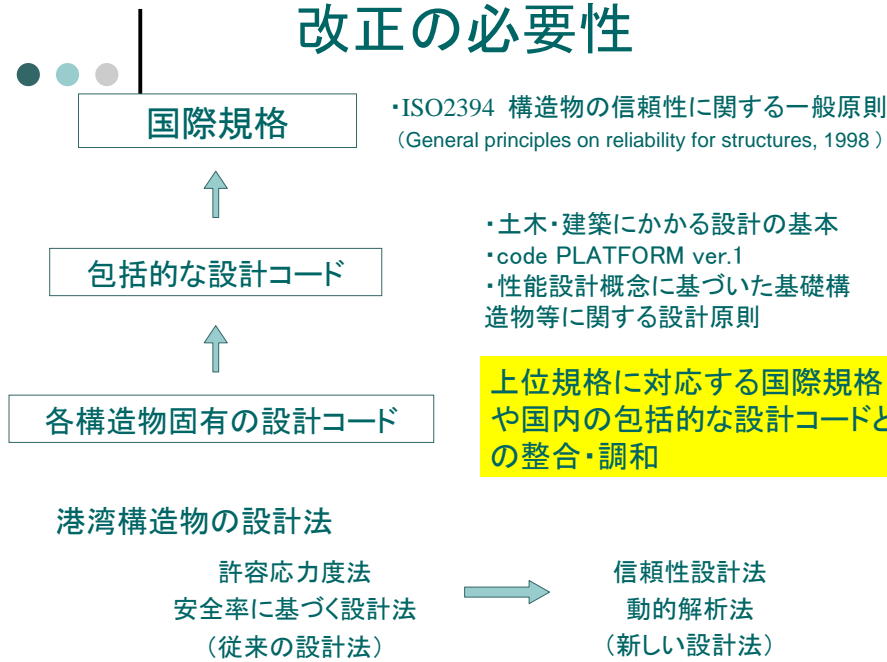
## 港湾基準改正の概要

国土技術政策総合研究所

長尾 毅(たかし)

資料の借用開始

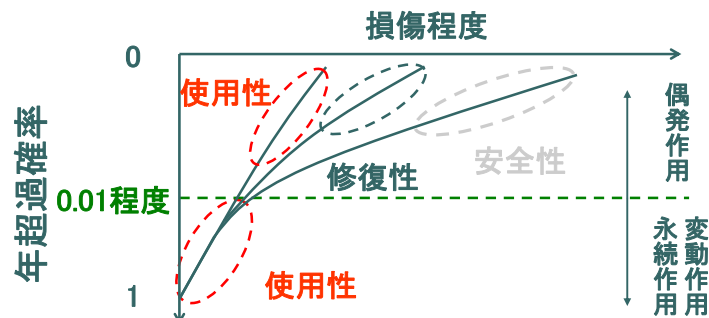
# 改正の必要性



# 要求性能

分類		定義
基本的要求性能		作用に対する施設の構造的な応答(変形, 断面力等)に関する性能
	使用性	わずかな修復を行うことにより, すみやかに機能が発揮できること.
	修復性	ある程度の修復が必要となるが, 比較的短期間のうちに機能を再び発揮することが可能であること.
	安全性	非常に大きな損傷が発生するものの, 損傷の範囲が人命や背後圏の財産に甚大な影響を及ぼさないこと.
その他の要求性能		施設の供用および利便性の観点から必要とされる構造的な諸元等に関する性能

設計状態	定義	施設に求められる性能
永続状態	永続作用(自重, 土圧等)が主たる作用の状態	使用性
変動状態	変動作用(波浪やレベル1地震動等)が主たる作用の状態	使用性
偶発状態	偶発作用(レベル2地震動や津波等)が主たる作用の状態	使用性, 修復性, 安全性



# 基本的な性能照査の考え方

## 許容される性能照査手法

- ・信頼性に基づく方法
- ・施設的作用応答を適切に評価しうる数値解析手法
- ・模型実験
- ・過去の経験等に基づく方法

設計状態	主たる作用	推奨される性能照査手法
永続状態 変動状態	自重, 土圧, 水圧, 載荷重, 波浪, 風, 船舶による作用等	信頼性設計法
	レベル1地震動	・地盤-構造物の動的相互作用を考慮した非線形地震応答解析(変形量照査) ・信頼性設計法(断面力照査) ・準静的法(震度法, 但し変形量を目標)
偶発状態	レベル2地震動, 津波, 船舶の衝突, 偶発作用としての波浪等	数値解析法(変形量や損傷程度を具体的に評価)

# 港湾基準改正の概要

国土技術政策総合研究所

長尾 毅

資料の借用終了

# 全体構成

- 性能設計
  - 性能設計による設計コード登場(2003-2006)  
「港湾の施設の技術上の基準」(2007年4月改定)を中心として.
  - 学会における包括設計コードの開発(1997-2002)  
「基礎性能設計概念に基づく基礎構造物等の設計原則(地盤コード21)」と「code PLATFORM ver.1」の背景と開発経緯.
  - 性能設計の将来
- 信頼性設計
  - 地盤工学独自の信頼性設計法の開発の必要

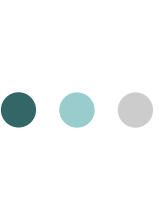
# 性能規定化設計基準の開発経緯

1995 WTO/TBT 協定施行  
1997 地盤工学会 新しい設計法と国際調和委員会  
1997 ISO2394「構造物の設計の基本」改訂完了  
1998 規制緩和3ヵ年計画の閣議決定  
2001 地盤コード21の第1次ドラフト完了.  
2001 規制改革推進3ヵ年計画の閣議決定  
2002 国土交通省公共事業コスト構造改革プログラム→  
「土木・建築にかかる設計の基本」完了, この基準に沿った基準類の改定  
道路橋の技術基準の検討, 港湾基準の性能規定化  
2003 土木学会 code PLATFORM ver.1  
(国総研・港湾部の受託プロジェクト)  
2004 地盤工学会 地盤コード21 基準化  
2007 「港湾の施設の技術上の基準」性能規定化の改訂版改正  
「道路橋示方書」は, 性能規定化の改定作業中.

# 「性能設計概念に基いた基礎構造物等に関する設計原則」: 経緯

年月	活動内容
1997-99年度	地盤工学会 「わが国の基礎設計と地盤調査の現状と将来のあり方に関する研究委員会」(日下部治)
2000/3	「地盤コード21 ver.1」発行(科研報告書を兼ねる)
2000/9	「土と基礎」2000年9月号特集号
2000年度	地盤工学会「基礎設計基準化検討委員会」(日下部治)
2001/4	国総研→土木学会へ「包括コード作成」委託(日下部治)
2002/4	国際WS鎌倉 「地盤コード21 ver.2」(英語版)発行
2001-03年度	地盤工学会「基礎設計基準化委員会」(本城勇介・菊池喜昭)
2003/3	「包括設計コード code PLATFORM ver.1」発行
2005/3	「設計原則」JGS4001-2004として発行
2006/3	英語版完成. 印刷配布





## 地盤工学会 「性能設計概念に基いた基礎 構造物等に関する設計原則」 (JGS4001-2004)


従来の呼称

「包括基礎構造物設計コード:地盤コード21」



## 背景

- **Structural Eurocodesの台頭**
  - EC, CEN, ISOによる世界制覇
  - 地域コードの作成 20年以上の歴史
- **日本は...**
  - 相変わらず各機関ごとの基準が跋扈
    - 見掛けは異なるが実は良く似ている
    - 仕様規定, マニュアルエンジニア化
  - 説明責任、透明性、要求の多様化



## 日本の各機関の 設計コードの持つ特徴

- **法的な拘束能力**
  - 改訂したときから実施される
  - 間違いが許されない
    - 新しい概念の導入, 新しい技術の導入が困難

### アメリカのAASHTOの基準

各州はAASHTOの記述に完全には従う必要はない  
各州政府はAASHTOの記述を参考にして各州独自の  
方法で技術基準を整備する。



## 設計原則の目指している方向

- **法的な拘束の緩やかなもの**
  - このコードをたたき台として各機関のコードが将来的に変化する (**A code for code writers**)
  - 日本のコードの考え方を統一的に示すもの (**single voice**)  
「性能設計」の概念による統一
  - Eurocode7のように, このコードだけでは照査ができない  
枠組みとチェック項目リスト

## 設計原則=包括設計コード

- 日本の将来の構造物設計コードのあるべき姿(理想像)を示す
  - 各機関のコードの体系化, 調和
  - 設計コードの透明性・説明性の確保、理想像の提示
- A code for code writers
  - 性能の規定方法, 用語の統一, 安全性余裕の導入方法, 情報の伝達方法の標準化
- 日本のコードの考え方を統一的に示す (single voice)
- 第三者機関(例えば学会)が制定する

## 設計原則の章構成

0. 構造物設計の基本
1. 基礎構造物設計の基本
2. 地盤に関する情報
3. 浅い基礎の設計
4. 杭基礎の設計
5. 柱状基礎の設計
6. 抗土圧構造物の設計
7. 仮設構造物の設計

例えばcode PLATFORMIによって置き換えられる

地盤コード21の共通項目  
地盤に関する情報は特に特徴的

各種構造形式に対する記述

State of the Artに基づく定性的なチェックリスト

今後構造物の種類が増えていく類似の節構成

「本文+付録」で構成される

## Code PLATFORM ver.1.0

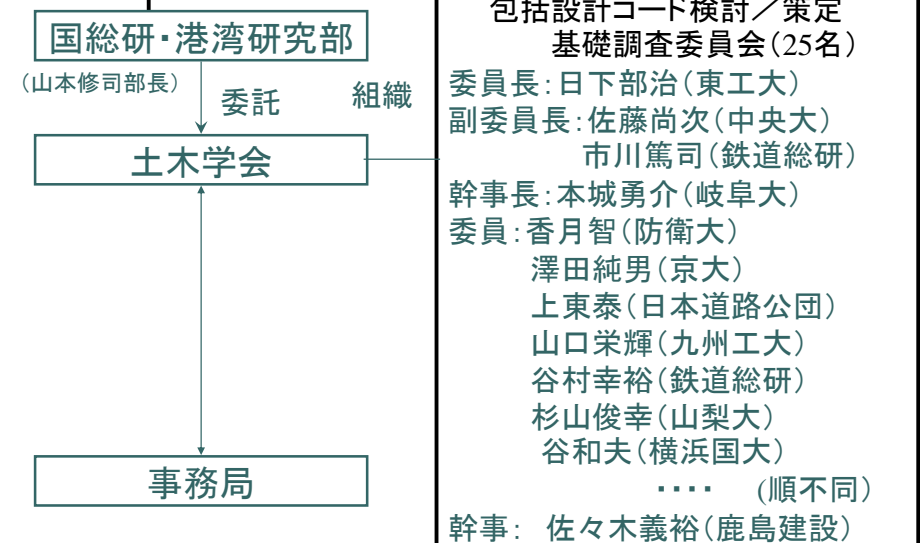
<日本語名称>

性能設計体系に基づいた構造物設計のための原則・指針と用語

<英語名称>

Principles, guidelines and terminologies for design code drafting founded on the performance based design

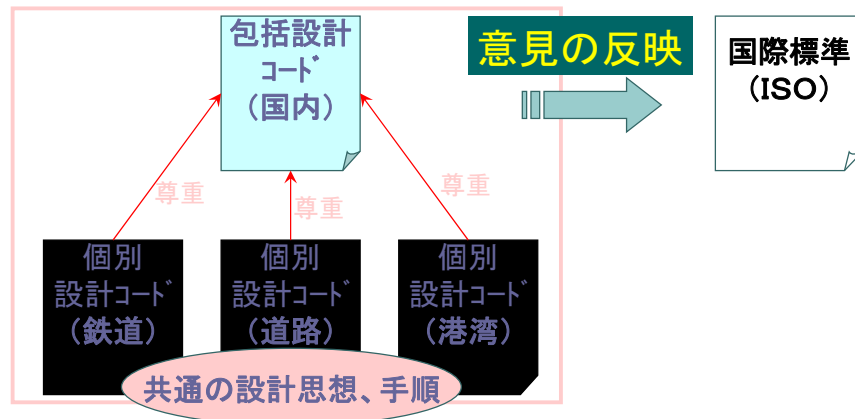
## 実施体制(2001-02年度)





## 包括設計コードとは

- 設計コードの考え方、手続き、などの基本的なルールを示したもの。
- 基準策定者(コードライター)に参照される。



## 策定上の基本方針

- ◆ 10年後程度の施行を考え、現状にとらわれずに理想的なものを目指す。
- ◆ 若手のコードライターを中心とするメンバーで議論する。
- ◆ 海外へ説明することを念頭に置き、できる限り簡素で解りやすい構造とする。
- ◆ 性能設計体系を推進させる内容とする。
- ◆ 用語を統一し議論に齟齬がないようにする。

## code PLATFORM ver1 の特徴(1)

- ◆ 用語集としての機能を重視
  - 既存の定義を尊重。
  - 新しい用語は十分吟味して導入。
- ◆ 性能記述の階層の再定義  
「目的」-「要求性能」-「性能規定」
- ◆ 性能規定(照査上の基準)  
「限界状態」-「作用」-「時間」によって定義される。その際、「重要度」を勘案する。

## 性能規定化設計基準の開発経緯

- 1995 WTO/TBT 協定施行
- 1997 地盤工学会 新しい設計法と国際調和委員会
- 1997 ISO2394「構造物の設計の基本」改訂完了
- 1998 規制緩和3ヵ年計画の閣議決定
- 2001 地盤コード21の第1次ドラフト完了。
- 2001 規制改革推進3ヵ年計画の閣議決定
- 2002 国土交通省公共事業コスト構造改革プログラム→  
「土木・建築にかかる設計の基本」完了、この基準に沿った基準類の改定  
道路橋の技術基準の検討、港湾基準の性能規定化
- 2003 土木学会 code PLATFORM ver.1  
(国総研・港湾部の受託プロジェクト)
- 2004 地盤工学会 地盤コード21 基準化
- 2007 「港湾の施設の技術上の基準」性能規定化の改訂版改正  
「道路橋示方書」は、性能規定化の改定作業中。



Some movements toward  
establishing comprehensive  
structural design codes based  
on PBS concept in Japan

TAIPEI 2006  
International Symposium on New Generation  
Design Codes  
for Geotechnical Engineering Practice  
新世代大地工程設計規範國際研討會

November 2, 2006  
Y. Honjo, Gifu University  
本城 勇介、岐阜大学



a liar  
or  
a man of visions



## 全体構成

- **性能設計**
  - 性能設計による設計コード登場(2003-2006)  
「港湾の施設の技術上の基準」(2007年4月改定)を中心として。
  - 学会における包括設計コードの開発(1997-2002)  
「基礎性能設計概念に基づく基礎構造物等の設計原則(地盤コード21)」と「code PLATFORM ver.1」の背景と開発経緯。
  - **性能設計の将来**
- 信頼性設計
  - 地盤工学独自の信頼性設計法の開発の必要



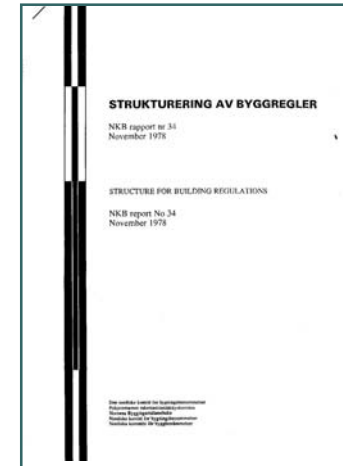
## 性能設計 (Performance based design)

- 物事をoutcomesで評価しようという風潮
  - 競争原理の導入による効率的な社会の実現
  - 情報公開、公正、規制緩和、自己責任、説明責任(accountability)、透明性、リスク管理等
  - 企業経営、行政評価、教育評価
- WTO/TBT協定「仕様に基づく規定ではなく、性能に基づく規定」

## 性能規定型設計と性能明示型設計 性能設計の2つの起源

- **性能規定型設計(新自由主義)**: 建造物の機能が確保されていることを、要求性能をブレイクダウンした仕様ではなく、要求性能そのものを提示し、これを照査することを規定した設計法。  
→ Nordic five levels 等
- **性能明示型設計(市民社会の合意形成)**: 建造物の機能を確保するために要求する性能のレベルと、その照査に用いる荷重のレベルの関係を明確にした設計法。  
→ Vision 2000 Performance Matrix 等

## 性能規定型設計: Nordic Five Levels



Structure for Building Regulations

NKB report No.34  
November 1978

建築物の規制の構造  
について規定した文書

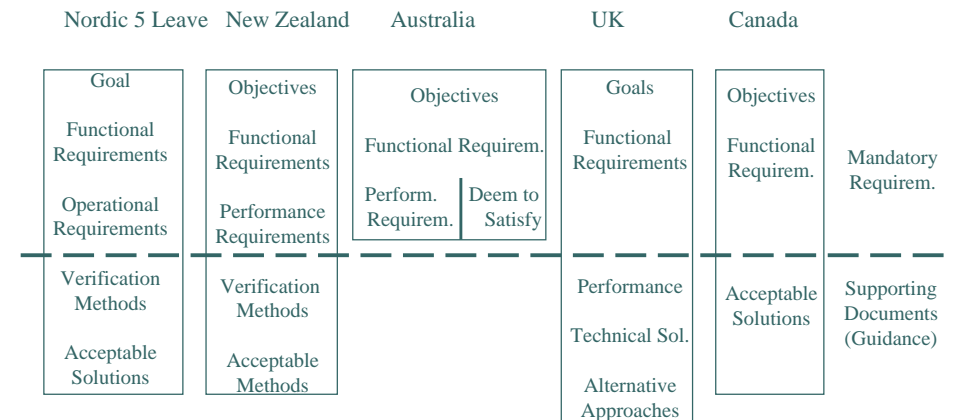
北欧各国のコードの調和

## 性能規定型設計:Nordic Five Levels

現在北欧諸国の建築物を支配している規則は、法律、規定、その他の規則からなっている。北欧閣僚協議会の北欧諸国の建築物規制の協力に関する活動プログラム(NU 1977:32)では、規則の体系はその包括的な目的から始まって、技術的な解決方法に至るような、一連の限られた数のレベルよりなる規則として構成されることを、最重要事項と定めた。このようにすれば、**国ごとに管理のシステムが異なっていたとしても、協力が促進される。**

(NKB(1978),p.23)

## 世界のいろいろな性能規定型 コードの階層性



(CIB,1997)

## 性能明示型設計：性能マトリックス

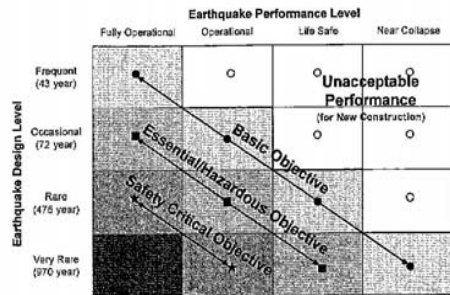


Figure 2-2: Recommended Performance Objectives for Buildings

### VISION 2000

Performance Based Seismic Engineering of Buildings (SEAOC 1995)

所有者と設計者の対話のための道具 (地震被害の経験より生まれた)

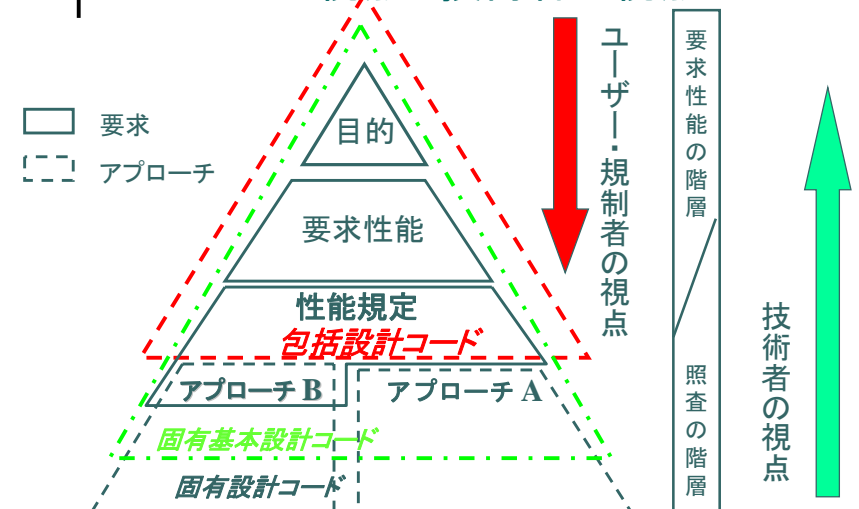
## 性能設計の利点

- 説明性と透明性が高い：規定の意図の理解が容易 (市民に理解される言葉)
- 異なる背景を持つ仕様型設計コードや社会制度の基にあっても、調和や統一が容易
- 新技術の導入、コストダウンが可能 (期待?)
- 記述の一貫性を保ちやすい

## 性能設計の問題点

- 構造物の性能に基づく、上からのアプローチと、仕様規定になり易い照査に関する下からのアプローチのインターフェース
  - どのような共通の表現を見つけるか (規制者／一般ユーザーの視点 vs. 設計者の視点)
- 性能設計された構造物が要求性能を満たしているのか否かを照査する社会的制度の不備
- 問題が生じたときの瑕疵の判定に、従来からの仕様型の規定が用いられる場合が多い

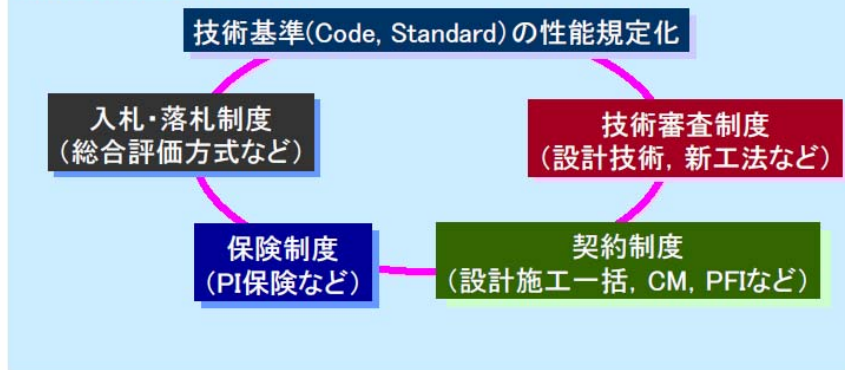
## 性能設計の問題点：ユーザーの視点と技術者の視点



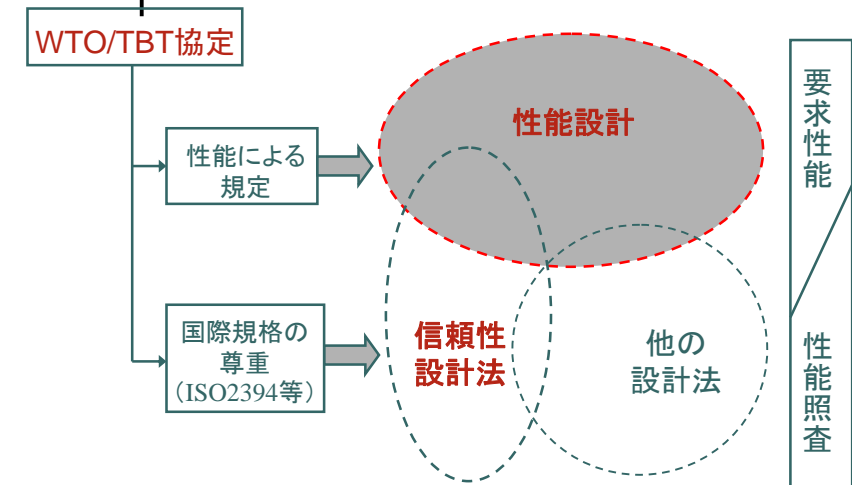
## 社会制度としての性能設計

- ・基準のみの性能規定化では、性能設計の進展は難しい。
- ・技術者・学会は、どこまで関与していくべきなのか？
- ・それぞれの国際整合性を念頭に置いた“しくみ”の創出が重要

### 性能設計を支える要素



## 性能設計・信頼性設計法とWTO/TBT協定



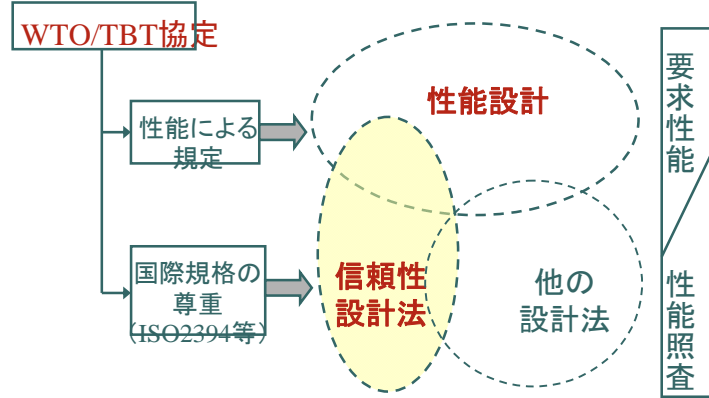
## 謝辞:

山本修司(沿岸技術研究センター)  
 長尾毅(国総研)  
 堀越研一(大成建設)  
 進藤惣治(農林水産省)  
 菊池喜昭(港湾空港技術研究所)  
 鈴木誠(清水建設)  
 白戸真大(土木研究所)  
 香月智(防衛大学校)  
 順不同, その他多数

## 全体構成

- 性能設計
  - 性能設計による設計コード登場(2003-2006)  
 「港湾の施設の技術上の基準」(2007年4月改定)を中心として。
  - 学会における包括設計コードの開発(1997-2002)  
 「基礎性能設計概念に基づく基礎構造物等の設計原則(地盤コード21)」と「code PLATFORM ver.1」の背景と開発経緯。
  - 性能設計の将来
- 信頼性設計
  - 地盤工学独自の信頼性設計法の開発の必要

## 性能設計・信頼性設計法とWTO/TBT協定



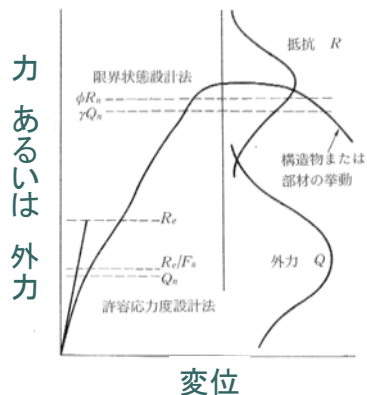
レベルⅢの信頼性設計では、無駄が多い。実務者が直に信頼性解析を実施する可能性が高まる！

## 設計：不確実性下の意思決定

「調査と試験、地盤パラメータの特性値の決定、設計計算、設計代替案の評価、実施の全ての作業段階で生じる不確実性を認め、かつ理解しながら、現時点での最善の意志決定を下し、要請される安全性、使用性、経済性、環境条件等を出来る限り満たす構造物を作っていく作業。」

(松尾(1984)を修正)

## 設計法の発展 (構造工学)



### 19世紀

許容応力度設計法 (Navier)

### 1920年代

ソ連、東欧などで個別的研究

終局強度設計法

### 第2次大戦後

古典的信頼性理論

(Freudenthal, 1945等)

限界状態設計法

1次近似2次モーメント法(FOSM)

(Cornell, 1968)

1次近似信頼性設計法(FORM)

(Ditlevsen, 1973; Hasofer & Lind, 1974等)

## 日本における信頼性設計理論の歴史(1960-現在)

- 1960—1980: 興隆期. 世界的に見ても同様. 多くの優れた論文あり.
- 1980-1995: 停滞(衰退)期. 一部で設計コードに信頼性設計を持ち込もうと言う試みあり. 挫折.  
(欧州ではEC, 北米ではLRFD定着期)
- 2000-現在: 再活性期. 上記説明の状況により興隆. 実務的展開が求められる.

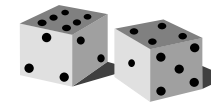


## 信頼性設計法で考えられる不確実性

- **物理的不確実性**: 外力や抵抗力、形状寸法等が本来持っているばらつき
- **統計的不確実性**: 限られたデータからばらつきの統計量(平均値、分散等)を推定する誤差。
- **モデルの不確実性**: 単純化・理想化された計算モデル・確率モデル等の誤差
- **グロス・エラー**: ヒューマン・エラーの別称  
(Thoft-Christensen and Baker, 1982)

## 地盤工学の信頼性設計における不確実性 「確率」の最近の解釈

Aleatory  
(偶然性による不確実性)  
vs.



Epistemic  
(知識の不足による不確実性)



(By G. Baecher and J. Christian, 2003)

## 地盤工学の信頼性設計における不確実性 結論(1)

- **物理的不確実性**: 地盤のばらつき
  - 一般的モデル化 → 偶然性(Aleatory)
  - ある位置 → 知識の不足(Epistemic)
- **統計的不確実性**: 知識の不足(Epistemic)
- **モデルの不確実性**: 知識の不足(Epistemic)

地盤工学で遭遇する不確実性はほとんど知識の不足による。

(さらに地盤のばらつきは、空間的平均化により低減する)

## 地盤構造物信頼性設計の特徴

- 地盤は不均質な連続体である。
- サイトごとに地盤調査により地盤パラメータ値を決定し設計する
- 工学的判断と設計計算の精度
- 実大規模に近い載荷試験や、破壊例の存在

## 地盤構造物信頼性設計の特徴

- 地盤は不均質な連続体である。
  - 確率場の理論の適用
- サイトごとに地盤調査により地盤パラメータ値を決定し設計する
  - 統計的推測理論の重要性
- 工学的判断と設計計算の精度
  - 要求される計算の精度, メカニズムの重視
- 実大規模に近い载荷試験や, 破壊例の存在
  - モデル化誤差の定量化の可能性

yh1

## User Friendlyな信頼性解析法

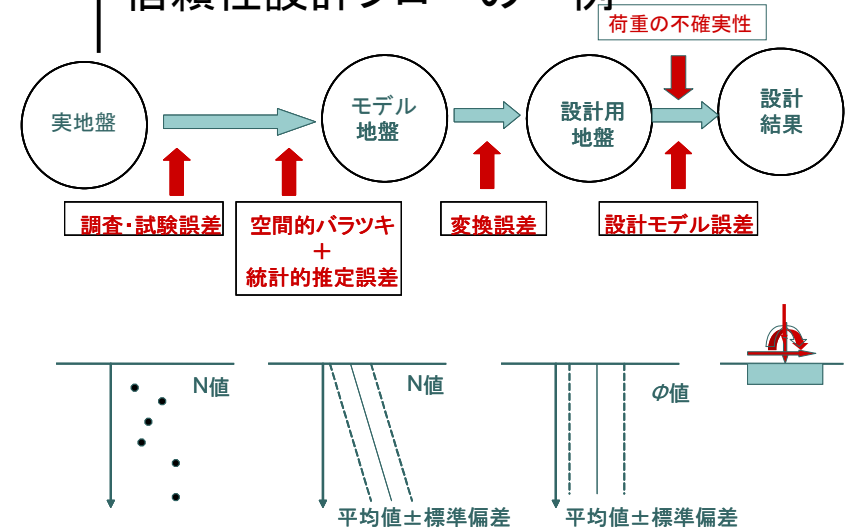
- 一般の地盤工学の実務者に取り組みやすい信頼性解析法の開発
- 複雑な設計計算結果(FEM等)を信頼性解析にリンクする
- 地盤の空間的ばらつきと, 統計的推定誤差を理論的整合性を取り込む。
- 一般信頼性解析と局所信頼性解析
- 空間的な局所平均を行うことによるばらつきの低減

スライド 62

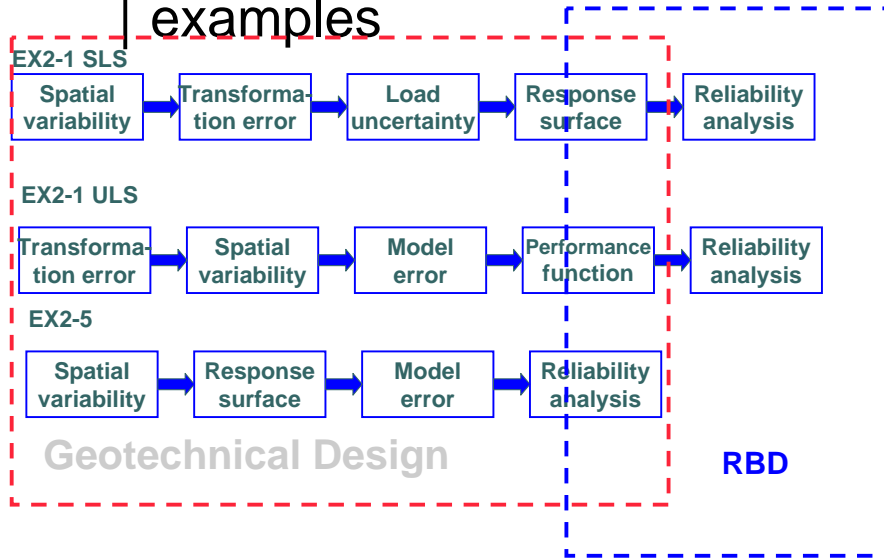
yh1

HONJO Yusuke, 2010/08/06

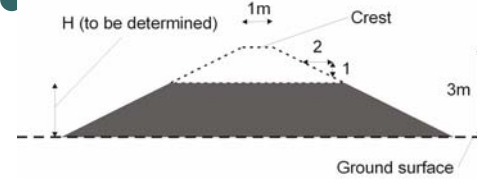
## 信頼性設計フローの一例



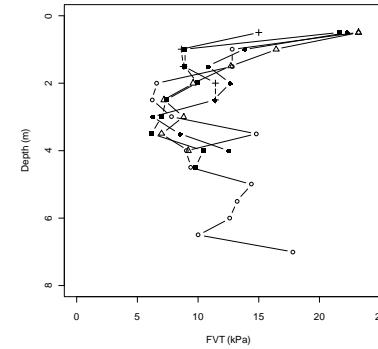
# Procedures for different examples



## EX 2-5 : EMBANKMENT OF SOFT PEAT



- An embankment on a soft peat with final height 3 (m)
- determine the first stage embankment height.



- The Embankment material
  - $\gamma=19$  (kN/m<sup>3</sup>) ,
  - $\phi'_k=32.5$  (degree).
- Top soil : normally consolidated clay ( $\gamma=18$  (kN/m<sup>3</sup>) and  $\gamma'=9$  (kN/m<sup>3</sup>)
- 3 to 7 (m) thick peat layer with  $\gamma'=2$  (kN/m<sup>3</sup>) overlaying
- Pleistocene sand of  $\gamma'=11$  (kN/m<sup>3</sup>) and  $\phi'_k=35$  (degree).
- 5 filed vane test (FVT) results are given whose testing interval is 0.5 (m)

2nd International Workshop on Evaluation of Eurocode 7, Pavia, Italy, April 2010



### EX 2-5 : Spatial variability of soil and modeling

Undrained shear strength of the topsoil

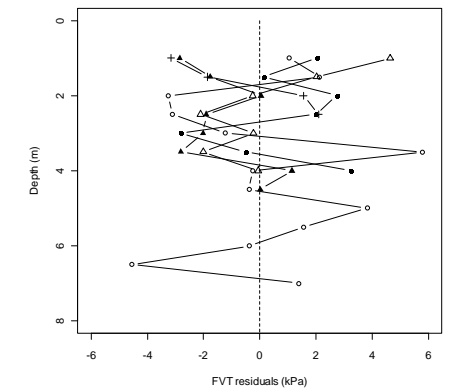
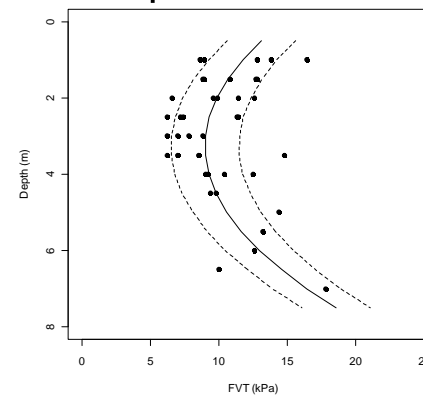
Mean (kPa)	SD (kPa)	COV
21.04	3.44	0.163

Alternative models fitted to  $su$  of the peat layer

Models	Trend (kPa)	SD	AIC	Note
Constant	10.33	2.89	196.52	
Linear	9.3677 + 0.3221z (9.40) (1.085)	2.85	197.30	$R^2 = 0.031$ (t-values)
Quadratic	14.73 - 3.51z + 0.536z <sup>2</sup> (9.04) (3.42) (3.85)	2.40	185.82	$R^2 = 0.314$ (t-values)

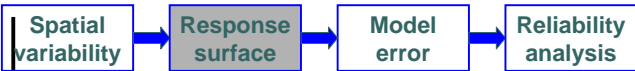


### EX 2-5 : Spatial variability of soil and modeling



$$su = 14.73 - 3.51z + 0.536z^2 \text{ (kPa)}$$

the SD of the  $su \rightarrow 2.40 \times 0.5 = 1.20$  (kPa).



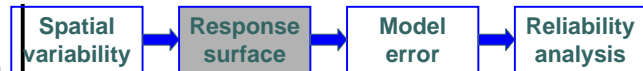
EX2-5: Range of values used in obtaining RS (135 cases)

$h$ (m)	$I_{peat}$	$I_{topsoil}$	$D_t$ (m)
1, 1.5, 2, 2.5, 3	0.5, 0.75, 1.0	0.5, 0.75, 1.0	0.5, 0.75, 1.0

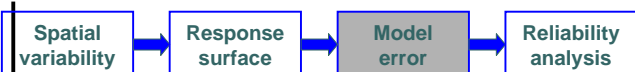
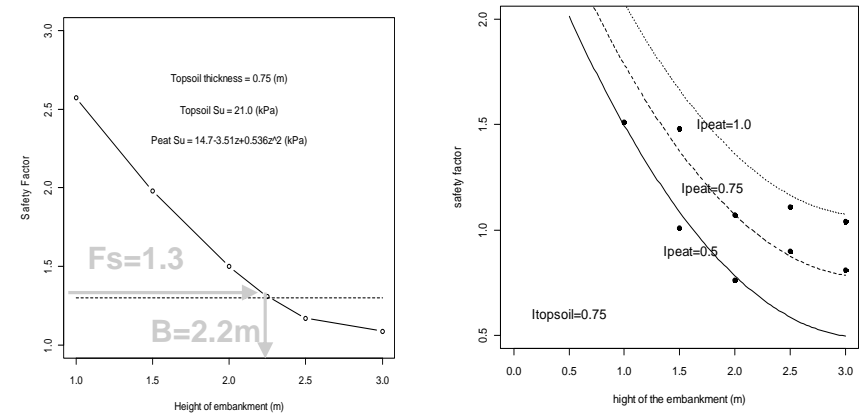
$$I_{peat} = s_u / (\text{mean of } s_u \text{ of the peat layer})$$

$$I_{topsoil} = s_u / (\text{mean of } s_u \text{ of the topsoil}) = s_u / 21.04$$

model	equation	r.s.e.	R <sup>2</sup>
Linear	$F_s = 0.948 - 0.449 h + 1.154 I_{peat} + 0.272 I_{topsoil} + 0.047 D_t$	0.0985	0.823
Quadratic	$F_s = 1.783 - 1.351 h + 0.213 h^2 + 1.156 I_{peat} + 0.272 I_{topsoil} + 0.091 D_t$	0.0533	0.949
logalismic	$F_s = 0.595 - 0.915 \log(h) + 1.181 I_{peat} + 0.272 I_{topsoil} + 0.079 D_t$	0.0645	0.924

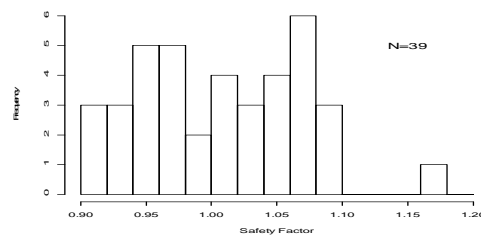


EX2-5: Height vs.  $F_s$  and Response surface



EX2-5: Model error in stability analysis of embankment

39 failure cases of embankment on soft ground by FV/UU compression tests and  $\phi' = 0$  circular slip method, and  $F_s$  distributed between  $F_s = 0.9$  to 1.1.



Model error (Matsuo and Asaoka, 1976)



Basic variables	Notations	mean	SD	Distribution
Topsoil $s_u$ (kPa)	$s_{u, \text{topsoil}} (I_{topsoil})$	21.04 (1.0)	3.44 (0.163)	Normal
Peat $s_u$ (kPa)	$s_{u, \text{peat}} (I_{peat})$	$14.73 - 3.51z + 0.536z^2$ (1.0)	1.20 (0.13) <sup>(1)</sup>	Normal
Topsoil thickness	$D_t$	[0.5, 1.0] (m)		Uniform <sup>(2)</sup>
Model error	$\delta_{F_s}$	[0.9, 1.0]		Uniform <sup>(3)</sup>
Unit weight of embankment	$\gamma_f$	19.0 (kN/m <sup>3</sup> )	—	Deterministic
friction of embankment	$\phi_f$	32.5 degree	—	Deterministic
Unit weight of topsoil	$\gamma_c$	9.0 (kN/m <sup>3</sup> )	—	Deterministic
Unit weight of peat	$\gamma_p'$	2.0 (kN/m <sup>3</sup> )	—	Deterministic
friction of sand	$\phi_s$	35 degree	—	Deterministic
Unit weight of sand	$\gamma_s'$	11.0 (kN/m <sup>3</sup> )	—	Deterministic

(Note 1)  $s_u$  topsoil (at  $z=4.0$ (m)) =  $14.73 - 3.5 \times 4.0 + 0.53 \times 4.0^2 = 9.27$ ,  $COV = 1.20/9.27 = 0.13$

(Note 2) It is assumed that the boundary of the topsoil and the peat layer lies somewhere between  $z = 0.5$  to 1.0 (m).

(Note 3) Based on Matsuo and Asaoka (1976).



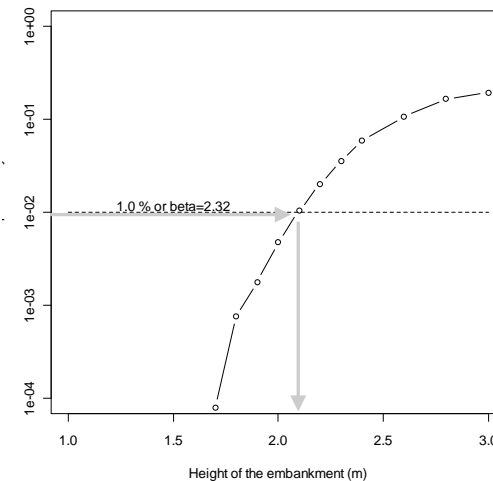
### EX2-5: reliability analysis by RS and MCS

- The response surface for the safety factor
  - $F_s = (1.783 - 1.351 h + 0.213 h^2 + 1.156 I_{peat} + 0.272 I_{topsoil} + 0.091 D_t) \delta_{F_s}$
  - After 100,000 MCS runs, to obtain
  - $P_f = P [ F_s \leq 1.0 ]$

2nd International Workshop on Evaluation of Eurocode 7, Pavia, Italy, April 2010



### EX2-5: Result of the reliability analysis



- For  $\beta = 2.32$ ,
- the first stage embankment height should be less than 2.1 (m).

### EX2-5: Summary and discussions

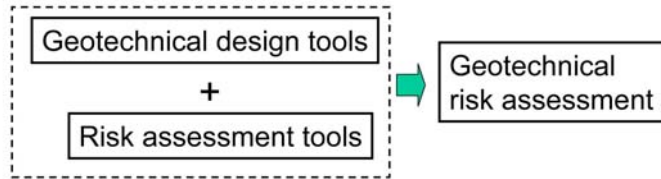
- Based on the RS, one can evaluate the contribution of each basic variable to the safety of the embankment. For example,
  - The effect of the height of the embankment becomes less as the embankment height increase, which is indicated by the quadratic function.
  - 10% reduction of peat strength reduces the safety factor by 0.12. The reduction is 0.027 in case of the topsoil strength.
  - 0.1 (m) change of the topsoil layer thickness changes the safety factor by 0.01.
- $F_s = (1.783 - 1.351 h + 0.213 h^2 + 1.156 I_{peat} + 0.272 I_{topsoil} + 0.091 D_t) \delta_{F_s}$

### Merits of RSM (response surface method)

1. Release geotechnical engineers from the uncomfortable feelings for RBD tools by separating geotechnical design part and RBD part.
2. Monte Carlo simulation, a very straightforward tool, is only RBD tool employed.
3. The response surface (RS) itself contains considerable amount of useful design information.
4. Direct geotechnical designers to make the most of their knowledge, experiences and engineering judgments in obtaining the RS.

# RBD by response surfaces

Existing methods



Proposed method

