

性能照査法により設計された橋 の安全性・破壊確率の推測 —津波防潮堤の安全性にもふれて—

京都大学名誉教授
(財)大阪地域計画研究所理事長
(株)駒井ハルテック技術顧問

渡邊 英一

1

序 言

- 現在構造物の長期的信頼性の評価が極めて重要性を増しており、ライフサイクルコスト、LCCが重要です。このためには統一された規範に基づいて、長期的観点より構造物の有している信頼性を正確に把握する必要があります。

2

序 言 (つづき)

- 現在では私はこの規範は「信頼性指標」以外にはないと信じています。この指標の変化を知ることにより構造物の破壊の確率は現在これだけだから、後何年は大丈夫ですとの推定が可能となる訳です。
- 現在の橋梁の示方書では信頼性(安全性)が評価できません。ましてや、長期的にこの信頼性がどのように変化するかは明らかではありません。

3

序 言 (つづき)

- 今春3月11日に発生した東日本大震災では改めて低頻度巨大災害の怖さを認識させられました。とくにモーメントマグニチュード9に及ぶ我が国始まって以来の凄まじい大地震とそれに伴う未曾有の大津波により東日本太平洋岸は致命的破壊を被りました。
- 通常は起こることが極めて稀ではありますが、一度起こると甚大な被害が生じるような災害を低頻度巨大災害といい、low-frequency but high-consequences disaster といわれます。このことについても後半で少し言及したいと思います。

4

1. はじめに

- 透明(transparent)な社会システム (social system)に向けて
- 説明責任(accountability)の明確化
- 共通の価値基準により行動し、能力・実力を発揮
- GCD: (内部統制(Governance, G), 規律遵守(Compliance, C), そして証拠開示(Disclosure, D))

5

現在の橋梁の示方書の問題点

- 構造物の長期的信頼性の評価は極めて重要性を増してきている。特に、長期的なコストパフォーマンスが良くなければならないので、LCCが重要である。
- このためには長期的観点より現在構造物の有している信頼性を正確に把握する必要がある。

6

現在の橋梁の示方書の問題点 (つづき)

- 現在では私はこの規範は「信頼性指標」以外にはないと信じる。
- この指標の変化を知ることにより構造物の信頼性、破壊の確率は現在これだけだから、後何年は大丈夫だとの推定が可能となるはず。
- 残念ながら、現在の橋梁の示方書では信頼性(安全性)が評価できない。ましてや、長期的にこの信頼性がどのように変化するかは明らかでない。

7

性能規定と仕様規定

- **性能規定** (Performance Requirement)は構造物の目標性能(Target Performance)を確保するための規定
- **仕様規定** (Specification Requirement)は各種構造に対応させて、形式や種別を分類し、それぞれについて仕様を満足させるような規定

8

許容応力度設計法

- 現在のわが国の道路橋示方書は形上は性能照査型へ移行したことになる。
- でも実質的には依然として仕様規定で許容応力度設計法を採用中。例えば、応力やたわみなどの応答挙動の大きさに制限をし、構造部材の安全性を確保するもの。

9

許容応力度設計法 (つづき)

- 限界状態での安全性および、使用限界状態での使用性・機能性堅持の上から見てどのような性能を確保しようとしているのかを明確に記述しているとは言えず、改良の余地が多い

10

- 目的：性能の明確化／技術進歩・国際対応／自由度拡大
- 背景：多数の不明確仕様規定が存在
→ 要求性能／新技術・新材料の出現／

図1-1 性能照査型設計の必然性

11

課題：

- **技術的課題：**
要求性能の明確化と評価法の検討／法令の技術規準の性能規定化
- **社会的課題：**
性能に基づく設計等が適切に行われる社会機構の検討

図1-2 性能照査型設計の課題

12

構造物の設計において要求される性能

- (1) 終局限界状態での適正な安全性保持
- (2) 使用限界状態での適正な使用・機能性維持
- (3) 疲労限界状態での適正疲労強度維持
- (4) 検査・モニタリングが容易で維持・管理・補修が適正に行えること
- (5) 環境に優しく、景観に優れていること

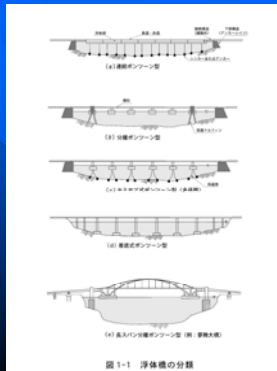
13

1963年NKB(ノルディック建築委員会)による5レベルシステム

- レベル1: 社会およびその構成員の観点からの建築物のあり方の全体的記述
- レベル2: レベル1で規定された特定の目的・意図を明確化するため機能項目・原則別に分類
- レベル3: レベル2で規定した機能項目別毎の設計・工事のため特定された要求
- レベル4: 要求への適合性を実証するためのガイドラインまたは指示事項
- レベル5: 基準に適合すると見なされる(deemed-to-satisfy) 技術的解(手法)による

14

性能照査型による浮体橋の設計



15

浮体橋への適用例 レベル2:要求性能 (土木研究所佐藤弘史室長ご提供)

X=条件, Y=対象, Z=現象

安全性	使用性	耐久性	適用性	経済性
X: 死荷重, 活荷重, 衝撃力, 風荷重, 波力, 潮流力, 浮力	X: 変形, 動揺, 横断線形, 縦断線形	X: 振動, 動揺, 塩分, 異種金属, 潮流	X: 浮体基礎, 死水域, 日照障害, 桁下空間	X: 過大設計, 現地条件
Y: 浮体基礎, 上部構造, 緩衝, 係留	Y: 利用者	Y: 構造体, 付属物, 塗装, 地盤	Y: 流れ, 生態系, 航行船舶	Y: 制作費, 架設費, 維持・管理費
Z: 転倒, 浸水, 座屈, 動的不安定, 動的破壊	Z: 不快, 不安, 利用不可能	Z: 疲労, 腐食, 劣化, 洗掘	Z: 阻害, 死滅, 航行不能	Z: 費用の増加

16

(例) 耐震性能の照査: 平成8年耐震設計編

- 耐震性能1: 地震後にも機能は健全で, 補修をしないでも使用可能
- 耐震性能2: 地震後にも機能が短時間で回復可能で, 補強を必要としない
- 耐震性能3: 地震によって構造物全体は崩壊しない

17

1. 道路橋示方書の性能照査型へ移行の動き

- 道路橋示方書:
 - ➡ 要求に応じて性能照査型の設計フォーマット書き直しへ
- 現在道路協会の橋梁委員会を中心に作業中。現行の道路橋示方書の条文と解説文から要求性能(検証方法とみなし仕様)を抽出。

18

■国際化への対応

- ・ 経験則による仕様規定が多いこと
- ・ ISOにおける技術基準の国際統一化への動き
→ 基準の透明性確保

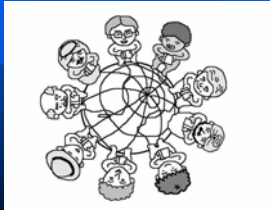


図2-1 道路橋示方書改訂の検討経緯

■構造等の多様化への対応

- ・ 利用者(納税者)の要求、発注・契約方法の多様化
- ・ 新技術の導入や新しい発注形態への対応
→ 柔軟性・普遍性の高い基準

図2-1 道路橋示方書改訂の検討経緯

■維持管理、耐久性の重視

- 維持管理・耐久性の配慮の促進
- 増大する膨大な橋梁ストックの維持管理への対応: 現在14万橋あり、寿命を50年としても年間2600橋を架け替える必要がある!

図2-2 道路橋示方書改訂の検討経緯

- 「橋梁定期点検要領(案)」: 国土交通省の直轄橋梁(案)(平成16年度より)
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_2.pdf
- ・ (国土交通省国道・防災課長通達)による本格的な保全を開始

-
- ・ 5年に1回の点検を義務付け
- ・ 点検結果を橋梁カルテに記録・保存の義務
- ・ 補修履歴の記録・保存
- ・ 橋梁マネジメント等への活用

図2-3 道路橋示方書改訂の検討経緯

(前からつづく)

- コスト縮減などの成果の早期導入 → 実績と信頼を得た新技術・新工法・新橋梁構造や新設計法の導入促進

■性能照査型設計への移行

図2-4 道路橋示方書改訂の検討経緯

I 第一段階(意識改革を優先し、早期改訂) (平成12年度中)

- ・ 仕様の部分の要求性能を明確化(不完全さ許容)
- ・ みなし仕様の概念を使用(大半の中小事業へ配慮)
- ・ 条文改訂、試設計、資料集作成

II 第二段階(真に性能照査らしいフォーマットへ) (平成13年度から)

- ・ 要求性能の更なる具体化・部分安全係数法導入検討
- ・ 法的位置付けの見直し・編構成など見直し
- ・ 委員会構成など見直し・認証機関など体制検討
- ・ キャリブレーション、試設計等

図3 道路橋示方書改訂の経緯: 二段階改訂

改訂の検討体制および検討 状況の概要

道路橋示方書の改訂の検討体制
および検討状況の概要

橋梁委員会

25

この部分の説明は割愛します



26

3. 道路橋示方書等における 安全性の評価の現状

3. 1 土木の分野の設計基準の現状

鋼構造物と設計基準

照査の主要な項目：安全性。

鋼構造物：橋梁・水門・水圧鉄管・貯蔵用タンク・
煙突・送電用鉄塔・パイプライン・通信施設・
海洋構造物・ロケット発射台など多岐。

わが国：代表的なものは橋梁が構造物設計の基本。
橋梁は道路橋と鉄道橋に大別

27

鉄道橋の場合：活荷重の確率的性質：通行車両の
種類が限定、荷重としての変動幅も相対的に
小さく、かつ、ある精度で推定できる。鉄道橋
の設計活荷重は通常最大値。設計荷設計活荷重
に近い荷重が作用する確率は比較的高い。

道路橋の場合：設計活荷重は超過確率こそ十分
に小さいものの、必ずしもゼロとはいえない。
これに対し、その一方で、設計活荷重に近い荷
重が作用する頻度は、ごく短い橋や床版に対す
る活荷重を除いて鉄道橋の場合より少ない。

28

鋼橋の設計規準

■中小スパン橋梁：

- ・スパン200m以下の道路橋：道路橋示方書(1994, 1998)
- ・スパン150m以下の鉄道橋：鉄道構造物等設計標準3(1992)

■慣用の設計過程：許容応力度設計法

- ・荷重設定：設計規準で規定された種々の設計荷重とそれらの組み合わせによる
- ・構造解析：構造モデルの設定と断面力、応力、変形量の計算
- ・形状寸法決定：材料の抵抗性能を考慮し、安全性と使用性の条件を満足

29

●長大橋梁：

幾何学的非線形性が顕在化、固有振動周期が増大。
地震、強風等による特有の動的応答が見られる。

〔⇒本州四国連絡橋：上部構造設計基(1984)／吊
橋主塔設計要領・同解説(1989)〕最小限の規定の
み。設計の合理化の余地、自由度のある性能照査
型設計が可能。耐用年数大。

30

- 近代橋梁：溶接構造
→ 交通荷重による疲労破壊の研究が増大。
- 中小スパン鉄道橋：死荷重応力 $\leq$ 活荷重応力
道路橋でも疲労損傷が多数見。

31

安全性確保と設計の合理化

世界各国の鋼橋の設計規準は

- a. 許容応力度設計法
- b. 限界状態設計法
(米国及びカナダでの呼び方：荷重係数設計法, LRFD: Load and Resistance Factor Design)

に分類できる

32

英国、カナダ、ECC諸国等ではこの

b 限界状態設計法 (Limit State Design Method) が制定:部分安全係数を用いたいわゆる、荷重係数設計法となっている。この手法の発展の鍵は

- 構造物の使用目的、機能、建造費、破壊による損害の程度、構造物の公共的重要性等を考慮した目標破壊確率の決定
- その目標破壊確率を達成するために、部分安全係数、すなわち荷重係数と抵抗係数を様々な荷重とそれらの組み合わせ、鋼種別、構造形式別、構造部材別に決定すること

33

構造物の信頼性設計法の大別

- レベルI: レベルIIおよびレベルIIIの計算結果を踏まえて安全係数(荷重係数、抵抗係数=材料強度係数、構造物係数等)を用いてキャリブレーションしたもの
- レベルII: 二次モーメント法により荷重や強度の期待値と標準偏差を用いて信頼性指数を算出、正規確率分布を仮定して破壊確率を計算するもの
- レベルIII: 例えば原子炉等、極めて重要でその破壊の社会に及ぼす影響が甚大な構造物の場合厳密な確率密度関数を用い厳密に多重積分にて破壊確率を計算するもの

34

3. 2 安全性の明確化と鋼構造物設計指針 PART A

昭和59年土木学会鋼構造委員会の中に鋼構造物設計指針小委員会が設置される

35

鋼構造物設計指針 PART Aの概要

- 適用範囲: 一般的な鋼構造物に適用。設計思想は準確率論を基礎とした限界状態設計法
- 設計の原則: 構造設計では構造物の安全性、使用性、経済性、環境との調和を考慮するとともに製作、運搬、現場施工、検査、塗装、維持管理、補修などを勘案。設計に当たり、強度、変形、安定、耐久性、施工性、保守、美観、騒音軽減、振動軽減などの性能規定を盛り込む
- 関連する基準: c1~c35に記載

36

その他の説明

- テキストを御覧下さい



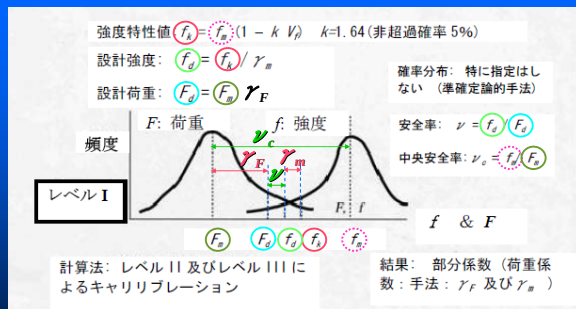
37

構造物の信頼性設計法の概説

- Level I による信頼性設計法
- Level II による信頼性設計法
- Level IIIによる信頼性設計法

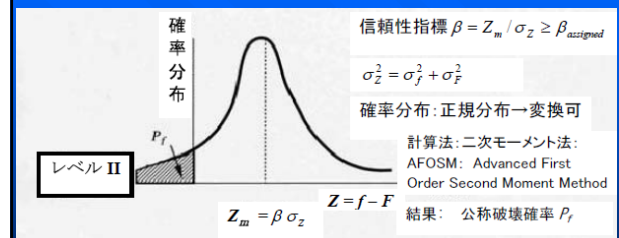


38



Level I による信頼性設計

39



Level II による信頼性設計

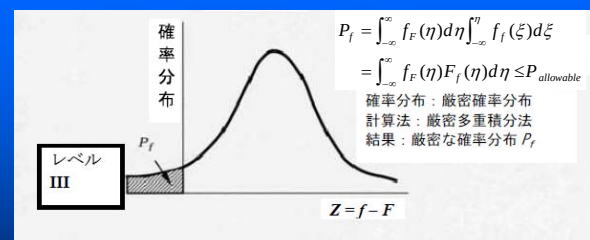
40

- 信頼性指標 β ならびに破壊確率 P_f :

$$\beta = \frac{f_m - F_m}{\sqrt{\sigma_F^2 + \sigma_f^2}}; \quad P_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta)$$

二次モーメント法

41

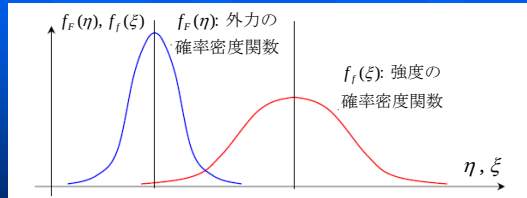


Level III による信頼性設計

42

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} f_F(\eta) d\eta \int_{-\infty}^{\eta} f_f(\xi) d\xi$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} f_F(\eta) F_f(\eta) d\eta \leq P_{\text{allowable}}$$



Level III による信頼性設計

43

鋼構造と コンクリート構造の 限界状態設計法に 関する共通の原則

昭和63年4月より土木学会構造工学委員会に鋼・コンクリート共通構造設計基準小委員会が設置され、共通設計指針(案)が作成された

44

■荷重の特性値 F_m :

終局限界状態の照査の場合、荷重のばらつきを想定した上で、構造物の施工中及び耐用期間中に生ずる最大または最小荷重の期待値、使用限界状態の照査の場合、構造物の耐用期間の変動状況を考慮して定めるもの。

■材料強度の特性値 f_k :

定められた材料強度試験法による試験値のばらつきを想定した上で、試験値がそれを下回る確率が一定の小さな値以下となることが保証された材料強度の値、またはこれと同等の値。

45

表 2 荷重係数 γ_F

限界状態	荷重の種類	荷重係数 γ_F
終局限界状態	永久荷重	1.0~1.2 または 1.0~0.8 (小さい方が不利なとき)
	主たる変動荷重	1.1~1.2
	従たる変動荷重	1.0
	偶発荷重	1.0
使用限界状態	全ての荷重	1.0
疲労限界状態	全ての荷重	1.0

46

■材料係数 γ_m : 材料強度の特性値からの望ましくない方向への変動、供試体と構造物中との材料特性の差異、材料特性が限界状態に及ぼす影響、材料特性の経時変化を考慮するための安全係数。表3にその値を示す。

■設計荷重 F_d : 荷重の特性値(期待値)に荷重係数を乗じた値 :

$$F_d = \gamma_F F_m$$

47

表 3 材料係数 γ_m

材料の種類	限界状態	材料係数 γ_m	
鋼材($m = s$)	終局限界状態	γ_s	1.0~1.05
	使用限界状態		1.0
	疲労限界状態		1.0~1.05
コンクリート ($m = c$)	終局限界状態	γ_c	1.3
	使用限界状態		1.0
	疲労限界状態		1.3

48

■設計材料強度 f_d :

材料強度の特性値を材料係数で除した値:

$$f_d = f_k / \gamma_m$$

安全係数による設計

安全係数による設計法は、設計変数に割り当てられた安全係数を用いて、設計の不確実性を考慮する設計法である。

49

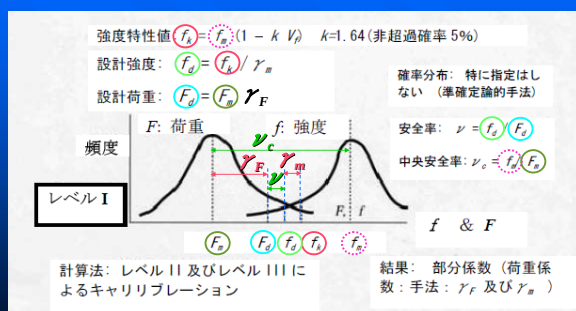
(1) 荷重 F と材料強度 f の設計値

設計荷重 F_d と設計材料強度 f_d はそれぞれ以下の式で与えられる:

$$F_d = \gamma_F F_m; \quad f_d = f_k / \gamma_m \quad \dots(1)$$

50

レベルIの荷重&強度の比較



51

(2) 断面力 S と断面耐力 S_d の設計値

断面力を算定する関数 S : 荷重及び部材の剛性を期待値としたとき、断面力の期待値を算定する関数。設計断面力 S_d は、不利な荷重組み合わせについて、各設計荷重 F_d をもとに構造解析によって算出された断面力 $S(F_d)$ に構造解析係数 γ_a を乗じ、それらを加え合わせる。

$$S_d = \sum \gamma_a S(F_d) \quad \dots(2)$$

52

(3) 耐力算定式 R と設計断面耐力 R_d

断面耐力を算定する関数 R として、材料強度を期待値としたとき、断面耐力の期待値を算定する関数を選ぶ。設計断面耐力 R_d は、実構造物の耐力がそれを下回る確率が十分小さいものとし、必要な数の設計材料強度 f_d から耐力算定式より算定された断面耐力 $R(f_d)$ を部材係数 γ_b で除したものとする:

$$R_d = R(f_d) / \gamma_b \quad \dots(3)$$

53

(4) 限界状態に対する検討

設計断面力 S_d の設計断面耐力 R_d に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめる:

$$\gamma_i S_d / R_d \leq 1.0 \quad \dots(4)$$

ここに、構造物係数 γ_i は、構造物の重要度、限界状態に達したときの社会的・経済的影響を考慮して定める。構造物係数 γ_i は一般に、1.0~1.2としてよい。

54

(5) 安全率と破壊確率の概算

レベルI, すなわち, 準確率論的手法に従った設計法で, 表2の荷重係数 γ_F と表3の材料係数 γ_m を参照し, 構造物係数 γ_i の値, 1.0~1.2をも考慮して安全のマージン $\gamma_F \gamma_m$ の値が1.0~1.87であること, さらに, 荷重や材料強度の変動係数を仮定して破壊確率を荷重と材料強度の確率分布が正規確率分布に従うと仮定して計算

55

■材料強度と荷重の期待値と標準偏差および変動係数:

荷重の期待値, 標準偏差, 変動係数:

$$\bar{F}_m, \sigma_F, V_F$$

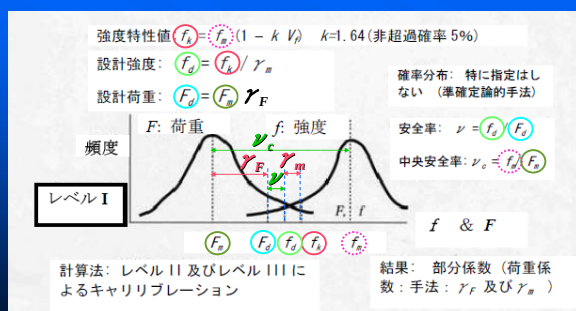
材料強度の期待値, 標準偏差, 変動係数:

$$\bar{f}_m, \sigma_f, V_f$$

■中央安全率 ν_c : $\nu_c = \bar{f}_m / \bar{F}_m \dots(5)$

56

レベルIの荷重&強度の比較



57

■材料強度の特性値 f_k : 5%非超過確率に対応の材料強度 f の値を用いれば,

$$f_k = f_m (1 - k V_f) : k = 1.64 \dots(6)$$

■設計材料強度 f_d と設計荷重 F_d :

$$f_d = f_k / \gamma_m ; F_d = F_m \gamma_F \dots(7)$$

■安全率 ν : $\nu = f_d / F_d = (f_k / \gamma_m) / (F_m \gamma_F) = \nu_c (1 - k V_f) / (\gamma_m \gamma_F) \dots(8)$

58

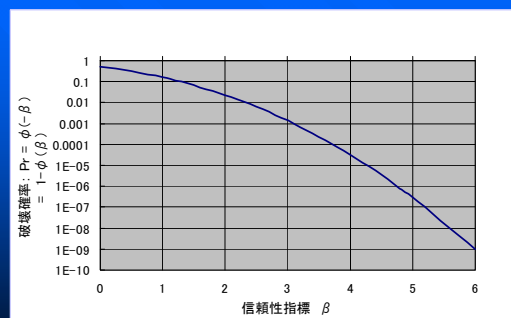
■信頼性指標 β ならびに破壊確率 P_f :

$$\beta = \frac{\bar{f}_m - \bar{F}_m}{\sqrt{\sigma_F^2 + \sigma_f^2}} ; P_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta)$$

...(9)

59

標準正規分布の場合



60

表4 $k = 1.64$ (非超過確率5%) のときの安全率 ν , 中央安全率 ν_c および信頼性指標 β 及び破壊確率 P_f の値 (正規分布を仮定: $\gamma_m \gamma_F = 1$ のとき)

荷重変動係数 $V_F = 0.1$ 強度変動係数 $V_f = 0.05$ のとき

安全率 ν	中央安全率 ν_c	信頼性指標 β	標準正規確率 $\Phi(\beta)$	破壊確率 $P_f = \Phi(-\beta)$
1.0	1.08	0.78	0.78	0.22
1.05	1.143	1.24	0.89	0.11
1.1	1.198	1.70	0.955	0.045
1.15	1.253	2.14	0.983	0.017
1.2	1.307	2.57	0.9953	0.0047
1.25	1.362	2.99	0.9987	0.0013

(continued 1)

荷重変動係数 $V_F = 0.1$ 強度変動係数 $V_f = 0.05$ のとき

安全率 ν	中央安全率 ν_c	信頼性指標 β	標準正規確率 $\Phi(\beta)$	破壊確率 $P_f = \Phi(-\beta)$
1.0	1.08	0.78	0.78	0.22
1.3	1.416	3.40	0.9997	0.0003
1.35	1.471	3.79	0.999928	0.000072
1.4	1.525	4.17	0.999984	0.000016
1.5	1.634	4.91	0.9999952	0.0000048
1.6	1.743	5.60	0.999999999	0.000000001
1.7	1.852	6.18	0.999999999	0.000000001
1.8	1.961	6.86	0.999999999	0.000000001

(continued 2)

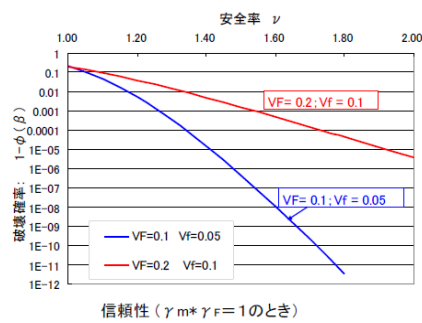
荷重変動係数 $V_F = 0.2$ 強度変動係数 $V_f = 0.1$ のとき

安全率 ν	中央安全率 ν_c	信頼性指標 β	標準正規確率 $\Phi(\beta)$	破壊確率 $P_f = \Phi(-\beta)$
1.0	1.196	0.84	0.8	0.2
1.05	1.256	0.92	0.82	0.18
1.1	1.316	1.32	0.906	0.094
1.15	1.376	1.55	0.939	0.061
1.2	1.435	1.77	0.961	0.039
1.25	1.495	1.98	0.977	0.023
1.3	1.555	2.19	0.986	0.014
1.35	1.615	2.39	0.9915	0.0085
1.4	1.675	2.59	0.9951	0.0049
1.5	1.794	2.96	0.9984	0.0016

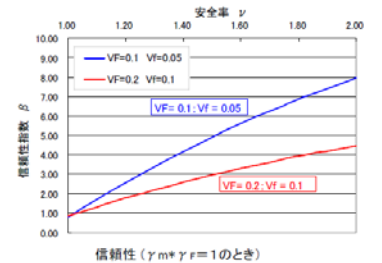
(continued 3)

荷重変動係数 $V_F = 0.2$ 強度変動係数 $V_f = 0.1$ のとき

安全率 ν	中央安全率 ν_c	信頼性指標 β	標準正規確率 $\Phi(\beta)$	破壊確率 $P_f = \Phi(-\beta)$
1.6	1.914	3.30	0.99952	0.00048
1.7	2.033	3.62	0.99985	0.00015
1.8	2.153	3.92	0.999954	0.000046
1.9	2.273	4.20	0.9999778	0.0000222
		1.0	0.841	0.159
		2.0	0.9772	0.0228
		3.0	0.99865	0.00135
(Reference)		4.0	0.9999683	0.0000317
		4.6	0.99999785	0.00000215
		5.0	0.999999702	0.000000298
		6.0	0.999999999	0.000000001



(a) 破壊確率 P_f の値



(b) 信頼性指標 β の値

図7 $k = 1.64$ (非超過確率5%) のときの安全率 ν , 中央安全率 ν_c および信頼性指標 β 及び破壊確率 P_f の値 (正規分布を仮定: $\gamma_m/\gamma_F = 1$ のとき)

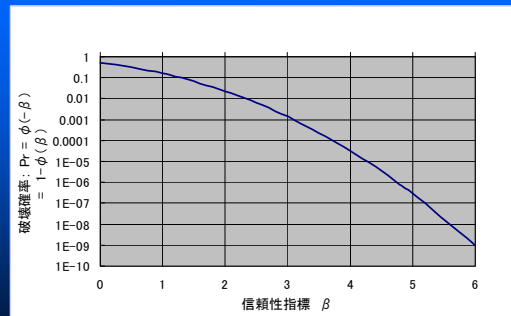
5. 橋梁の性能の劣化のモデル化

■ D. Frangopol P. やThoft-Christensenらの、主として英国のコンクリート橋などに関する調査結果: 信頼性指標 β が時間の経過とともに低下:

- 信頼性指標 β の橋梁完成時の0値 $\beta(0)$ は5~12 程度の値を持つ
- 完成後しばらくは劣化しないがある時間 t_1 の経過後は劣化が始まる.
- 信頼性指標 β が 4.6 を下回ると事後保全型維持管理 (essential maintenance) をしなくてはならない
- そこまで落ち込むまでに予防保全的維持管理 (preventive maintenance) を行い 体質改善によって劣化の進行を抑制するとよい

67

標準正規分布の場合



68

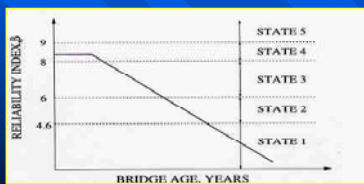
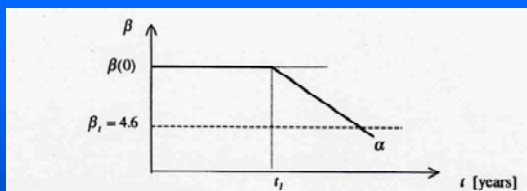
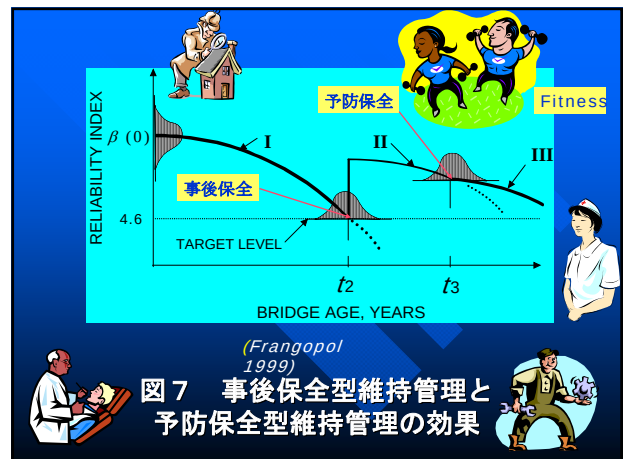


図6 橋梁の時間的劣化と信頼性指標 β の値



(Frangopol 1999)
図7 事後保全型維持管理と
予防保全型維持管理の効果

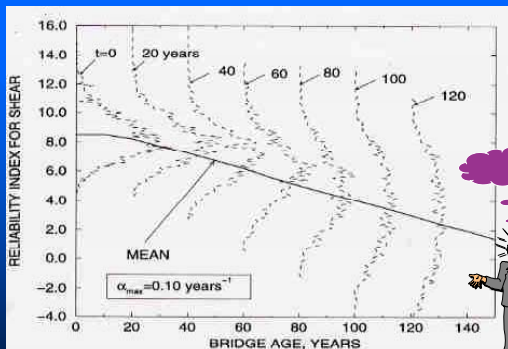
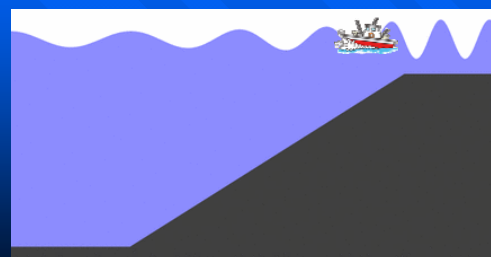


図8 信頼性指標の平均値 β と劣化勾配 α

71

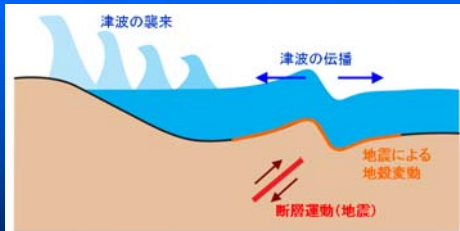
付録: 津波防潮堤の安全性との 関連を考える



<http://en.wikipedia.org/wiki/Tsunami>

72

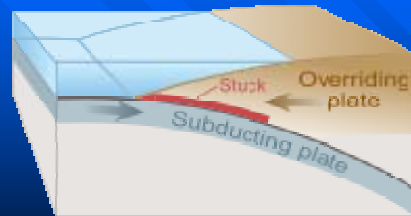
津波の発生



津波の発生
海底下の断層運動(地震)の結果、海面に地震変動が発生し、その上の海水を押し上げる。この押し上げられた水の塊が津波となり四方に広がっていく。

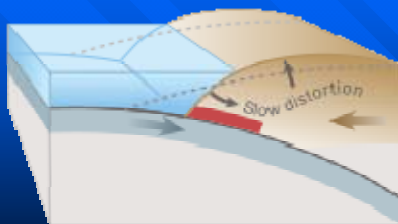
73

津波の発生: Drawing of tectonic plate boundary before earthquake



74

Overriding plate bulges under strain, causing tectonic uplift.



75

Plate slips, causing subsidence and releasing energy into water.

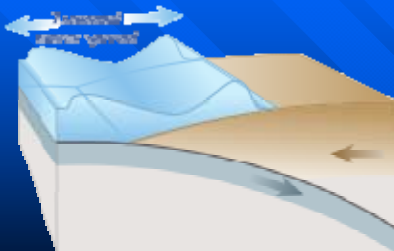
Tsunami starts during earthquake



76

The energy released produces tsunami waves

tsunami waves spread



77



78



<http://en.wikipedia.org/wiki/Tsunami>

79

再現期間(Return Period)

住宅用語大辞典によれば 再現期間とは:

- 一定の強度をもった自然現象(台風・豪雨・豪雪・地震など)が再び発生するまでの期間(年数)を「再現期間」という。例えば「再現期間100年の地震動」とは、100年に一度起きる規模の地震のことである。
- T 年間に一度起きる規模の事象が1年間のうちに起きる確率は $1/T$ である。
- Q 年間にこのような事象が一度も起こらない確率は $(1-1/T)^Q$ である。

www.weblio.jp/cat/architecture/recju
(青字は著者のコメントです)

80

再現期間(Return Period), T 年, の荷重と 構造物の設計寿命(Design Life), Q 年

- Q 年間のうち全く荷重の襲わない確率, Pr :
- $Pr = (1-1/T)^Q$ $1/300=0.00333$; $1-1/300=0.9967$

T	300	300	300	300	6	12	27
	(100)	(100)	(100)	(100)			
Q	100	150	300	750	18	18	18
	(33)	(50)	(100)	(250)			
Pr	0.71	0.61	0.37	0.08	0.038	0.209	0.507
	(0.71)	(0.61)	(0.37)	(0.08)			

81

18年に1度の頻度? 1985 → 2003



津波の発生頻度・再現期間

http://committees.jsce.or.jp/2011quake/system/files/110510_tsunami.pdf

津波特定テーマ委員会

第1回 報告会(平成23年5月10日) 配布資料

■ 1. 今回の津波の特性と位置づけ(WG1)

1-1 今回の津波は場所によっては貞観津波(869年)クラスかそれ以上と考えられる。(合同調査グループ等による痕跡調査の分析から。)

1-2 貞観津波クラスの巨大津波の発生頻度は500年から1000年に一度と考えられる(津波堆積物の調査研究のレビューから。)

83

■ 2011/05/15(日) 10:28:57

- 国の地震調査委員会(阿部勝征委員長)は、日本の沿岸各地を襲う津波の高さや浸水域発生確率を予測し、公表することを決めた。
- 早ければ3年後にも公表する。同委員会はこれまで、日本とその周辺で起きる地震について、過去の発生頻度をもとに今後30年以内の発生確率などを公表してきたが、津波の発生確率を予測するのは初めて。

<http://jshige.dti blog.com/blog-entry-179.html>

84

大津波450～800年周期か 東北太平洋岸, 貞観地震挟み

- 東日本大震災で津波被害を受けた宮城県から福島県にかけての太平洋岸では、「貞観地震」(869年)を挟み、約450～800年間隔で大津波が起きていたとみられることが18日までに、産業技術総合研究所の分析で分かった。

http://www.toonippo.co.jp/news_kyodo/news_mn/20110518010007261.asp

85

大津波450～800年周期か 東北太平洋岸, 貞観地震挟み

- 2011年5月22日から千葉市で開催される日本地球惑星科学連合大会で発表する。産総研は、仙台市若林区と宮城県山元町、南相馬市で、過去に津波が運んだ砂の堆積物分布を調査。堆積物内の植物化石の放射性炭素から年代測定した結果、紀元前390年ごろ、西暦430年ごろ、869年の貞観地震、1500年ごろ—の津波によるとみられる堆積物を確認。

http://www.toonippo.co.jp/news_kyodo/news_mn/20110518010007261.asp

86

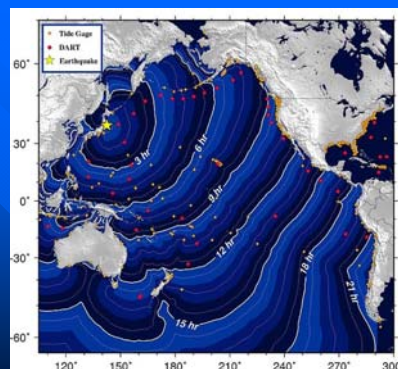
大津波450～800年周期か 東北太平洋岸, 貞観地震挟み

- 産総研は、450～800年程度の周期で、東日本大震災の津波もこのサイクルに含まれ、貞観と430年ごろの津波の規模は大震災と同程度とみている。

http://www.toonippo.co.jp/news_kyodo/news_mn/20110518010007261.asp

87

2011年東北地方太平洋沖地震で引き起こされた津波の各地への予想到達時間: アメリカ海洋大気観測局 NOAAによる試算。



Estimated tsunami travel time forecast map for the 2011 Sendai earthquake from the U.S. NOAA

<http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:2011Sendai-NOAA-TravelTime-Ttvulhvpd9-06.jpg>

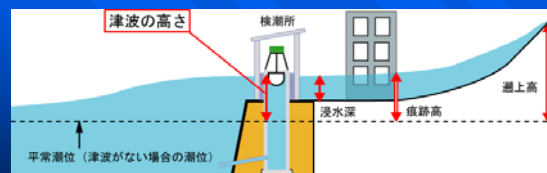
88

<http://www5d.biglobe.ne.jp/~kabataf/tunami.htm>



海岸に押し寄せる大津波(パソコンによる描画)⁸⁹

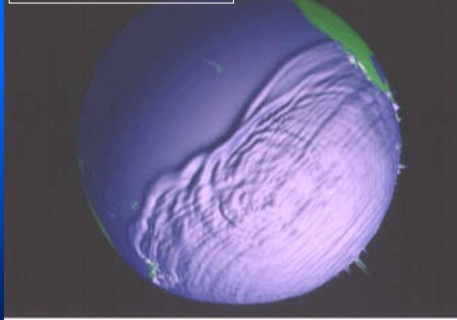
津浪の高さと遡上高



<http://www.jma.go.jp/jmakishouknowfaqfaq26.html>

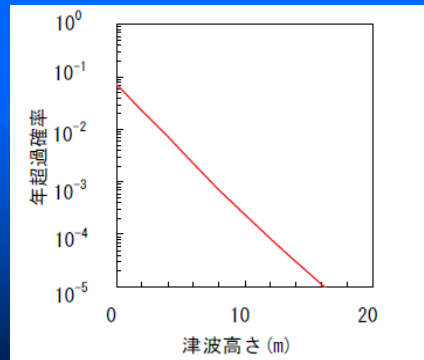
90

津波シミュレーション



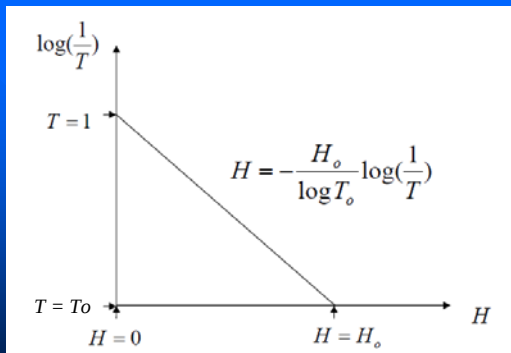
http://inpaku.dpri.kyoto-u.ac.jp/jp/think/sea/tsunami_jpn/contents/right.html

91

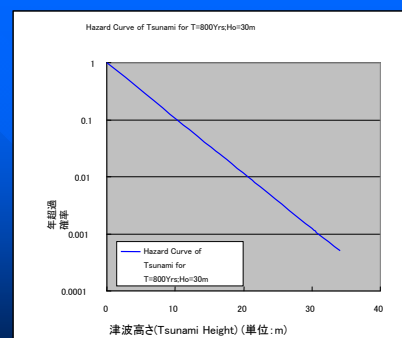


付図A1 津波ハザード曲線^{A1)}

92

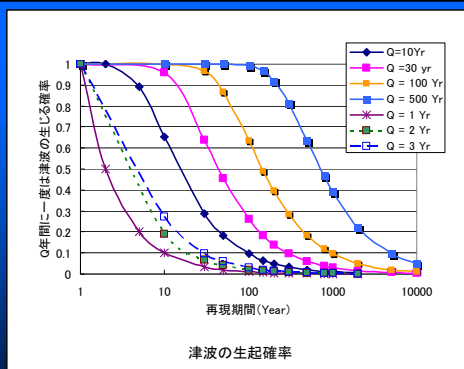


付図A2 $\log(1/T)$ と H の関係を示すハザード曲線



付図A3 予想される津波高さとして津波の発生年超過確率

94



付図A4 供用期間の Q 年間に津波の生じる確率.
 $Q = 1, 2, 3, 10, 30, 100, 500$ 年.

95

防潮堤を超える津波の安全性について: 防潮堤の信頼性評価

- 防潮堤の高さを d 、津波の高さを H としたとき安全性 Z の概念は

$$Z = d - H \geq 0$$

96

安全性指標 β の定式化

- AFOSM (Advanced First Order Second Moment Method) によれば Z, d, H の期待値をそれぞれ, μ_Z, μ_d, μ_H 標準偏差をそれぞれ, $\sigma_Z, \sigma_d, \sigma_H$
- H の変動係数を V_H として以下の定式化が考えられる

97

安全性指標 β

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_d - \mu_H}{\sigma_Z} = \frac{\mu_d - \mu_H}{\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_H^2}}$$

$$= \frac{\mu_d / \mu_H - 1}{\sqrt{\sigma_d^2 / \mu_H^2 + \sigma_H^2 / \mu_H^2}} = \frac{v_d - 1}{(\sigma_H / \mu_H) \sqrt{\sigma_d^2 / \sigma_H^2 + 1}}$$

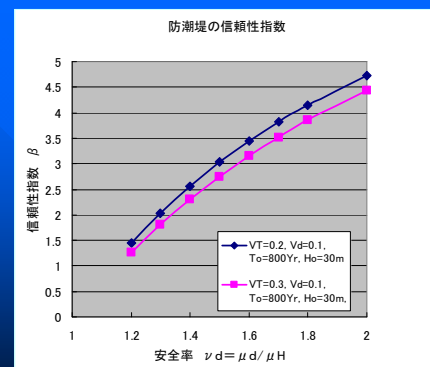
$$= \frac{(v_d - 1)}{V_H \sqrt{\sigma_d^2 / \sigma_H^2 + 1}} = \frac{(v_d - 1)}{\sqrt{V_d^2 \cdot v_d^2 + V_H^2}}$$

98

安全性指標 β の最終表現

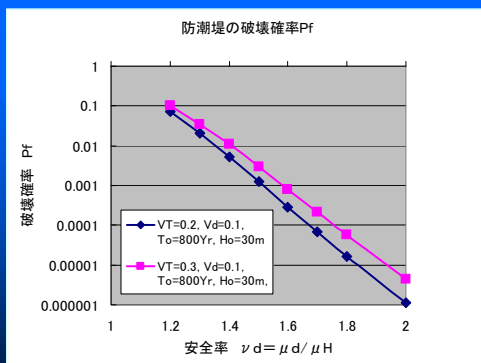
$$\beta = \frac{(v_d - 1)}{\sqrt{V_d^2 \cdot v_d^2 + V_H^2}} = \frac{(v_d - 1)}{\sqrt{V_d^2 \cdot v_d^2 + \left(\frac{V_T}{\log T_o} \right)^2}}$$

99



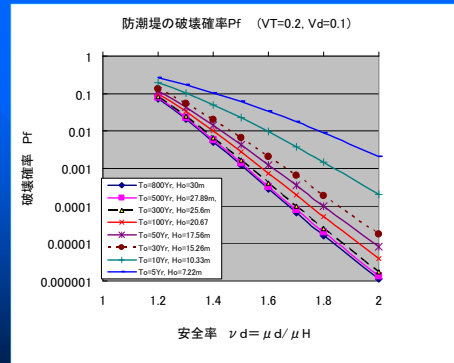
付図A5 防潮堤の信頼性指数 β の計算例

100



付図A6 防潮堤の津波越波による破壊確率 P_f の計算例

101



付図A7 再現期間 T_o が変化したときの破壊確率 P_f の変化

102

観 察

- 防潮堤の安全率 1.2 は低すぎるのではないだろうか。
- 構造分野でよく用いられる安全率 1.7 まですぐ大きくすべきとは言わないが
- 安全率を上げると防潮堤の建設費は膨大なものになる！



103



津の防潮堤

<http://en.wikipedia.org/wiki/Tsunami>

104

6. 要 約

- 性能照査型設計の最近の趨勢
- 性能照査で最も重要な安全性の照査の考え方
- 性能照査型の設計方式: 時宜にかなった適正な方式

(国際化を迎え、ガラス張りの世の中、倍旧の公平性、公明性の要求)

105

6. 要 約

- 本質的な性能評価と照査の考え方を確立しなければ見かけ倒し
- 維持・管理・補修は新設と同様に重要な課題
: 長期的観点に立った LCC, 長期的な社会基盤の性能のモニター, 維持・管理・補修の重要性

106

おことわり

- 津波に関しては素人的なコメントを致しました。
- 構造分野(外野席)から見たコメントとお考え下さい。



107

謝 辞

- ご清聴ありがとうございました
- 橋梁委員会での資料を参考にしました
- 記して謝意を表明します。

108

RAMS

FOR BEAUTIFUL HUMAN AND
STRUCTURAL LIFE

