

土木学会平成29年度全国大会
研究討論会 研-19資料

構造設計における目標安全性水準の設定 — How safe is safe enough? —

座長	佐藤 尚次	中央大学
話題提供者	秋山 充良	早稲田大学
	菊池 喜昭	東京理科大学
	有川 太郎	中央大学
	高田 毅士	東京大学
	蛭沢 勝三	電力中央研究所

日 時	平成29年9月13日（水）13:00~15:00
場 所	九州大学伊都キャンパス
教 室	センター1号館 1402教室

構造工学委員会

土木学会平成29年度全国大会 研究討論会【研19】

構造設計における 目標安全性水準の設定

How safe is safe enough ?

(担当：構造工学委員会)

委員会の中で議論したテーマ

- ・「要求性能」って何だ？
- ・「荷重の値を決めてくれ」「そうしたら何とかするか」とよく言われる・・・
→これらは「2016版土木構造物共通示方書(性能・作用編)」とリンク
- ・確率変数の取り扱い
→これらは付録の「分布形、データーソース」「信頼性評価法」
- ・「**目標安全性(信頼性)水準の設定**」って何だ？ **勝手に決めていいのか**
→これも付録で扱う

しかしながら、最後の点については、

- ★社会的関心が大きく、学会内でもいろんな分野で議論されている
- ★「構造設計の安全係数」の議論を「土木の構造の、信頼性専門家の身内」
だけでする、ということ満足していいのいか？
- ★**防災**専門家とのすり合わせ→機会をつくるべきでは？
- ★学会内の多様な分野からの視点(水工学、地盤工学など)
- ★他分野の動向 (→本日は**建築**、**原子力**)
- ★**国際標準**の動向

これらのことを意識して、幅広い議論の場を設けることに意義がある

構造工学委員会・「設計基準体系における安全性照査ガイドライン
策定小委員会(2015.11～2018)」

これに先立ち

「設計基準体系における安全性照査ガイドライン
研究小委員会(2011～2014)」

「構造」の信頼性に関心の深いメンバーが集まって、

- ・「信頼性評価の考え方を定量的に取り入れて要求性能を照査する」方法論
を記述したガイドラインの作成を目指す
- ・「基準作成者編と設計者編」「部分係数による照査／確率による照査」
・付録として

「**目標性能(安全性)水準の設定方法**」「**確率変数の分布形と統計量**
(データーソースの紹介)」「**信頼性解析・部分係数の計算方法**」

→既存の学会「標準示方書類」との関係性の問題(安全係数の決め方とか)
新しい方向性:「示方書間の対話」

「学会ベースの『土木建築』共通基準の議論

などと関わりを持っていくことも目標

ただし本日のテーマは、この報告書から少し離れた発展的な問題提起

というわけで、

本日の話題提供者

- ・秋山充良氏(早稲田大学)
当委員会代表「目標性能水準の設定」パートのまとめ責任者
土木の構造・信頼性側から
- ・菊池喜昭氏(東京理科大学)
土木の地盤分野、国際標準などにも詳しい
- ・有川太郎氏(中央大学)
土木の水工学分野、津波研究のフロントランナー、要求性能水準の
国際比較などに問題意識。
- ・高田毅士氏(東京大学)
建築分野における信頼性の第一人者、
国際標準、防災的視点などあらゆる分野に精通。
- ・嵯沢勝三氏(電力中央研究所／東京都市大学)
原子力分野における信頼性の第一人者。

この他、堤防を中心とした地盤分野の方、河川工学を中心とした水工学
分野の方などにもお声をかけ、「多様な要求性能と目標性能(安全性)水準」を
各分野それぞれどう考えておられるのかの、比較論から入ってみよう
と考えております。

「How safe is enough safe?」 を考える

早稲田大学 秋山充良

信頼性設計のメリット

限界状態設計法

(部分係数を用いた橋脚の耐震設計式を例にして)

せん断照査: $\gamma_{shear} \frac{V_{act}}{V_{cap}} \leq 1.0$ 作用せん断力とせん断耐力の比較

応答変位照査: $\gamma_{def} \frac{\delta_p}{\delta_r} \leq 1.0$ 応答変位と変形性能の比較

残留変位照査: $\gamma_{res} \frac{\delta_{pr}}{\delta_{rr}} \leq 1.0$ 残留変位と許容残留変位の比較

Reliability-Based Design (信頼性設計)

ISO: International Standard ISO/DIN 2394, General Principles on Reliability for Structures, 1998.

ある期間において破壊可能性 P_f が規定された値 P_f を超過しないように構造物を設計すること. 数式で表現すると次式.

$$P_f < [P_f]$$

目標破壊確率

構造設計学の拡がり

LIFE-CYCLE-BASED DESIGN, SUSTAINABILITY

システム・ネットワーク

RESILIENCE-BASED DESIGN

構造

RISK-BASED DESIGN

長期性能の考慮
復旧シナリオの事前作成

部材

PERFORMANCE-BASED DESIGN

RELIABILITY-BASED DESIGN

限界状態設計法

限界状態を超えた後の影響度を最小化

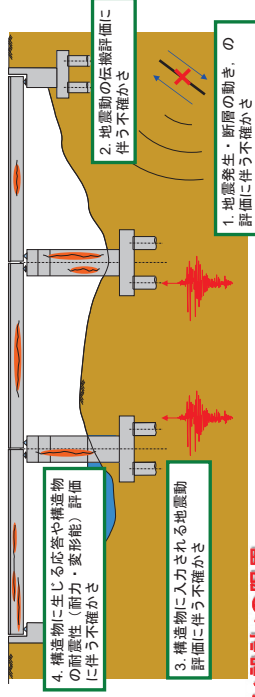
許容応力度設計法

想定した限界状態を生起させない

Waseda University

信頼性設計の限界

耐震安全性評価に係わる「不確かさ」



「填さない設計」の限界

部分係数が確定的、あるいは確率・統計的に決定されていても、結局のところ、設計者は部材や構造物の強度(抵抗)が作用や荷重により生じる応答を上回ることを確認するのみである。

今後生じる地震や津波を確かに予測できない現状では、仮にこの照査式を満足す
ることを確認したとしても、構造物が有している安全性を100%保証することはできない。
目標破壊確率を0.01にはできない。

結局のところ、**信頼性設計法の枠組みでは、想定した状態を超える事象が生じ
たときに引き起こされるシナリオを描くことが難しい。**

Waseda University

支配的ハザードの読み間違え



耐震補強済みの橋梁の津波や地すべりによる流出



ライフサイクルの視点



安全性の管理からリスクの制御へ

ASCE内の委員会
Technical Administrative
Committee on Structural
Safety and Reliability

http://www.asce.org/ASCE/Committee/ASCE-2862220101

RELIABILITY-BASED DESIGN

- 構造物が壊れると何が起きるのか？ 壊れることで引き起される影響度(被害額・死者数等)の事前評価とリスク算定
- 部材→構造→システム・ネットワーク
- 壊れた後、どのぐらいの期間でイベント前の状態に戻るのか？ その期間を短くできる技術・方策は？
- 新設構造の設計から既存構造の性能照査へ
- ライフサイクルにわたる評価の必要性

RISK LIFE-CYCLE RESILIENCE ASSESSMENT

- RISK-BASED DESIGN AND ASSESSMENT
- RESILIENCE-BASED DESIGN
- LIFE-CYCLE-BASED DESIGN AND ASSESSMENT

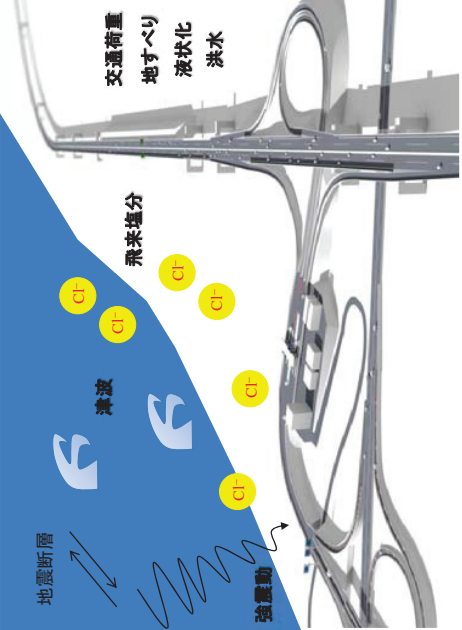


まとめ Go beyond all borders

How safe is enough safe?
を考える際に必要な視点:

- 構造物単体
⇒ ネットワーク
- 安全性・信頼性
⇒ リスク・レジリエンス
- シングルハザード
⇒ マルチハザード

壊さない設計
⇒ 壊れた後の影響度を最小化する設計



ライフサイクル信頼性の確保・リスクの制御の視点から
構造物を設計・管理



構造設計における 目標安全性水準の設定

~How safe is safe enough? ~

地盤分野(港湾を例として)

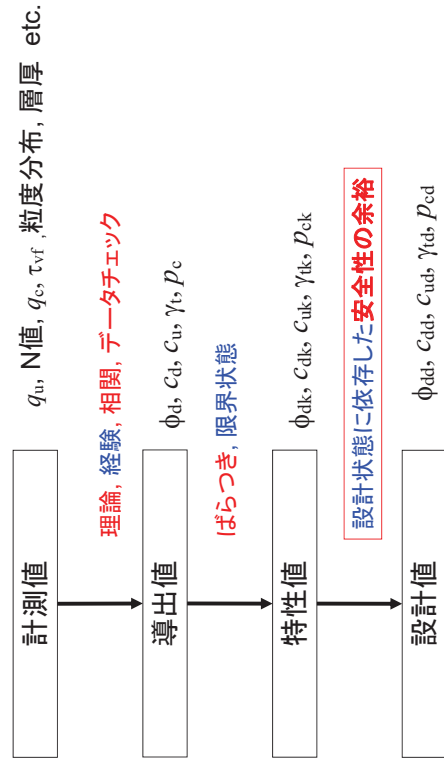
土木学会全国大会研究討論会(構造工学委員会)
2017.9.13 九州大学伊都キャンパス 1号館1402室

東京理科大学
菊池喜昭

設計を考えた時の地盤の特徴

- 自然地盤は天から与えられたものであり, 自ら選ぶことができない.
 - 自然地盤: 自然が作った地盤. 切土による斜面を含む.
 - 人工地盤: 人工によって作られた地盤. たとえば, 盛土, 埋立地, 裏込め地盤. 地盤改良した地盤はこちらの範疇.
- 地盤調査を十分な量行うことが困難.
- 地盤調査で調査できるものには限りがある.
 - 設計で本当に要求する特性を直接あるいは十分に調べることができないことが多い.

設計用地盤パラメータの設定の考え方(JGS 4001-2004)



パラメータの設定の考え方

- 計測値で間接的に求めた導出値を換算することもある.
 - サウンディング等では直接的に力学特性を求めるとはできない.
- 導出値の平均値を特性値とする(期待値)
 - 単純な平均値とせず, 統計的な平均値の推定誤差を考慮する.
 - データの取得方法の違い, 数量を考慮する.
- 設計値は導出値のバラツキ等を考慮して決める
 - 確率的取り扱いをする. ただし, パラメータの分布形状は十分にわかっていないことが多い.

データのばらつきや個数を考慮した特性値の決定方法(港湾基準)

平均値の95%信頼区間を考慮したOvesen(1995)の提案式をさらに簡略化した次式を用いて導出値から特性値を決定している。

$$a_k = b_1 \cdot b_2 \cdot a^* = \left(1 - \frac{COV}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{0.5}{n}\right) \cdot a^* \quad (a^* \text{が望ましいほうに作用するとき})$$

b_1 の修正項はばらつきの影響を表現するファクターであり、 b_2 はデータ数の影響を考慮するファクターである。

b_1 は変動係数の違いによって決める。

ただし、データの個数が10を超えた場合には、 b_2 は1とする。このように定義することによって、特性値が導出値の累積確率密度30%(あるいは70%)に相当するフラクタル値とほぼ一致するようになる。

港湾基準における(地盤)設計

- 港湾基準は2007年以来、永続状態、変動状態に対しては、信頼性設計を全面的に採用。
- 材料係数アプローチを導入
- レベル2信頼性設計法を用いて、コードキャリブレーションに基づいて部分係数を決定。一般の設計者はレベル1信頼設計法で設計。
- 構造形式、設計状態の違いにより大量の部分係数が設定された。
- この反省から、2018年に改訂される基準では、荷重抵抗係数法に変更する。

港湾基準における偶発状態への対応

- 二つの偶発状態
 - L2地震動と巨大津波
 - L2地震動に対しては、2007年の基準で、許容変位量を設定。これに対応するため、数値解析もしくは模型実験の導入を推奨している。(決定論的アプローチ)
 - 巨大津波に対しては、2011年以降に検討。「粘り強い化」で対応。構造物がどこまで持つのか、構造物がどれくらいの間隔耐えられるのか、が議論の的。
 - 偶発状態を確率的に議論できるだけの精度があるかどうかの問題?

論点について

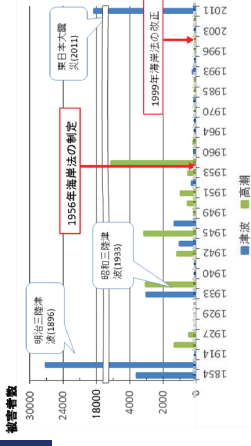
- 統計データを利用して確率論を用いた設計が行われているか?
 - 地盤分野、港湾分野ともYes
- 目標安全性水準は明示されているか?
 - 港湾分野ではYes。地盤分野は地盤それだけで目標安全性水準という議論は困難。
- 「目標安全性水準」は
 - a)大地震や大洪水などの偶発作用が発生したという条件の下での水準で定義されているか?
 - 港湾分野では、現状No(?)
 - b)それらの偶発作用の発生確率も考慮した水準(全確率)で定義されているか?
 - 偶発作用の発生確率の議論は地震動ではある程度できていると考えられるが、津波では?
- 今後の設計基準改定においては信頼性設計法に基づいて「目標安全性水準を明示する予定であるか?
 - 偶発作用については今後もしばらくは難しいと考えられる。

構造設計における目標安全性水準の設定 How safe is safe enough?

津波防護に関する考察

中央大学 有川太郎

沿岸の防護に関する変遷



- ▶ 1956年 海岸法
 - ▶ 防護(線の防護)
- ▶ 1999年 海岸法 (改正)
 - ▶ 防護、環境、利用(面的防護)
 - ▶ 地域計画と一体となった防護のあり方が課題
- ▶ 2011年6月 津波における2段階レベルの防護の考え方の提言(内閣府)
 - ▶ L1の津波高さの防潮堤
- ▶ 2011年12月 津波防災地域づくりに関する法律(施行)
 - ▶ 浸水想定と区画制限
- ▶ 2014年 海岸法 (改正)
 - ▶ 減災・予防保全
- ▶ 2015年 水防法 (改正)
 - ▶ 高潮、降雨に関するも最大クラスを想定し、避難と一体となった防護方針
 - ▶ 高潮については、室戸台風級

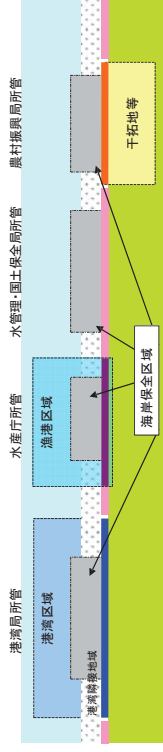
東日本大震災をうけて

- ▶ 中央防災会議(2011)では、東日本大震災を受けて、今後の津波対策に際し、二つのレベルの津波を想定すると提言し、「一つは、住民避難を柱とした総合的防災対策を構築する上で設定する津波である。」
- ▶ これは、「海岸保全施設等に過度に依存した防災対策には問題があったことが露呈されたため」で、「最大クラスの津波レベルを想定した津波対策を構築し、住民の生命を守ることを最優先として、どういう災害であっても行政機能、病院等の最低限必要十分な社会経済機能を維持することが必要」であるからである。そのうえで、「防護施設に対して、設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果があり強く発揮できるような構造物の技術開発を進め、整備していくことが必要である。」と提言されている。

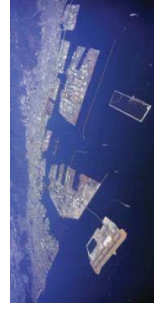
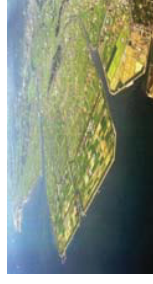
津波レベル	定義	防護目標	計画・設計
発生頻度の高い津波 (L1)	数十年～百数十年に1回の頻度で発生すると考えられる津波	<ul style="list-style-type: none"> 人命を守る 財産を守る 経済活動の継続 発災直後に必要な沿岸部の機能の継続 	堤内地の浸水を防止するよう計画・設計
最大クラスの津波 (L2)	津波防護レベルをはるかに上回り、構造物対策の適用限界を超過する津波	<ul style="list-style-type: none"> 人命を守る 経済的損失の軽減 大きな二次災害の防止 早期復旧 	堤内地の浸水を許すが、破壊・倒壊をしにくくし、被害が拡大しないよう計画・設計

海岸省庁の役割分担

参考資料)海岸保全施設の維持管理のあり方について
「国土交通省 水管理・国土保全局 海岸室」平成27年10月



※ 海岸保全区域以外は一般公共海岸区域



構造設計における目標安全性水準の設定

その1：建築分野 その2：構造設計基準の国際動向

東京大学大学院
工学系研究科建築学専攻
高田 毅士



発表概要

その1

1. 性能と性能水準
2. 性能設計のすすめ
3. 性能水準の三要素
4. まとめ

その2

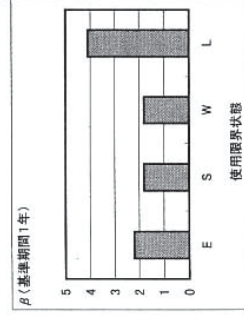
1. 性能水準の差別化例と考え方
2. ISO2394(2015)の提案
3. 目標性能水準設定の基本
4. LQIの考え方
5. まとめ



建築学会の限界状態設計規準, 総プロ

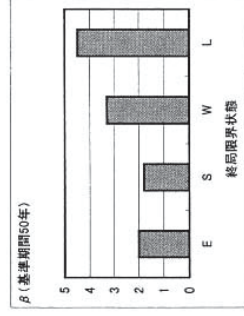
目標信頼性指標 β (構造部材断面の応力規範) (1998)

荷重組合せ 状態	終局限界状態		使用限界状態	
	50年	8年	1年	1年
D+L	2.5			
D+L+S	2.0			
D+L	2.0			
D+W	2.0			
D+L+E	1.5			
多雪地域				
D+L+S+W	2.0			
D+L+S+E	1.75			



使用限界状態の定義

- ・地震荷重：最大層間変形角 $<1/200$
- ・風荷重：最大層間変形角 $<1/120$
- ・積雪荷重：梁のたわみ $<1/800$
- ・積載荷重：床スラブのたわみ $<1/250$



終局限界状態の定義

- ・地震荷重：最大層間変形角 $<1/50$
- ・風荷重：崩壊メカニズム形成
- ・積雪荷重：崩壊メカニズム形成
- ・積載荷重：床スラブの鉄筋脆状

各限界状態における信頼性指標 β の比較(総プロ, 1998)



建物に要求される基本性能 (総プロ)

◆基本要性能は、1)安全性、2)使用性、3)修復性の三つ。

安全性：安全性は人命に関わるものであり、建築物の中や周辺の人間の人命を守るために建築物に要求される最も重要な性能である。「**人命の保護**」

使用性：使用性とは、建築物の使用目的、用途、機能に直接関わるものであり、この性能が満足されないと、建築物に期待されている機能や役割が十分果たせなくなる。(ex. 床のたわみ、壁や床の過大な振動、基礎の不同沈下等々)「**機能の確保および居住性の確保**」

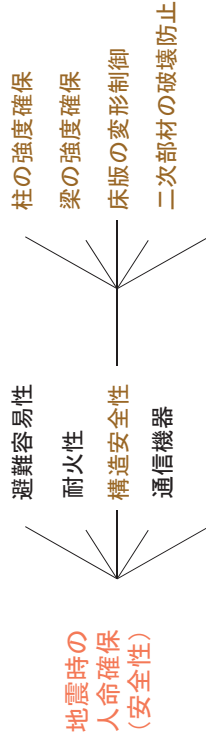
修復性：建物として修復が出来る状態に関する性能。「**財産の保全**」



性能設計のすすめ

1. 構造性能に関する説明性の向上
 - 一般建物の場合
建築主に設計建物あるいは既存建物の性能をわかりやすく示すこと
→ 設計者の建築主に対する説明責任
 - 公共施設の場合
国民に設計施設あるいは既存施設の性能をわかりやすく示すこと
→ 国や事業主の国民や住民に対する説明責任

2. 要求性能を満足させるための方法の多様化



性能水準の三要素

1. 対象とする性能の明確化
(安全性、修復性、使用性、他の性能)
2. 対象とする部位の明確化
(部材、部材の危険断面位置、架構、構造物全体、等)
3. 性能を測る期間
(基準期間、供用期間、耐用期間、等々)

期限付き建物の性能水準の決め方

建築物の分類 (期限付き建築物設計指針, 2013)

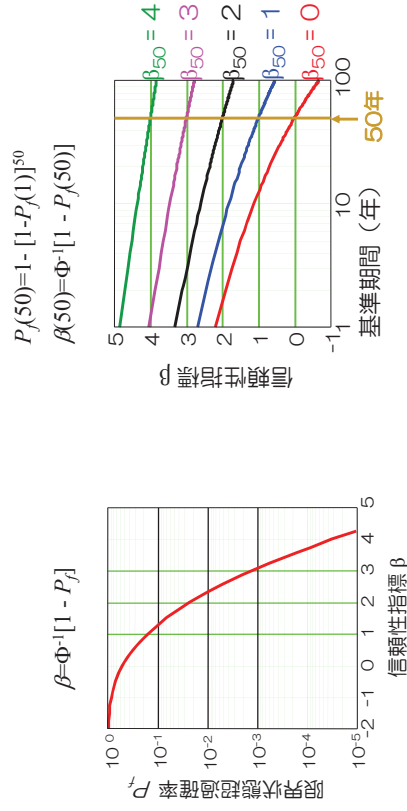
建造物の分類	定義
仮設建築物 (1年以内)	基準法第85条に定義され、短期間に限って使われる建築物
恒久建築物	仮設構造物以外の建築物で、使用期間が決められていない建築物
期限付き建築物 (1年以上)	仮設建築物と恒久建築物の間にある仕切りを取り払い、両者を統一する設計思想上の概念で、一定の使用期間及び使用条件を設定して使用する建築物

建築物の寿命や使用期間に関する社会ニーズ (指針より抜粋)

- (1) 借地や都市計画道路などの敷地条件に基づき短期間の土地利用を図る
- (2) 商業・娯楽施設など当座の短期的利用価値を高める
- (3) 使用期間に応じて荷重・外力や耐久性などに対する要求性能を軽減して建設費用を下げる (使用性は経済合理性より、安全性は不変)
- (4) 期限をチェックポイントとして積極的に維持管理を進め建築物の価値の低下を防ぐ
- (5) 新しい技術的チャレンジと安全確保を実現する

基準期間

限界状態設計指針では、
基準期間は、終局限界状態設計および使用限界状態設計では、それぞれ、50年および1年とする。



その1：まとめ



1. 目標値の無い、目標値の不明な構造設計はあり得ない
2. どのような性能を表現しようとしているのか？
要求性能の明確化、対象部位の明確化、要求性能水準の明示
3. 性能に基づく設計のすすめ
4. 性能水準の三要素（要求性能の種類、部位、対象期間）
5. 「期限付き建築物」の設計における性能水準設定の疑問

その2：性能水準の差別化例（Eurocode）

RC	結果クラス	解説	例
RC1	CC1	生命や経済の損失が小さく、社会や経済に与える影響が小さいか無視しうる程度	農業施設、温室
RC2	CC2	生命や経済の損失が中程度であり、社会や経済に与える影響が無視できない	住宅、事務所、結果の重大性が中程度の公共建築物
RC3	CC3	生命や経済の損失が小さく、社会や経済に与える影響が非常に大きい	競技場の観客席、結果の重大性が高い公共建築物(集客ホール等)

信頼性 RC	信頼性指標の下限值	
	基準期間1年	基準期間50年
RC1	4.2	3.3
RC2	4.7	3.8
RC3	5.2	4.3

限界状態	目標信頼性指標	
	基準期間1年	基準期間50年
終局	4.7	4.3
疲労	-	1.5-3.8*
使用性	2.9	1.5

*点検や修理のしやすさ、損傷に対する耐性による

性能水準の差別化例（ASCE7-10, 2010）

RIC	建築物、構造物の用途や収容能力
I	・損傷・破壊の際の人命へのリスクが小さな建築物およびその他の構造物
II	・リスクカテゴリーI, III, IV 以外の構造物
III	・その損傷・破壊が、人命に相当なリスクをもたらさしうる構造物 ・その損傷・破壊が相当な経済的影響を及ぼしたり、住民の日々の生活に大規模な混乱を引き起こしたりしうる、リスクカテゴリーVIに含まれない構造物 ・漏れ出すと市民に対し脅威となる有害な、あるいは爆発の危険性のある物質を監督官庁が定める基準よりも多量に貯蔵するものの、リスクカテゴリーIVに含まれない構造物
IV	・重要な施設と指定された構造物 ・その損傷・破壊が、地域社会に相当な危険をもたらさしうる構造物 ・漏れ出すと市民に対し脅威となる非常に有害な物質を監督官庁が定める基準よりも相当多量に貯蔵する構造物 ・リスクカテゴリーIVに区分される他の構造物の機能を維持するために必要な構造物

	RIC			
	I	II	III	IV
前兆があり、かつ損傷が広範囲に至らない損傷・破壊	2.5	3.0	3.25	3.5
前兆がないか、あるいは、損傷が広範囲に進行しうる損傷・破壊	3.0	3.5	3.75	4.0
前兆がなく、かつ、損傷の広範囲に進行しうる損傷・破壊	3.5	4.0	4.25	4.5

ISO2394 (2015) の性能水準差別化の提案

4.2.1 構造物に対する基本的要求事項

特に、構造物は適切な水準のリスクと信頼性を有しながら、以下の性能要求を満たさなければならぬ。

- 1) 供用期間を通して、考えられる全ての作用下において適切に機能すること、つまり、使用性と機能性を確保すること（**使用性の要求**）
- 2) 建設中、想定される使用中および撤去中において発生する、極大あるいは頻繁に繰り返す作用と永続的な作用、環境暴露に耐えること、つまり、被害と損傷・破壊に関する安全性と信頼性を確保すること（**安全性の要求**）
- 3) 自然災害、事故、人的過誤のような異常で予期できない出来事によって深刻な損傷や連鎖的破壊を被ることがないようなロバスト性があること、つまり、十分なロバスト性を確保すること（**ロバスト性の要求**）

リスク低減に要する費用	信頼性指標の下限值 (基準期間1年)
大	3.1
中	3.7
小	4.2

LQIと人命に関する規範

追加人命救助費用の原理 (Marginal life saving cost principle) を適用して最低限の安全性を確保

- もう一人の命を救うのに必要なコストが、**社会の支払意思額 (SWTP)** を下回っていれば改善すべき
- **一國**の生活の質を測る指標 (LQI: Life Quality Index) により受任できる安全性の水準を決定 (LQI許容規準)

$$L(g, e) = g^q e$$

g : GDP, e : 平均寿命,
 q : 余暇時間/労働時間の関数

$$dL = \frac{\partial L}{\partial e} de + \frac{\partial L}{\partial g} dg > 0$$



この式を満たせば、このプロジェクトは**合理性がある**と判断する。

$$WTP = dg = -\frac{g}{q} \frac{de}{e}$$



WTP (Willingness-to-pay) : 社会が支払いを行うことが妥当とする額



LQIに基づく最適化

リスク低減策の投資を、

- 1) 財政的な側面 2) 人命救助効果の側面 の両方から判断する

- 1) 財政的な側面 から最適化を行う

$$\max \left\{ E \int_0^T [b_{p,s}(t) - c_{p,s}(t)] \cdot e^{-\gamma p,s t} dt \right\}$$

P (private) : 個人の意思決定者(会社など)

S (social) : 公共の意思決定者(政府など)

- 2) 人命救助効果の側面 から最適化を行う

$$L(g, e) = g^q e(1 - w) \quad LQIを(g,GDP)とe(平均寿命)の関数とみなす$$

$$\frac{dg}{g} + \frac{1}{q} \frac{de}{e} \geq 0 \quad LQIの变化分が正でなくてはならない$$

$$dc = -dg \cdot N_p \geq SWTP = \frac{g}{q} \frac{de}{e} \cdot N_p \approx -\frac{g}{q} c_x dt m$$

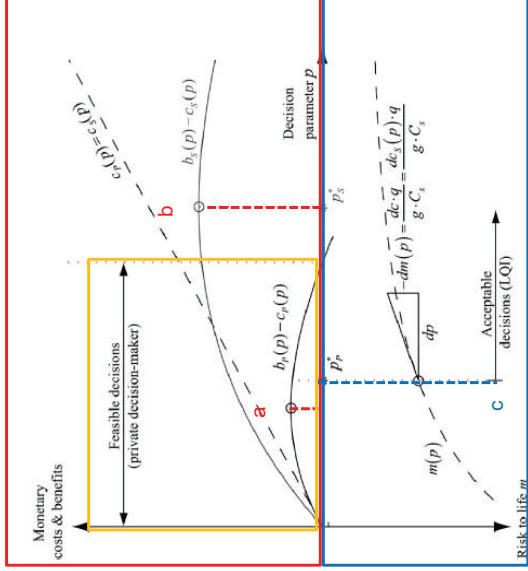
国民のGDPの減少分 \uparrow 死者数の増加分をお金に変換した値
→ 社会基準(どれくらい死者数までなら許容できるか)

限界値が**限界人命救助費用(dc)**
(marginal life saving cost)



LQIに基づく評価規範

- 1) 経済的最適化
 - a) $\max(b_p(t) - c_p(t))$
 - b) $\max(b_s(t) - c_s(t))$
- 2) 人命救助効果
 - a) 青線が最適



Case1)個人の意思決定
利益の出る黄色の範囲内で考える。aは
最も利益は出るが、受容可能な範囲出な
いのでとす

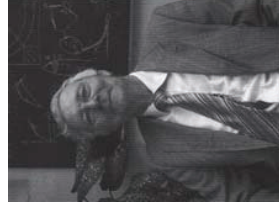
Case2)公共の意思決定
最も利益が出るのはbだが、cが人命救助
効果の最適値。cまたはb

Fig. 1. The LQI criterion as a boundary condition for optimization.



その2: まとめ

1. 性能水準の差別化は当たり前
2. どのような考え方で差別化するか?
 - 被害程度 (社会、人命への影響程度) に応じて
 - 破壊の前兆の有無
 - 損傷の進行性の有無
3. ISO2394(2015)の考え方
 - リスク低減対策に要する費用の程度も考慮
 - 使用性については、経済性最適化による
 - 安全性については、追加人命救助費用の原理を適用
 - LQI許容規範を参考



平成29年度土木学会全国大会研究討論会
 構造工学会委員会：構造設計における目標安全水準の設定
 How safe is safe enough?

原子力分野の現状

平成29年9月13日13時～15時
 九州大学伊都キャンパス1号館1402室

蛭沢 勝三
 電力中央研究所/東京都市大学

(1) 基準地震動Ssの策定（設計用地震動策定）

決定論的手法

- 震源の設定方法
 - ◇ 震源を特定する地震の設定
 - ◇ 震源を特定しにくい地震の設定
- 地震動の設定方法
 - ◇ 震源を特定して策定する地震動
 - ・ 応答スペクトル手法
 - ・ 断層モデル手法
 - ◇ 震源を特定せず策定する地震動
 - ・ 同上

確率論的手法

地震ハザード曲線

解放基準での最大加速度 (Gal)

何年に一度か？

水平動 Ss

上下動 Ss

超過頻度を参照

I. 耐震設計審査指針における残余のリスク

耐震設計審査指針の系譜

観点	旧指針(1981年)	改定指針(2006年)	改定指針(2013年)
(1) 基準地震動(設計用地震動)	<ul style="list-style-type: none"> ・2つの地震動 ・S1波:弾性領域(水平動) ・S2波:機能確認(水平動) ・S2を超える可能性なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・地震動の一本化 ・Ss波:機能確認(水平・上下) ・不確実さの考慮 ・Ssを超える可能性の認知 ・地震ハザードの超過頻度の参照 	同左
(2) 構造設計	<ul style="list-style-type: none"> ・耐震重要度分類 4分類:As,A,B,Cクラス ・許容応力体系 	<ul style="list-style-type: none"> ・耐震重要度分類 3分類:S(As,A),B,Cクラス ・性能規定体系 	同左
(3) 地震随伴現象		<ul style="list-style-type: none"> ・周辺斜面の考慮 ・津波の考慮 	強化
(4) リスク		<ul style="list-style-type: none"> ・Ssを超えた場合の残余のリスクの認知 	同左

(2) 耐震重要度分類

Asクラス

Aクラス

Bクラス

Cクラス

閉じ込める

止める (制御棒)

冷やす

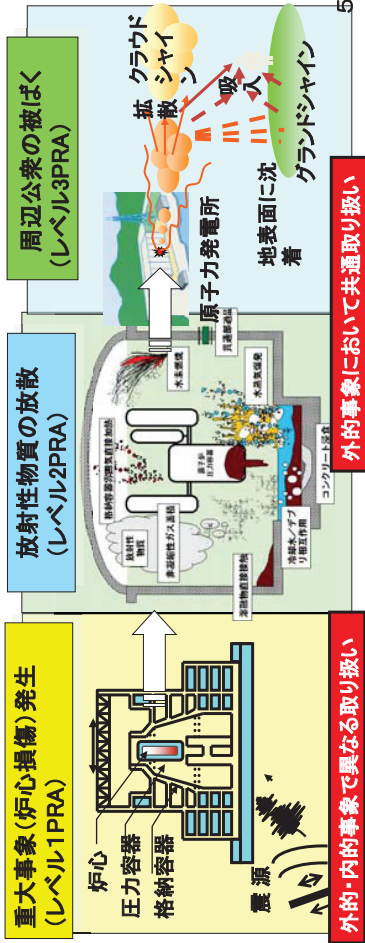
【タービン建屋】

【原子炉建屋】

(4)「残余のリスク」の定義 (1/3)

■ 旧原子力安全委員会 耐震設計審査指針 (2006年9月改訂): 「残余のリスク」明記

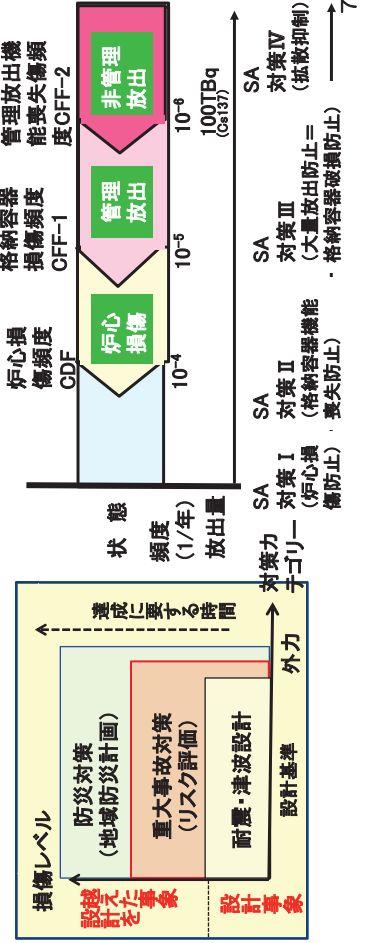
- (1) 基準地震動を上回る地震動の影響が施設に及ぼすことによる施設の重大損傷事象が発生すること ⇒ レベル1 PRA対応
- (2) 大量の放射性物質が放散する事象が発生すること ⇒ レベル2 PRA対応
- (3) 周辺公衆の放射線被ばくによる災害を及ぼすこと ⇒ レベル3 PRA対応



5

原子力規制委員会新規制基準及び地域防災計画の概要 (3/3)

- 原子力規制委員会: 下記規制基準・対策指針策定
 - ・新規制基準 (地震・津波等) (2013年6月)
 - ・同基準 (重大事故対策) (同上)
 - ・原子力災害対策指針 (2012年10月)
 - ・安全目標に関し議論された事項 (2013年4月)



7

「残余のリスク」の評価手法・判断指標 (2/3)

評価手法

「残余のリスク」の最も現実的な評価手法として、確率的リスク評価 (PRA: Probabilistic Risk Assessment) 手法が提案されている。

- ・施設の重大損傷事象評価 : レベル1PRA手法 (20年3月制定、21年3月発行)
- ・放射性物質の放散事象評価 : レベル2PRA手法 (同上)
- ・周辺公衆の放射線被ばく評価 : レベル3PRA手法 (同上)

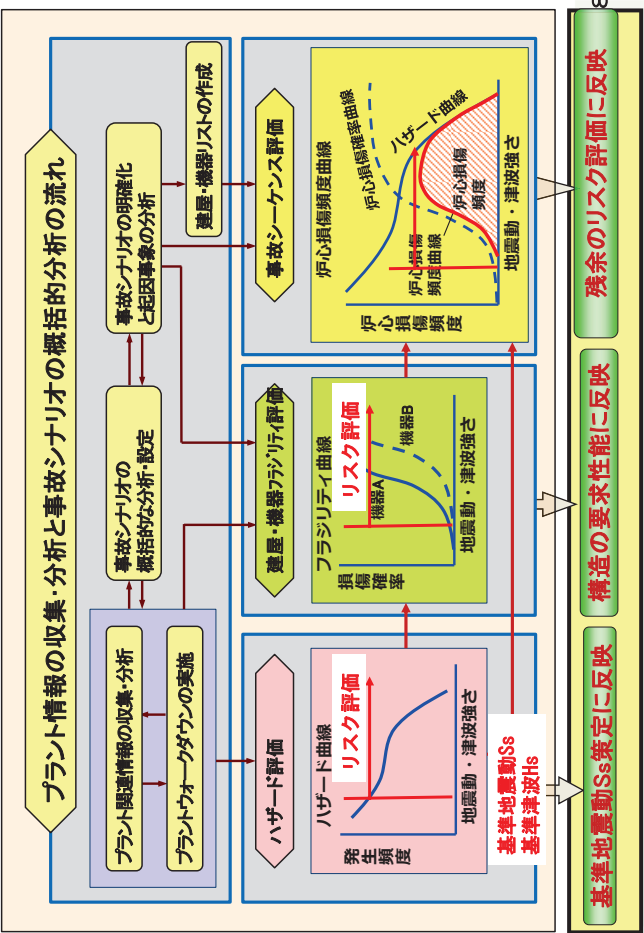
原子力学会地震PRA実施基準の策定 (2007年)
原子力学会津波PRA実施基準の策定 (2013年)

判断指標 (旧原子力安全委員会2006年)

- 安全目標 (案): 敷地境界付近の公衆の個人平均急性死亡リスクと敷地周辺の公衆の個人平均がん死亡リスクが 10^{-6} /年・サイト程度以下
- 性能目標: 炉心損傷頻度 (10^{-4} /炉・年)、且つ、格納容器機能損傷頻度 (10^{-5} /炉・年) 以下

6

II. 地震・津波PRA手順



- 基準地震動Ss策定に反映
- 構造の要求性能に反映
- 残余のリスク評価に反映

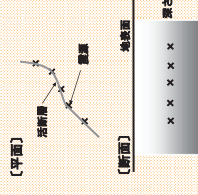
8

(1) 地震ハザード評価及び不確実さの取り扱い

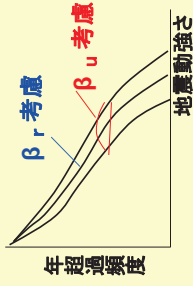
■ 地震ハザード評価手順

- 震源モデル設定：特定震源及び特定せずの震源に係る不確実さを考慮
- 地震動伝播モデル設定：断層モデル及び応答スペクトル距離式を用いて地震動伝播に係る不確実さを考慮
- 震源モデル及び地震動伝播モデルに係る不確実さの取り扱い
- ◇ 物理現象固有のランダム性・偶発性に起因する不確実性 (β_r)
- ◇ 知識・認識不足に起因する不確実性 (β_u)

ランダム性起因 要因の例



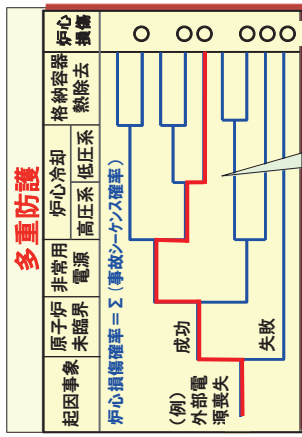
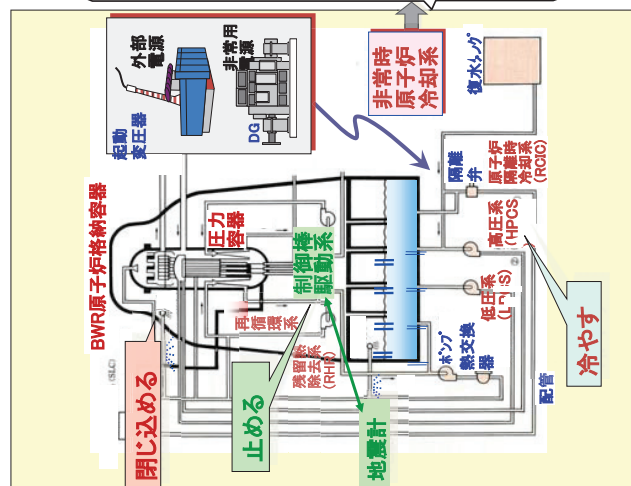
知識・認識不足起因 要因の例



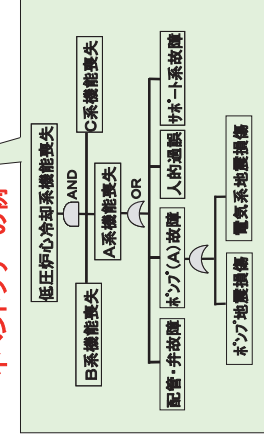
同じ航空写真による活断層長さの認識:

・専門家A: 35km ・専門家B: 50km ・専門家C: 70km

(3) 事故シークェンス評価



イベントツリーの例

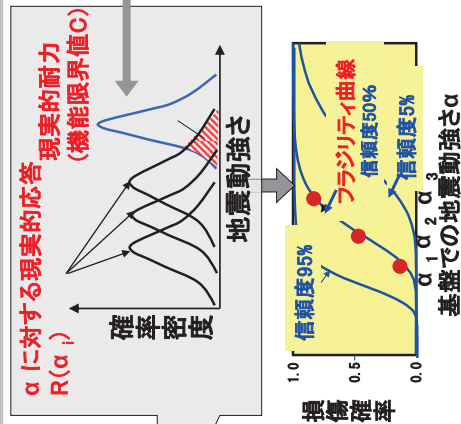
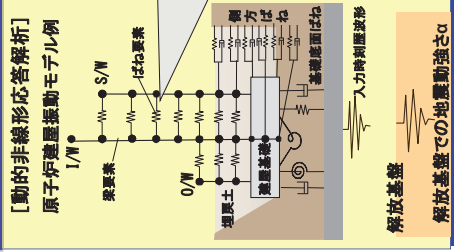


フォールトツリーの例

(2) フラジリティ評価

■ フラジリティ評価手順

- ① 構造物・機器の機能喪失部位・モードの同定
- ② 同部位での現実的耐力 (機能喪失限界) ・現実的応答の評価 (対数正規分布仮定)
- ③ 現実的耐力は振動台試験等で求める
- ④ 現実的応答と耐力を比較し、条件付損傷確率/フラジリティ曲線の評価



機能喪失限界
耐力評価



横置きポンプ試験

制御棒設備の試験