

鉄道の耐震設計標準の改訂と今後の課題 危機耐性の導入と耐震設計のバランス

(公財)鉄道総合技術研究所
室野 剛隆



Railway Technical Research Institute

本日の内容

- 鉄道構造物の耐震設計標準の改訂
- 2011年東北地方太平洋沖地震をどう考えたか
 - ・ どう対処するか？(危機耐性の導入)
 - ・ 利用者との合意形成
- 耐震化・耐震補強の難しさ



Railway Technical Research Institute

本日の内容

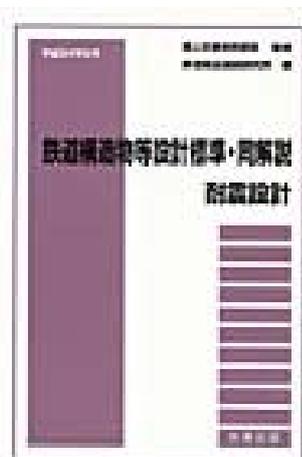
- 鉄道構造物の耐震設計標準の改訂
- 2011年東北地方太平洋沖地震をどう考えたか
 - ・ どう対処するか？（危機耐性の導入）
 - ・ 利用者との合意形成
- 耐震化・耐震補強の難しさ



Railway Technical Research Institute

鉄道構造物の新しい耐震設計基準

■ 鉄道構造等設計標準「耐震設計」が改訂。平成24年7月に国土交通省より通達。9月に出版



- 平成17年度より「耐震設計標準に関する委員会」において改訂に関する審議
委員長 佐藤忠信（神戸学院大学教授）
幹事長 澤田純男（京都大学防災研究所教授）
- 平成23年3月末の時点では成案（通達準備中）
- H23.3.11に東北地方太平洋沖地震が発生
 - 従来の想定を超える巨大地震（Mw9.0）
 - 「鉄道構造物耐震基準検討委員会」を発足させ、この地震に対する設計標準の適用性について検証



Railway Technical Research Institute

改訂経緯 (1)

■国際基準への配慮

- (1) **国際標準化機構(ISO)**や**欧州規格委員会CEN**(European Committee For Standardization)を中心とする国際規格の制定の動きが急速に進みつつある
 - ・ISO2394: General principles on reliability for structures (1998)
 - ・ISO23469 Bases for design of structures -- Seismic actions for designing geotechnical works (2005)
- (2) **世界貿易機関(WTO)**における「政府調達協定」及び「貿易の技術的障害に関する協定」(**TBT協定**)により、加盟国の国内規格の基礎として国際規格を遵守することが義務



改訂経緯 (2)

■性能規定化への流れ

鉄道に関する技術上の基準を定める省令(平成13年:国土交通省第151号)

第1条 この省令は、鉄道の輸送の用に供する施設・・・について、**必要な技術上の基準を定めることにより、安全な輸送及び安定的な輸送の確保を図り、もって公共の福祉の増進に資することを目的とする。**

第24条 **土工、橋りょう、トンネルその他の構造物は、予想される荷重に耐えるものであって、かつ、列車荷重、衝撃等に起因した構造物の変位によって車両の安全な走行に支障を及ぼすおそれのないものでなければならない。**



改訂経緯 (3)

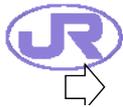
■地震観測網の整備

兵庫県南部地震(1995)以降、急速に地震観測網が整備された(K-NET, KiK-net)

多数の強震動が記録→地震動の予測技術に貢献

■地震工学分野の研究の進展

- 地震による各種データの蓄積
- 実験技術の向上による現象解明の進展
- シミュレーション技術の飛躍的向上
 - 地震動評価技術
 - 構造物の挙動評価技術



Railway Technical Research Institute

改訂のポイント

- (1) 性能照査型設計への移行
 - 性能設計／国際標準との整合性
- (2) 設計地震動の見直し
- (3) 応答値算定法の高度化
 - 動的相互作用の評価(応答変位法の拡張)
 - 部材の非線形モデル化
 - 非線形応答スペクトル法の合理化
- (4) 電柱等の付帯施設の応答値も規定
- (5) 新しい性能照査方法への取組み
- (6) 地震随件事象や危機耐性への配慮



Railway Technical Research Institute

改訂のポイント

- (1) 性能照査型設計への移行
 - 性能設計／国際標準との整合性
- (2) 設計地震動の見直し
- (3) 応答値算定法の高度化
 - 動的相互作用の評価(応答変位法の拡張)
 - 部材の非線形モデル化
 - 非線形応答スペクトル法の合理化
- (4) 電柱等の付帯施設の応答値も規定
- (5) 新しい性能照査方法への取組み
- (6) 地震随件事象や危機耐性への配慮



耐震設計の基本

耐震設計

性能照査

● 想定する地震動および構造物の重要度に応じて、必要な性能を定めて照査するものとする。

耐震構造計画

● 構造物は、建設地点の地形、地盤条件および地震環境等に適した構造を計画するものとする

● 地震随件事象（津波、地表断層変位etc）に関しては未解明な部分が多いので、照査する体系とせず、耐震構造計画で配慮する



構造物の要求性能と性能照査の基本

構造物の性能照査においては、使用目的に応じた要求性能を設定し、適切な照査指標を用いて、要求性能を満足することを照査するものとする。

地震時における要求性能は、安全性について設定し、「2.4 重要度の設定」に示す重要度の高い構造物については、復旧性についても設定するものとする。



構造物の要求性能

安全性

構造物の構造体としての安全性

- L2地震動に対して、全体系が破壊しないための性能

構造物の機能上の安全性

- 脱線に至る可能性をできるだけ低減するための性能
- 少なくともL1地震動に対して構造物の変位を走行安全上定まる一定範囲内に留める

復旧性

構造物周辺的环境状況を考慮し、想定される地震動に対して、構造物の修復の難易度から定まる損傷等を一定の範囲内に留めることにより、短期間で機能回復できる状態に保つための性能とする。



性能照査型設計法をめざして

構造物の目的とそのために必要とされる性能を規定し、規定された性能を構造物の供用期間中確保することにより、構造物の目的を実現させる設計法

自由度の高い設計法: 設計された構造物が保有すべきであると要求された性能さえ満足していれば、どのような構造形式や構造材料、設計手法、工法を用いても良い



- 新材料/新工法の開発を促すものである
- 性能水準を満たすことが重要であり、使用材料、解析手法などに拘束されない



- ある1つの手法を前提とした記述を避ける
 - ✓ 設計地震動(参照地震動)と地震作用
 - ✓ 応答変位法の適用拡張 etc

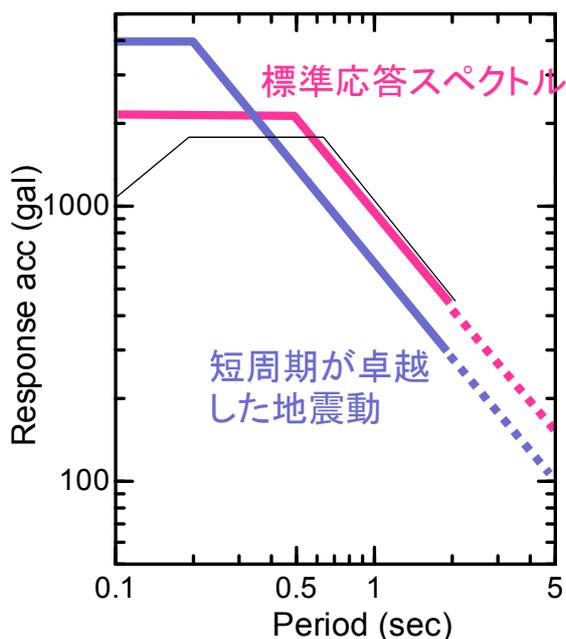
設計地震動

■ **L1地震動**: 構造物の建設地点で設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動

■ **L2地震動**: 構造物の建設地点で考えられる想定される最大級の地震動

- 陸地近傍で発生する大規模な海溝型地震
- 内陸活断層型地震
 - サイト依存のL2地震動
 - 簡易な手法により算定するL2地震動(適用条件あり)

標準設計地震動



- 耐震設計上の基盤面で定義
- 短周期側の地震動を敢えて下げることはしない
- ただし、入力損失効果を別途見込む
- 地震基盤浅い地域に0.3秒よりも短周期の構造物を設計する際の「短周期卓越タイプ」の設計地震動を追加



応答値算定方法

変更事例（応答変位法）

平成11年標準

- 1) 表層地盤の設計固有周期 T_g が0.5秒以上の場合（G4～G7地盤）
- 2) 表層地盤のN値および層厚が解説表6.4.1の条件に該当する場合

粘性土		砂質土	
N値	層厚	N値	層厚
N=0	2m以上	N≤5	5m以上
N≤2	5m以上	N<10	10m以上
N<4	10m以上		

改訂標準

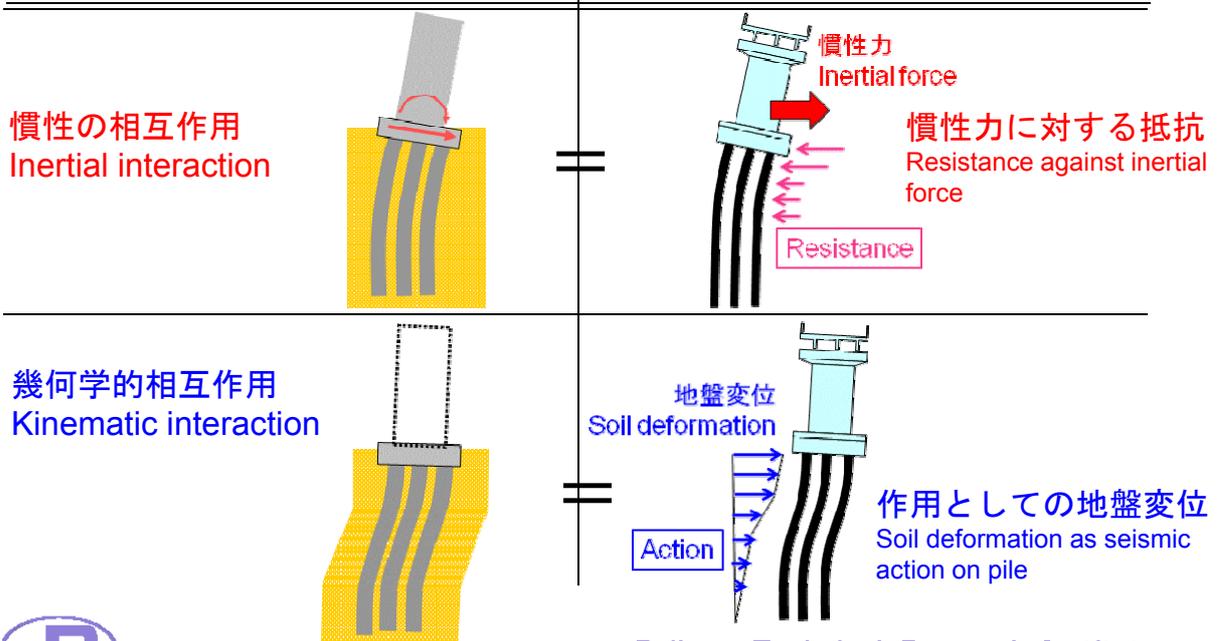
G0～G2地盤を除く地盤に建設される深い基礎においては、地盤の硬軟によらず地盤変位の影響を考慮する



地盤の役割

動的相互作用の観点

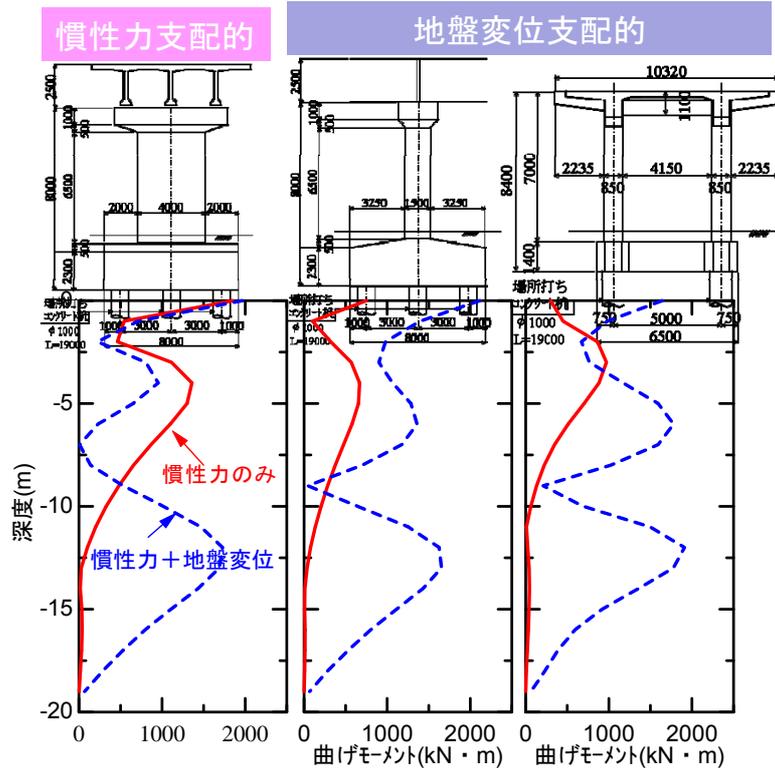
設計的な観点



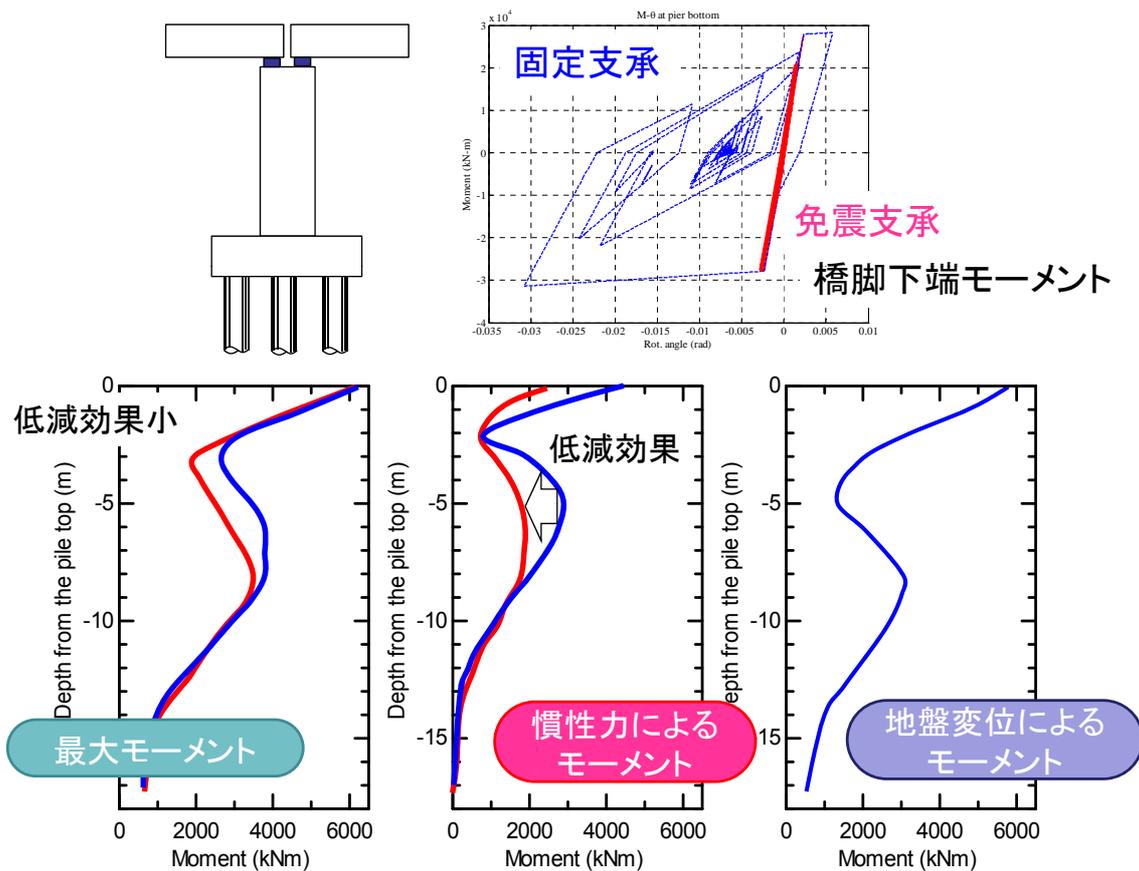
Railway Technical Research Institute

壁式橋脚 (C/L) ・ 高架橋の事例

大きい死荷重 小さい死荷重
 高い降伏震度 低い降伏震度



免震橋梁の場合の事例



変更の背景

■新形式構造への対応

- 今後新しい構造形式が開発され、益々慣性力が低減される可能性を考えると、地盤変位の考慮が必須
- 例えば、免震など上部から伝達される慣性力が小さい構造物では、むしろ地盤変位が杭基礎の決定要素

性能設計を意識した改訂！

これまでの“一般的な条件”に捉われないことが重要

■G3地盤における基礎の被害事例

- 工事中の構造物で、杭基礎のみが構築された状態の杭が損傷(G3地盤)

■設計の連続性

- G3地盤とG4地盤の設計の連続性
- 液状化地盤との連続性



耐震構造計画

●建設地点の地震動および地震に伴い生ずる事象が構造物に与える影響を総合的に考慮して構造物の位置、形式等を定める

- 1) 周辺環境、地形等にマッチした構造・・・従来通り
 - 2) 地震発生後の構造物の復旧性を考慮
 - ① 損傷箇所を点検や修復工事が実施し易い箇所に
 - ② 機能回復が容易な構造形式
 -
 - ① 構造物への進入路、作業ヤードの確保
 - ② 高架橋下などの利用状況
 - 3) 地震随件事象
 - 4) 危機耐性
- } 新規

●列車走行安全性に有利な構造物を計画する



地震随件事象に対する構造計画

地震随件事象が構造物に与える影響に関しては現時点では未解明な部分も多い

- 国や地域の防災計画(津波)、断層調査結果(断層変位)を参考 → その影響を大きく受けないように路線計画
- やむを得ず、津波の影響を受ける場合 → 津波の影響を受け難い構造形式
- やむを得ず活断層と交差する場合
 - ①土構造物等の中実な構造
 - ②橋梁の場合は、断層方向と直交、落橋防止対策
 - ④山岳トンネルの場合は、断層方向と直交、断層の前後区間ではインバート設置、覆工(短繊維混入や鉄筋コンクリート)



危機耐性

安全性と復旧性(重要構造物)以外に・・・

↓ ●東北地方太平洋沖地震で学んだ事

Mw9.0(4連動地震)→想定を上回る地震の発生

L2地震動を越える地震動の発生の可能性は排除できない

↓ 鉄道の高い公共性／生産活動への役割

想定された以上の地震が発生→構造物またはシステムとして、破滅的な状況に陥らないように設計する必要性

↳ 危機耐性

- 直接的に定義し照査する体系は未整備
- 配慮事項として、「耐震構造計画」で対応



Railway Technical Research Institute

危機耐性に対する構造計画

■構造物全体系として脆性的な破壊形態となるのを避けること(「8.3 構造物の破壊形態を確認するための解析」)

■一部の部材が破壊の限界状態に達しても構造物全体系の破壊崩壊が生じないような構造

- 冗長性(リダンダンシー)
- 頑健性(構造ロバスト性)

■構造物への進入路、作業ヤードの確保

- ・被害の波及を防止
- ・復旧資材の搬入を容易に
- ・鋼材等の資材の仮置スペース、重機の作業



Railway Technical Research Institute

本日の内容

- 鉄道構造物の耐震設計標準の改訂
- 2011年東北地方太平洋沖地震をどう考えたか
 - ・ どう対処するか？（危機耐性の導入）
 - ・ 利用者との合意形成
- 耐震化・耐震補強の難しさ



Railway Technical Research Institute

東北地方太平洋沖地震を経験して

設計で想定する規模を大きく上回る地震の発生

- Mw9.0という規模の地震
- 非常に大きく長い揺れ
- 短周期領域で設計応答スペクトルを大きく超過
- 震源から遠く離れた地点での液状化
- 広域・他所の電車線柱の被害
- 大規模な津波

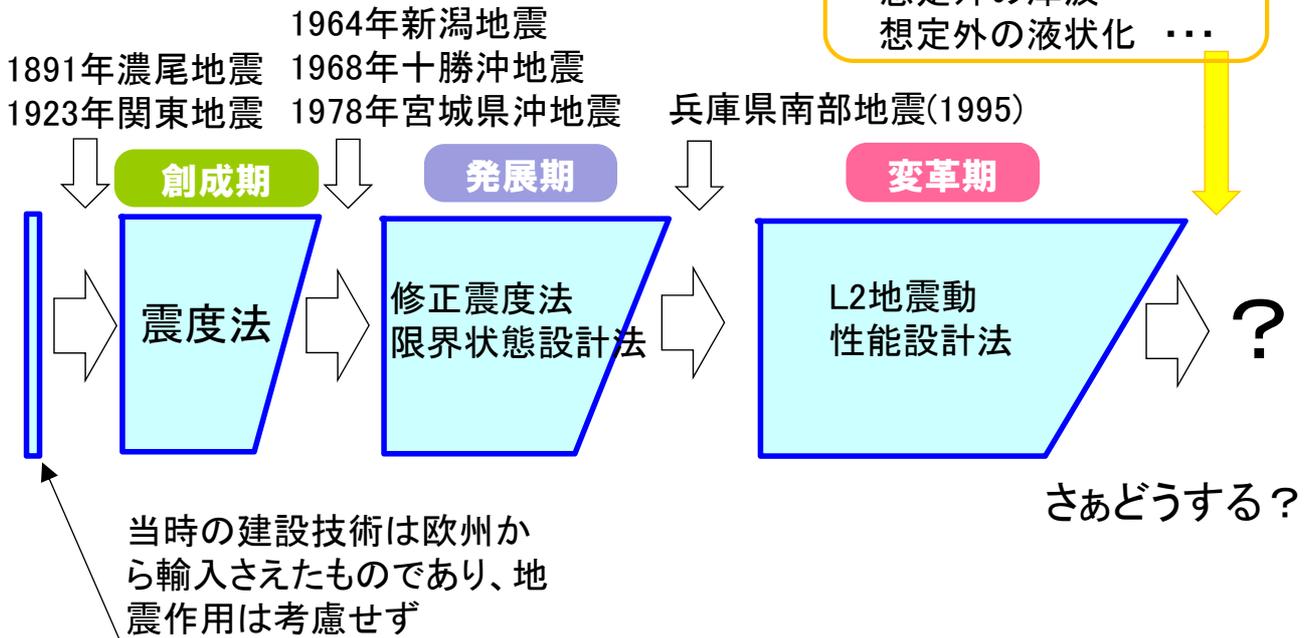


- 経済性を度外視して、地震動を現在よりも数倍も大きくして崩壊しない構造物を設計？
- では、具体的には何倍にするの？ 決めたとたんに思考停止？
- 現在の我国の経済情勢の中では受け入れ難い・・・

これまでの耐震設計の発展の変遷

2011年東北地方太平洋沖地震

想定外の地震(M9)
想定外の津波
想定外の液状化 ...

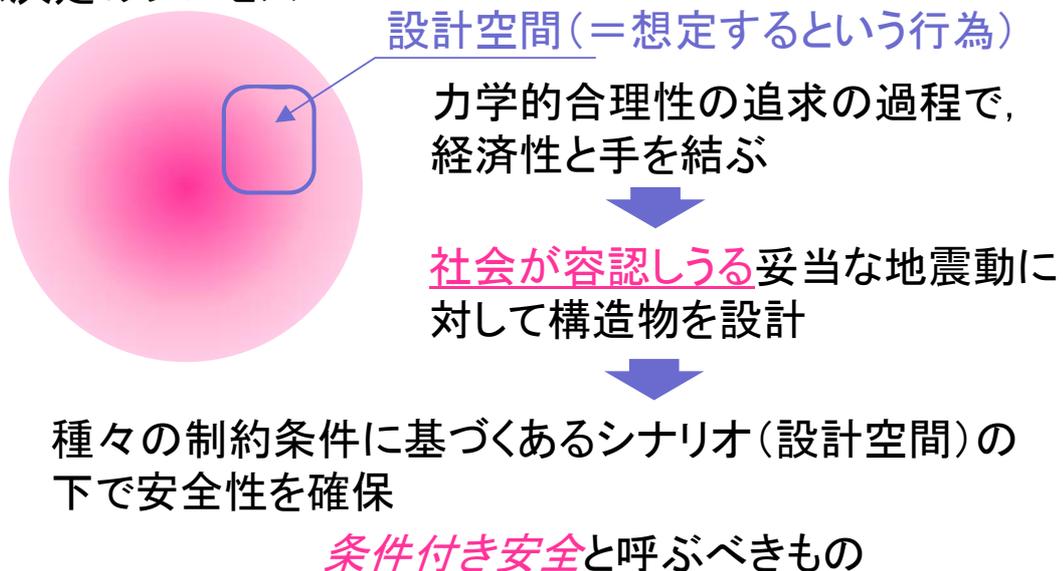


Railway Technical Research Institute

耐震設計とは

・・・不確定性の中での意思決定

- 地震動や地盤など多くの不確定を有する現象が相手
- 耐震設計という行為は、大きな不確定性の中での意思決定のプロセス



不確定性の中での意思決定 ヒント1

Nassim Nicholas Taleb 著 『ブラック・スワン—不確実性とリスクの本質』にヒントを見出すことができる

- とても稀な事象の確率は計算できない。でも、そういう事象が起こったときに私たちに及ぶ影響なら、簡単に見極められる。
- ある事象が起こる可能性がどれぐらいかわからなくても、その事象が起こったらどんな影響があるかはちゃんと把握できることがある。
- 地震が起こるオッズはわからないが、起こったらサンフランシスコがどんなことになるかは想像はできる。
- 意思決定をするときは、確率（これはわからない）よりも影響（これはわかるかもしれない）のほうに焦点を当てるべきなのだ。不確実性の本質はそこにある。

不確定性の中での意思決定 ヒント2

畑村洋太郎著『想定外を想定せよ！』でも同様の議論

- 人間は何かを考えようとするとき、ある種の境界が無いと、思考に脈絡がなかったり、物事をバラバラにしか認識できない。そこで、境界を設けることになるが、これこそが「想定」である。
- しかし「想定」は人間が決めたものであり、その範囲を超えた「想定外」は起こりえないものではなく、確率は低いかも知れないが起こるときには起こる。
- 想定外は誰にも防ぐことはできない。重要なのはむしろ「想定外」のことが起こったときに、的確な判断を行い、いかに被害を最小限に食い止めるか
- そのためには予め「想定外」のことが起こり得るということを「想像」し、「想定外」のことが起きたときにはどのように対応するかを予め考えておくべき。

新たな設計基準の枠組み

現在の考え方の主流

想定される地震動(L2設計地震動)に対して安全性(崩壊しない)を確保することが目的

3・11を経験して…

上記の耐震設計の枠組(狭義の耐震設計)に加えて、耐震設計で制御してきた範囲を超えた不測の事態に対処するための枠組みが必要

危機耐性
Anti-catastrophe



Railway Technical Research Institute

耐震設計の枠組みと危機耐性の関係

現在の耐震設計の基本的枠組みを維持しつつ、それにプラス！



耐震設計の守備範囲が広がれば、危機耐性の守備範囲は小さくなり、その逆となれば大きくなる

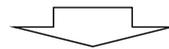
- まずは、耐震設計の強化がまずは重要
- ただし、どんなに強化しても100%の安全確保は困難

危機耐性

●力学的合理性の追求&社会が容認する範囲内で、地震動を予測して、それに対して、耐震設計・耐震対策を施す！



●ある種の経済的制約、もしくは、科学の未成熟による制約下における『条件付き安全』であることを認識



耐震設計という行為
= Minimum Requirement

●事前に想定した以上の地震が作用し得ることを否定しないことが重要



●想定外の地震が作用したことを前提として、その後のシナリオ(=設計で想定した以上の損傷)を事前に想定し、対応を考えておくことが重要

『危機耐性』(仮想演習も同義)

鉄道標準の対応:耐震構造計画の強化



●危機耐性は、抽象的であり曖昧な面を伴っており、数学的にうまく定義できない

●鉄道耐震標準では、「照査」ではなく、**当面は「配慮」**事項として、設計の上流工程に位置する「**耐震構造計画**」で対応

●この「配慮」は暗黙知の類に近い概念をも含んでおり、現状の設計基準体系のままでは、一般化しにくい。

危機耐性に向けて、当面行うべき事

- **路線計画にまで言及**
 - ・計画屋と設計屋が議論する場
 - ・耐震設計からみた路線計画のあり方を示すべき
- **構造物への進入路、作業ヤードの確保**
 - ・被害の波及を防止
 - ・復旧資材の搬入を容易に
 - ・鋼材等の資材の仮置スペース、重機の作業ヤード
- **モニタリング**
 - ・損傷を速やかに確認
- **高架橋下・地下構造物上の利用の制限**
- **システム、ネットワークでの対応**
- **構造的対応**
 - ・曲げ破壊形態(最もシンプルだけど実質的かつ有効)
 - ・設計で想定する以上の状況に陥ったときに始めて効果を発揮

耐震構造計画の強化

危機耐性に近い概念(実用化工法)の例

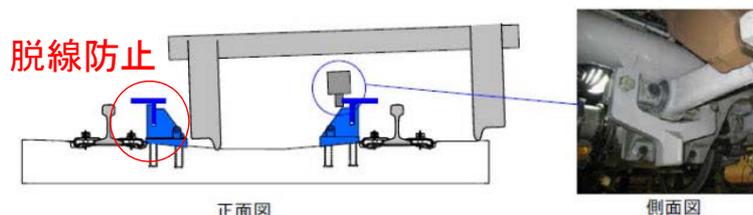
- **L型ガイド逸脱防止装置 (JR東日本殿)**



- **開削トンネル添え柱工法 (東京地下鉄殿)**



- **逸脱防止装置 (JR東海殿)**



本日の内容

- 鉄道構造物の耐震設計標準の改訂
- 2011年東北地方太平洋沖地震をどう考えたか
 - ・ どう対処するか？（危機耐性の導入）
 - ・ 利用者との合意形成
- 耐震化・耐震補強の難しさ



Railway Technical Research Institute

社会（利用者）との意思疎通

危機耐性という考え方の導入には・・・

土木構造物が有する性能や地震が発生したときにどのような状態を想定しているのか、利用者に理解してもらう努力が必要



Railway Technical Research Institute

国民が期待する橋の要求性能

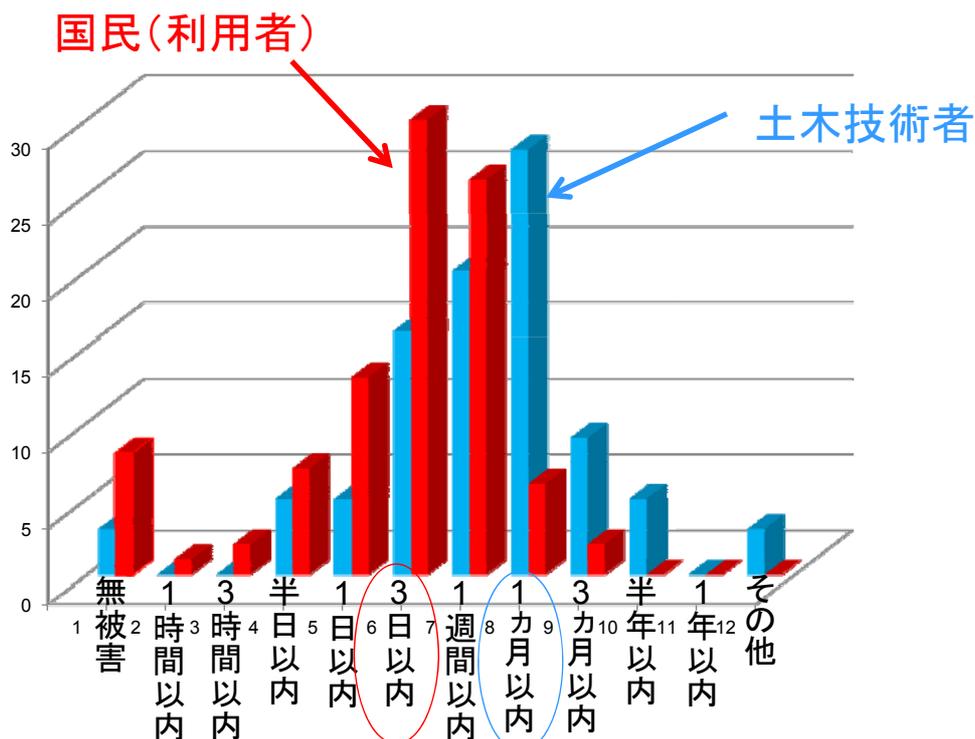
目標とすべき橋の耐震性能	度数(%)
①地震後使用できなくても人命が損なわなければよい	36 (4.2%)
②地震後なるべく早く回復できる程度の被害に留めるべき	109 (12.7%)
③地震後直ちに回復できる程度の被害に留めるべき	414 (48.0)
④コストをかけてでも被害を抑えるべき	282 (32.7)
無回答	21 (2.4)
合計	862 (100.0)

出典:川島:専門家が思い描く性能目標は国民のニーズに一致しているのか?、大会2004、日本地震工学会



Railway Technical Research Institute

土木技術者と国民の考える復旧期間のずれ



Railway Technical Research Institute

技術者の常識と国民の期待の乖離

技術者

- 中小地震・・・機能保持
- 大地震・・・崩壊防止

国民

- 耐震設計してあったのに、なぜ高架橋は損傷した？
- 大地震の時こそ、鉄道・道路は重要でないか？

土木構造物が有する性能や地震が発生したときにどのような状態を想定しているのか、利用者に理解してもらう努力

- 耐震設計の考え方を国民に説明するための技術者と国民の共通言語がない。土木構造物に要求される安全という概念について、社会との合意形成が得られるように表示方法を含めて議論

本日の内容

- 鉄道構造物の耐震設計標準の改訂
- 2011年東北地方太平洋沖地震をどう考えたか
 - ・ 想定外だったこと
 - ・ どう対処するか？（危機耐性の導入）
 - ・ 利用者との合意形成
- 耐震化・耐震補強の難しさ

耐震化の意思決定を難しくさせる要因

(1)低頻度巨大災害

- いつ起こるか分からない事象に莫大な投資をすることは経営判断として難しい
- 目先の事案(頻度の高い災害)を最優先する傾向

(2)耐震化することへのインセンティブが薄い

- 耐震化・耐震補強しても、その効果が表れるのは、地震が起きてから！
- 経営的側面からの意義・メリットが薄い

(3)終わりが見えない

- 新しい地震が起きるたびに、新たな耐震補強を強いられるのでは？という不安感

(1) 低頻度巨大災害対応への意思決定

技術者(学会)と、利用者・意思決定者(政府・事業者)との意思疎通の必要性

- 内在する地震のリスクについて熟知している技術者(Code writer?)が、その事を分かりやすい形で表現する
→ 「安全性」という言葉の捉え方すら3者で異なる
- リスクを意思決定者、利用者、技術者で共有する必要がある

(2) 耐震化することへのインセンティブ

耐震設計・耐震補強の効果が検証されるよう大地震の発生確率はかなり低いのは事実！



● 中小地震は、相当な頻度で発生！

大地震を対象とした耐震補強の補強効果を中小地震でも感じられるようにすることが重要

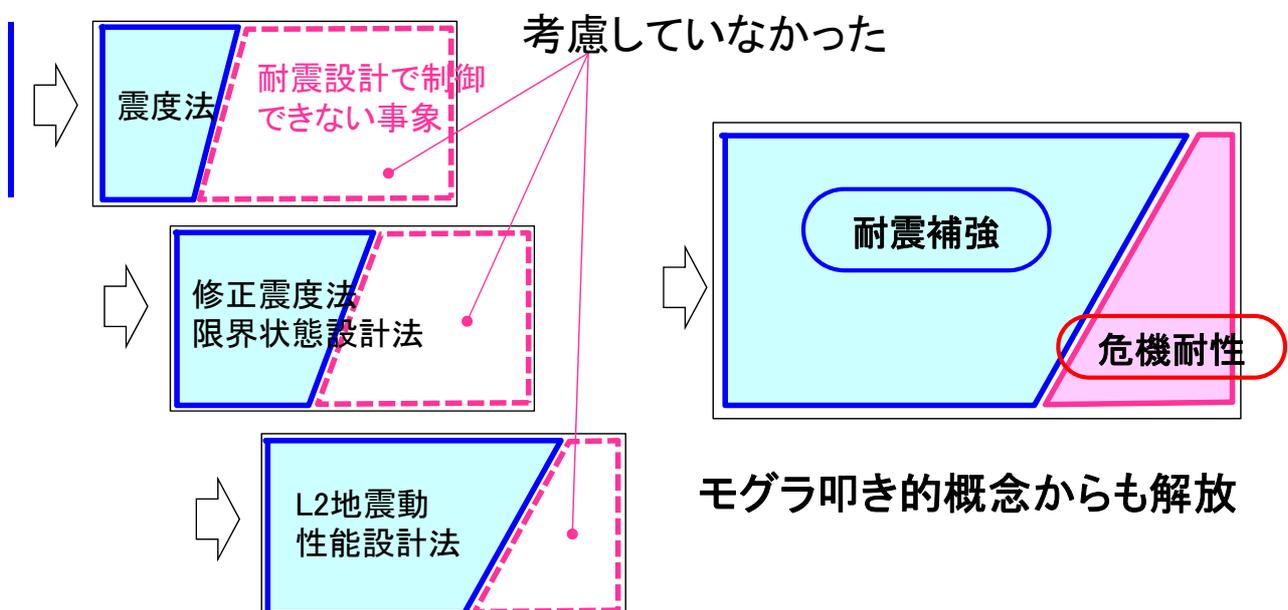
- ✓ 中小地震に対する有効性を持たせること
- ✓ 耐震補強した地点の運転規制(巡回)の閾値を上げることで、無駄な停止による損失を防ぐ
- ✓ 維持管理の観点からの優位性

● 耐震性を第三者機関で評価・公開する取組みもあるかも・・・

- ✓ Report Card for America's Infrastructure
- ✓ 耐震安全性の高い鉄道(事業者)を利用者が選ぶことによる運輸収入の向上

(3) 既往最大思想からの脱却

想定を超える事象を認識し、それが起こった後のシナリオを想像して備える事が重要



まとめ

耐震設計を広義に捉える：「性能照査」と「危機耐性」の2つのプロセスで対応

- 力学的合理性の追求の過程で、社会が容認し得る水準で経済性と手を結んだ形での耐震設計（性能照査）を実施（現状の枠組みを踏襲）
- 想定を超える事象を認識し、それが起こった後のシナリオを想像して備える事が重要
- 例えば『危機耐性』を要求性能とする。但し、抽象的・曖昧な面を伴い、数学的定義が難しいので、当面は路線計画をも含めた耐震構造計画で「配慮事項」として対応するのが現実的

将来的には・・・危機耐性に対する照査指標や照査方法など、一般化するための努力が必要

ご清聴有難うございました

