「危機耐性」を考慮した耐震設計体系
(2)鉄道・港湾構造物の設計指針と「危機耐性」

野津　厚[1]・室野剛隆[2]・本山紘希[3]・本田利器[4]

[1]正会員　港湾空港技術研究所（〒239-0826　神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）
E-mail: nozu@pari.go.jp
[2]正会員　鉄道総合技術研究所（〒185-8540　東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail: murono@rtri.or.jp
[3]正会員　鉄道総合技術研究所（〒185-8540　東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail: motoyama@rtri.or.jp
[4]正会員　東京大学大学院新領域創成科学研究科国際協力学専攻（〒277-8563　千葉県柏市柏の葉5-1-5）
E-mail: rhonda@k.u-tokyo.ac.jp

危機耐性に関する今後の議論の活性化に資する目的で，鉄道・港湾分野における設計指針の動向を概観するとともに，東日本大震災前後を問わず，危機耐性への配慮と見なすことのできる事例をとりあげ整理した．鉄道の分野では，車両逸脱防止装置，自重保証機構などのdeviceの開発・改良が進められている．一方，港湾の分野では，津波に対する「粘り強い構造」の開発が重要な課題となっている．危機耐性を考慮した設計においては，狭義の設計における想定を越える外力が作用した場合の構造物・システムの応答に対する深い理解が重要であると考えられる．また，鉄道分野・港湾分野に共通する今後の課題として，耐震の観点からの路線計画や港湾計画の重要性が挙げられる．

Key Words : *railway facility, port facility, design code, anti-chatastrophe*

1.　はじめに

土木学会地震工学委員会・耐震基準小委員会・危機耐性WGでは「危機耐性」を考慮した耐震設計体系の構築に向けた検討を行っている[1]．そこでは「危機耐性」を「狭義の設計段階で想定していなかった事象においても，構造物が，単体またはシステムとして，破滅的な状況に陥らないような性質」と定義している[1]．ここで「狭義の設計」とは，レベル1，レベル2等の設計地震動に対して構造物が要求性能を満足していることを照査で確認する設計[2)3)4)]のことである．

危機耐性を考慮した設計が必要とされる理由として第一に挙げられるのは，狭義の設計時に想定していたレベル2地震動を越える地震動が構造物に作用する可能性は常に存在しているという点である．また，そのことに加え，作用した地震動がレベル2以下の場合でも，設計時に想定していなかった挙動が構造物に生じ被害に結びつく可能性はある．こうした不測の事態への対処の必要性は，2011年東日本大震災による津波被害と福島第一原子力発電所の過酷事故の経験から強く意識されるようになってきた．

危機耐性を考慮した設計では，はじめから「壊れたときのシナリオ」を考える[1]．そして，構造物単体の挙動ではなく，社会環境を含む複数のスケールでのシステムの挙動を考慮し[1]，それに対処するため，構造計画および構造設計の段階でそれぞれ可能な対策を実施する[1]．例えば，防波堤が津波の浸水を遅らせる効果について議論する場合は防波堤を含む津波の影響範囲をシステムとして考慮することになり，交通網の代替性を議論する場合は広域な道路ネットワークをシステムとして考慮することになる[1]．構造物が壊れた場合のシステムの応答を構造物の設計者自身が計画段階・設計段階で考慮するという点が危機耐性を考慮した設計の新しい点であり，これにより，計画段階・設計段階で適切な対策をとることが可能になる．

さて，危機耐性を考慮した設計の必要性は，東日本大震災以降，土木学会の外でも（危機耐性という用語を用いるかどうかは別として）認識が広がってきている．例えば，「鉄道構造物等設計標準・同解説」[5)]では，構造物の要求性能に関する解説の中で「設計段階で想定された以上の地震が発生した場合であっても，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

る必要がある」としており，事実上，危機耐性の概念を導入している．一方，「港湾の施設の技術上の基準・同解説」[6]の部分改訂[7]では，「設計津波を越える規模の強さを有する津波」に言及しており，それが作用した場合の防波堤・防潮堤等に求められる性能に言及している．また，防波堤・防潮堤の耐津波設計ガイドライン[8][9]では，設計津波を越える規模の津波に対する「粘り強さ」を考慮した設計の考え方を明らかにしている．これらも危機耐性を考慮した設計と見ることができるだろう．

以上は東日本大震災以降の動向であるが，東日本大震災以前においても，現時点から見れば危機耐性への配慮と見なすこともできる設計上の配慮が存在していた．それは，必ずしも設計基準に明記されたものばかりではなく，設計者の経験知として存在していた場合も多い．また，実際に導入した装置が危機耐性の効果を発揮した事例もある．2004年新潟県中越地震では新幹線が脱線したものの，車両が大きく逸脱することなく停止したため，死傷者はゼロであり被害を最小限に抑えることができた[10]。これを契機に，車両が地震により脱線した場合にも車両が軌道面から大きく逸脱することを防ぐデバイスの導入がなされた．東日本大震災では，東北新幹線仙台駅付近を走行中の試運転列車が脱線したものの，この車両逸脱防止装置が機能を果たした[11]．

そこで，本稿においては，危機耐性に関する今後の議論の活性化に資する目的で，鉄道・港湾分野における設計指針の動向を概観するとともに，東日本大震災前後を問わず，危機耐性への配慮と見なすことのできる事例をとりあげ整理する．さらに，危機耐性に配慮した設計の今後の展開に関するいくつかの考えを述べる．

2. 鉄道構造物の設計指針と「危機耐性」

本章では鉄道構造物を対象として設計標準の考え方を概観するとともに，危機耐性への取組みの考え方と現状について述べる．

(1) 耐震設計の基本的な考え方

(a) 耐震設計の基本

鉄道構造物の耐震設計は，「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）」[5]（以下，耐震標準と呼ぶ）に準拠して行われる．最新の耐震標準は，2012年に改訂された．この耐震標準では，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体系を採用している．設計で想定する地震動にはL1地震動とL2地震動がある．

L1地震動とは，「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

表-1　要求性能と地震動との関係

要求性能	設計地震動	内容	適用
安全性	L2 地震動	崩壊防止	全て
	L1 地震動	走行安全性	全て
復旧性	復旧性照査地震動	修復性	重要度の高い構造物

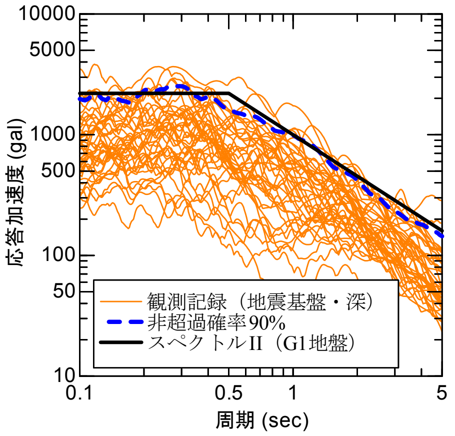

図-1　補正された観測記録群と標準設計地震動の応答スペクトルの関係（スペクトルII）

動は「構造物の建設地点で考えられる最大級の地震動」と定義されている．また，要求される性能には，「安全性」と「復旧性」がある．安全性には，①構造全体として崩壊させない「構造物の構造体としての安全性」と，②脱線に至る可能性をできるだけ低減するための「機能上の安全性」の２種類が鉄道構造物に要求される．また，新幹線などの重要構造物に対しては，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「復旧性」が要求される．対象とする地震動と要求性能の組合せを**表-1**に示す．

(b) 設計地震動

L1地震動は主に列車の走行安全性の照査に用いる地震動であり，1995年兵庫県南部地震以前の耐震設計で用いられてきた地震動が踏襲されている．L2地震動は，建設地点で想定される最大級の強さをもつ地震動を個別に設定することを原則としているが，設計実務の便を考えて，詳細な検討を必要としない場合については，あらかじめ妥当性が検証された標準地震動を用いてよいとされている．詳細な検討が必要な場合とは，(i)建設地点近傍にMw7を超えるような断層が存在する場合や，(ii)深層地盤構造により著しく地震動が増幅される可能性が分かっている地域を対象とする場合であり，この場合は標準応答スペクトルの適用が難しい．

標準地震動には，海溝型地震を想定したスペクトルI（Mw=8.0，断層最短距離60km）と内陸活断層を想定し

図-2　狭義の耐震設計と危機耐性の関係

たスペクトルII（Mw=7.0，直下）が用意されている．その特性は，マグニチュードMと震源距離Rを補正した観測記録群の応答スペクトル群に対して非超過確率が90%になるように設定されている（**図-1**）．なお，耐震標準では設計地震動は耐震設計上の基盤面で定義されている．

(c)　危機耐性

ところで，耐震設計とは，地震という極めて不確定な自然現象を取り扱う行為である．不確定性を適切に取り扱うことが，地震という自然現象と対峙する場合の真摯な姿勢であると言える．しかし，実際には力学的合理性の追求の過程で経済性や社会的合理性に配慮せざる得ないのが実情である．つまり，社会が容認しうる妥当な地震動に対して，社会が容認しうる妥当な性能を確保するように，構造物を設計することになる[12]．何をもって“妥当”であると考えるのかは非常に難しい問題であるが，その時の科学的知見や技術水準に大きく依存するであろう．耐震設計標準では，その考え方の１つとして，L2地震動を“最大級の地震動”と定義し，**表-1**のような要求性能が設定されている．

さて，ここで注意すべきは，L2地震動を“最大級の地震動”と定義したことである．物理的に発生可能な最大の地震動ではなく，高度な工学的な判断により設定することを意味しており，設計で考慮するL2地震動を超える地震動の発生を否定していないということである．

2011年東北地方太平洋沖地震以降は，想定を越えた危機（地震）に対してどう対応するべきか，ということが重要な関心事項になっている．耐震標準[5]を引用すると，「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」としており，このような地震動に対しても「鉄道構造物は一般に公共性の高いものであり，それらの円滑な機能の維持・確保が個人の生命や生活，社会・生産活動にとって非常に重要であることを考えると，耐震設計においても，上記の安全性，復旧性に加えて，設計段階で想定された以上の地震が発生した場合であっても，構造物またはシステムとして，破滅的な状況に至らないように設計する必要がある」と述べられている．危機耐性をもう少し分かりやすく解説するために，筆者の一人は**図-2**のような概念図を良く用いている[例えば12]．これは，従来からの性能照査による耐震設計（狭義の耐震設計）

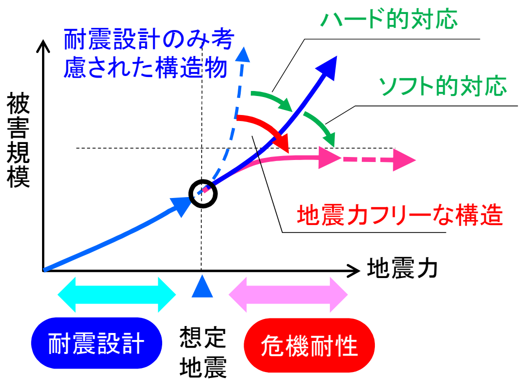

図-3　危機耐性を向上させる技術

と危機耐性の関係を表したものである．従来通り**表-1**に示したような性能を確保できるよう耐震設計・性能照査をしつつ，狭義の耐震設計で制御できない補集合の部分を考慮することが危機耐性である．ただし，危機耐性を「直接的に照査する体系はまだ構築されておらず，本標準では耐震構造計画の段階で配慮」することとして整理されている．

(2)　耐震標準に示される危機耐性の事例

従来の耐震設計は，**図-3**に示すように，想定地震に対して想定した被害になるように被害をコントロールしている．しかし，想定を超えた地震に対して被害レベルを補償するものではない．想定を超えた不測の事態に対しても，被害規模をある程度で飽和させたい．それが危機耐性で目指すものである．仮に地震力フリーな構造物が実現できれば，それだけで危機耐性に対応できることになるが，構造的な対応だけでは不可能な場合には「ソフト対策とハード対策を組合わせて対処」[5]しなければならない．

例えば，耐震標準[5]では，危機耐性に配慮した構造的対応として，「構造物全体系として脆性的な破壊状態となるものを避ける」こと，つまり曲げ破壊型の構造とすることを示している．また，ソフト対策としては，構造計画の段階で「構造物の周辺環境について，復旧性の面から配慮」することも危機耐性の観点からは有益であるとしている．具体的には，過去の鉄道地震被災事例に鑑みると，高架橋の側道の利用や高架下の利用状況が復旧に大きく影響していたことから，「構造物への進入路，作業ヤードの確保」や「構造物の損傷想定箇所を点検や修復工事が実施しやすい箇所に想定すること」が例として挙げられている．

(3)　危機耐性を向上させる技術

ここでは，耐震標準が発刊された以降の取組みを含めて，危機耐性を向上させるための方策について考える．想定を越えた不測の事態が発生した場合に避けなければ

図-4　逸脱防止装置の例

ならない危機には様々なものがあり，その対策も危機毎に各種の技術・対策が必要となる．例えば，平成26年に閣議決定された国土強靱化基本計画[13]では，４つの基本目標を設定するとともに，起きてはならない最悪の事態（本報でいう危機に該当）を回避するための「国土強靱化アクションプラン2014」[14]が提案されている．この中では，交通施設等の大規模倒壊等による死傷者発生，など色々な例が示されている．よって，危機耐性を向上させるためには，どのような危機を対象とするかによって，様々な方策が必要であり，具体的には，①設計計画の充実，②構造的な対応，③早期地震警報，④仮想演習，⑤避難誘導を含めたソフト対応，などが考えられる．

(a)　設計計画の充実

危機耐性を高めるためには，危機に遭遇する可能性を事前にできるだけ少なくする努力がまずは必要である．その観点からは，路線計画が決まった段階でそれに見合う構造物を耐震設計するのではなく，耐震設計からみた路線計画のあり方を示すような枠組みがあるとよいのではないだろうか．実際には，路線計画の決定には社会的な側面や経済的な側面など多くを勘案しなければならないが，例えば活断層の存在が認められた場合は，ある程度の距離を保つように路線計画を設定することは危機耐性の観点からも有益である．

また，仮に危機に遭遇してもダメージが拡大することを防止することが重要である．そのためには，前項で述べたように，構造物のダメージを想定して，予め構造物への進入路や作業ヤードを確保することなどが重要である．

(b)　危機耐性を向上させる構造的対応

危機の１つとして，地震時に車両が脱線して多くの死傷者が発生するというシナリオが考えられる．2004年新潟県中越地震の発生により，新幹線が脱線した．脱線した際，先頭車に取り付けている台車排障器と車輪との間にレールを挟みこんだ状態となり，車両が大きく逸脱することなく停止し，死傷者はゼロであり被害を最小限に抑えることができた[10]．このことから，新幹線車両が地震などにより脱線した場合には，車両が軌道面から大きく逸脱することを防ぐことが被害拡大を防ぐために有効

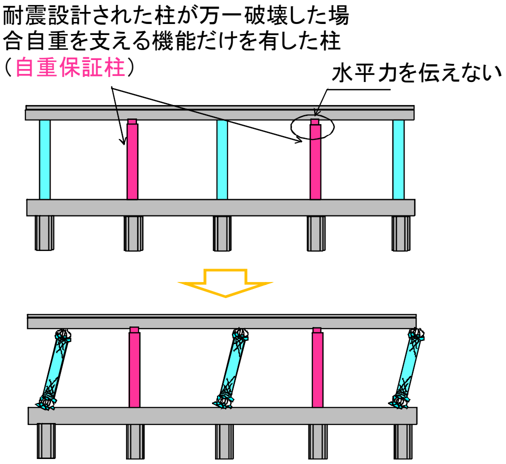

図-5　自重保証機構を有するラーメン高架橋

表-2　自重補償構造の設計試算例

構造型式	通常部材の配筋	
	引張鉄筋	帯鉄筋
通常の耐震構造	D32×5本	D19-1組-150ctc
自重補償構造	D32×7本	D19-1組-100ctc

注）柱寸法0.85m×0.85mで高さは5.5m

であることが分かる．地震時の車両の走行安全性については，変形をある一定レベルに抑えることにより，その性能を確保することが行われているが[15]，その上で，万が一脱線した場合にも大きく逸脱することを防止する目的で，**図-4**に示すように軌道側に逸脱防止ガードを設置する方法[16]や，車両側で対応する方法[17]などなどが開発され，導入されている．これは，不測の事態に対する対応策であり，危機耐性の範疇に入る具体的な取組み例の１つと言える．

また，危機としては，鉄道構造物が倒壊することで死傷者が発生すると言うシナリオも考えられる．このような危機に対する構造的な対応として，想定を超えた状態に対して破壊に至るプロセスを緩やかにすることが望ましい．これには，前述したように，まずは曲げ破壊型の構造物を設計することが素直な方法として思いつく．1995年兵庫県南部地震以降，新設構造物はもちろん，既設構造物についても鋼板巻き補強等が順次実施され，鉄道全体としてこの点の取組みがなされてきた．

より強力な対策としては，“自重補償機構”が考えられる．自重補償機構とは，想定を越える地震に対して柱や橋脚などの鉛直方向の部材が破壊しても，上部工等を支持するための鉛直支持性能の喪失を防ぐことで，倒壊を防止するというコンセプトである．その１つとして，**図-5**に示すようなラーメン高架橋が考えられる．２種類の柱から構成されており，図中の水色の柱を“通常部材”，ピンク色の部材は“自重補償部材”と呼ぶ．通常部材は，従来のように，L2地震に対して性能を満足するように耐震設計される．一方，自重補償部材は，鉛直

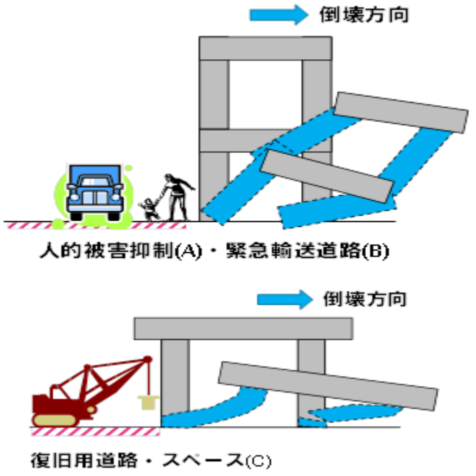

図-6　倒壊方向の制御

荷重のみを分担し，地震力による水平荷重は作用しない構造とし，想定外の地震力を受けた際にも応力を負担せず無損傷とする．その結果，通常部材が想定を越えた地震で破壊しても，無損傷の自重補償が少なくとも上部工を支えてくれる．

1層5径間のラーメン高架橋を対象に試計算を行った結果[18]，例えば，10本ある柱のうち4本を自重補償部材に変更すると，L2地震に対して通常部材が負担するべき地震時慣性力が増大するため，従来よりも通常柱の耐力を増加させる必要があるが，その量は引張鉄筋数本程度であることが分かった（**表-2**）．

一方、想定を超える地震動により，構造物が万が一倒壊した場合，その波及効果として倒壊に伴う人的被害の拡大，復旧性の著しい低下・喪失を予見して対応することも重要である．これに対しては，倒壊する方向をコントロールする機構の付与や倒壊の広がりをコントロールする機構の付与が有効である（**図-6**参照）．その機構の詳細は参考文献[19]に譲るが，これにより，歩行者や周辺施設の利用者の安全確保，緊急輸送道路などの災害復旧時における重要ルート，構造物を復旧するための専用道路やスペース等の確保が可能となり，危機耐性を向上させることができる．

(c)　早期地震警報システムの高度化

危機の１つとして，構造物が損傷・倒壊した箇所に列車が突入して死傷者が発生，というシナリオが考えられる．このシナリオを回避するためには，地震の揺れをできるだけ早期に検知し，構造物が大きく揺れる前に警報を発し，列車の速度を速やかに低下または停止させる，早期地震警報が有効である[20]．

現在，新幹線で運用されているアルゴリズムは，**図-7**に示すようにP波初動部2秒の加速度の成長を指数関数でフィッティングし，係数Bから震央距離を求めている（B-Δ法）．求められた震央距離と観測された変位振幅

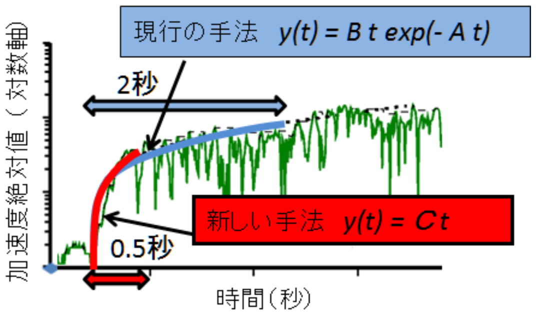

図-7　新しい震央距離推定手法と現行の手法の比較

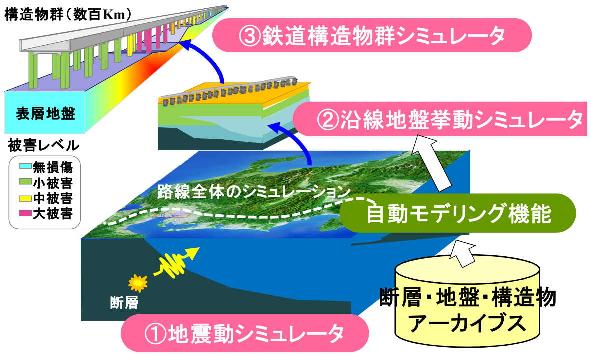

図-8　鉄道地震災害シミュレータ

から距離減衰式を用いてマグニチュードを算出し，鉄道構造物に影響があると判断された場合には，電力供給を停止させて列車を緊急停止させる．なお，現在は，①より精度の高い警報を出すこと，②より早い警報を出すことに取組んでおり，より精度の高い警報を出すために，P波初動部0.5秒程度における加速度成長を用いて，これを図7の1次関数で近似することで，その係数Cから震央距離を求めるアルゴリズムを開発した（**図-7**）[20]．新しい手法により震央距離の推定精度が約13%向上し，また推定に用いるデータ長は従来の2秒から0.5秒に短縮された．

(d)　仮想演習

起きてはならない最悪の事態（危機）を回避するためには，想定外の事象が発生したら何が起こるのか，という想像力を高めて事前に「仮想の演習」をする必要がある．ただし，過去の知見や経験だけを基にした仮想演習だけでは，想定を越えた地震に対して想像力豊かに訓練するのが難しい．このような問題に対しては，各種のシミュレータが大いに貢献できると思われる．例えば，鉄道では仮想演習の道具として『地震災害シミュレータ』が構築されており（**図-8**）[21]，その活用が考えられる．これは，任意の位置で任意の規模の地震を発生させることが可能であり，そのような地震が発生した場合の地震波動の伝播を日本全土レベルで解析し，数百キロ区間の表層地盤や構造物群の挙動を解析することが可能なシミュレータである．

3. 港湾構造物の設計指針と「危機耐性」

本章では港湾構造物を対象として設計指針の動向を概観するとともに，危機耐性への配慮と見なすことのできる事例をとりあげ整理する．さらに，危機耐性に配慮した設計の今後の展開に関するいくつかの考えを述べる．

(1) 設計地震動と性能[6]

港湾構造物を設計する際に考慮する照査用地震動については2007年に刊行された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」[6]に詳しく記述されている．

まず，レベル1地震動は「技術基準対象施設を設置する地点において発生するものと想定される地震動のうち，地震動の再現期間と当該施設の設計供用期間との関係から当該施設の設計供用期間中に発生する可能性の高いもの」と定義されており，「地震動の実測値をもとに，震源特性，伝播経路特性及びサイト特性を考慮して，確率論的時刻歴波形を適切に設定する」とされている．ここに震源特性とは震源断層の破壊過程の影響，伝播経路特性とは震源から地震基盤に至る伝播経路における減衰等の影響，サイト特性とは地震基盤上に存在する堆積層の影響である（**図-9**）．レベル1地震動の再現期間は75年を標準としている．レベル1地震動の実際の設定には周波数領域における確率論的地震危険度解析が用いられている．その具体的方法については文献[22]で包括的整理が行われているので参照していただきたい．

次に，レベル2地震動は「技術基準対象施設を設置する地点において発生するものと想定される地震動のうち，最大規模の強さを有するもの」と定義されており，「地震動の実測値，想定される地震の震源パラメータ等をもとに，震源特性，伝播経路特性及びサイト特性を考慮して，時刻歴波形を適切に設定する」とされている．レベル2地震動の設定にあたっては，次の（ｉ）～（vi）の想定地震の中から対象地震の選定を行っている．

（ｉ）過去に大きな被害をもたらした地震の再来
（ⅱ）活断層の活動による地震
（ⅲ）地震学的あるいは地質学的観点から発生が懸念されるその他の地震
（ⅳ）中央防災会議や地震調査研究推進本部など国の機関の想定地震
（ｖ）地域防災計画の想定地震
（vi）M6.5の直下地震

震源パラメータの設定方法については文献6)に記載がある．例えば「活断層の活動による地震」を想定する場合，アスペリティの破壊開始点の設定については，設定される地震動が安全側となるように配慮されている（**図-10**）．設定された震源パラメータに基づく実際の地震動の評価には文献23)の方法が多く用いられている．

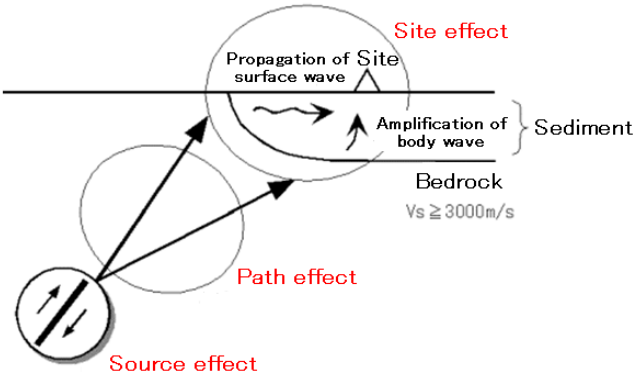

図-9 震源特性・伝播経路特性・サイト特性

これらの地震動に対する岸壁の要求性能は次のようになっている[6]．

まず，レベル1地震動に対しては，種別を問わず，岸壁が継続して利用できること（使用性）を求めている．レベル2地震動に対しては，耐震強化岸壁に限り，使用性または修復性を求めている．耐震強化岸壁以外の岸壁については，レベル2地震動に対して特段の性能を求めていない．レベル2地震動に対して耐震強化岸壁に求められる性能は岸壁の種別に応じて異なっており，**表-3**のように整理される．この表にあるように，耐震強化岸壁には緊急物資輸送対応と幹線貨物輸送対応がある．後者はガントリークレーンを備えており，コンテナの荷役に用いられる．

強震動作用時の重力式岸壁の典型的な被害は，**図-11**に示すとおり，基礎地盤が変形し，それに伴い，堤体に海側への水平変位と傾斜・沈下が生じるものである．堤体の海側への移動に伴い，背後地盤はvolumeが足りなくなるので沈下し，堤体と背後地盤との間に段差が生じる．堤体の水平変位が大きいほど背後の段差も大きい傾向がある．このような状況が極端な形として表れたものが，**図-12**に示す兵庫県南部地震の被災事例である．背後の段差が明瞭に表れている．

大きい水平変位が生じれば，地震後の船舶の接岸に支障を来すことになる．また，背後に大きな段差が生じれば，トラックによるアプローチができなくなり，地震後の荷役に支障を来すことになる．従って，岸壁が地震後に使用できるためには，構造的な安定が保たれることの他，水平変位や段差の大きさを許容範囲以内に押さえることが肝要である．

現在，レベル1地震動に対する岸壁の性能照査は主に震度法により行われているが，その際に用いる照査用震度は，地震動の周波数特性や継続時間も考慮し，岸壁の水平変位が一定程度以下に収まるように調整されたものが用いられている[6]．これは，与えられた地震動に対して構造物の塑性率が一定値以下となるような降伏震度

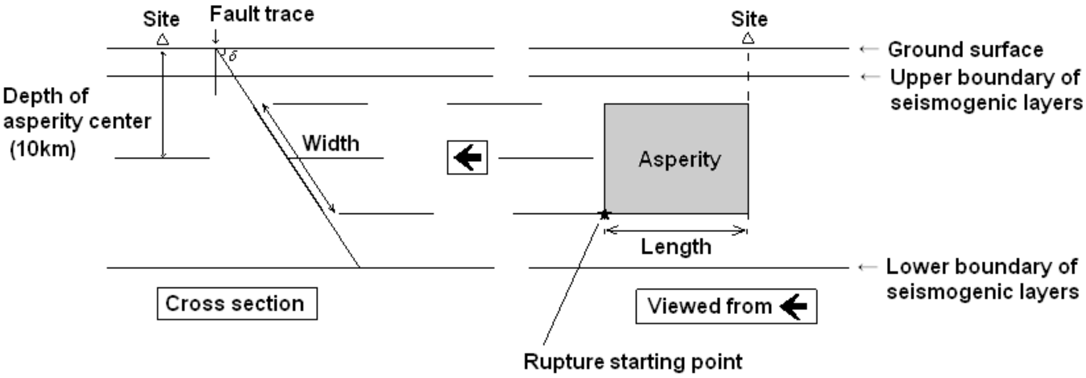

図-10 アスペリティと破壊開始点の位置

表-3 耐震強化岸壁に求められる性能

	耐震強化岸壁		
	特　定		標　準
	緊急物資輸送対応	幹線貨物輸送対応	緊急物資輸送対応
レベル2地震動の作用後に必要とされる機能	地震後，構造的な安定が保たれ，速やかに，船舶の利用，人の乗降及び緊急物資等の荷役を行うことができる	地震後，構造的な安定が保たれ，速やか（短期間の後）に，船舶の利用及び幹線貨物の荷役を行うことができる	地震後，構造的な安定が保たれ，一定期間の後に，緊急物資等の荷役を行うことができる
	地震後に必要な機能（本来の機能は不要）	本来の機能	地震後に必要な機能（本来の機能は不要）
要求性能	使用性*	修復性	修復性*
必要とされる修復の機能	軽微な修復	軽微な修復	ある程度の修復

* この要求性能は，地震後に必要な機能（緊急物資輸送）に対するものであり，施設の本来の機能に対するものとは異なる．

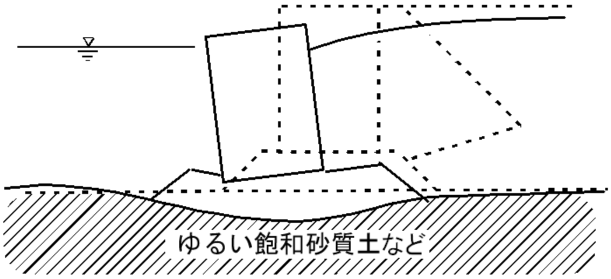

図-11 重力式岸壁の典型的な被害

図-12 兵庫県南部地震における重力式岸壁の被害事例

を求める鉄道構造物の方法とある意味で類似していると言える．レベル2地震動に対する岸壁の性能照査は主に有効応力解析により行われている．

(2) 設計津波と性能

「設計津波」という用語は，2013年に行われた「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の部分改訂[7]で初めて用いられた．そこでは設計津波は「技術基準対象施設を設置する地点において発生するものと想定される津波のうち，当該施設の設計供用期間中に発生する可能性が低く，かつ，当該施設に大きな影響を及ぼすもの」と定義されており，「既往の津波記録又は数値解析をもとに，津波高さ等を適切に設定する」とされている．

設計津波に対する港湾の防護目標は，可能な限り構造物で人命・財産を守りきることである[8][9]．その際，防波堤と防潮堤を含む港湾施設全体で重層的に防護する多重防護の考え方が重視されている[8][9]．防波堤は，元来は波浪に対する港内静穏度の確保のために整備されるものであるが，その配置によっては，防波堤背後に浸入する津波を効果的に低減することができると考

えられている．

設計津波に対する防波堤の照査では，津波波力を作用させ，直立部の滑動，転倒及び基礎の支持力に対する安定性照査を行うことが基本となる[8]．その際，津波波力は，波状段波の有無，越流の有無に応じて異なる算定式で算定される（防波堤に関しては設計津波に対しても越流を許容している）[8]．設計津波に対する防潮堤の照査でも，津波波力を作用させ，堤体の滑動，転倒及び基礎の支持力に対する安定性照査を行うことが基本となる[9]．

(3) 設計津波を越える規模の強さを有する津波と性能

上述の「設計津波」に対する防波堤・防潮堤の設計は1.で述べた狭義の設計に対応すると考えられる．それに対し，同じく2013年の部分改訂[7]で導入された「設計津波を越える規模の強さを有する津波」に対する設計は，危機耐性を考慮した設計であると考えられる．

先に述べたように，防波堤は元来は波浪に対する港内静穏度の確保のために整備されるものであるが，防波堤の存在は，防護ライン（防潮堤など）に到達する津波高さの低減や到達時間の遅延にも寄与すると考えられている．例えば，東日本大震災における釜石湾口防波堤の効果を数値シュミレーションで検証した研究[24]によれば，防波堤は最終的に倒壊したにも関わらず，湾奥での津波高さを防波堤がない場合と比較して約4割低減させ，津波の第一波が防潮堤を越えるまでの時間も，防波堤がない場合と比較して約6分間遅延させたと考えられている．この6分という時間は，一刻を争う避難においてたいへん大きな意味を持つであろう．

設計津波を越える規模の強さを有する津波に対する港湾の防護目標は，最低限人命を守るという目標のもとに被害を可能な限り小さくする「減災」を目指すことである[8)9]．そこでは，当然ではあるが避難が最も重要な意味を持つ．しかしながら，防波堤が「粘り強い構造」を持ち，最終的には倒壊するとしても倒壊までに十分な時間を確保できれば，住民の避難を支援することにつながると考えられる．

このような観点から，2013年の部分改訂[7]では，「設計津波を越える規模の強さを有する津波」に対する防波堤の性能に言及している．その部分を引用すると，「当該防波堤の被災に伴い，人命，財産又は社会経済活動に重大な影響を及ぼすおそれのある防波堤の要求性能にあっては，構造形式に応じて，当該防波堤を設置する地点において設計津波を越える規模の強さを有する津波が発生した場合であっても，当該津波等の作用による損傷等が，当該防波堤の構造の安定に重大な影響を及ぼすのを可能な限り遅らせることができるものであることとする」となっている．防潮堤に対しても類似の規定がある．

防波堤の「粘り強い構造」を実現するための具体的手段としては，腹付工や洗掘防止工などが考えられている．また，その効果の検証においては水理模型実験や数値シミュレーションが活用されている．

以上のように，「設計津波を越える規模の強さを有する津波」に対する設計は，狭義の設計時の想定を越える外力に対し，構造物単体のみならずシステム（この場合は防波堤を含む津波の影響範囲）の挙動を考慮し，構造設計の段階で可能な対策を実施しようとするものであるため，危機耐性を考慮した設計と考えることができる．

今後は，対策工の波及効果の検証において，津波の浸水シミュレーションや避難シミュレーション[25]が活用されるようになれば，対策の有効性への理解がより進むのではないかと考えている．

(4) 危機耐性に配慮した設計の今後の展望

以上のように，港湾の分野では，耐津波設計において，既に事実上，危機耐性を考慮した設計が始まっていると言える．これに対し，地震動に対する設計という点では，危機耐性を考慮した設計を導入するには至っていない．

強いて言えば，耐震強化岸壁のレベル2地震動に対する許容変形量を決める際に，応急復旧用の資材が常備され，迅速に応急復旧ができる体制が整えられていれば，許容変形量を大きめに設定できる規定がある[6]．ここでいう応急復旧用の資材とは，例えば，**図-11**に示すような岸壁背後の段差を埋めるための地盤材料や鉄板のことである．この規定は，レベル2地震動に対する要求性能を満足するための一手法との位置づけであるが，危機耐性的な考え方とも言えるかも知れない．

次に，将来に話題を移すと，地震動に対する設計という点でも，危機耐性を考慮した設計ができる余地はあるものと考えられる．例えば，鉄道の分野で導入が検討されている自重保証機構（2.(3)参照）などは，港湾の桟橋にも適用可能かも知れない．また，道路の分野で導入されている踏掛版もたいへん参考になる考え方である．

著者らの一人は，以前，踏掛版と類似の考え方で，岸壁の耐震性能の向上が図れるのではないかと考えたことがある[26]．先に述べたように，大地震の際，岸壁の水平変位に伴い，岸壁背後には段差が生じる（**図-11**）．この段差を解消しなければ，耐震強化岸壁に期待される地震直後の緊急物資輸送に支障が生じる．震災後の応急復旧により段差を解消する考えもあるが，震災後の混乱した状況の中で応急復旧のための人手や機材を確保できるかどうかは不透明である．そこで，震災後

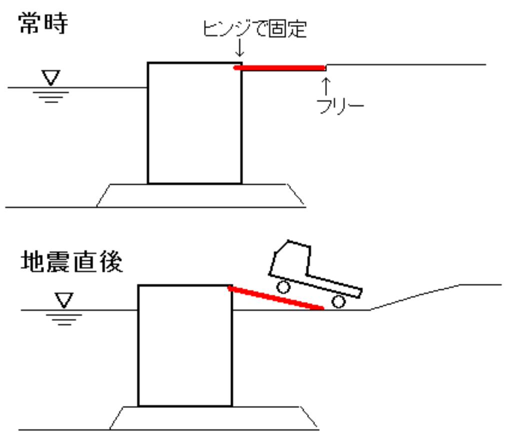

図-13　耐震スロープの概念

に耐震強化岸壁（緊急物資輸送対応）に求められる機能のより確実な確保を目的として，著者らの一人は耐震スロープ（図-13）の設置を提案した[26]．これは，岸壁上部工にヒンジで固定され背後側はフリーとなっているスロープのことで，常時はフラットになっている．地震時に岸壁背後に段差が生じた場合，スロープとして機能し，トラック等が段差を乗り越えることを可能にする．これと類似の構造として港湾の分野には浮体式桟橋と護岸を結ぶスロープがある．構造としてはこれと類似のものであり，これまでに蓄積されている技術で十分に実現可能と思われる．

3.(1)で述べたように，耐震強化岸壁はレベル2地震動に対して水平変位や段差の大きさが許容値以内に収まるように設計される．従って，作用する地震動がレベル2以下であり，かつ，地震動に対する岸壁の応答が設計通りであれば，こうしたスロープは必要ないことになる．しかしながら，1.で述べたように，レベル2を越える地震動が構造物に作用する可能性は常に存在しており，また，地震動がレベル2以下であっても，現状の有効応力解析の精度が必ずしも十分とは言えないことを踏まえれば，設計時に想定していた以上の残留変位が構造物に生じる可能性はある．こうした事態に対処する上で上述のスロープは有用であると考えられる．すなわち上述のスロープは危機耐性のためのdeviceの一つと見ることができる．

今後の課題としては，このようなdeviceの採用等の意思決定の基準（根拠）を明確にすることが挙げられる．そのためには，このdeviceによる便益を定量的に評価するなどの方法が考えられる．例えば，被災後の復旧・復興過程におけるインフラの貢献をインフラ性能の時間積分として評価する方法[1]は有用かもしれない．

さらに，2.(3)では鉄道構造物に関連して，耐震設計からみた路線計画のあり方を示すことの重要性に言及したが，同様のことは港湾計画についても言える．これまで港湾における地震対策は計画－設計－施工－維持管理という一連のプロセスのうち主に設計段階の工夫によって行われてきている．しかし，設計の段階でとりうる対策には限界があることも事実である．設計段階での工夫に加え，計画段階において種々の工夫を行うことで，地震に強い港湾をより小さいコストで実現することに寄与できるものと考えられる．具体的には，①港湾計画におけるサイト特性の考慮，②土留めとの距離を十分にとった桟橋構造の活用，③活断層地震の走向への配慮，などが計画段階における工夫として考えられる．

これらはあくまでも例にすぎず，「危機耐性」という新しい概念を起爆剤に技術者が柔軟な発想を生かせば，他にも有用な対策が生まれるのではないかと考えている．

4.　まとめ

本稿では，危機耐性に関する今後の議論の活性化に資する目的で，鉄道・港湾分野における設計指針の動向を概観するとともに，東日本大震災前後を問わず，危機耐性への配慮と見なすことのできる事例をとりあげ整理した．さらに，危機耐性に配慮した設計の今後の展開に関するいくつかの考えを述べた．

鉄道の分野においては耐震標準[5]において，事実上，危機耐性の概念を導入している．一方，港湾の分野では，耐震設計という点では危機耐性を考慮した設計を導入するには至っていないが，耐津波設計において，事実上，危機耐性を考慮した設計が始まっている．

想定を越えた不測の事態が発生した場合に避けなければならない「危機」には様々なものがあり，その対策も危機毎に各種の技術・対策が必要となる．鉄道の分野では，車両逸脱防止装置，自重保証機構などのdeviceの開発・改良が進められている．一方，港湾の分野では，津波に対する「粘り強い構造」の開発が重要な課題となっている．

危機耐性を考慮した設計においては，レベル2地震動を越える地震動（あるいは設計津波を越える津波）が作用した場合の構造物・システムの応答に対する深い理解が重要である．2.で述べたように，仮に外力フリーな構造物，すなわち外力の増加に対して被害規模が飽和するような構造物が実現できれば，それだけで危機耐性を実現することができ，理想的である．しかしながら，現実には完全な外力フリーを実現することは困難である．従って，実際に実現可能な構造が，レベル2地震動を越える地震動（あるいは設計津波を越える津波）に対してどのように挙動するかを正しく理解する

ことが重要である．このことは，たいへん挑戦的な課題であり，数値シミュレーションを含む新たな技術の開発も必要であると考えられる．それとともに，レベル2地震動を越える領域においてrealisticな地震動群を与えるための技術（けして地震動の上限を与えるための技術という意味ではない）も重要になってくると考えられる．

最後に，鉄道分野・港湾分野に共通する課題として，耐震の観点からの路線計画や港湾計画の重要性が浮かび上がってきている．この点については，計画に携わる技術者と設計に携わる技術者との間でのコミュニケーションが重要と考えられる．

参考文献

1) 本田利器・他：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系(1)試案構築にむけての考察，本発表会，2015.
2) 土木学会 耐震基準等基本問題検討会議：土木構造物の耐震基準等に関する提言（第一次提言），1995，http://www.jsce.or.jp/committee/earth/propo1.html.
3) 土木学会 阪神・淡路大震災対応技術特別委員会：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」，1996，http://www.jsce.or.jp/committee/earth/propo2.html.
4) 土木学会 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会：土木構造物の耐震基準等に関する提言「第三次提言」，2000，http://www.jsce.or.jp/committee/earth/propo3.html.
5) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2012.
6) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，2007.
7) 国土交通省港湾局：基準省令及び告示の改正に伴う，設計津波と施設の要求性能等に係る変更，2013，http://www.mlit.go.jp/common/001012831.pdf.
8) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン，2013，http://www.mlit.go.jp/common/001012142.pdf.
9) 国土交通省港湾局：港湾における防潮堤（胸壁）の耐津波設計ガイドライン，2014，http://www.mlit.go.jp/common/001012142.pdf.
10) 国土交通省航空・鉄道事故調査委員会：鉄道事故調査報告書　東日本旅客鉄道株式会社上越新幹線浦佐駅～長岡駅間列車脱線事故，2007.
11) 堀岡健司：新幹線脱線メカニズム解明と地震対策について，JR EAST Technical Review，No.45，pp.13-16、2013.
12) 室野剛隆：巨大地震に備える -耐震設計と危機耐性-，土木学会誌，Vol.100，No.7，pp.24-27，2015.
13) 国土強靭化基本計画－強くて、しなやかなニッポンへ－，2014.
14) 国土強靭化推進本部：国土強靭化アクションプラン2014，2014.
15) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限），丸善，2004.
16) 柳川秀明：軌道における地震時の新幹線脱線対策，第210回鉄道総研月例発表会講演集，2008.
17) 梶谷泰史，加藤博之，浅野浩二：車両逸脱防止Ｌ型ガイドの開発，JR EAST Technical Review，No.29，pp.27-30，2009.
18) 西村隆義，室野剛隆，本山紘希，五十嵐晃：危機耐性を高める自重保障構造の提案と成立性，第70回土木学会全国大会概要集CD-ROM，2015.
19) 齊藤正人，室野剛隆，本山紘希：地震時における構造物の倒壊に対する危機耐性機構の一考察，第70回土木学会全国大会概要集CD-ROM，2015.
20) 山本俊六，野田俊太：早期地震警報システムにおけるＰ波を用いたより高精度な震央推定手法，JREA，Vol.56，No.6，pp.15-18，2013.
21) 井澤淳，坂井公俊，本山紘希，室野剛隆：地震災害シミュレータの開発，日本鉄道施設協会誌，Vol.52，No.3，pp.228-230，2013.
22) 竹信正寛，野津厚，宮田正史，佐藤裕司，浅井茂樹：確率論的時刻歴波形として規定される港湾におけるレベル1地震動の設定に関する包括的整理，国土技術政策総合研究所資料，No.812，2014.
23) 野津厚，長尾毅，山田雅行：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良－因果性を満足する地震波の生成－，土木学会論文集A，Vol.65，pp.808-813，2009.
24) 高橋重雄，戸田和彦，菊池喜昭，菅野高弘，栗山善昭，山崎浩之，長尾毅，下迫健一郎，根木貴史，菅野　甚活，富田孝史，河合弘泰，中川康之，野津厚，岡本修，鈴木高二朗，森川嘉之，有川太郎，岩波光保，水谷崇亮，小濱英司，山路徹，熊谷兼太郎，辰巳大介，鷲崎誠，泉山拓也，関克己，廉慶善，竹信正寛，加島寛章，伴野雅之，福永勇介，作中淳一郎，渡邉祐二：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港湾空港技術研究所資料，No.1231，2011.
25) 熊谷兼太郎：2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動への津波避難シミュレーションの適用性，国土技術政策総合研究所資料，No.742，2013.
26) 港空研耐震構造研究チーム：耐震強化岸壁の機能を確保するための耐震スロープの提案，2008，http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/eqcount/earthquake_resistant_slope.pdf

SEISMIC DESIGN METHOD TO CONSIDER “ANTI-CATASTROPHE” CONCEPT (2) “ANTI-CATASTROPHE” CONCEPT IN DESIGN STANDARDS FOR RAILWAY AND PORT STRUCTURES

Atsushi NOZU, Yoshitaka MURONO, Hiroki MOTOYAMA and Riki HONDA

In order to contribute to the establishment of the “anti-catastrophe” design concept of structures, the design standards for railway and port structures are reviewed, with special reference to their recent trends. Design examples are presented in which “anti-catastrophe” design concept are considered implicitely or explicitely both before and after the 2011 Great East Japan Earthquake. For the railway structures, devices have been developed for the “anti-catastrophe” design. For the port structures, efforts are being maid to improve the performance of breakwaters after they are affected by extreme tsunamis. In the “anti-catastrophe” design, it is important to understand the performance of a structure or a structure-environment system for extreme external forces.