

## 気仙沼湾横断橋の設計段階における危機耐性向上の取組み

大日本コンサルタント 正会員 ○吉岡 勉 松浦雅史  
非会員 竹田竜一 渡辺 歩

### 1. はじめに

東日本大震災を契機に、設計で考慮する事象を超えた事象への対応として「危機耐性」という概念が共有されつつある<sup>1),2)</sup>。H29 道路橋示方書・V耐震設計編においても「2.7.2 構造設計上の配慮事項」として、設計で考慮した地震力を上回る場合に脆性的な破壊を回避することへの配慮の考えが明記されている。

三陸沿岸道路において2020年3月に開通した気仙沼湾横断橋（鋼3径間連続斜張橋、L=680m）は、「維持管理しやすく、想定外の事象に対しても損傷が制御され、かつ美しい形態の橋」を設計コンセプトとして、ダメージコントロール設計やケーブルのリダンダンシー設計等が導入された<sup>3),4)</sup>。これらは、設計基準で標準的に定められた事象以外を想定した設計例であり、広義には「危機耐性」に分類される事例と考えられる。

今後、同種の長大橋設計において参考となることを期待して、本稿は、気仙沼湾横断橋での取組みを「危機耐性」を入り口として再整理し、費用対効果について考察を加えるものである。

### 2. 危機耐性の概念

危機耐性という概念は提唱されてから間もないため、まだ定義が定まっていないが、既往文献を参考に本稿では以下と定義する（図-1）。

危機耐性：狭義の耐震設計等では制御できない事象を考慮し、社会への影響をより小さくする性質

危機耐性を議論する場合、そのわかりやすさから設

計地震動を超える地震動を例示することが多いが、本報では地震動だけに留めず、津波発生時や斜面変状、火災などの事象も対象とする。

### 3. 気仙沼湾横断橋における危機耐性の取組み

図-2に示すL2地震時限界状態を目標に耐震設計された本橋に対して、危機耐性に関して取組まれた内容を表-1に整理する。耐震設計では、ロバスト性の高い構造として免震構造を採用し、液状化層に対する基礎の安定化や、軟弱地盤との共振性の検証が行われた。

しかし、L2地震動を超える超過地震動や地盤変状等の不測の事象により免震支承やケーブルが破断する可能性もあるため、本橋では危機耐性に関する①～⑦の取組みが実施された。以下では①、②、⑥について紹介するが、詳細は文献3、4を確認されたい。

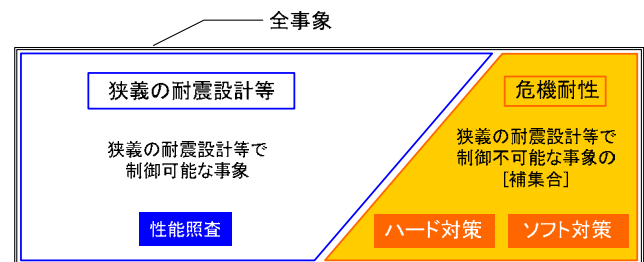


図-1 危機耐性の概念（文献2を参考に作成）

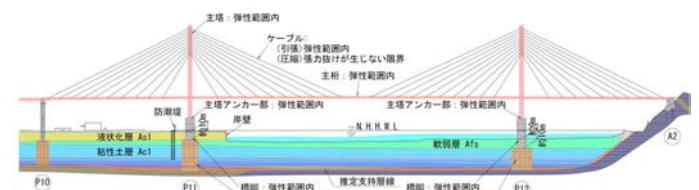


図-2 気仙沼湾横断橋のL2地震時限界状態

表-1 気仙沼湾横断橋の設計段階における危機耐性向上の取組み一覧

分類	事象	求める橋の状態	設計における取組み内容
耐震設計	レベル2地震時	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆上部構造・下部構造は弾性状態</li> <li>◆基礎構造は副次的な塑性化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ロバスト性の高い構造として免震構造を採用（液状化層の下に基礎を床付け）</li> <li>◆軟弱地盤との共振性を動的相互作用解析より検証し、免震効果を確認</li> </ul>
危機耐性	想定外地震時 (M9～M10級)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆超巨大地震時にねばり強い構造</li> <li>◆弱部は維持管理が容易な構造</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①漸増動的解析（IDA）による鋼製主塔の損傷制御を実施</li> <li>橋全体系として致命的な主塔柱の圧壊を回避するため、横梁上にストッパーを設置</li> <li>②海中橋脚は有害なせん断ひび割れが卓越しないよう海中部分の充填高さを調整</li> </ul>
	L1・L2津波時	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆津波による漂流船舶を鋼部材に直接衝突させない</li> <li>◆洗堀による安全性を確保</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>③漂流船舶を鋼製主塔に直接衝突させないようにRC橋脚の天端高さを決定し、RC橋脚は船舶衝突時に弾性域に留まることを照査</li> <li>④津波による海底の洗堀に対して基礎の安定性を損なわないように床付け位置を設定</li> </ul>
	火災や車両衝突時	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ケーブル1本破断があっても橋全体の崩壊には至らない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⑤静的リダンダンシー解析を行い、ケーブル破断時の冗長性よりケーブル本数を決定</li> <li>⑥動的リダンダンシー解析を行い、ケーブル1本破断時の橋全体の安全性を確認</li> </ul>
	斜面変状時	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆橋台の安全性を確保</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⑦斜面の安定性照査より不安定な土層の地盤抵抗を無視して深基礎を設計</li> </ul>

キーワード 斜張橋, 危機耐性, 耐震設計, 漸増動的解析, ダメージコントロール, リダンダンシー

連絡先 〒330-6011 さいたま市中央区新都心11-2 大日本コンサルタント(株)関東支社 TEL048-600-6691

### ①漸増動的解析 (IDA) による鋼製主塔の損傷制御

加速度波形倍率 (Scale Factor, SF) を変化させた漸増動的解析 (IDA) を実施し, L2 地震動を超える想定外地震時において, 脆性的な破壊に至らしめる弱部の把握, 余剰耐力及び対策後の効果の検証を行った。

橋軸直角方向加振時の IDA 解析結果 (図-3) より, SF = 1.29 ~ 1.32 にて主桁が主塔の柱に衝突することにより, 主塔下部の柱が終局に至ることがわかった。主塔柱が圧壊すると脆性的な崩壊に至るリスクが高まるため, 横梁上の主桁側に緩衝装置を設置し, 衝突力は支承台座を介して横梁が受ける対策とした (図-4)。対策後は, 横梁が損傷した後に下柱の圧壊に至る破壊順番となったことで, L2 地震動の 2 倍程度まで余剰耐力を有しており, 損傷制御の効果が確認された。

### ②Push Over 解析による海中橋脚の損傷制御

P12 橋脚の海中部は点検補修が容易でないことから, Push Over 解析により L2 地震時のひび割れ状況を確認した (図-5)。中空断面部は有害な斜めせん断ひび割れが広範囲に発生するが, 充実断面に変更することで海中部に斜めせん断ひび割れはほぼ発生しないことを確認した。主塔基礎の鋼管矢板基礎は鉛直支持力に余裕があったことから, 海中部までを充実断面とした。

### ⑥動的リダンダンシー解析によるケーブル破断時照査

火災や車両衝突によりケーブル 1 本が破断する事象を想定し, 動的リダンダンシー解析により周辺部材や橋全体系の安全性を照査した (図-6)。活荷重満載状態でケーブル 1 本が破断した場合は主桁下フランジに  $1.37 \epsilon y$  のひずみが発生するものの, 実事象として起こり得る活荷重半載状態でのケーブル 1 本破断では, 周辺の主桁も降伏しないことを確認した。

## 4. 危機耐性向上によるコスト影響

以上のような危機耐性の取組みによる各部材のコスト影響を表-2 に示す。3%程度のコスト増となる取組み②⑦がある一方, 橋全体のじん性向上に寄与した①鋼製主塔の損傷制御策は 0.4%増であり, 費用対効果が高い。また, 工事費全体で見てもコスト増は 0.7%であり, 狭義の耐震設計に留めず, 脆性的な破壊を回避するための危機耐性に取組む意義は大きいと考えられる。

### 参考文献

- 1) 高橋, 秋山, 片岡, 本田: 国内外の道路橋の設計指針に見られる「危機耐性」の分析, 土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 4, pp. I\_821-I\_830, 2016.
- 2) 武田, 西村: 橋梁耐震への危機耐性導入に関する一考察, 土木学会論文集 A1, Vol. 75, No. 4, pp. I\_688-I\_700, 2019.
- 3) 向田, 浦田, 竹田, 渡辺, 池田, 太田: (仮称) 気仙沼湾横断橋鋼索張橋部の設計コンセプトと計画, 橋梁と基礎, Vol. 54, pp. 12-18, 2020.10.
- 4) 平山, 吉岡, 松浦, 石井, 末松, 平野: (仮称) 気仙沼湾横断橋海上部の耐震・耐風設計と架設計画, 橋梁と基礎, Vol. 54, pp. 20-26, 2020.10.

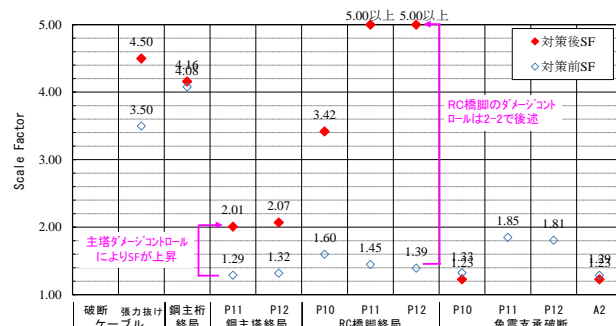


図-3 IDA 解析による各部材損傷時の SF 値

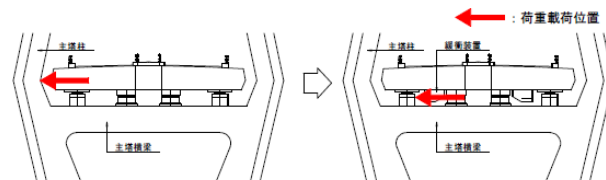


図-4 鋼製主塔の損傷制御策

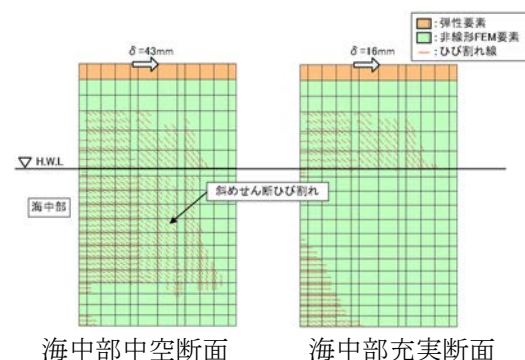


図-5 Push Over 解析による L2 地震時のひび割れ状況

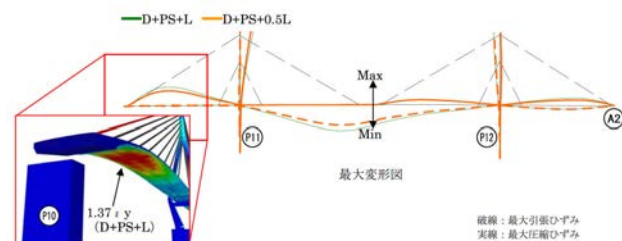


図-6 ケーブル破断時の挙動(動的リダンダンシー解析)

表-2 危機耐性確保によるコスト影響

事象	設計における取組み内容	コスト比 <sup>※</sup>	備考
想定外地震時 (M9~M10級)	①鋼製主塔の損傷制御	1.004	主塔工2基分
	②主塔RC中空橋脚の損傷制御	1.034	橋脚工1基分
L1・L2津波時	③主塔橋脚の船舶衝突時照査	1.000	橋脚工1基分
	④洗掘対策 (床付け位置設定)	1.005	基礎工1基分
火災やケーブルへの車両衝突時	⑤冗長性によるケーブル本数設定	1.000	ケーブル材料費
	⑥ケーブル 1 本破断時照査	1.000	ケーブル材料費
斜面変状時	⑦斜面変状を考慮した深礎基礎設計	1.026	橋台工1基分
斜張橋工事費に対する比率		1.007	上下部工事費

※コスト比は備考に記載の工種における対策工と標準工のコスト比のこと

謝辞: 仙台河川国道事務所には本稿の発表にあたりご支援いただいた。ここに記して謝意を表する。