

東北の土木技術を語る会（平成29年10月5日）

三陸沿岸道路 気仙沼湾横断橋の計画・設計

関東支社 構造保全技術部
吉岡 勉

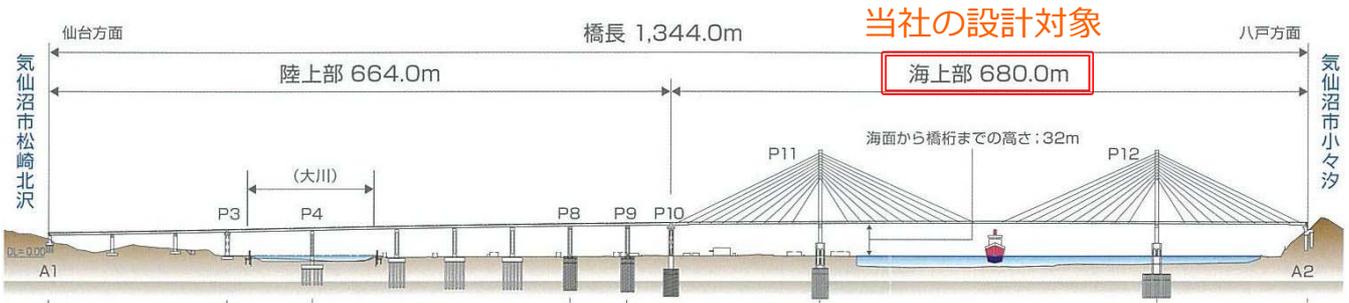


大日本コンサルタント株式会社
NIPPON ENGINEERING CONSULTANTS CO.,LTD.

発表アウトライン

1. 設計概要
2. 橋梁基本計画
3. 耐震設計(L2地震、想定外地震)
4. 耐風設計(主桁・主塔・ケーブル)
5. 架設計画(陸上部、海上部)
6. おわりに

1. 設計概要

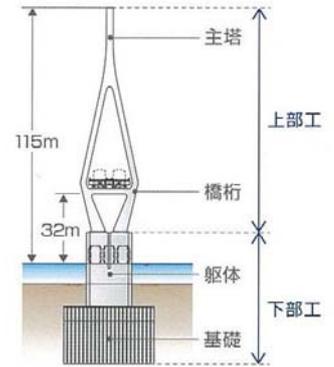


<設計条件>

路線名 : 三陸沿岸道路 気仙沼唐桑道路
 道路規格 : 第1種第3級 V=80km/h
 計画交通量 : 11,900台/日、大型車4,546台/日
 橋の重要度 : B種の橋、塩害対策S区分

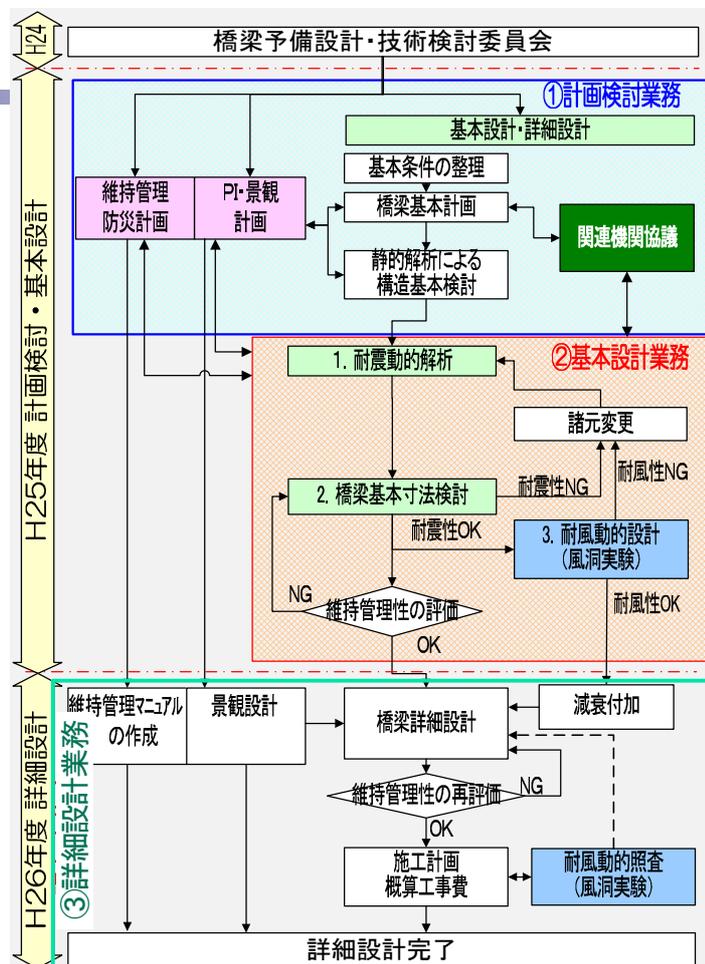


主塔断面図



設計フロー

- ✓ 当社は形式決定後から本事業に参画
- ✓ ①H25計画検討、
②H25基本設計、
③H26詳細設計、
の3業務に分けて実施
- ✓ H28年度に架設条件変更による修正設計を実施



委員会・関係機関協議

気仙沼地区技術検討委員会 (有識者・国総研・土研)

- ✓ 計6回実施 (H24.3~H28.12)
- ✓ H24道示を踏まえた鋼斜張橋の設計
- ✓ 技術的課題の解決

地域懇談会 (気仙沼市)

- ✓ 計4回実施 (H25.9~H26.11)
- ✓ 地域からの提言に対する対応
- ✓ 景観デザイン、色彩、ライトアップ

関係機関協議 (漁業組合、海上保安庁等)

- ✓ 事業促進PPP主導で多数実施
- ✓ 湾内の占有(補償)範囲の承諾
- ✓ 航路標・航路灯の仕様の承諾

船舶航行安全対策調査委員会 (有識者・漁組・海保等)

- ✓ 詳細設計中のH26.12より実施中
- ✓ 橋梁完成後及び建設工事中の航行船舶への影響調査
- ✓ 必要な船舶航行安全対策の策定

通常は設計後に行う航行安全対策調査を事業促進のため前倒しで実施

2. 橋梁基本計画



建設コンセプト(地域懇談会資料より)

気仙沼湾の象徴となり、自然豊かな風景と調和した地域の発展・復興を支える橋

設計コンセプト(技術検討委員会資料より)

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、且つ美しい形態の橋

橋梁形式比較

側面図	維持管理空間	工事費工期
<p>第1案: 鋼3+6径間連続箱桁橋+鋼斜張橋</p>	<p>主塔・主桁は2.5m程度の内空となり、内部の維持管理が可能</p>	<p>工事費比率: 1.00</p> <p>海上部上部工期: 1.5年</p>
<p>第2案: 鋼3+6径間連続箱桁橋+連続トラス橋</p>	<p>上・下弦材は1.2m程度の内空となり、内部の維持管理は困難</p>	<p>工事費比率: 1.22</p> <p>海上部上部工期: 1.9年</p>
<p>第3案: 鋼3+8+3径間連続箱桁橋+ニールセンローゼ桁橋</p>	<p>アーチリブ・補剛桁は1.8m程度の内空となり、内部の維持管理が可能</p>	<p>工事費比率: 1.19</p> <p>海上部上部工期: 2.0年</p>

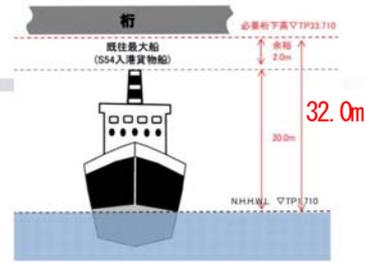
7

要求性能の設定

部材 要求性能	設定した目標性能
構造物の安全性及び耐久性	<p>耐震性・耐津波性</p> <ul style="list-style-type: none"> ○レベル2地震による損傷が限定的であり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能 (特に斜張橋上部構造の応答は弾性域にとどめる) ○海中橋脚において津波による船舶衝突及び局所洗掘に対する安全性を確保
	<p>耐風性</p> <ul style="list-style-type: none"> ○主塔・主桁は完成時及び架設時において、設計照査風速以内で発散振動が生じない。且つ、有害な渦励振を発生させない。 ○ケーブルも有害な振動現象 (渦励振やレインバイブレーション等) を発生させない。
	<p>補完性・代替性</p> <ul style="list-style-type: none"> ○主塔は、主桁の桁衝突が生じないように適切な遊間を確保するとともに、万が一、衝突が生じた場合であっても主塔に致命的な損傷を生じさせない。⇒ダメージコントロール設計 ○ケーブルは、不測の事態によりケーブルが破断した場合であっても、連鎖的な部材の破壊が生じさせないものとする。⇒リダンダンシー設計
	<p>耐久性</p> <ul style="list-style-type: none"> ○劣化進行が予測される部位を特定し、耐久性を確保する。
維持管理の確実性及び容易さ	<ul style="list-style-type: none"> ○交換や補修が困難となるケーブルや支承については使用する個数を最適化する。 ○各部材への近接目視が容易に可能となるように、点検空間を確保するとともに、適切に点検設備を設置する。 ○点検の容易さに配慮した細部構造 (マンホールやダイヤフラム開口等の形状) とする。

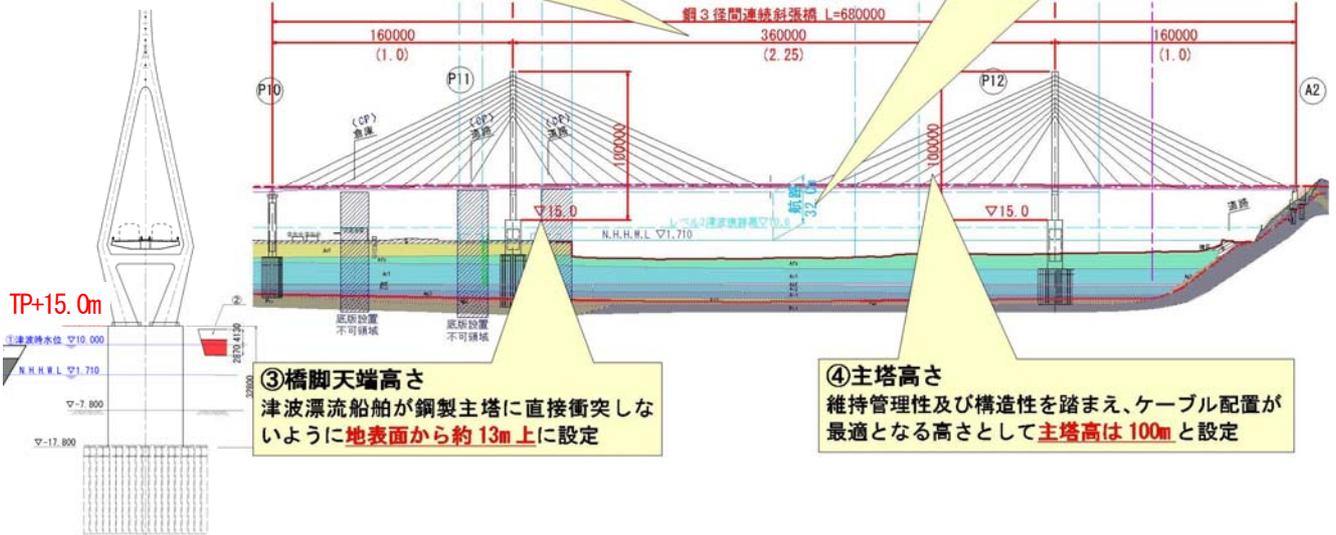
8

橋梁基本スケルトン計画



②支間割
橋脚の立地条件と斜張橋としての構造性より
160m+360m+160m (1:2.25:1) と設定

①桁下クリアランス
既往最大船舶のマスト高に余裕高 2m
以上を加えた高さより 32.0m と設定



③橋脚天端高さ
津波漂流船舶が鋼製主塔に直接衝突しない
ように地表面から約 13m 上に設定

④主塔高さ
維持管理性及び構造性を踏まえ、ケーブル配置が
最適となる高さとして主塔高は 100m と設定

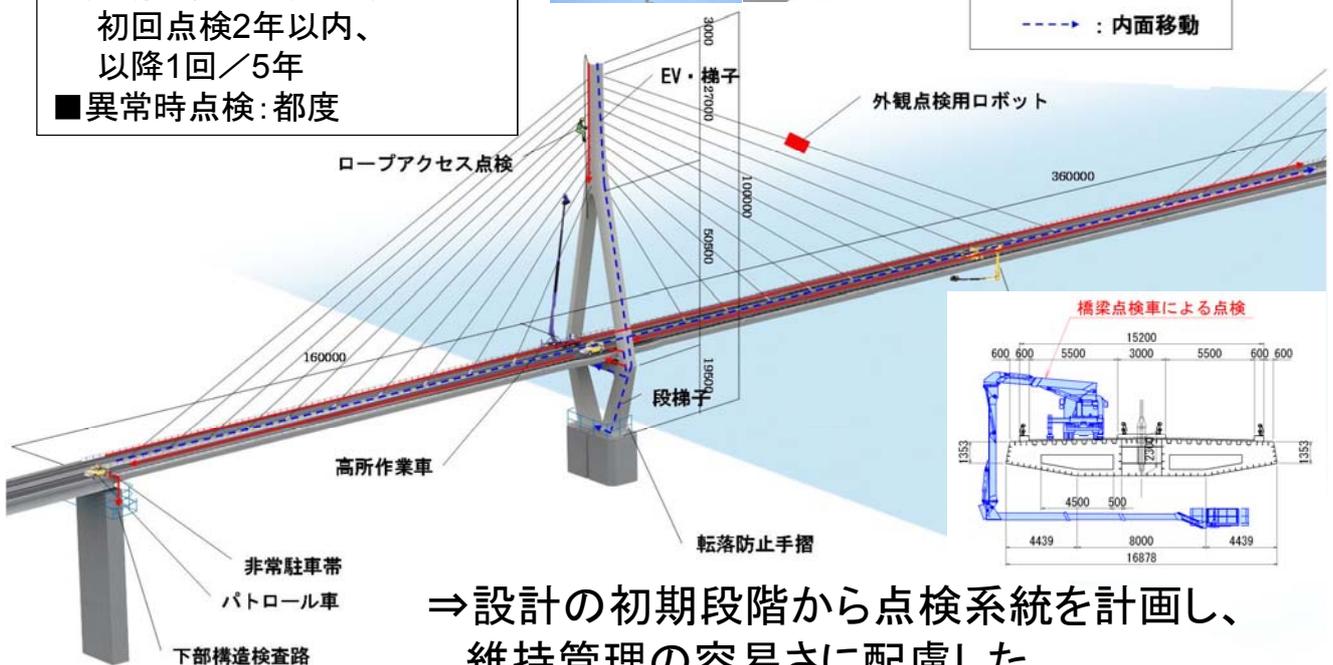
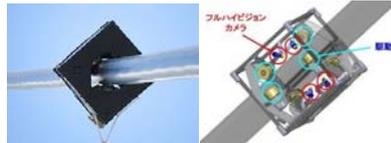
維持管理に配慮した主構造の検討(1)

◆ 点検系統計画の概要

<点検スキーム>

- 通常巡回: 1回/2日
- 定期点検及び定点観測:
初回点検2年以内、
以降1回/5年
- 異常時点検: 都度

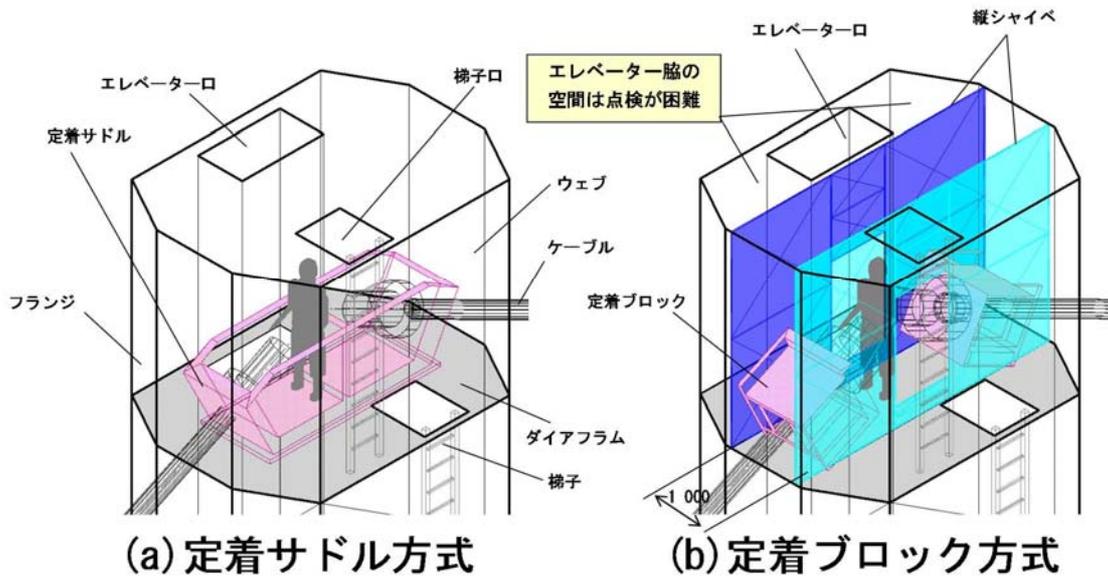
ケーブル点検用ロボット



⇒設計の初期段階から点検系統を計画し、
維持管理の容易さに配慮した。

維持管理に配慮した主構造の検討(2)

◆ 主塔側ケーブル定着方式



⇒最も狭隘となるケーブル定着部周辺の点検空間、及びケーブルの交換作業性の観点より、「定着サドル方式」を採用

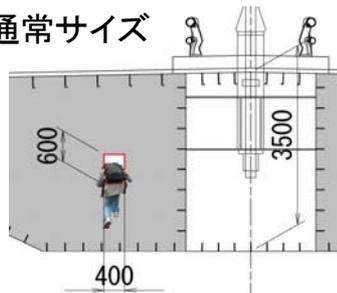
11

維持管理に配慮した主構造の検討(3)

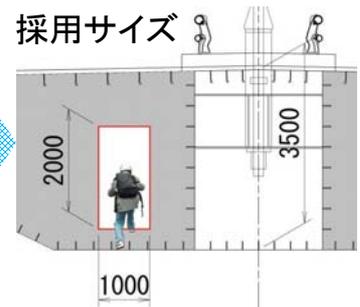
◆ 桁端マンホールのサイズ



通常サイズ



採用サイズ



◆ 主塔内段梯子の形状



段梯子の開口が狭い例

⇒実物大実験により角部の維持管理空間を検証

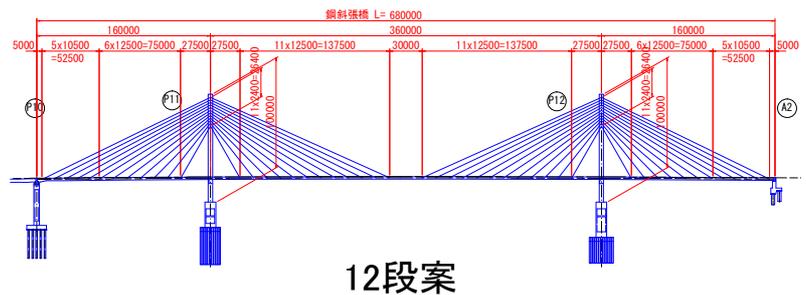
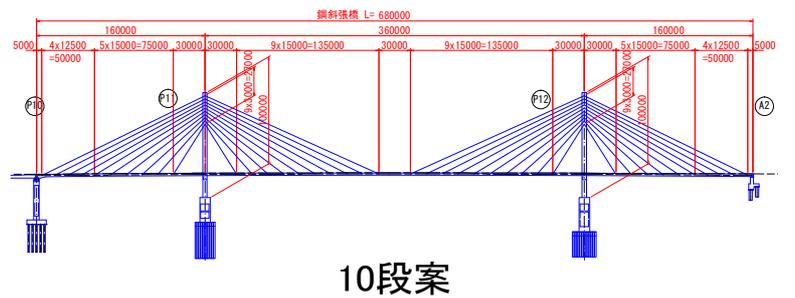
12

リダンダンシーに配慮したケーブル本数設定

◆ 設定方針

- ✓ 工場製作型ケーブルの8段以下では構造不成立のため、10段案と12段案を選出
- ✓ 静的リダンダンシー解析より、ケーブル1本破断時の安全性を照査
- ✓ 照査を満足する本数案のうち、維持管理の容易さより少ない方の10段案を選定

◆ ケーブル本数案



13

景観設計：主塔の形状検討

- ・主塔全体のバランス→全体的な重心バランスが整い、伸びやかな印象を獲得
- ・自然に調和するフォルムと存在感→主塔全体の印象を和らげ、圧迫感を緩和



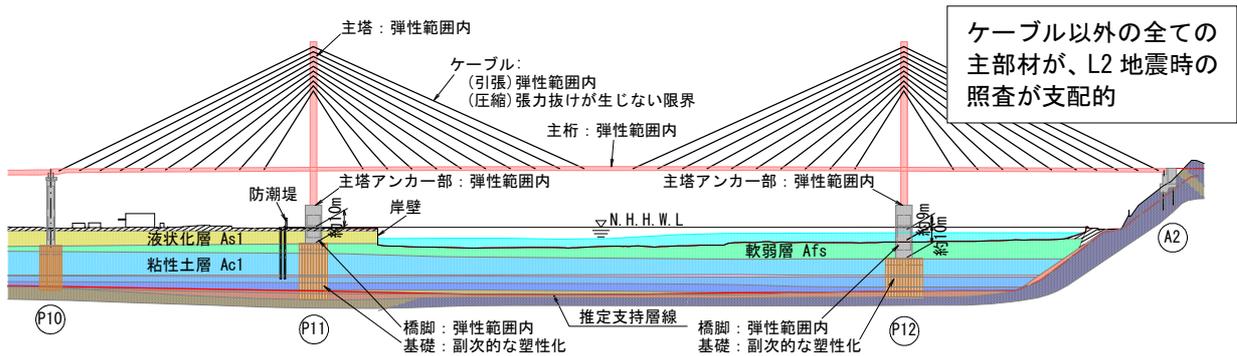
14

3. 耐震設計(L2地震、想定外地震)

◆ 検討ステップ

- ① 目標耐震性能を満足するための**各部材の限界状態を設定し**、基本応答特性を把握
- ② 問題点の把握と**免震構造の必要性の判断**
- ③ 液状化地盤・軟弱地盤における**免震構造の適用性の検討**
- ④ 想定外地震に対する**ダメージコントロール設計**

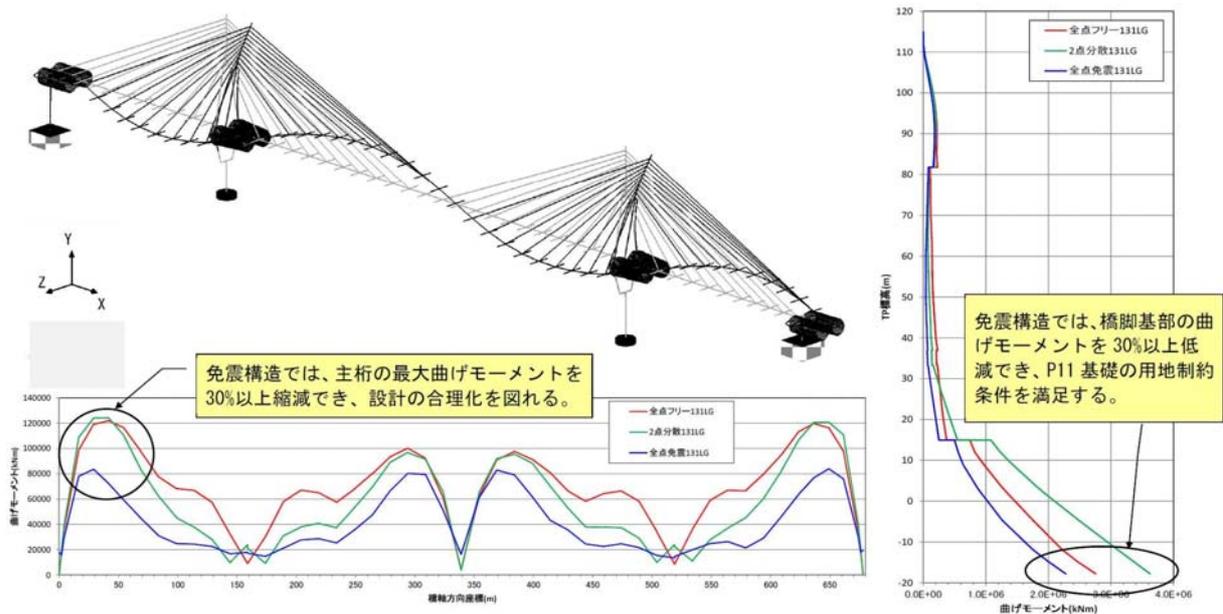
◆ 目標耐震性能2における各部材の限界状態の設定



15

基本応答特性の把握

◆ 免震構造による地震時応答の低減効果



⇒免震構造を採用することでP11主塔基礎の用地制約条件を満足し、**大幅な設計合理化が図れる**ことを確認。

16

免震構造の適用性の検討(1)

◆ 基礎の床付け位置

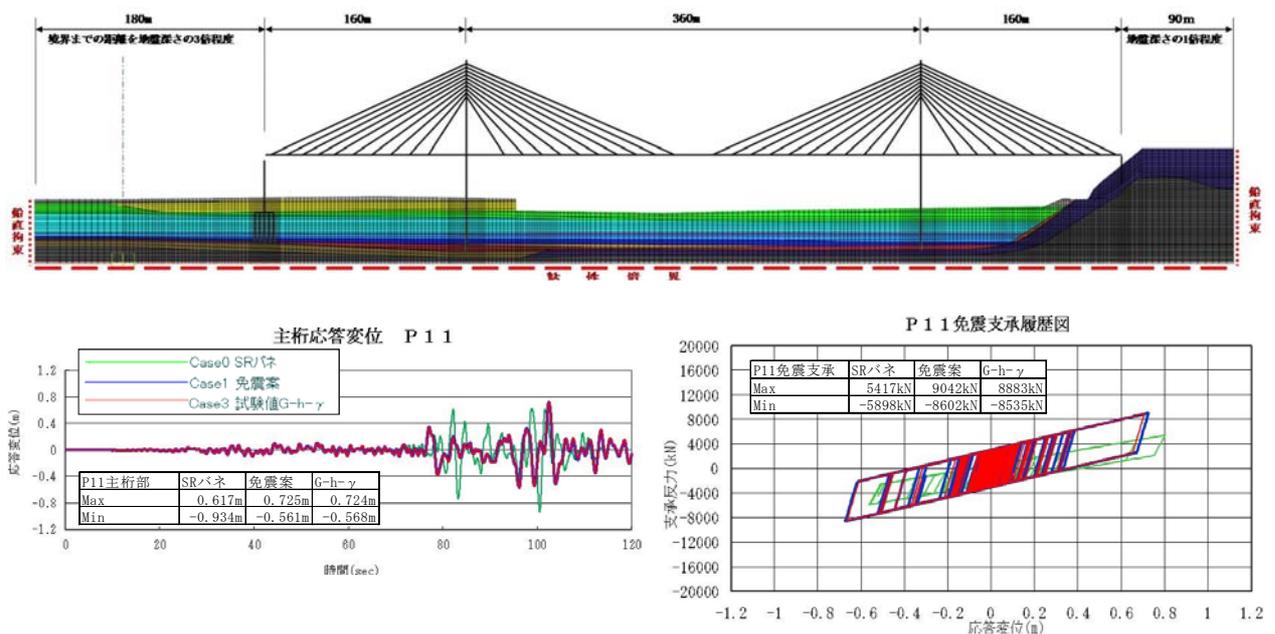
	CASE1: 液状化地盤を避けた高さ	CASE2: 現地盤-0.5mの高さ(地盤改良併用)
正面図 (→橋軸方向)		
概算工事費 比率(%)	1.00	1.14
評価	○ CASE2よりも安価となる。	△ 地盤改良が付加される分CASE1よりも14%高価となる。最小形状となっているため、基礎平面寸法はCASE1と同等。

⇒液状化地盤を改良するのではなく、液状化層を避けた高さまで基礎の床付けを下げることに対応

17

免震構造の適用性の検討(2)

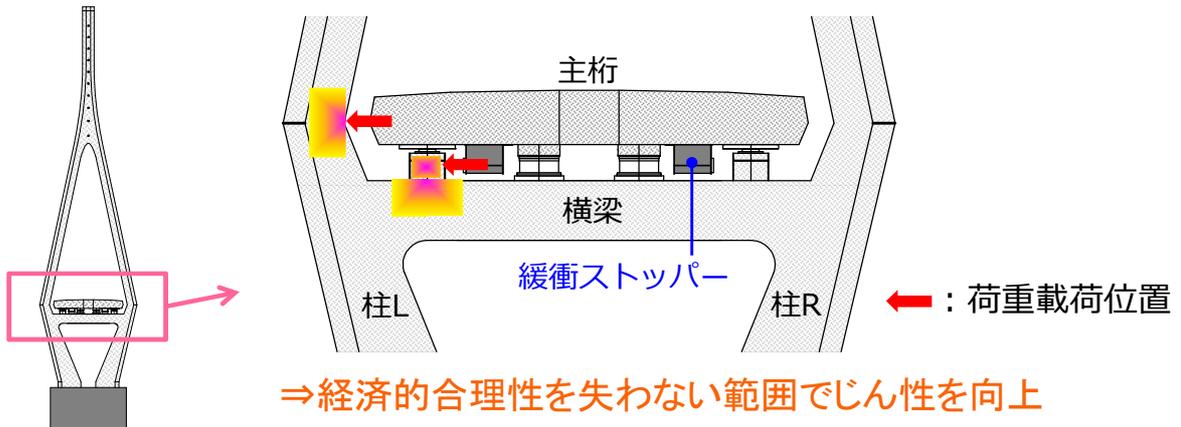
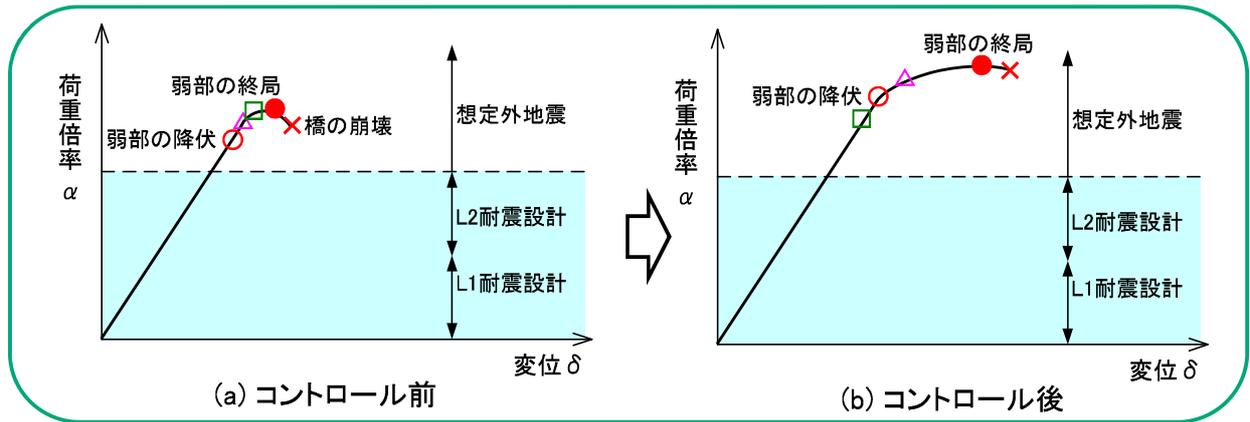
◆ 2次元FEM動的相互作用解析



⇒軟弱地盤とは共振せず、免震支承が有効に機能することを確認

18

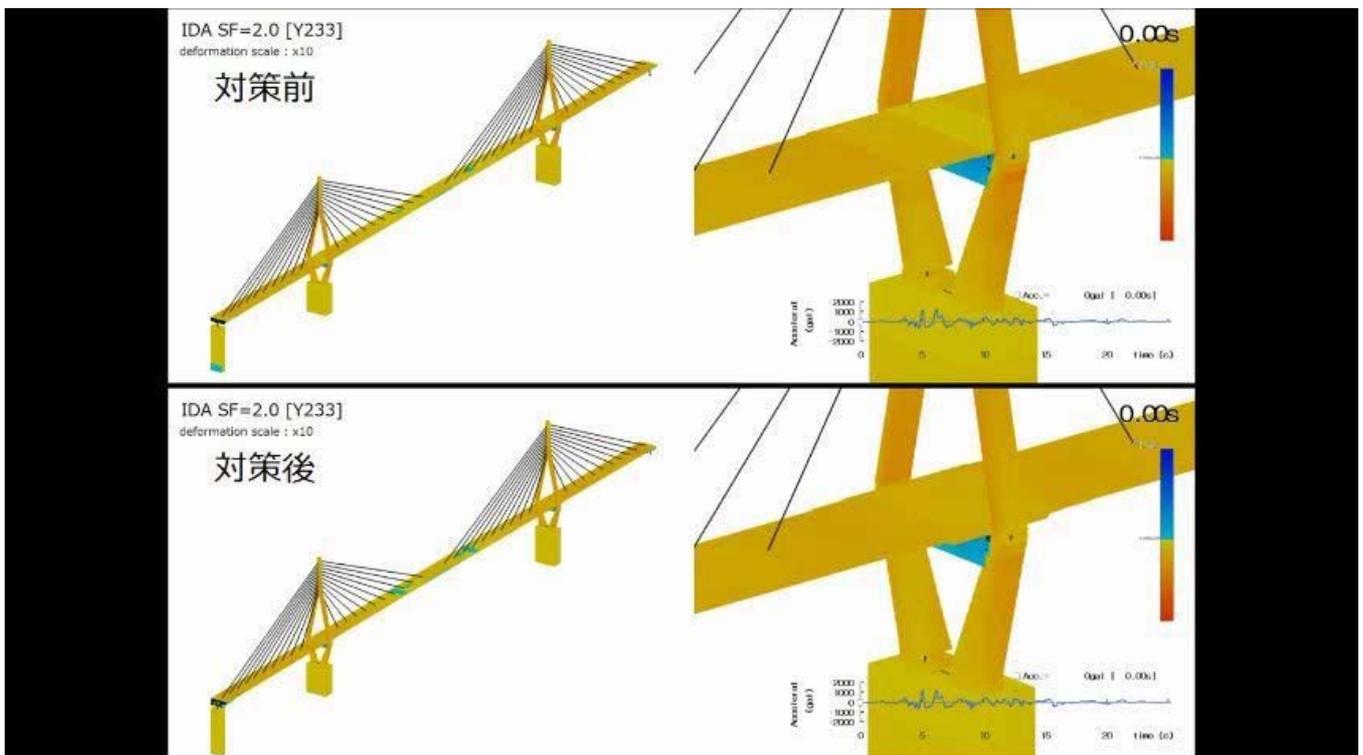
想定外地震時のダメージコントロール設計



解析手法： 漸増動的解析

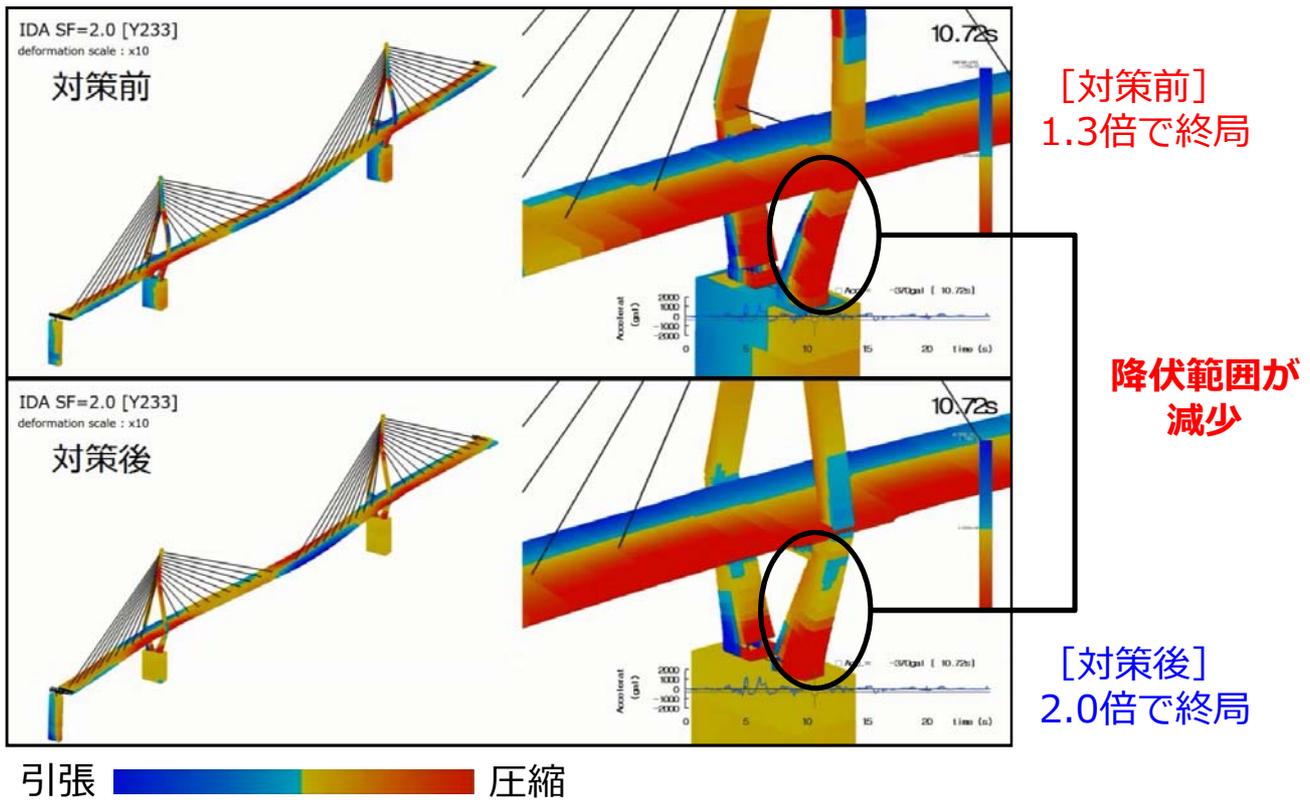
- ・レベル2地震動を1～5倍し、複数回動的解析を実施
- ・一つ一つは通常の動的解析

- ・何倍で終局に至るか
- ・弱点の把握



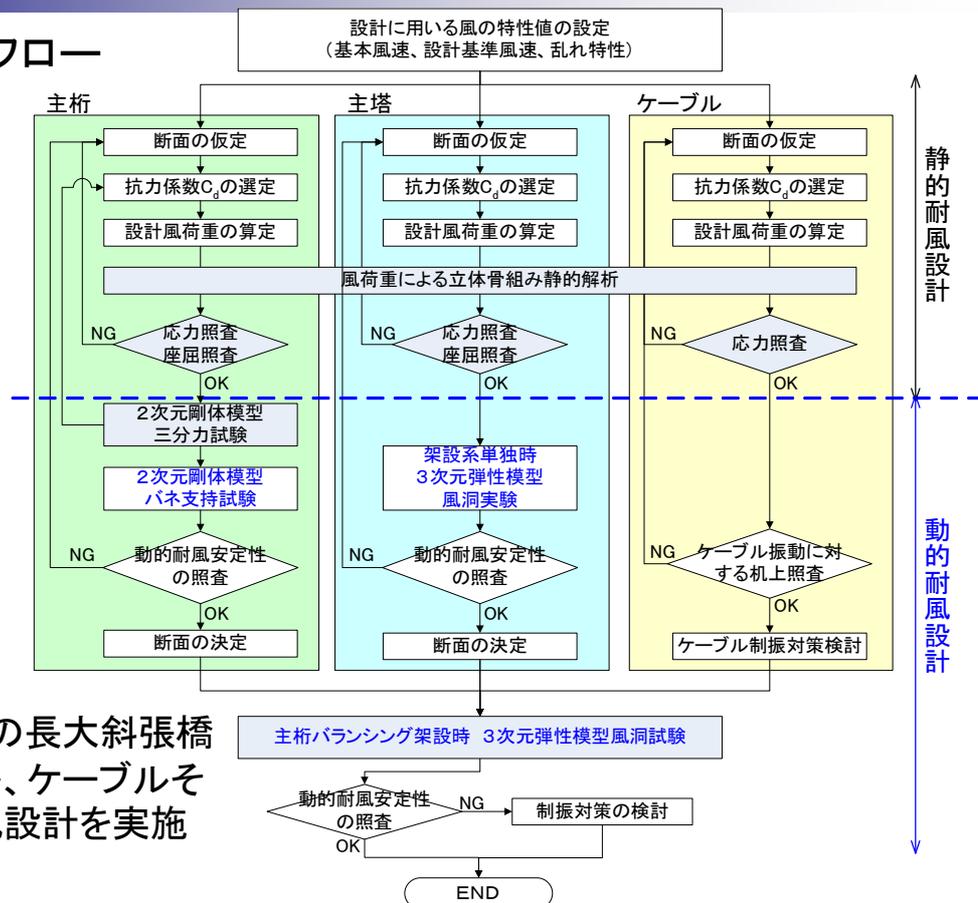
漸増動的解析結果

対策前後比較 (レベル2地震動×2倍の動的解析結果)



4. 耐風設計(主桁・主塔・ケーブル)

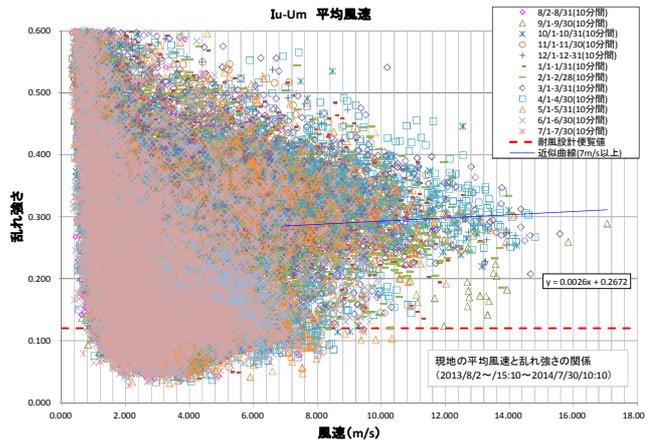
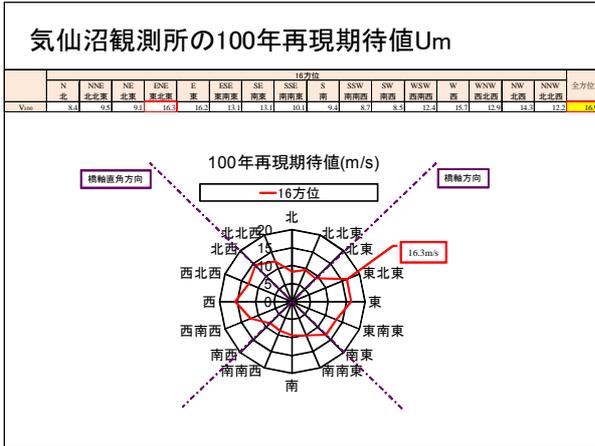
◆ 耐風設計フロー



支間長200m以上の長大斜張橋であり、主桁、主塔、ケーブルそれぞれの動的耐風設計を実施

現地の風特性

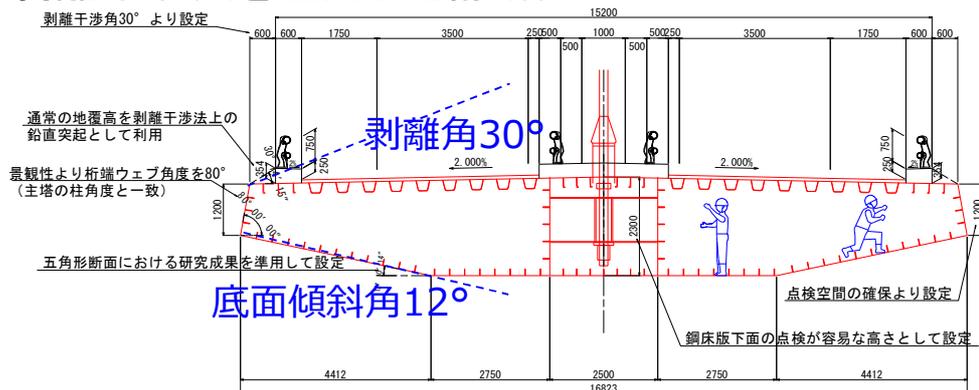
- ✓ 過去の風観測データより、現地の100年再現期待値を基にした設計基準風速は26.5m/s程度であり、安全側より耐風設計便覧値42.3m/sを採用
- ✓ 1年間の追加風観測より、風の乱れ強さは約30%と大きく、主塔や主桁の不安定現象は生じにくい傾向と言える。



23

主桁完成時の風洞実験(1)

◆ 剥離干渉法を適用した桁断面



◆ バネ指示試験状況

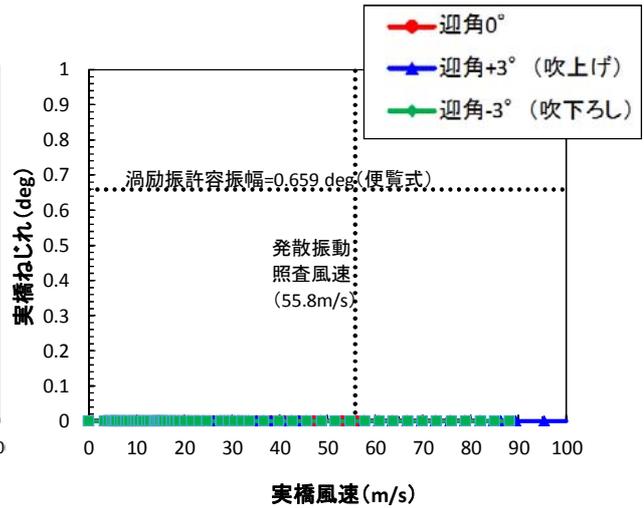
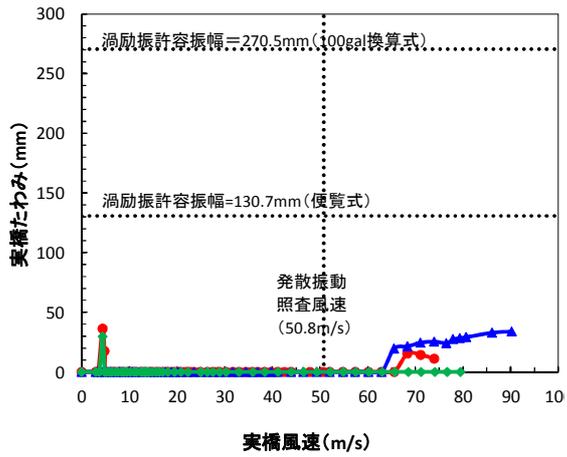


剥離干渉法: 耐風付加物を取り付けることなく、構造部材および道路機能に必要な部材の配置や角度を変えることだけで耐風安定性を確保する。

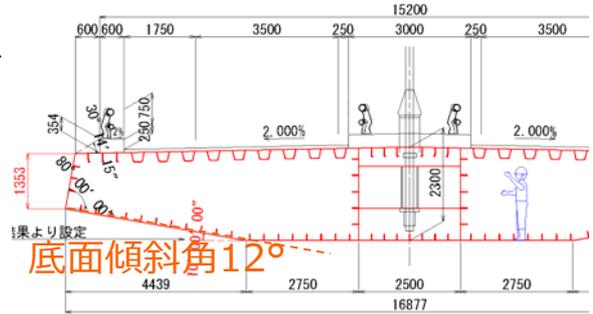
24

主桁完成時の風洞実験(2)

◆ 主桁のバネ支持試験結果



- ✓ 設定した基本断面で発散振動は生じず、たわみ渦励振、ねじれ渦励振の発現振幅は許容振幅を下回っており、**耐風安定性を満足した。**
- ✓ 底面の傾斜角は耐風安定性及び維持管理性に優れる**10° に変更した。**



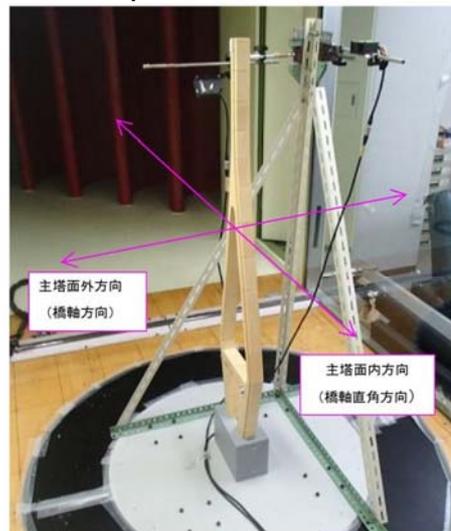
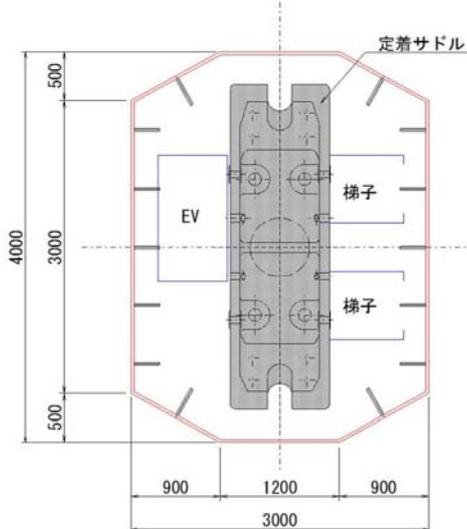
最終断面 (風洞実験後)

25

主塔架設系単独時の風洞実験(1)

◆ 主塔面取り断面と風洞模型

縮尺1/80 (模型高約1.4m)



- **主塔は架設系の単独時が最も不安定**となるため、風洞実験による照査を行った。
- 主塔断面にも剥離干渉法を適用し、「**面取り断面**」と「**隅切り断面**」の2案を比較検討した。

26

主塔断面の選定

		面取り断面	隅切り断面	参考: 矩形断面			
断面概要図							
耐風安定性	【完成系: 恒久的】 橋軸方向風に対する 主塔面内振動	・発現振幅は隅切り断面より小さい。	◎	・発現振幅は面取り断面より大きい。	○	— (未実施)	—
	【架設系: 一時的】 橋軸直角方向風に対する 主塔面外振動	・隅切り断面より振幅が大きい。	○	・面取り断面より振幅は小さい。	◎	・耐風安定性を満足しない。	×
	製作性	・比較案中 2 位である。	○	・比較案中 最も多い。	△	・比較案中 最も少ない。	◎
	維持管理性	・点検空間も確保されている。	○	・定着サドル周りの空間は狭隘である。	△	・箱内空間は最も広い。	◎
	経済性(製作費直工)	(比率: 1.00)	◎	(比率: 1.09)	○	—	—
総合評価		採用					

⇒耐風安定性は同程度であり、製作性、維持管理性、経済性を重視して「面取り断面」を採用した。

27

主塔架設系単独時の風洞実験(2)

◆ 面取り断面: 面外たわみ渦励振時動画

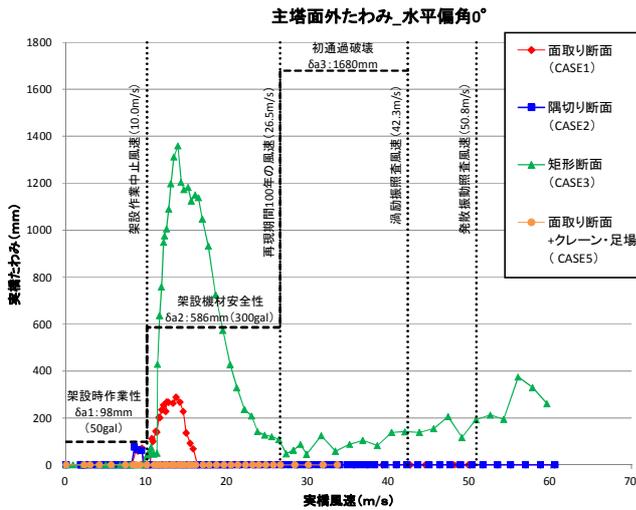


⇒架設作業性に関する許容振幅を超過する振幅が発生

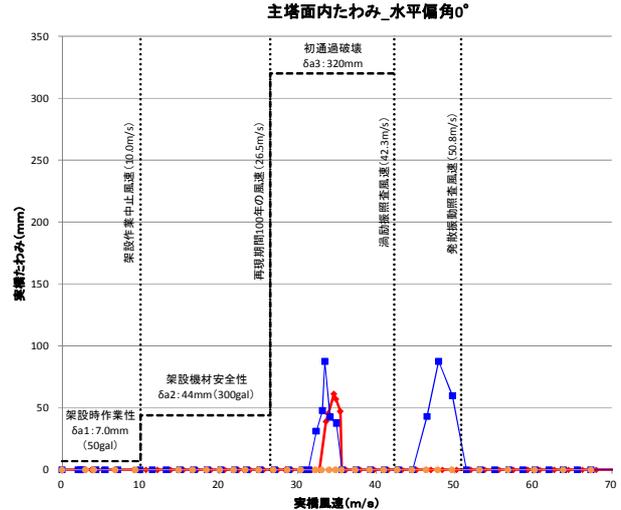
28

主塔架設系単独時の風洞実験(3)

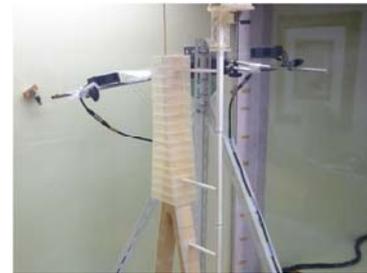
◆ 主塔の面外振動



◆ 主塔の面内振動



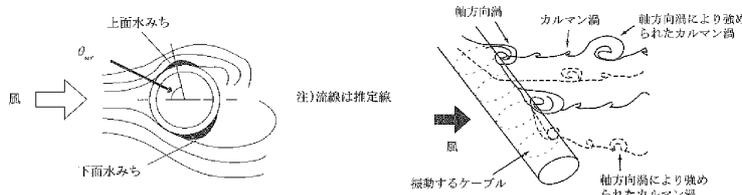
⇒面外振動の耐風安定性は、隅切り断面より面取り断面の方がやや劣るものの、足場を設置することで許容振幅以内に収まる。



29

ケーブルの制振対策の必要性

◆ レインバイブレーション事例(荒津大橋)



◆ 制振装置の不具合事例



制振ゴムが破断して本体が損傷



制振ダンパーの粘性体漏れ

⇒空力対策を施し潜在的に耐風安定性を高めることが重要と考え、
①空力対策と②減衰付加対策を併用して相互効果を図る方針とした。

30

ケーブルの①空力対策

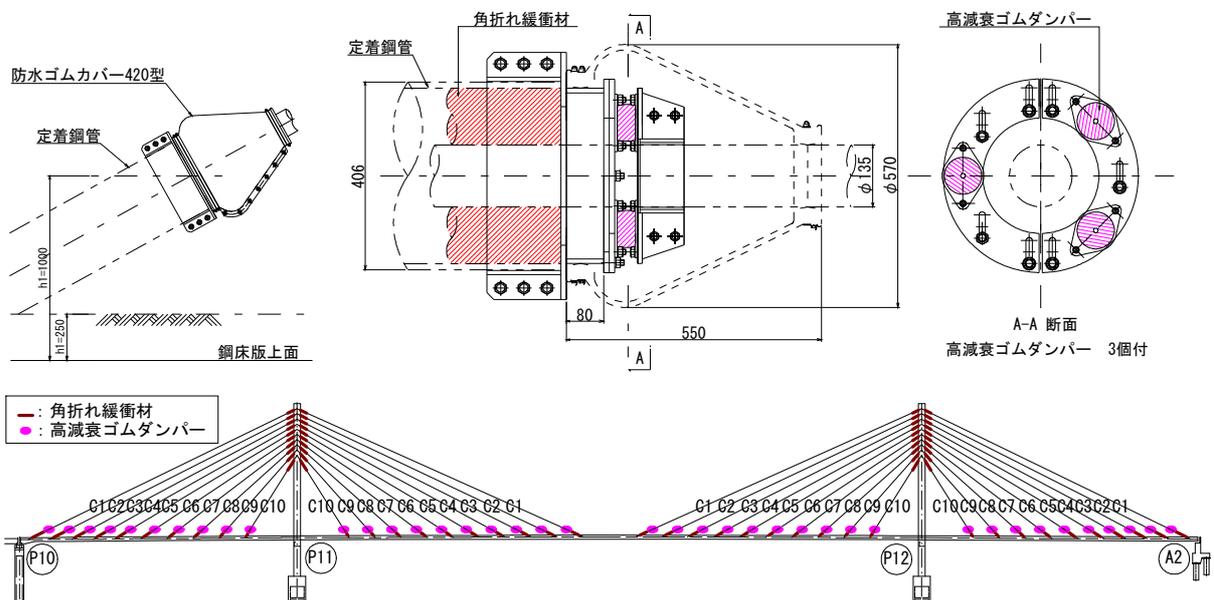
- ✓ 風洞実験レベルでは新技術である「スパイラル突起」が優れるが、実績がなく、工事段階で最新の知見を踏まえて選定する方針となった。

	平行突起	スパイラル突起	ディンプル	
外観及び水路確認				
形状例				
耐風特性 (実験レベル)	静的空力特性 (抗力係数 C_D)	1.08	0.63	
	渦励振特性	規則性のあるカルマン渦が発生しており、渦励振が発生	3次元効果によりカルマン渦が抑制されることから、渦励振が発生しない	臨界レイノルズ数域に達する風速域以上では、カルマン渦が抑制されるが、それ以下の風速では渦励振が発生
	レインバイブレーション特性	雨滴が乗り越えない突起高さを採用。水路確認試験において上面側水路は確認されない	突起5mmでは雨滴が乗り越えないため上面側水路は確認されない	水路確認試験(11m/s以下)では上面側水路が確認されている
	ドライギャロッピング特性【参考】	— [計測データなし]	非定常空気力係数が負の値を示し安定を示す	臨界レイノルズ数域でドライギャロッピング発現の可能性が示唆されている 実橋ケーブルの観測で振動報告がある
実績	東神戸大橋、梅沢橋で適用実績を有する	工場製作型ケーブルとしては実績がなく、新技術のケーブルである【NETIS:KT-140029-A】 現場収束型ケーブルのヘリカルワイヤ策は明石海峡大橋等多数の実績を有する	多々羅大橋、ストーンカッターズ橋等で適用実績を有する	

31

ケーブルの②減衰付加対策

- ✓ 角折れ緩衝装置は経年的に隙間が生じるため減衰効果は期待しない
- ✓ 対数減衰率 $\delta > 0.02$ を設計条件として、高減衰ゴムを全ケーブルに設置
- ✓ 高減衰ゴムを3個設置して定着部の曲げを防止し、維持管理しやすいよう鋼床版から1.0m上に設置



32

5. 架設計画(陸上部、海上部)

<当初計画条件>

- ・可航幅：130m以上(加木漁船の2倍)
- ・断片的な航路閉鎖を許容

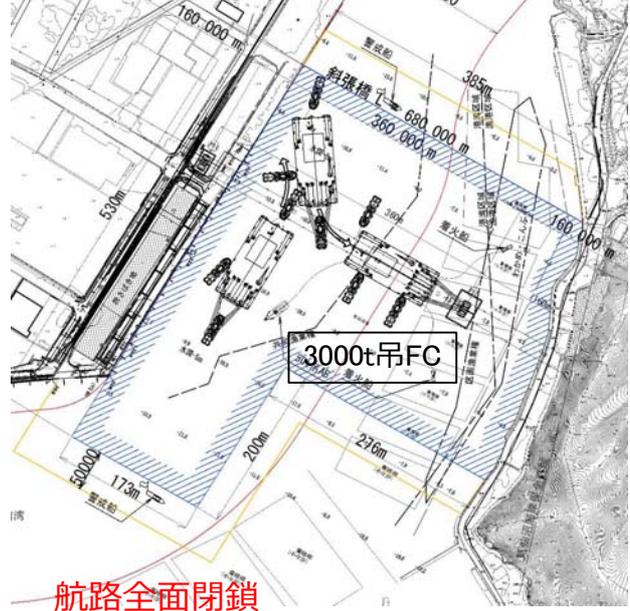
<修正計画条件>

- ・可航幅：190m以上(下部工事実績)
- ・航路閉鎖は基本不可。夜間は可能

◆ P11主塔一括架設(当初計画)



◆ P12主塔一括架設(当初計画)



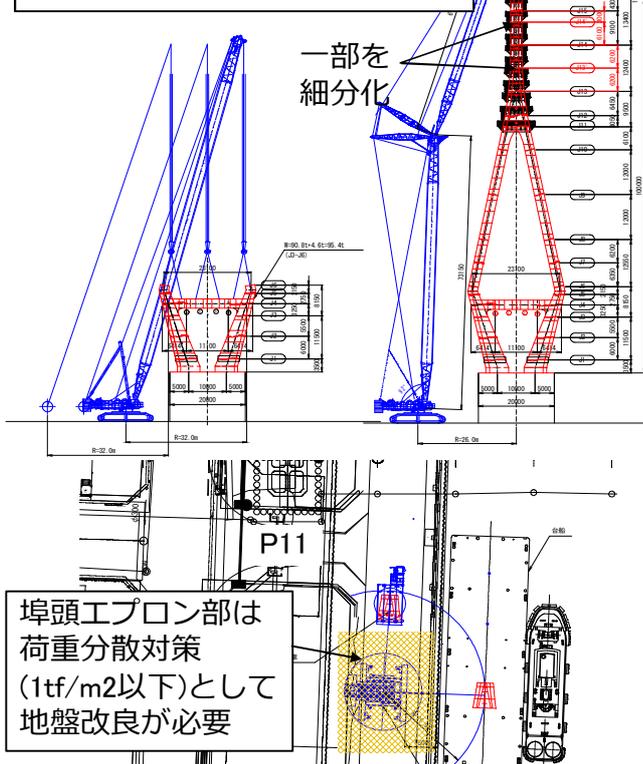
33

主塔架設修正計画

※本計画は設計標準案であり、
今後施工業者により変更される可能性あり

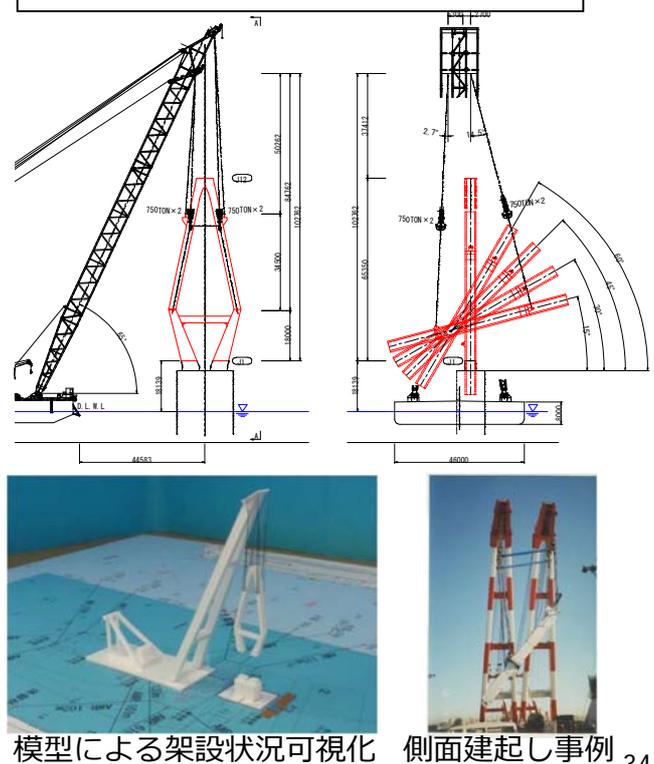
◆ P11主塔架設(陸上部)

750t吊FCによる単ブロック架設



◆ P12主塔架設(海上部)

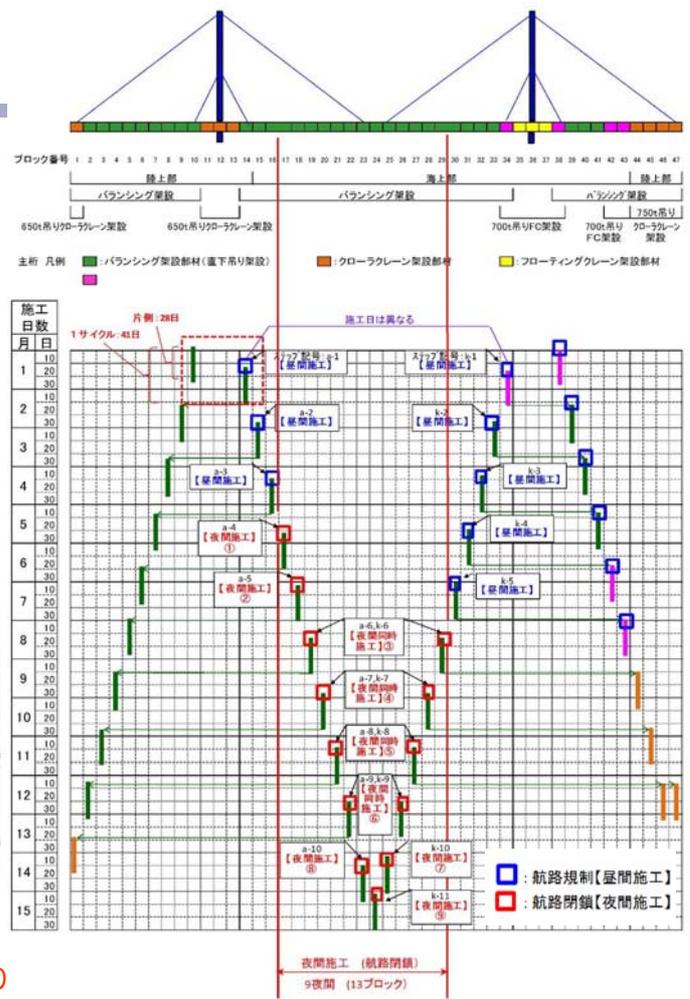
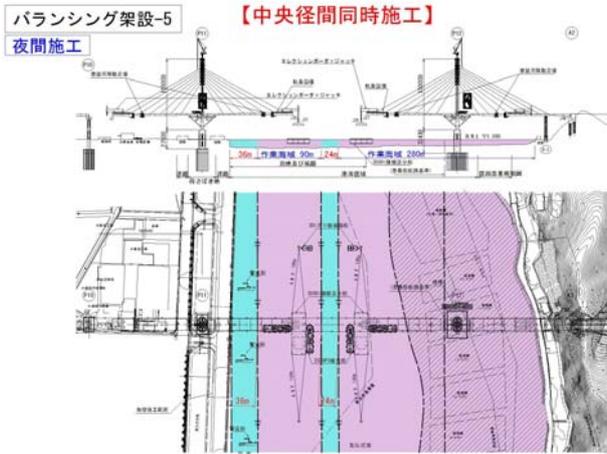
3000t吊FCによる側面吊り上下分割架設



34

主桁架設修正計画

- ✓ 中央径間側の直下吊り張出し架設において**航路が二分**
- ✓ 可航幅190m以上を確保できない**13ブロックを夜間施工**
(9夜間、23時～5時)



※本計画は設計標準案であり、
今後施工業者により変更される可能性あり

6. おわりに

- ✓ 本橋の計画検討段階から基本設計、詳細設計、架設計画とのべ3年間に渡って参画したことは**当社として大変貴重な財産**
- ✓ 「維持管理性への設計段階からの配慮」や「損傷制御設計の導入」はH24道示で新たに記載された概念であり、今後の**長大橋設計のスタンダードに成り得るものと自負**



H26.6.29着工式



局長表彰：詳細設計業務
(H27.7.16)



P12鋼管矢板基礎施工状況
(H27.10.16撮影)



事務所長表彰：修正設計業務
(H29.7.19)