

令和元年度 田中賞「作品部門」(改築)

櫃石島高架橋(トラス部)の耐震補強



企業者: 本州四国連絡高速道路(株)

設計者: 本州四国連絡高速道路(株)、大日本コンサルタント(株)、(株)横河ブリッジ

施工者: (株)横河ブリッジ、四国旅客鉄道(株)

道路鉄道併用橋の耐震補強

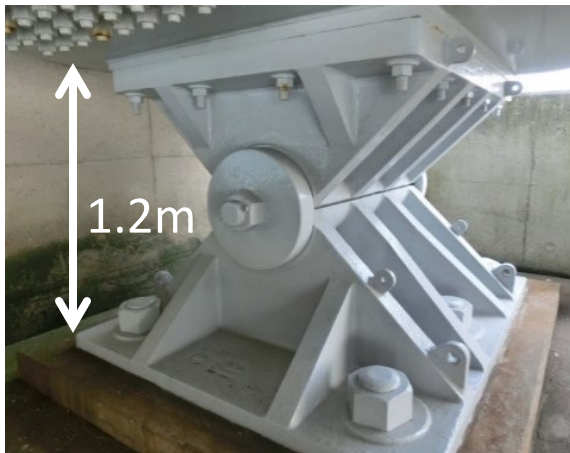
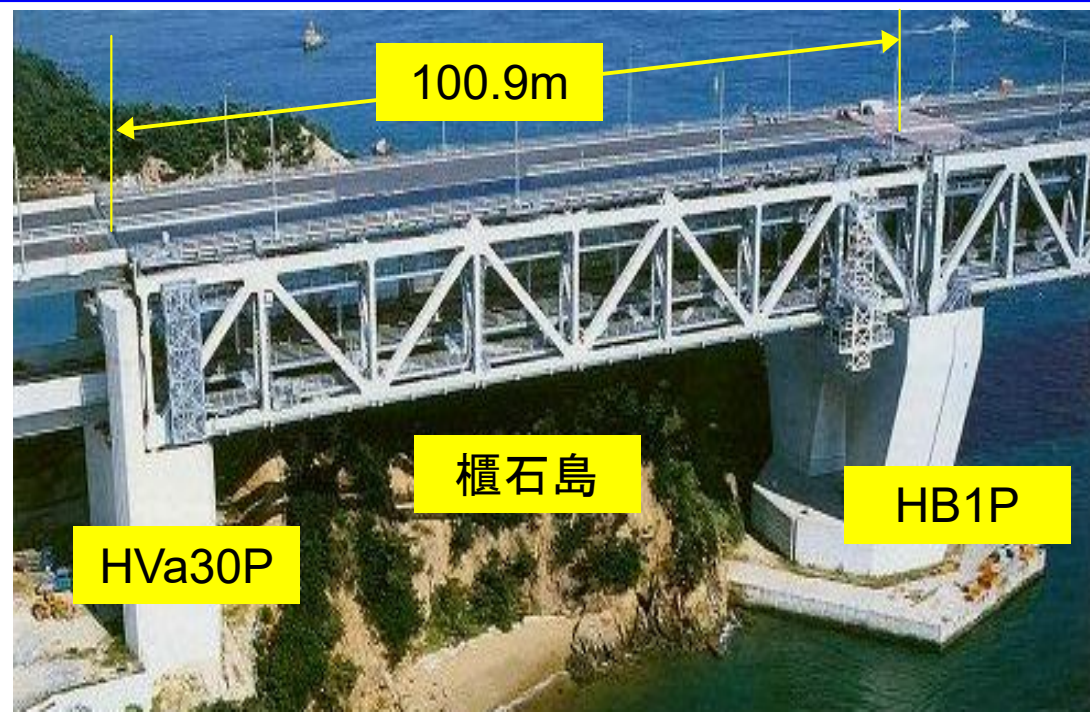
- 鉄道、添架構造物があり施工制約が厳しい
- 各管理者との共同事業となる
- 道路だけでなく鉄道の要求性能を満足

耐震補強として国内初となる全体系の免震化

- 耐震補強において、初めて免震効果を積極的に考慮
- 鉄道上空及び橋全体の補強量を最小化

大幅なコスト縮減(約2/3)

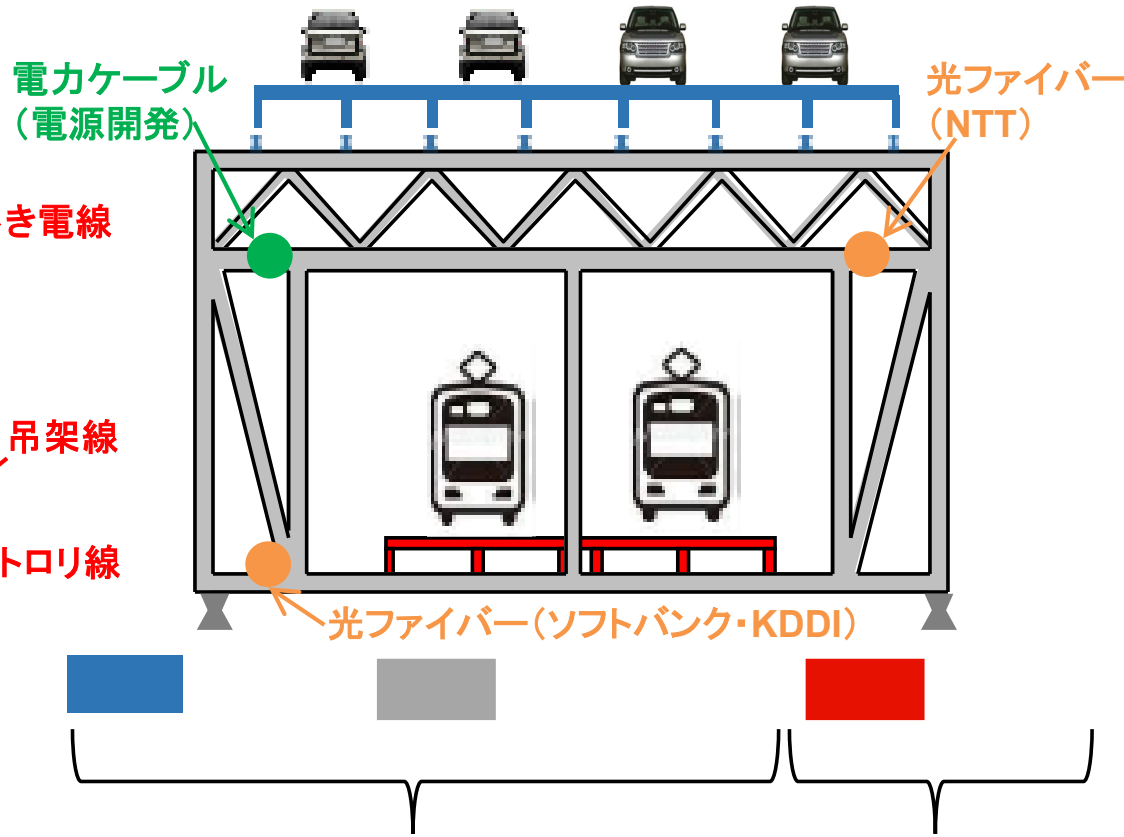
櫃石島高架橋(トラス部)



鋼製ピン支承 (HVa30P)

橋梁形式	垂直材付き単純ダブルデッキワーレントラス
橋長(支間)	104.95m (100.90m)
支承形式	<ul style="list-style-type: none"> ●トラス桁支承 ・HVa30P : ピン支承(固定) ・HB1P : ピン・ローラー支承(可動) ●道路桁支承 ・SW1 : BP・A支承(固定) ・SW2~9 : BP・A支承(可動)
上部工重量	36,480kN

道路鉄道併用橋

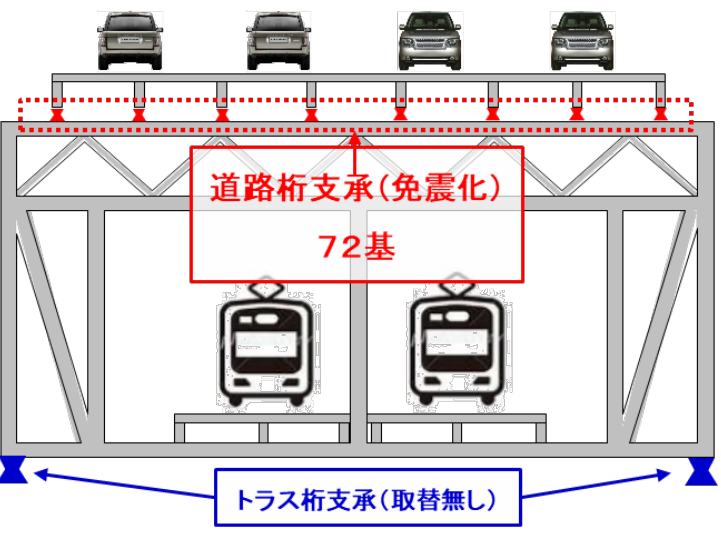


鉄道、添架構造物があり施工制約が厳しい

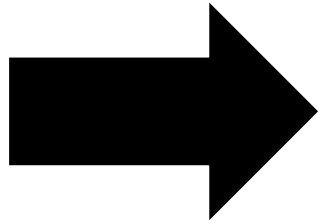
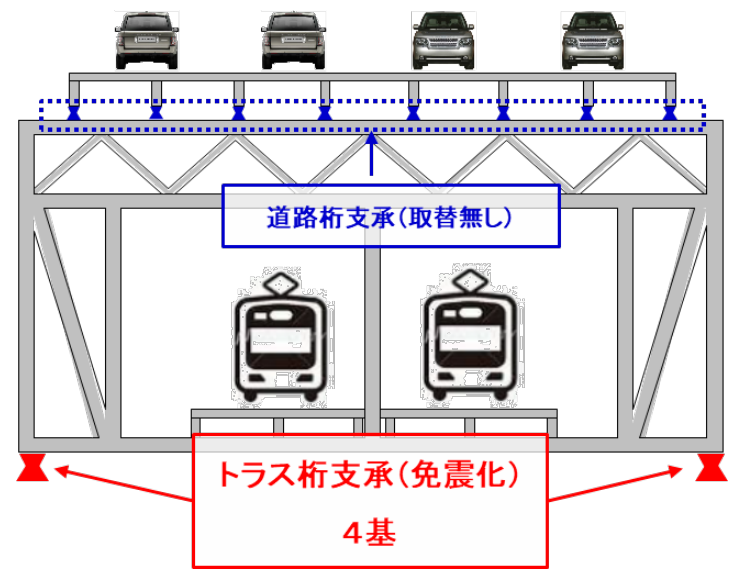
道路、鉄道、添架物の管理者との共同事業

道鉄併用橋の耐震補強で国内初となる全体系の免震化

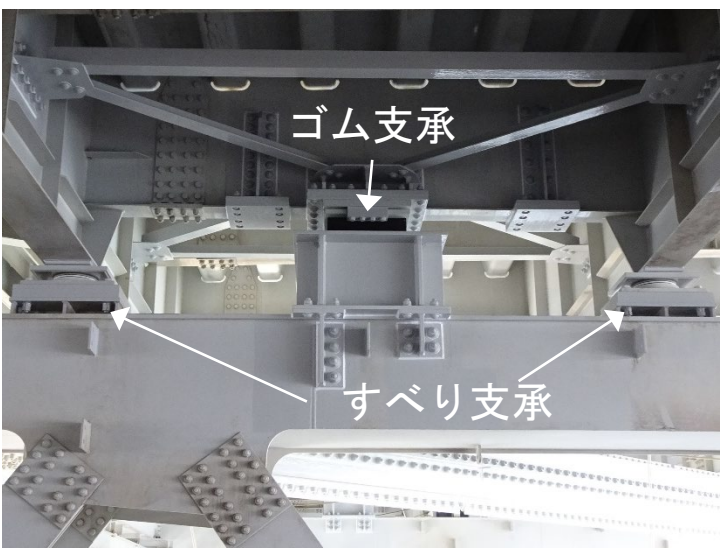
従来工法



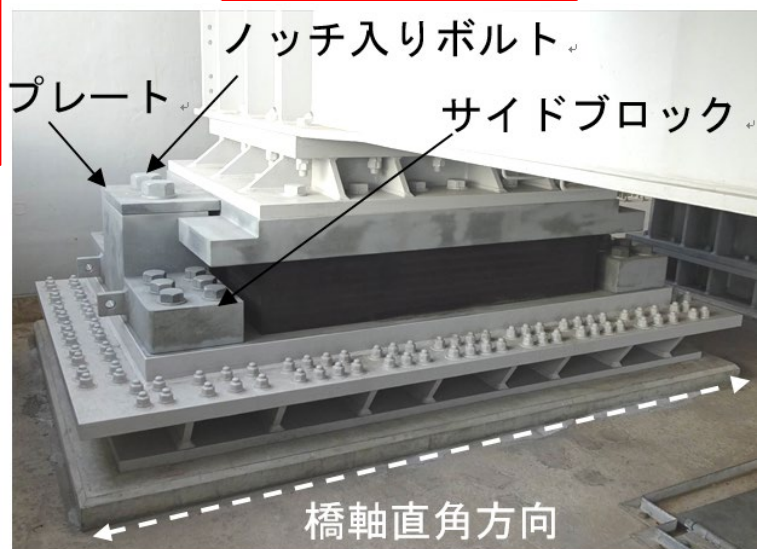
今回工法



施工制約のある
鉄道上空の
作業量を削減



床組免震



免震ゴム支承 (HVa30P)

耐震補強における要求性能と実現性能

道路と鉄道の両方の耐震性能を満足



道示の性能に加え、L1時の鉄道走行性を満足する必要がある

適用基準	橋の重要度	地震動	地震時の要求性能	実現性能	対象施設
道示	B種の橋	L1	耐震性能1 ・地震によって橋としての健全性を損なわない性能	・橋本体の損傷がない	道路部 道鉄共用部
		L2	耐震性能2 ・地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能	・橋本体の損傷がない (トラス桁免震化、道路桁支承8基の取替を実施)	
鉄標	重要度の高い構造物	L1	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 ・構造物の変位を走行安全上定まる一定値以内に留めるための性能	・構造物の変位が走行安全な範囲に留まる ※ロックオフ機構の有無に関わらず、走行安全性は確保	鉄道部
		L2	構造物としての安全性 ・構造物全体系が破壊しないための性能 復旧性 ・構造物の機能を使用可能な状態に保つ、あるいは短期間で回復可能な状態に留めるための性能	・構造物としての安全性、復旧性を確保 (上記免震化により、一部の支承部及び横構の補強を実施)	

耐震性能照査及び耐震設計

○建設時

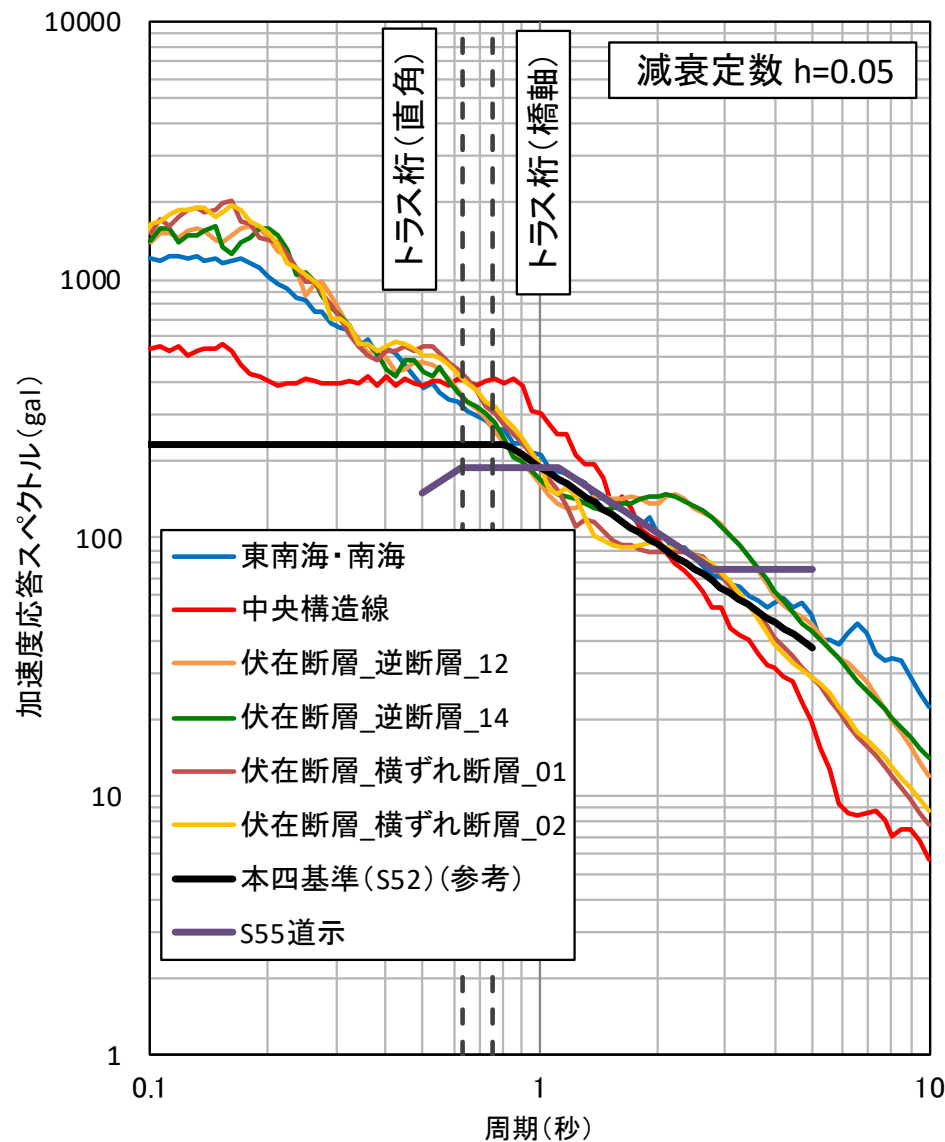
地震動	内容
支間長 200m以下	道路橋示方書 ※本橋の設計
支間長 200m超え	道路・鉄道の設計基準、土木学会、日本鉄道施設協会での審議を踏まえ設定

○耐震補強時

道路・鉄道分野の耐震に関する学識者等による委員会※での審議を踏まえ設定

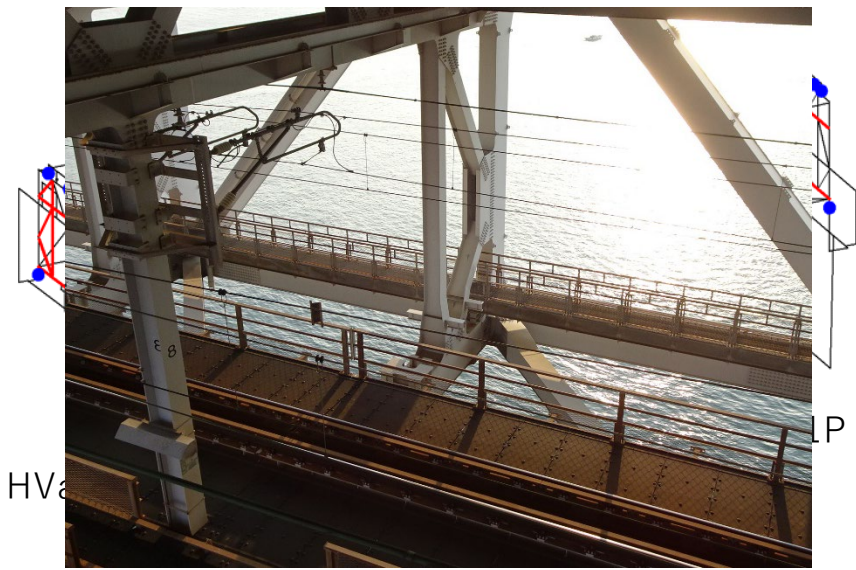
※本四耐震補強検討委員会
(委員長: 家村浩和京都大学名誉教授)

地震動	内容
L1	建設時に用いた設計地震動
L2	近隣断層等を考慮した断層破壊シナリオによる設計地震動



HVa30Pの入力地震動

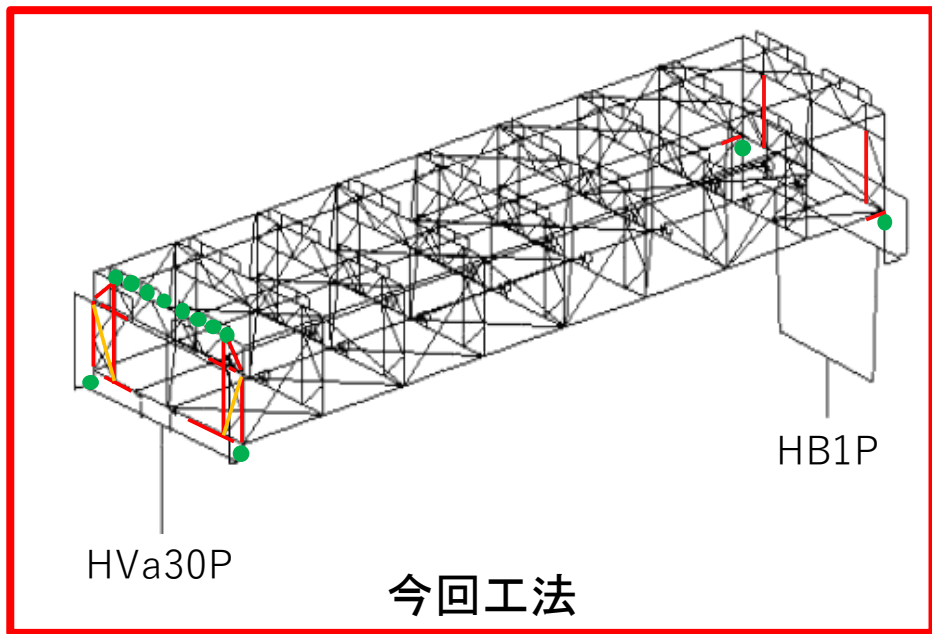
工法選定



実質的に補強不可能



鉄道上空の作業が膨大

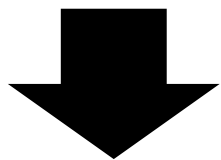


今回工法

- 支承補強
- 支承取替
- 部材補強
- 部材追加

軌道拘束が免震効果に及ぼす影響を評価

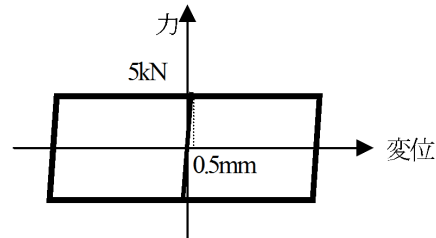
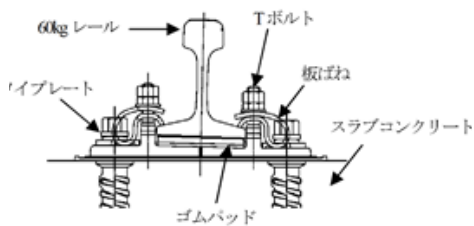
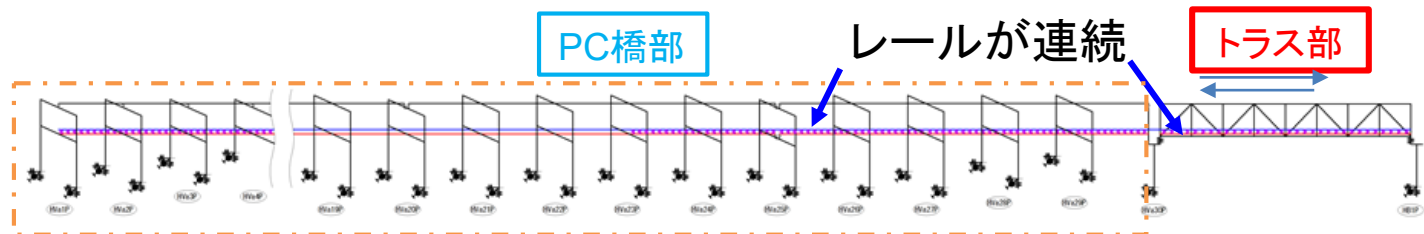
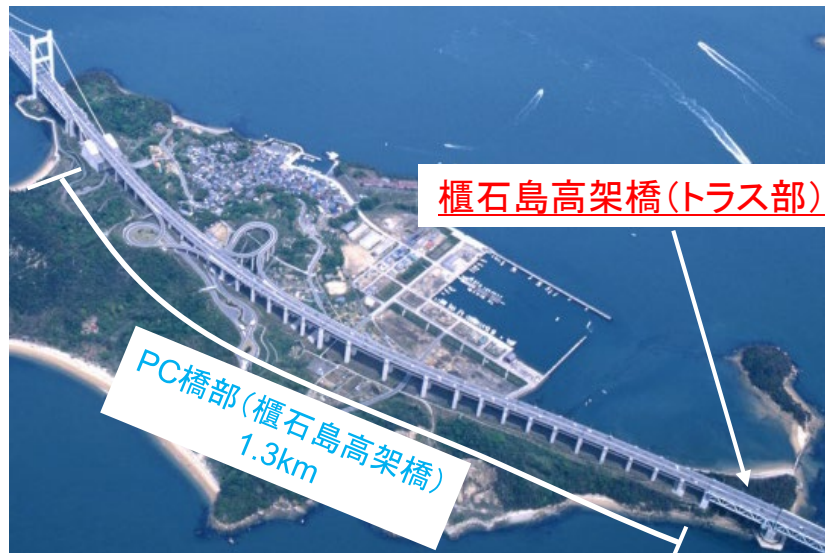
隣接橋と連続するレールが免震化後の橋の動きに及ぼす影響を考慮



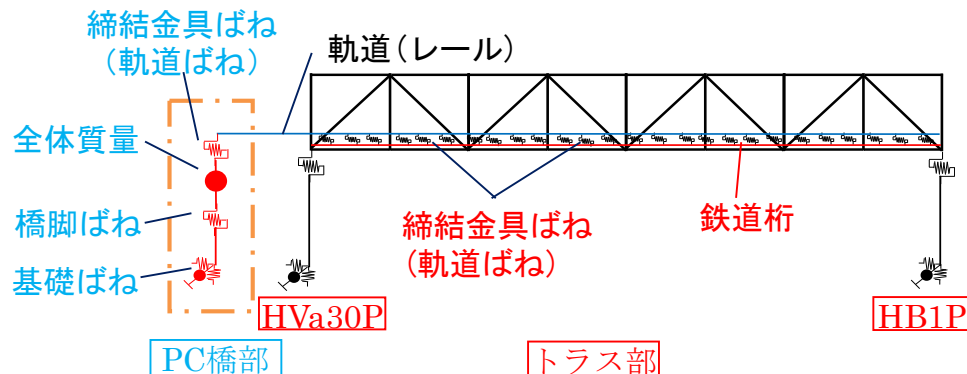
・つながったレールにより、トラス部の動きが止められないか

鉄道総研と協議を重ね、委員会で審議し設計に反映

- ・軌道締結：鉄道で実証された復元力モデル
- ・隣接橋：1質点系のばねマスモデル



軌道締結の復元力モデル



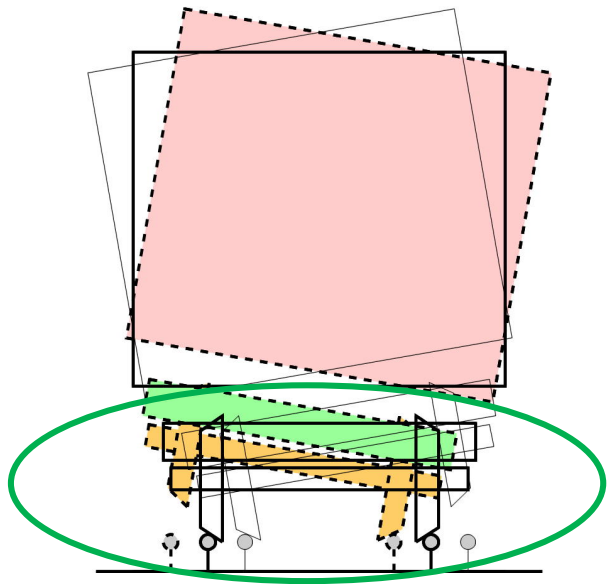
軌道拘束効果検討モデル

L1地震時の列車走行性への影響を評価

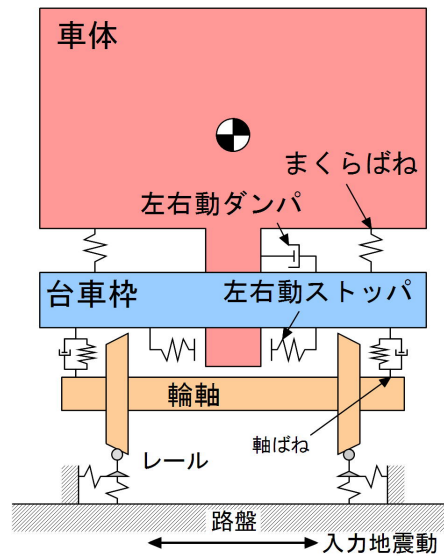
L1時の機能上の安全性(鉄道標準)

- ・軌道の角折れ量判定
- ・シミュレーションによる列車の脱線判定

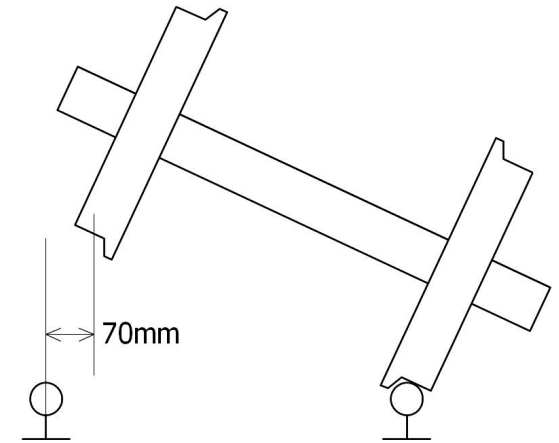
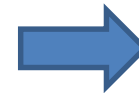
鉄道分野で確立された手法による評価



列車挙動シミュレーションのイメージ図



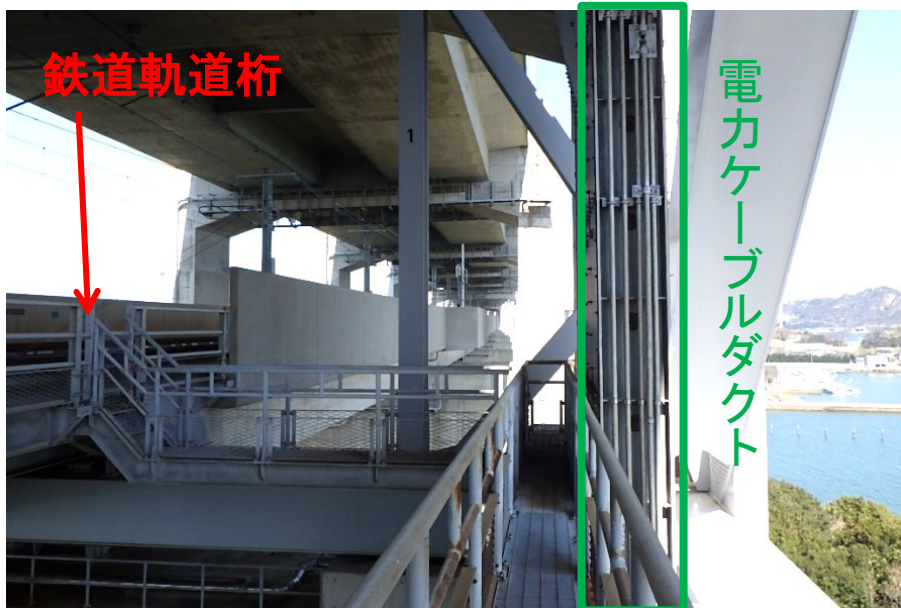
シミュレーション車両モデル



車両の脱線判定基準
(車輪と軌道との相対変位量が±70mm以上)

L1地震時の列車走行性を免震化後も確保できることを確認

トラス桁の支持条件変更による添架構造物等への影響最小化 ¹¹



L1地震の変位に追従できない



- ・L1地震まで現況（既設支承）と同等
- ・L2地震で免震化



ハックオフ機構を追加

トラス桁支承の支持条件			HVa30P		HB1P	
			橋軸方向	橋直方向	橋軸方向	橋直方向
現況	既設支承	常時	F	F	M	F
設計	免震支承	常時～L2	E	E	E	E
施工		常時～L1	F	F	E	F
		L1～L2	F	E	E	E

ハックオフ

ハックオフ

ノックオフ機構を有する支承構造への変更

12

○ボルトに設けたノッチ径による耐力コントロール

$$\rightarrow RH1 < \text{ボルト終局耐力} < RH2' (=RH2/1.12)$$

※L1まで既設支承と同等の支持条件

RH1: L1時に生じる支承水平反力の最大値

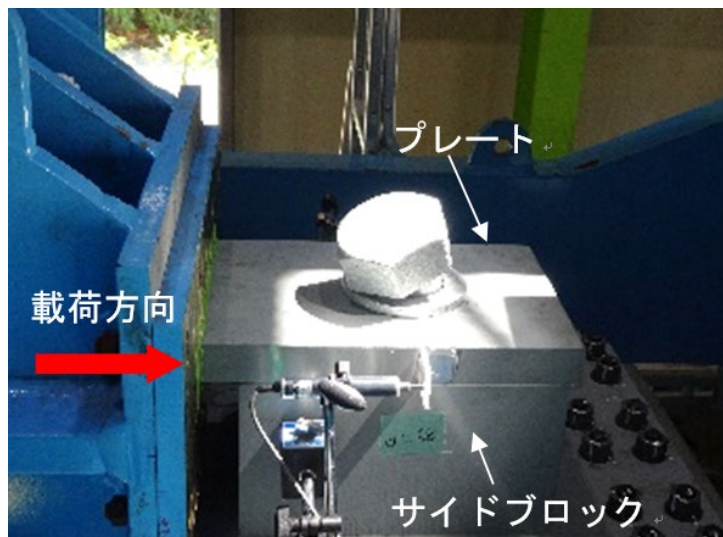
RH2: L2時にトラス部材が損傷する時刻までに生じる支承水平反力の最大値

RH2': 動的載荷時のボルト耐力の影響度(10%)と推定誤差等による安全余裕(2%)を考慮

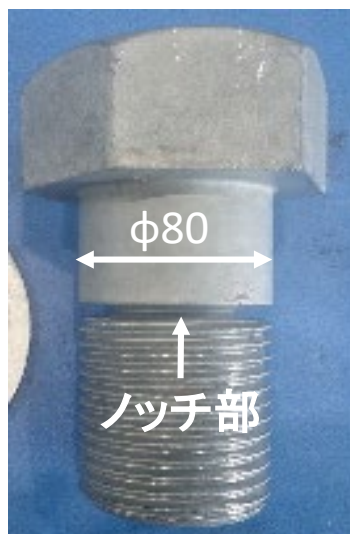
○静的ボルトせん断試験に基づくノッチ入りボルトの耐力推定

↳ ・実施工と同ロット
・実物大サイズ } ノッチ径の異なる6体

↳ 最小二乗法の決定係数 $R^2=0.998$



試験状況



ノッチ入りボルト



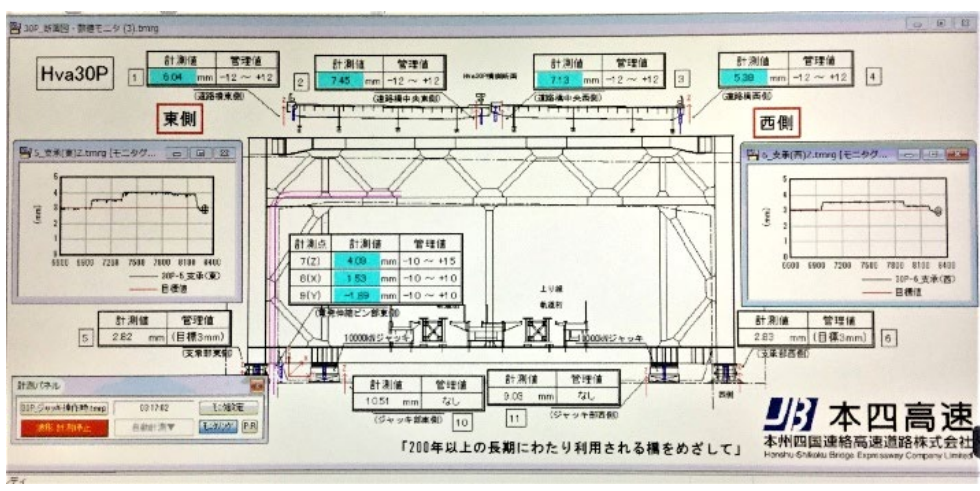
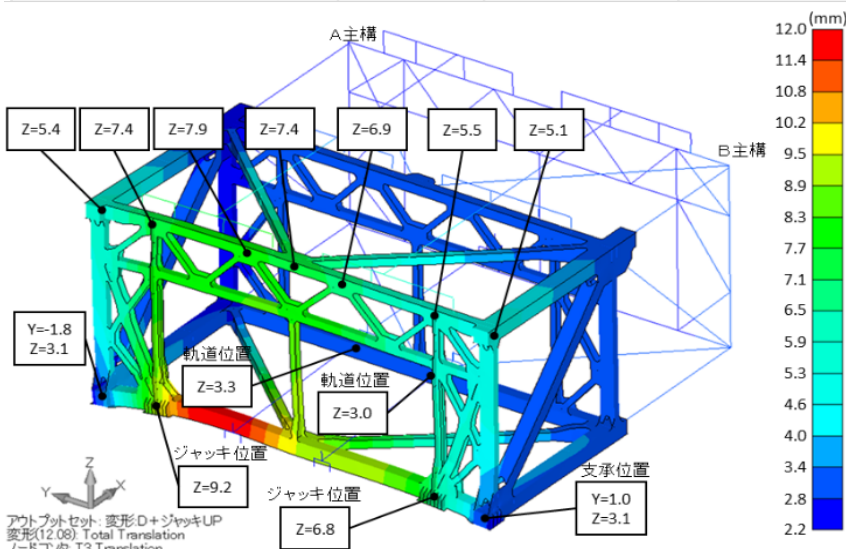
試験後の破断面

ミリ単位の精度が要求される支承取替

- ・ジャッキアップ・ダウン ➡ 夜間線路閉鎖時の2時間で実施
- ・支承取替 ➡ 高速道路及び鉄道の供用性を損なうことなく実施

HVa30P

	変位方向	許容値 (mm)	解析値 (mm)	実測値 (mm)	備考
支承位置	↑	—	3.1	3.0	ゴム支承のたわみ分を考慮し決定
道路桁	↑	—	7.9	8.6	予め道路桁をジャッキダウンし高さ調整
鉄道軌道桁	↑	16	3.0	4.0	緩衝桁構造のため影響小
電力ケーブル	→	±10	-1.8	-2.5	管理者との協議により許容値を決定



FEMに基づく詳細な施工検討

動的計測集中管理システムの構築

設計・施工の成果について、国内外で積極的に発表

■ 国内

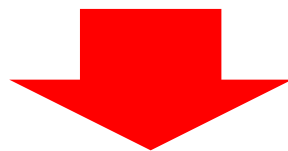
- ・橋梁と基礎
 - ・設計(2020.2)、施工(2020.3)
- ・土木学会年次学術講演会
 - ・設計・施工(2019.9)
- ・日本道路会議
 - ・設計・施工(2019.11)
- ・本四技報
 - ・設計(2018.3)、施工(2019.9)

■ 海外

- ・IABMAS
 - ・設計(2018.7)
- ・IABSE
 - ・設計・施工(2021.2予定)

おわりに

- ・添架構造物等への影響を最小化した全体系の免震化
- ・道路、鉄道の耐震性能を満足し、かつ、補強量を大幅に削減



合理的かつ経済的な補強方法で耐震性を向上



道鉄併用橋を含む鉄道橋の耐震補強技術の発展に大きく寄与

An aerial photograph of a long, multi-span suspension bridge crossing a vast blue body of water. The bridge features several tall, white, A-frame pylons supporting the roadway with white cables. The water is a deep blue, and the sky is a pale, hazy blue. In the distance, a range of mountains is visible under a clear sky. The bridge is filled with cars, and a few boats are seen on the water. The word "END" is superimposed in large, white, bold, sans-serif capital letters in the center of the image.

END