

# 既設長大橋梁の耐震補強の設計及び施工について

釧路開発建設部根室道路事務所工務課

○水山 公博  
千葉 康弘  
登 靖博

一般国道44号根室市に架かる温根沼大橋は、4径間連続鋼板桁×3連（A、C、D橋）+ニールセン系ローゼ桁（B橋）の橋長456mの長大橋である。

本橋の耐震補強設計にあたっては、自然豊かな湖沼上の架橋位地や根入れが相当深い橋脚などの条件から、支承の免震化等による橋梁全体系での耐震補強を行っている。

平成21年度より進めている耐震補強工事についても併せて発表する。

キーワード：耐震免震構造、地震災害、災害対策

## 1. 概要

温根沼大橋（写真-1、図-1）は、一般国道44号の根室市温根沼に架かる橋長456mの長大橋で、平成7年10月に共用されている。適用示方書がS55道示のため、H14道示に準拠した耐震補強が必要となった。

橋梁諸元を表-1に示す。A橋は我が国で最初の免震橋梁として試験的に施工された4橋の中の1つで、免震

設計は、土木研究所の指導を受け、「道路橋の免震設計ガイドライン（案）（財）国土技術開発センター 平成元年3月」に基づいている。



写真-1 温根沼大橋全景

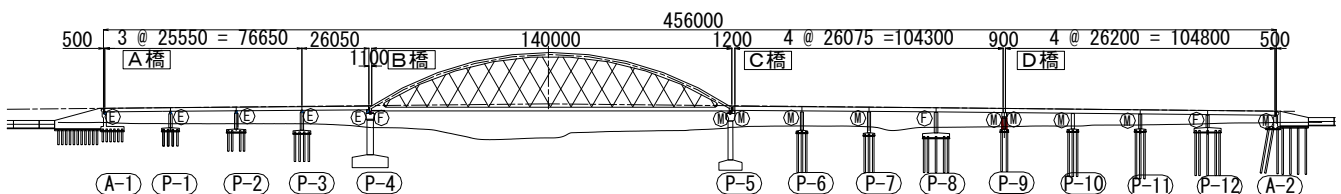


図-1 温根沼大橋一般図

表-1 橋梁諸元

形 式	4径間連続鋼板桁	ニールセン系ローゼ	4径間連続鋼板桁	4径間連続鋼板桁
橋 長	456.000m			
幅 員	15.300m			
支 間 長	3@25.55m+26.05m =102.70m	140.00m	4@26.075m =104.30m	4@26.20m =104.80m
支承条件	弾性支持	1点固定	1点固定	1点固定
支承形式	鉛プラグ入り積層ゴム 支承 (LRB) 積層ゴム支承 (RB)	ピボット、ピボット ローラー支承	密閉ゴム支承板支承 (BP・B 支承)	密閉ゴム支承板支承 (BP・B 支承)
使用材料	鋼材：SM400, SM520    コンクリート： $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 鉄筋：SD295A			
橋台形式	逆T式橋台	—	—	逆T式橋台
橋脚形式	小判型壁式橋脚			
基礎形式	杭基礎 (打込み鋼管杭φ600)	直接基礎 (ピアケーンタイプ)	杭基礎 (打込み鋼管杭φ600)	杭基礎 (打込み鋼管杭φ600)
使用材料	コンクリート： $\sigma_{ck}=21\text{N/mm}^2$ 鉄筋：SD295A			

## 2. 耐震補強設計

### (1) 現橋耐震診断

#### a) 解析モデル

温根沼大橋に対する耐震性能照査は、動的照査法（3次元骨組要素（図-2）を用いた非線形動的応答解析）によって検証を行なった。要素モデルは、ニールセン系ローゼ桁、橋脚及び免震支承を非線形とした（表-1）。

#### b) 応答解析手法

解析は非線形履歴モデルを用いた時刻歴応答解析法を採用し、Newmark-β法による直接積分法とした。ここで、Newmark-β法では $\beta = 1/4$ とし、積分時間間隔は0.0025secと設定した。また、非線形解析における反復計算にはNewton-Raphson法を採用し、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した複合非線形解析を実施した。

応答解析に用いる減衰モデルは剛性比例型減衰とした。振動モードに対応する減衰定数算出時の等価減衰定数は道路橋示方書Vを参考にして設定した。ここで、線形要素でモデル化した構造要素に範囲がある場合にはその下限値を採用している。

#### c) 非線形有限要素解析によるP-4、5橋脚の耐荷力評価

ニールセン系ローゼ桁を支持するP-4およびP-5橋脚は、曲げ破壊型であるにもかかわらずせん断力に対する照査において満足しない結果が得られた。これは地中深くに

表-2 適用要素モデル

部位		モデル化	
ニールセンローゼ橋 (B橋)	アーチリブ	ファイバー要素	
	補剛桁	ファイバー要素	
	縦桁	ファイバー要素	
	床桁	ファイバー要素	
	下横構	ファイバー要素	
	横支材	ファイバー要素	
	対傾構	ファイバー要素	
	斜材ロープ	ケーブル要素	
	床版	ファイバー要素	
	その他添加物	重量を考慮	
A, C, D橋	上部工	線形はり要素	
	その他添加物	重量を考慮	
R C 橋脚	柱	塑性ヒンジ長	M-θ
		一般部	線形はり要素
	基礎-地盤	直接基礎	線形ばね要素 (S-R)
杭基礎		線形ばね要素 (S-R)	
支承	ピボット支承	線形ばね要素	
	鋼製支承	線形ばね要素	
	分散支承	線形ばね要素	
	免震支承	非線形ばね要素	

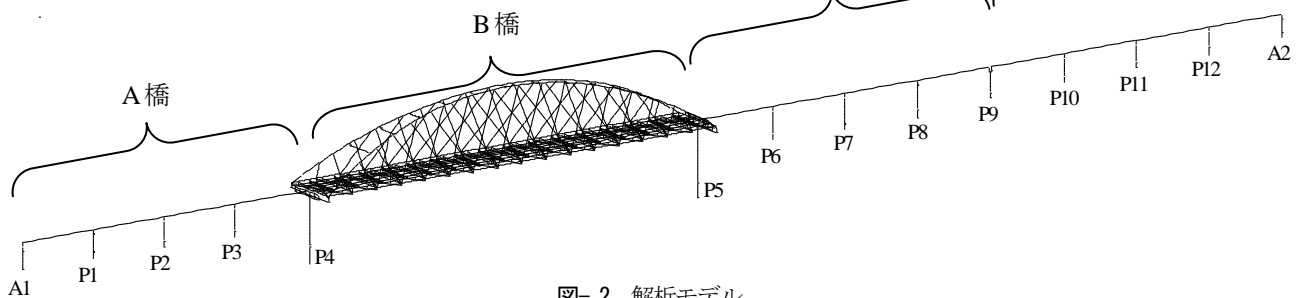


図-2 解析モデル

存在する橋脚が周辺地盤からの強制変位を受けて、応答せん断力が地上構造物として扱った場合と比較して大きくなったためと推察される。

しかしながら、せん断耐力としても橋脚を地上構造物として扱った場合と比較して異なるものと考えられることから、本検討では周辺地盤の影響を考慮した橋脚の2次元非線形有限要素解析（図-3）を行い、実態に近いせん断耐力の再評価を行った。

・周辺地盤を考慮するとともに周辺地盤からの強制変位を含めた動的解析による変形分布をFEMモデルに作用させた場合、P-4橋脚には最大で40,040kNの応答せん断力が発生し、地上構造物として扱った場合と比較して2倍以上大きく評価される。

・周辺地盤の影響を考慮したFEM解析においては最大で40,040kNのせん断力が発生するが、斜めせん断ひび割れが見受けられるもののせん断破壊には至らず、地中内のP-4橋脚のせん断耐力は40,040kN以上であると考えられる。ここで、道路橋示方書に基づいて算定した設計せん断耐力28,519kNの1.4倍と向上した理由は、周辺地盤は橋脚に対して強制変位を与える荷重として作用があると同時に、柱を水平方向に支持する役割があるためと推察される。

・再評価されたP-4橋脚のせん断耐力の増加率をP-5橋脚に適用すると、P5橋脚の地中内のせん断耐力は31,417kN以上となる。

・再評価されたせん断耐力を用いて再度照査を行うと、P-4およびP-5橋脚は発生せん断力に対して安全であるものと判断される。

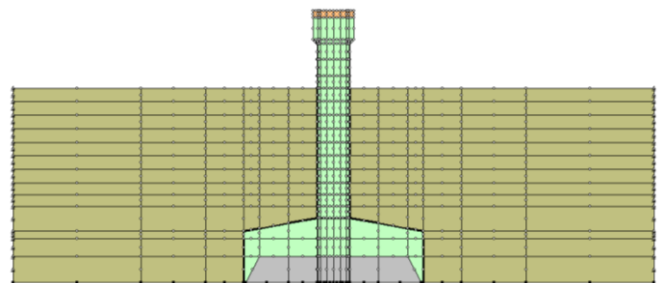


図-3 P-4 橋脚 FEM モデル

d) 診断結果

表- 3に橋軸方向、表- 4に橋軸方向の診断結果を示す。

橋軸方向は、上部工はニールセン部および鉸部のおよびいずれもOKであるが、支承、橋脚及び基礎工で許容値を満足しない結果となった。

支承部は、A橋では、ストッパーで降伏耐力を超過、支承の内部鋼板が座屈、B橋では、P-4で支承の降伏耐力を超過、P-5で移動可能量を超過、C、D橋で固定支承が降伏耐力を超過、可動支承では可能移動量を超過、掛け違い部のP-5及びP-9で遊間量を超える変位により桁衝突が発生した。このため、変位制限構造の設置や制震デバイス等の設置、段差防止構造の設置が必要となった。

橋脚は、A橋ではP-2、P-3で段落し損傷が発生し段落し補強が必要となった。B橋は、固定橋脚であるP-4で応答塑性率が許容値を超過し、補強が必要となった。C橋およびD橋は、固定橋脚であるP-8およびP-12で段落し損傷、応答塑性率および残留変位が超過し、補強が必要となった。

基礎工は、B橋においてフーチングの耐力が附則し補強が必要であった。C橋のP-8で応答塑性率を超過し、補強が必要となった。

橋軸直角方向では、上部構造、橋脚及び基礎工は許容値を満足するが、ほとんどのが降伏耐力を超過するため、変位制限構造の設置が必要となった。

(2) 耐震補強工法の選定

以上の診断結果から、P-1～P-3は陸上部、P-8、P-12は水上部であるが根入れが浅いため、比較的容易に橋脚補強が可能であるが、P-4は根入れが13m程度と深い上に、軟岩に根入されているため仮締切の施工が困難で工事費が増大することや、P-12で基礎工補強が必要となること、支承の耐力不足へは変位制限構造で対応可能であるが、移動量低減には効果がないため、免震・制震構造が必要となることから、橋脚単体補強に加え橋梁全体系の検討を行なった。

表- 3 橋軸方向診断結果

各構造要素		耐震診断結果のまとめ		補強方針案
上部構造	ニールセン系ローゼ桁 (B橋)	主要部材	アーチリブ、補剛桁、床桁、縦桁、RC床版の全部材が降伏に至らず安全である。	補強の必要性なし
		2次部材	降伏に至らず安全である。	補強の必要性なし
		ケーブル	降伏に至らず安全である。	補強の必要性なし
	鋼鉸桁 (A,C,D橋)		全部材が降伏に至らず安全である。	補強の必要性なし
支承	A橋	ゴム支承 A1~P4	ストッパーが降伏耐力を超過する。 また、2次形状係数が2程度と小さいことから、250%程度のせん断変形時には内部鋼板が座屈する危険性がある。	変位制限構造の設置あるいは座屈防止用の段差防止構造等の設置を検討する必要がある。
	B橋	固定支承 P4	降伏耐力を超過する。	
		可動支承 P5	移動可能量を超過する。	
	C橋 D橋	固定支承 P8,P12	降伏耐力を超過する。	
可動支承		移動可能量を超過する。 なお、P5,P9橋脚は移動限界量を超過する。		
橋脚	A橋	免震橋脚 P1~P3	P2,P3橋脚で軸方向鉄筋の段落し部が曲げ耐力を超過する。	橋梁全体系の耐震補強（免震工法、制震工法、変位拘束工法）によって、部材補強を回避する対策を検討する必要がある。
	B橋	固定橋脚 P4	応答塑性率が許容塑性率を超過する。	
		可動橋脚 P5	耐震性能2を満足する。	
	C橋 D橋	固定橋脚 P8,P12	応答塑性率および残留変位が許容値を超過する。また、軸方向鉄筋の段落し部が曲げ耐力を超過する。	
可動橋脚		耐震性能2を満足する。		
基礎	B橋	直接基礎 P4,P5	フーチングの曲げ耐力を超過し、橋脚耐力以上の耐力は有していない。	
	C橋	杭基礎 P8	降伏し応答塑性率も許容値を超過する。	

表- 4 橋軸直角方向診断結果

各構造要素		耐震診断結果のまとめ		補強方針案
支承	A橋	ゴム支承 A1~P4	降伏耐力を超過する。	変位制限構造の設置等 を検討する必要がある。
	B橋	固定支承 P4	降伏耐力を超過する。	
		可動支承 P5	降伏耐力を超過する。	
	C橋 D橋	固定支承 P8,P12	降伏耐力を超過する。	
可動支承		P5,P6,P10,P11橋脚で降伏耐力を超過する。		

**a) 比較案選定**

対策工法として、①橋脚補強+変位制限、②免震工法、③制震工法、④免震+制震工法の4案を比較した。各工法の概要は以下のとおりである。

①耐震工法：鉄筋コンクリート壁や粘性ストッパー等による変位制限構造を、耐力を超過している固定支承部に設置して両者が補完し合って地震時水平力に抵抗する工法である。支承部構造としての固定条件が維持されるため、耐震診断において耐震性能を満足しない橋脚（P-4、P-5、P-8、P-12橋脚）は鉄筋コンクリート巻立て等によって部材補強を行う必要がある。

②免震工法：既設支承を鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）や高減衰積層ゴム支承（HDR）、すべり系支承等の免震支承に取り替えて長周期化とエネルギー吸収を図る工法である。免震支承が減衰効果を発揮するためには上・下部構造間の大きな相対変位が必要であるため固定支承部の取替えを優先する。

また、必要に応じて可動支承部も交換して地震時水平力の分散化を検討する。なお、免震支承自体がレベル2地震動に対して支承部構造の性能を満足する構造であることから、落橋防止システムとしての変位制限構造の設置は不要となる。

③制震工法：せん断パネルや摩擦履歴型ダンパー、座屈拘束ブレース等の制震ダンパーを設置してエネルギー

吸収を図る工法である。地震時水平力の分散化を図るため可動支承部への設置を優先し、必要に応じて固定支承部の損傷が限定的となるようにロックオフ構造に改良した上で固定支承部にも設置する。

可動支承部への設置に際しては、温度変化時に抵抗しないようレベル1地震動に対する移動量を設けて設置する。また、制震ダンパーとしては、せん断パネル型制震ストッパーやビンガムダンパー等の摩擦履歴型ダンパーを検討する。なお、制震ダンパーと既設支承が補完し合って地震時水平力に抵抗する構造であることから、制震ダンパー本体が落橋防止システムとしての変位制限構造の機能も果たすことになる。

④免震+制震工法：免震工法と制震構造を組み合わせることで、上部工移動量を更に提言させる工法。

**b) 検討結果**

①案は、P-4橋脚の仮締切工事費が膨大となり経済性で不利となった。②案は、P-4橋脚の補強は回避可能であるが、全支承を免震支承に交換するため、経済性で①案に次いで不利となった。③案は、経済性では有利であるが、制震工法では橋台部及び掛け違い部に桁衝突を利用した変位拘束構造を採用しているが、桁衝突の地震時挙動に不確定要素が多いため、不採用とした。④案は、経済性で最も有利であり、構造的にも優れるため、本案を採用した。全体系耐震補強結果を図-4に示す。

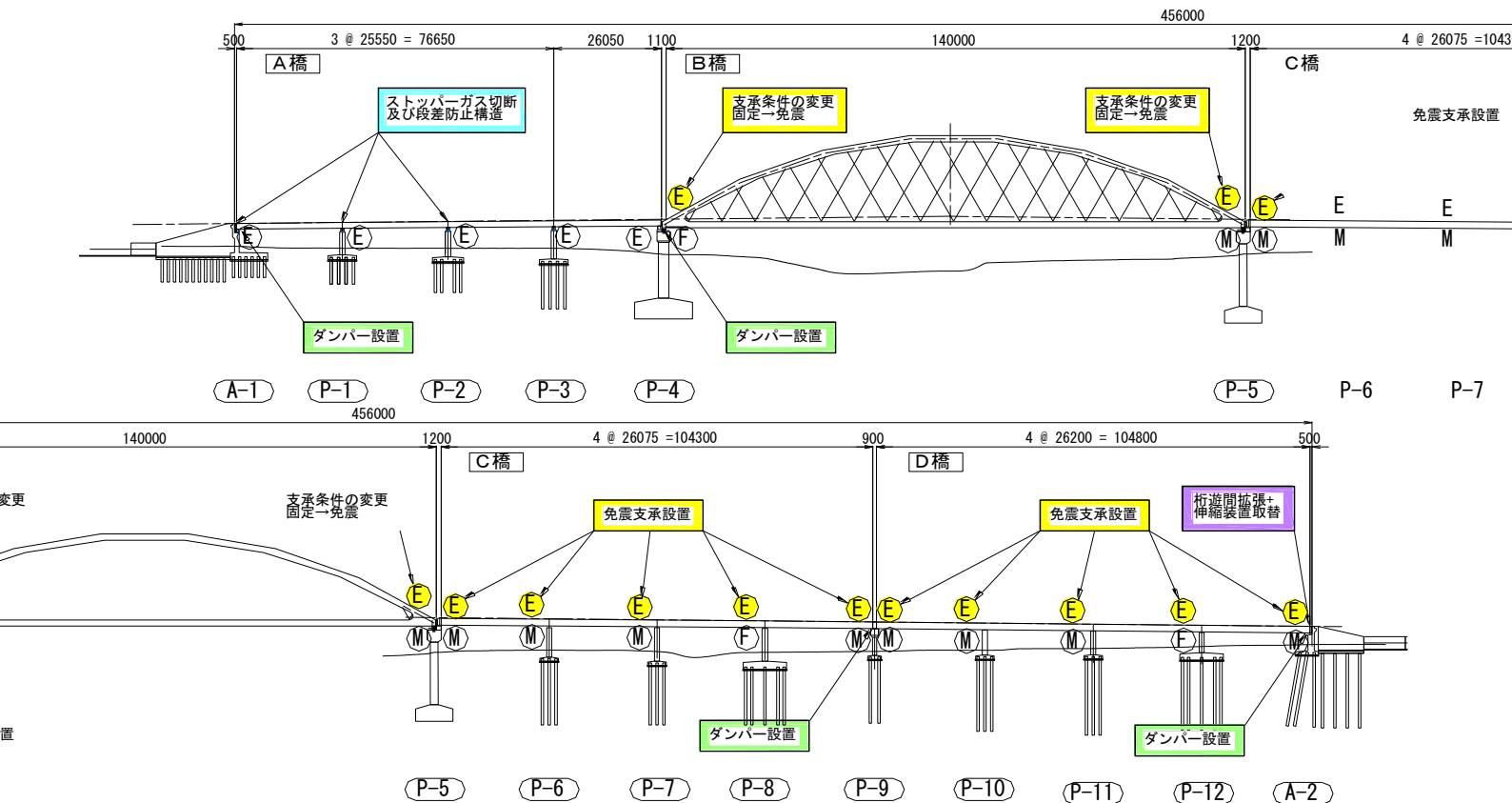


図-4 全体系補強の内容

### c) 落橋防止システム

**桁かかり長：** 現況でけたかかり長は、各橋梁共に満足する。また、C橋D橋の斜角および曲線の影響も問題はない。但し、D橋のA2橋台部においては、必要遊間確保のため桁端を切断するため、桁かかり長が不足する。このため、沓座拡幅が必要となる。

**落橋防止構造：** B橋に対しては、過年度において、施工がなされているため、問題はない。A橋、C橋、D橋においては未設置のため必要となる。尚、P-9橋脚の桁連結構造は、耐力を有しているが落橋防止としての緩衝機能が無いため、新たに設置することとする。

また、ニールセン桁との連結は隣接する橋梁の質量差が、2倍程度あるため桁連結構造とはしない。そのため、下部工と上部工を連結する構造とする。

**変位制限構造：** 橋軸方向においては、レベル2の地震時最大変位量を満足するように、支承のストッパーを撤去しタイプBの支承相当と判断し、軸方向の変位制限構造は不要である。但し、P-8、P-12の固定支承については、レベル2地震時は可動とすることから、既設の上沓を可動にし、増設の免震水平沓をロックオフ構造とする。また、P-7～P-9、P-12、A2の直角方向については、制限構造を設置する。免震水平沓を取り付ける箇所について

は、直角方向を変位制限構造として利用するため、別途変位制限構造を設置する必要はない。

### 3. 耐震補強工事

耐震補強補強工事は、平成21年度から実施しており、平成21年度には、A橋（A-1、P-1、P-2、P-3、P-4）の橋軸直角方向変位制限構造およびA橋（A-1、P-4）、C橋（P-5、P-9）、D橋（A-2）の落橋防止構造（写真-2）の設置を行なっている。平成22年度には、C橋（P-7）、D橋（P-10、P-11、A-2）の水平免震支承およびA-1、A-2ダンパーの設置（写真-4）、A-2部の桁端部切断および伸縮装置取替（）、A-1、P-1、P-2、A-2既設支承改造（写真-3）を実施。平成23年度には、C橋（P-5、P-6、P-8、P-9）、D橋（P-9、P-12）の水平免震支承およびP-9ダンパーの設置、P-8、P-9、P-12既設支承改造を実施している。最終年度である平成24年度には、B橋（P-4、P-5）の支承交換（写真-6）およびダンパー設置を実施中である。

### 4. 最後に

現在、B橋の支承交換およびダンパー設置は施工中であり、本年度で温根沼大橋の耐震補強は完了する。B橋の工事報告は、次年度以降に報告したい。



写真-2 A-2 落橋防止構造

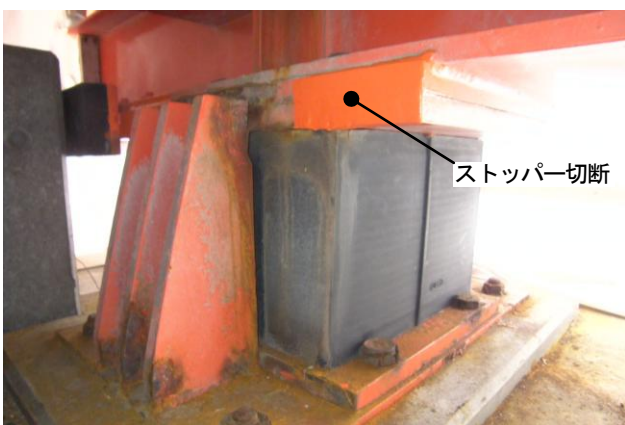


写真-3 P-1 支承改造 (ストッパー切断)

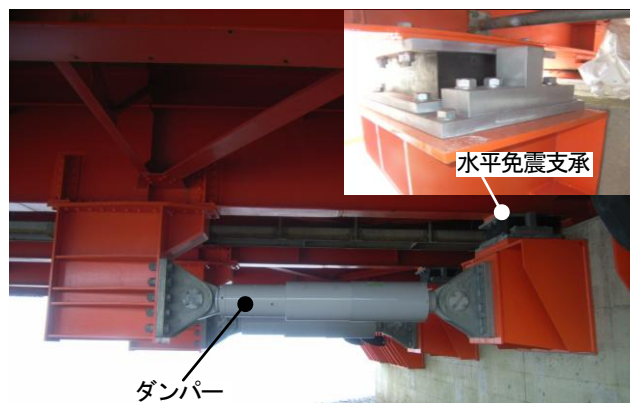


写真-4 A-2 部水辺免震支承およびダンパー



写真-5 桁端部切断および伸縮装置取替

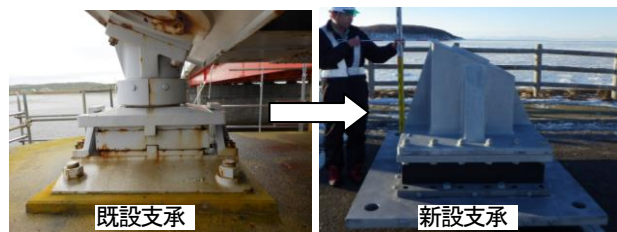


写真-6 B 橋 P-5 の支承交換