

ニールセンローゼ橋の耐震補強設計に関する検討

新名 裕¹・佐合 大²・藤田 英樹³

¹正会員 株式会社川金コアテック 本社技術部（〒332-8502 川口市宮町18-19）
²正会員 高田機工株式会社 設計部（〒556-0011 大阪市浪速区難波中2-10-70）
³非会員 川田テクノシステム株式会社（〒550-0014 大阪市西区北堀江1-22-19）

1. はじめに

道路ネットワークの耐震性を確保する目的として、緊急輸送道路の橋梁を中心に耐震補強対策が積極的に行われ、比較的小規模な桁橋などは概ね完了した状況にある。また、アーチ橋などの特殊橋梁に対しても、地震時の動的挙動を適切に評価し、耐震補強対策が順次行われている。

本論では、既設のニールセンローゼ橋を対象に、非線形動的解析を実施し、レベル2地震時の動的挙動を明らかにするとともに、効果的な耐震性向上策の検討を行った結果について、その概要を報告する。

2. 対象橋梁および構造概要

対象橋梁は、図-1および表-1に示す橋長198m、アーチ支間長196.2mのニールセンローゼ橋である。橋台形式は逆T式であり、基礎形式は、A1橋台は深礎杭Φ2000×2本、A2橋台は直接基礎である。

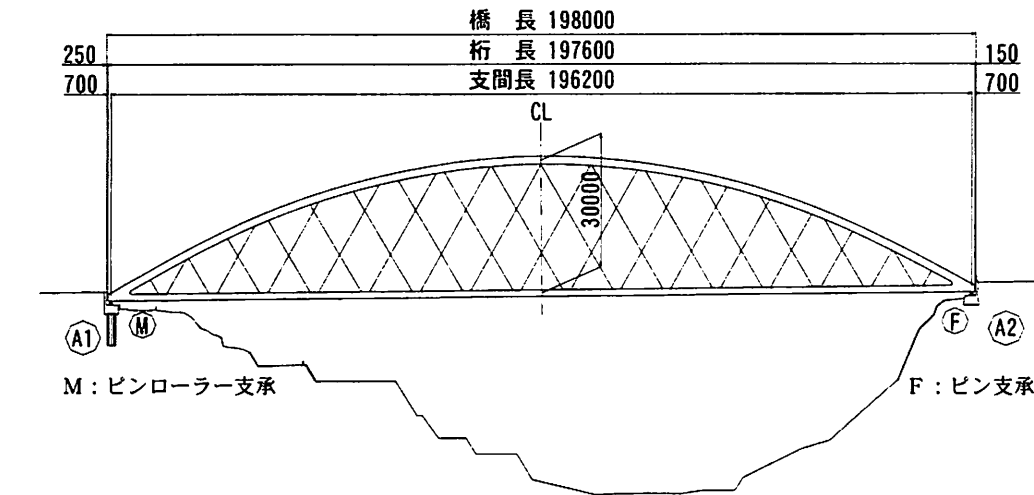


図-1 対象橋梁の一般図

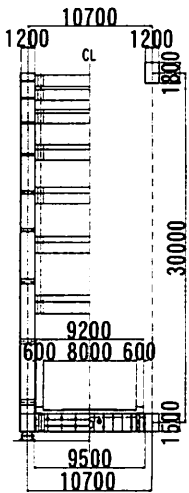
表-1 橋梁概要

橋梁形式	単純ニールセンローゼ橋
橋長	198.0m
支間長	196.2m
ライズ	30.0m
主構間隔	10.7m
支承条件	A1橋台：可動，A2橋台：固定
下部工形式	逆T式橋台
基礎工形式	A1橋台：深礎杭Φ2000×2本
	A2橋台：直接基礎
地盤種別	I種地盤
適用示方書	道路橋示方書（平成2年2月）

3. 現橋の耐震性能照査

(1) 解析モデル

本橋の動的解析モデルを図-2に示す。このモデルにおいて、床版は断面中央を結ぶ弾性要素でモデル化し、縦桁とは剛部材を介して連結した（図-3）。



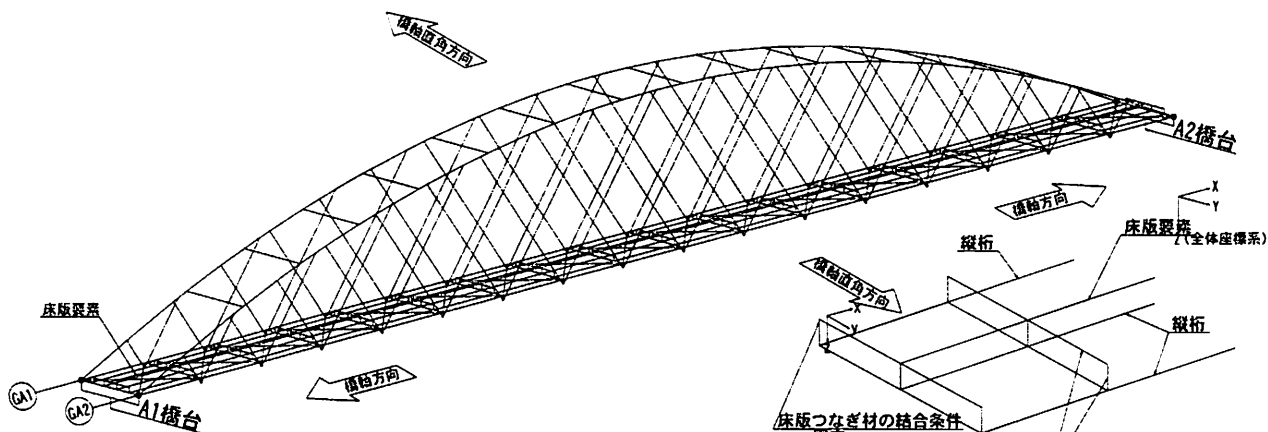


図-2 解析モデル

アーチリブ，補剛桁，横桁，縦桁，アーチリブ支材は弾性梁要素とし，下横構は，図-4に示すように，ひずみ硬化を考慮した2次勾配が $E/100$ のバイリニア型とした。

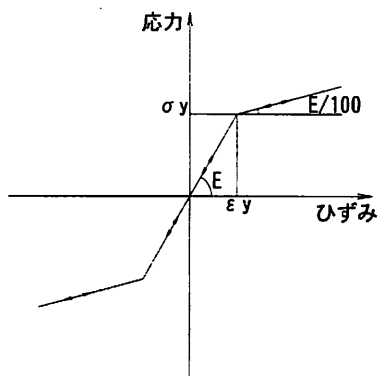
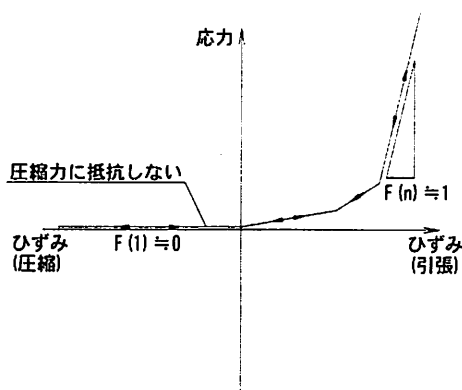


図-4 応力度-ひずみ関係

ケーブルは，図-5に示すように，圧縮力に抵抗しない非抗圧要素とした。



部材の軸方向剛性は、 $E \cdot A \cdot F(i)$ にて与える

図-5 ケーブル特性

橋台のモデル化は，全断面有効の剛性を有する弾性梁要素とし，地盤－基礎系パネのモデル化は線形バネ要素とした。

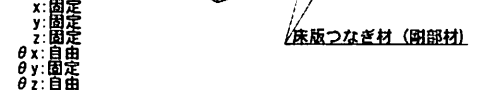


図-3 床版のモデル化

(2) 動的解析結果

a) 橋軸方向加震

固定支承部周辺の補剛桁，縦桁，端横桁が降伏応力度を超過し，一部のケーブルについても許容耐力を超える結果となった（図-6）．さらに，固定支承の応答水平力が降伏耐力を4倍程度超過しており，可動支承の応答変位も設計移動可能量の7割程度超過した。

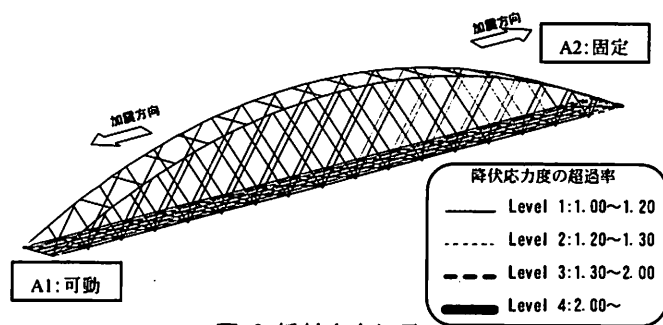


図-6 橋軸方向加震

b) 橋軸直角方向加震

固定および可動支承部周辺，補剛桁，下横構，アーチリブ支材が降伏応力度を超える結果となった（図-7）．さらに，固定および可動支承の応答水平力が降伏耐力をそれぞれ5倍程度，2倍程度超過した。

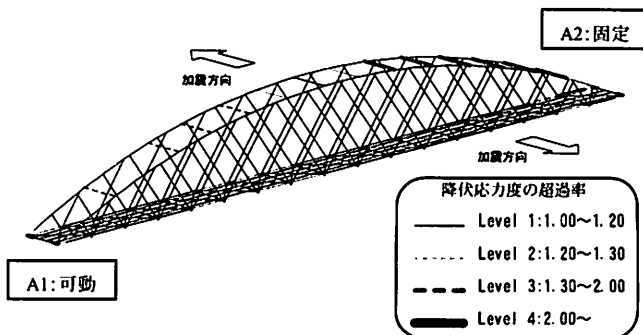


図-7 橋軸直角方向加震

4. 耐震性向上策の検討

(1) 制震装置の選定

耐震性能照査の結果を踏まえ、本橋の制震装置として、可動支承側に粘性ダンパー、固定支承側にせん断パネル型制震ストッパー（以下、制震ストッパー）を選定した。

粘性ダンパーは、図-8に示す粘性体がピストンとの隙間を通るときの流動抵抗力的によって減衰力を構造物に付与する装置である。

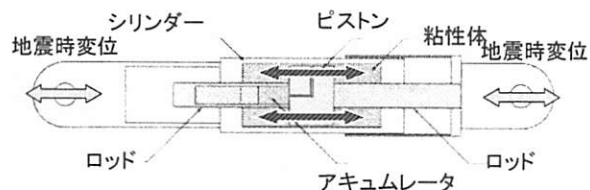


図-8 粘性ダンパーの構造

粘性ダンパーの減衰抵抗カFは、一般に式(1)で表され、本橋で選定した粘性ダンパーは、定格速度0.5m/secで減衰抵抗カF=750kNが作用するものである（図-9）。

$$F = C V^{\alpha} \quad (1)$$

ここに、C：粘性係数

V：速度

α ：べき乗係数（シリコンオイル0.22）

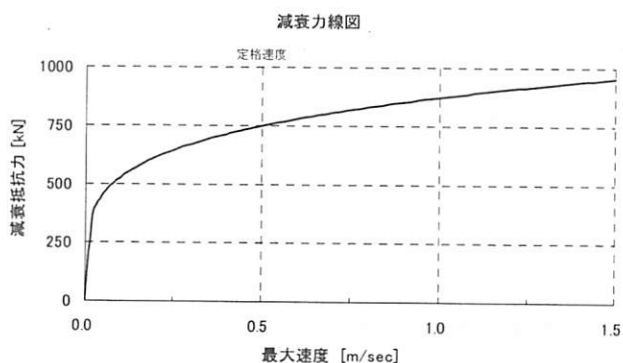


図-9 粘性ダンパーの減衰抵抗カ

制震ストッパーは、ウェブに降伏強度225N/mm²の低降伏点鋼材を用い、フランジおよびリブに普通鋼材を用いた構造である（図-10）。特徴としては、鋼材の弾塑性履歴により、エネルギー吸収性能が高くなり、地震動の繰返し変形に安定した性能を発揮することができる。本橋で選定した制震ストッパーの履歴特性を図-11に示す。

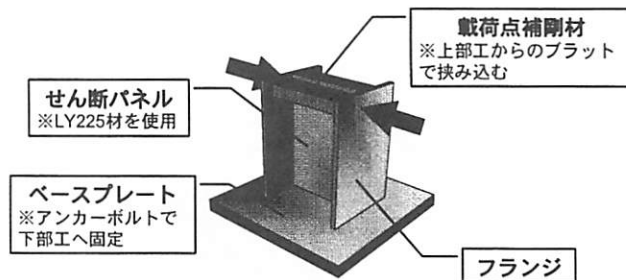


図-10 制震ストッパーの構造

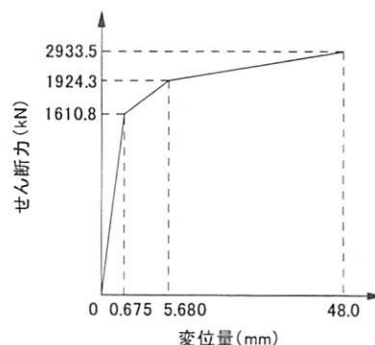


図-11 制震ストッパーの履歴特性

制震ストッパーに地震時水平力を伝達できるように、A2橋台部の固定支承の可動化を行った。

具体的には、下フランジに溶接されている既設ソールプレートを取り外し、下フランジ下面に滑動板（すべりプレート）を取り付け、上査上面に新たにソールプレート（NSプレート）設置することで、滑動板とNSプレート間に滑動面ができ、支承部を可動化することが可能となる（詳細については、5. 支承可動化工法参照）。さらに、既設セットボルトを常時およびレベル1地震時までは固定となり、レベル1地震時水平力が作用すると破断するロックオフボルト¹⁾に取り替えることとした。

(2) 補強後の耐震性能照査

A1橋台部の可動支承側に粘性ダンパーを2基、図-12のように配置した。

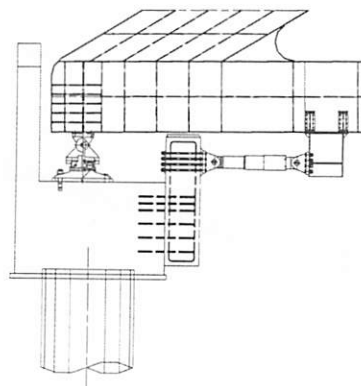


図-12 A1橋台側の粘性ダンパー取付概要図

A2橋台側に制震ストッパーを4基、図-13のように基配置した。

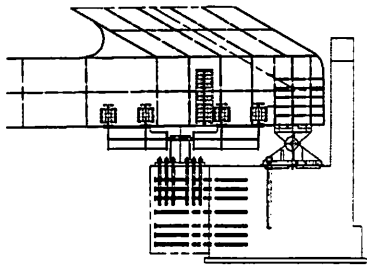


図-13 A2橋台側の制震ストッパー取付概要図

上記の制震装置に加え、固定支承を可動化したことによる耐震性能向上の効果を検証する。検証を行うにあたり、目標とする耐震性能²⁾と、耐震性能を確保するための部材健全度³⁾を整理する必要がある。本橋梁の重要度区分は「B種の橋」であるため、レベル2地震動に対して「耐震性能2」を満足する必要がある。その耐震性能に対し各部材の目標健全度を表-2のように設定した。

表-2 目標部材健全度

部 材	目標部材健全度
アーチリブ	部材健全度 2
補剛桁	部材健全度 2
アーチリブ支材	部材健全度 2
ケーブル(斜材)	部材健全度 1
端横桁	部材健全度 2
中間横桁	部材健全度 2
縦 桁	部材健全度 2
支 承	部材健全度 2

a) 橋軸方向加震

固定支承部周辺の端横桁が降伏応力度を超えるが、降伏ひずみに対して超過率が僅かであり、部材健全度2を満足する結果となった(図-14)。また、可動支承の応答変位も設計移動可能量以下となった。

端横桁① : $1.360 \varepsilon_y < 2.0 \varepsilon_y$

端横桁② : $1.360 \varepsilon_y < 2.0 \varepsilon_y$

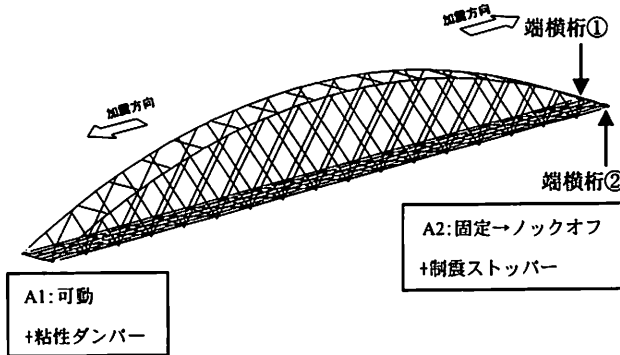


図-14 橋軸方向加震

b) 橋軸直角方向加震

固定および可動支承部周辺の端横桁とアーチリブ支材が降伏応力度を超えるが、降伏ひずみに対して超過率が僅かであり、部材健全度2を満足する結果となった(図-15)。また、固定および可動支承の応答水平力が降伏耐力以下となった。

端横桁① : $1.130 \varepsilon_y < 2.0 \varepsilon_y$

端横桁② : $1.050 \varepsilon_y < 2.0 \varepsilon_y$

端横桁③ : $1.140 \varepsilon_y < 2.0 \varepsilon_y$

端横桁④ : $1.090 \varepsilon_y < 2.0 \varepsilon_y$

アーチリブ支材 : $1.080 \varepsilon_y < 2.0 \varepsilon_y$

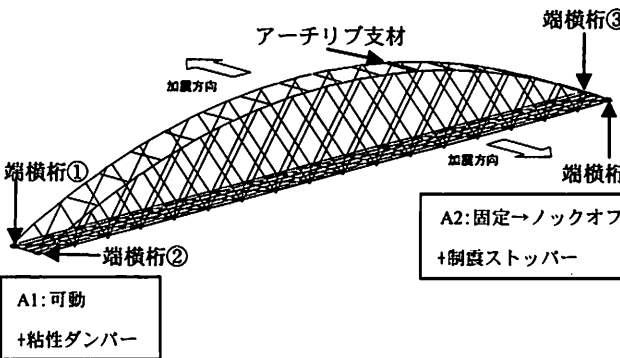


図-15 橋軸直角方向加震

(3) 落橋防止システムの検討

上記の耐震補強対策に加え、道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編に規定される落橋防止システムを設置する。本橋の支承を固定支承からノックオフ支承(レベル2：可動)へ変更したことにより、既設の固定支承は鉛直支持機能、制震ストッパーは水平支持機能となり、タイプB支承相当に機能アップしたこととなる。これにより、本橋に必要な落橋防止システムは、けたかかり長と落橋防止構造となる。しかし、上部工の荷重に対し橋台の規模が小さいため、落橋防止構造により上下部工が一体化したとしても、その大きな水平力により、橋台基礎の安定性が懸念される。したがって、本橋では落橋防止構造を設置せず、けたかかり長 S_E の1.5倍以上を確保した。

5. 支承可動化工法

(1) 支承可動化工法の概要

既設支承にはレベル 2 地震時の耐力は満足しないものの、常時の機能には全く問題ない支承が数多く存在している。また、本橋のように固定ピン支承(写真-1)は支承高も高く風通しも良いため腐食もほとんどなく健全である。しかしながらこれまでの耐震補強では、レベル 2 地震に対する要求性能を満足させるためには、支承本体を補強するか、取り替える状況にあった。

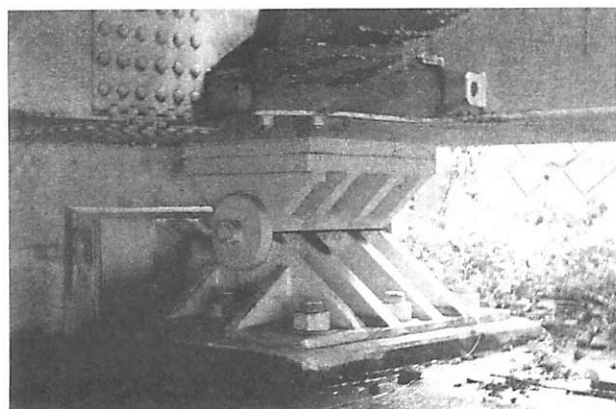


写真-1 既設固定ピン支承

レベル 2 地震に対して支承本体補強し、レベル 2 地震でもタイプ B の固定支承となるように耐力を増大にした場合には、下部工の地震時水平力が増加してしまう。また、新たに免震支承などに取り替える場合は、新規支承は高価なため経済性に劣る。

そこで本橋では既設支承を取り替えることなく、支承取り付け部を改造することによって、固定ピン支承をレベル 2 地震時のみ可動化することが可能な支承可動化工法（すべリッチ）を採用した。

支承可動化工法（すべリッチ）は、下フランジに溶接されている既設ソールプレートを取り外し、下フランジ下面に滑動板（すべりプレート）を取り付け、上査上面に新たにソールプレート（NS プレート）設置することで、滑動板と NS プレートの間に滑動面を設けることで支承部を可動化する。さらに既設セットボルトを常時・レベル 1 地震までは固定となり、レベル 1 水平力を超えると破断するロックオフボルトに取り替える（図-16）。

これにより固定ピン支承は、常時・レベル 1 地震までは固定となり、レベル 2 地震ではロックオフボルトが破断し、滑動面で可動となる滑り支承となる（図-17）。

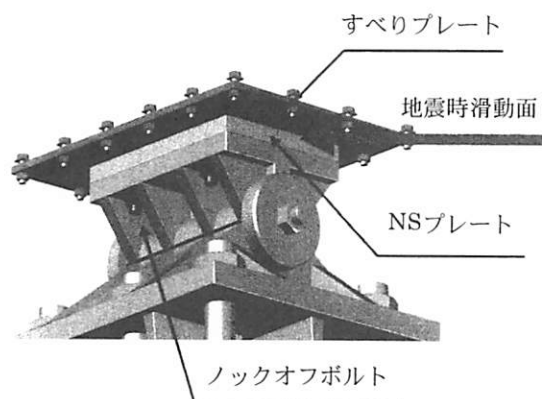
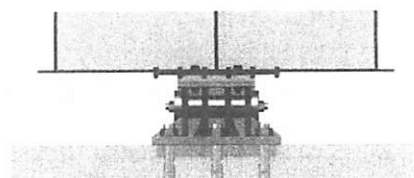
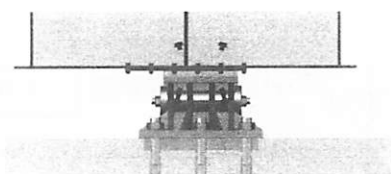


図-16 支承可動化工法（すべリッチ）



ロックオフボルトで固定
(常時・レベル1)



ロックオフボルト破断，滑り面で可動
(レベル2)

図-17 地震時システム

また、本橋では鋼材系せん断降伏型ダンパーである制震ストッパーと組み合わせることで、鉛直荷重は固定ピン支承が分担し、水平荷重は制震ストッパーが分担する機能分離型支承となっている。

(2) 支承可動化工法の設計

ロックオフボルトの耐力は、レベル 1 以上で破断するものとして設計する。しかし、本橋では、表-3 に示すように橋軸方向レベル 1 水平力 (2642.1kN) が、直角方向レベル 2 水平力 (1814.9kN) 以上あるため、橋軸方向レベル 1 水平力以上の耐力で設計すると、直角方向レベル 2 水平力では破断しない。また、直角方向レベル 2 水平力で破断するように設計すると、橋軸方向レベル 1 水平力で破断しないことになってしまう。

そこで、橋軸方向は、制震ストッパーによりレベル 1 まで固定とすることとし、直角方向をロックオフボルトでレベル 1 まで固定、レベル 1 以上で破断となるように設計した。

制震ストッパーは常時・レベル 1 まで固定装置、レベル 2 ではダンパーとして使用が可能なデバイスである。

表-3 地震時水平力

		橋軸方向 (kN)		橋軸直角方向 (kN)	
		レベル 1	レベル 2	レベル 1	レベル 2
固定支承 A2橋台	G1	2642.1	353.5	1321.0	1814.4
	G2	2642.1	353.5	1321.0	1814.4

※レベル2の応答値は橋軸方向・橋軸直角方向ともに橋軸直角方向加震時の値を示す

(3) 支承可動化の施工手順

本橋が架かる道路は重要路線のため、支承可動化にあたっては通行止めが出来ないとの制約条件があった。そこで支承下面をはつり、支承をジャッキダウンすることで、通行止めすることなく支承を可動化するよう計画を行った。

図-18 に支承可動化の手順を示す。

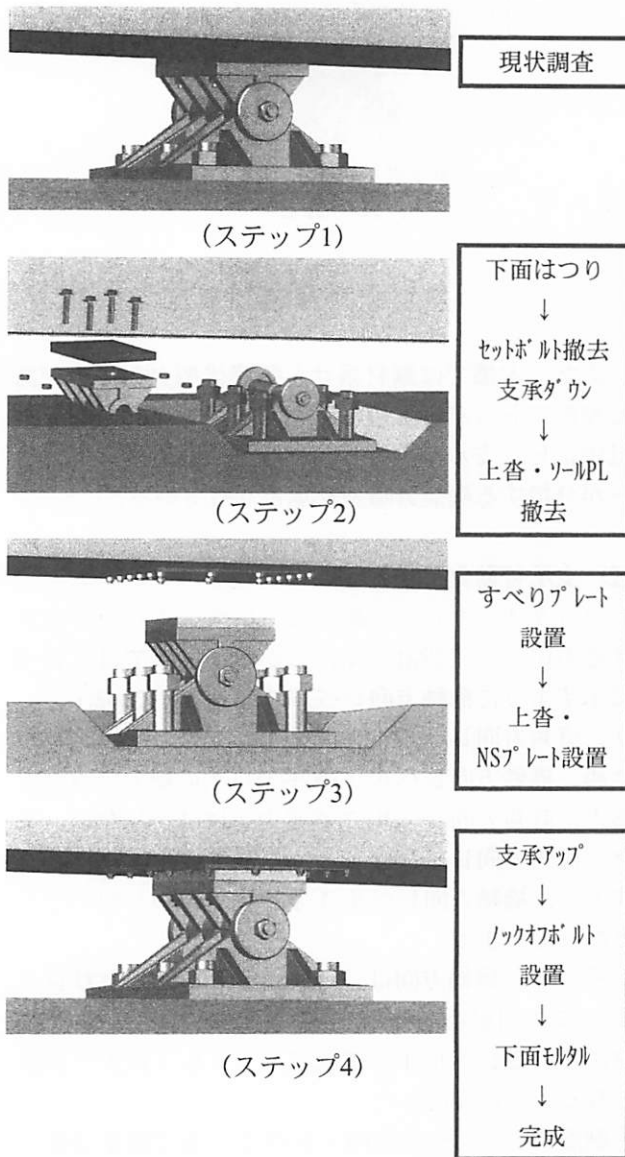


図-18 支承可動化手順

6. まとめ

単純ニールセンローゼ橋の耐震性能照査と耐震性向上策について、検討結果を整理すると以下の通りである。

- (1) 現況の照査では、レベル2地震時に補剛桁、横桁、縦桁、ケーブル、アーチリブ支材、下横構の一部が降伏応力度を超過した。また、固定支承は応答

水平力が降伏耐力の5倍程度超過し、可動支承は応答水平力が降伏耐力の2倍程度超過した。さらに、可動支承の応答変位は設計移動可能量の7割程度超過した。

- (2) 本橋の制震装置として、可動支承側には粘性ダンパー、固定支承側には制震ストッパーを配置することにより、各部材の応答値に大幅な低減効果が得られた。よって、固定支承側にはレベル2時にセットボルトがロックオフし、可動化する構造が必要となった。
- (3) 粘性ダンパーはおよび制震ストッパーの設置方向は、橋軸方向となっているが、橋軸直角方向の加震に対し、支承線上における橋軸方向への応答変位により、橋軸直角方向の応答値低減にも寄与することが分かった。
- (4) 本橋で採用した既設固定支承の可動化工法（すべりリッチ）は、新たに免震支承などに取り替えるものではなく、既設支承の上査を現場で改造するものであり、経済性に優位である。

参考文献

- 1) 本荘清司，横山和昭，前原直樹，田崎賢治，姫野岳彦：ロックオフ機能付き支承構造を用いた既設橋梁の耐震補強対策，構造工学論文集，Vol.55A，土木学会，pp.506-514，2009.3
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，pp.4-9，2002.3
- 3) 日本鋼構造協会：鋼橋の耐震・制震ガイドライン，技報堂出版，pp. 38-45，2006.9