

三径間連続一面吊り鋼斜張橋の耐震補強 —鶴見つばさ橋耐震性向上工事—

Aseismic Reinforcement of 3-Span Continuous Single-Plane Suspension Cable-stayed Bridge - Aseismic Improvement of the Tsurumi Tsubasa Bridge -

栗田 繁 実*¹ 安中 順 策*² 藤井 一 成*³
Shigemi KURITA Jyunsaku ANNKA Kazunari FUJII

小林 智 則*⁴ 佐藤 昌 義*⁵ 小林 裕 輔*⁶
Tomonori KOBAYASHI Masayoshi SATO Yusuke KOBAYASHI

Summary

The Tsurumi Tsubasa Bridge, which was opened in 1994, is Japan's largest single-plane suspension cable-stayed bridge. The aseismic design of the bridge is rated for Level 1 seismic ground motion, which is highly likely to occur within its service period. However, reviewing damage to bridges affected by the Great Hanshin Earthquake in 1997, we carried out aseismic reinforcement of the bridge to enable it to maintain a sound condition and allow use by vehicles as soon as possible after the bridge suffers damage in an earthquake, even at a seismic ground motion intensity of Level 2, which is less likely to occur within the service period. The present paper presents an outline of the reinforcement work as well as some devices applied to the project and a post-earthquake rehabilitation plan.

キーワード：長大橋 レベル2地震動 耐震補強 高周波コアドリル

1. はじめに

港湾部に位置する首都高速道路湾岸線の本牧ふ頭～空港中央間の16.4kmは、1994年12月21日に開通した路線であり、供用開始から約14年が経過している。その中の大黒ふ頭～東扇島間を結ぶ鶴見つばさ橋は、一面吊り斜張橋では日本最大の橋梁であり、建設当時、大黒ふ頭側については当社が設計、製作、施工を行っている。

耐震設計は、1977年以降に大黒ふ頭において観測された地震波をもとに、再現期間75年の想定地震レベルに修正して設計を実施しており、当時では大きな地震動に対して強度および機能上問題がないような設計が行われている。しかし、1995年の兵庫県南部地震では、当時の規定地震をはるかに上回る地震動となり、橋梁構造物も甚大な被害を受けた。そこで、鶴見つばさ橋についても、供用期間中に発生する確率は低い、大きな地震動強度を持つレベル2地震動を考慮した耐震性の検討が行われている^{1), 2)}。

今回補強を実施するにあたり、耐震評価として、上記の耐震性検討の入力地震波11波の中で、橋梁に最も影響を与える1波を選定して、複合非線形動的解析による

耐力照査を実施した。さらに、その中で、解析の妥当性と補強効果の確認を実施し、耐震補強の有効性の検証を行った³⁾。

本稿では、目標とする耐震性能及び耐震補強の概要について報告する。また、施工を円滑に進めるために実施した新たな取り組みなどについても報告する。

2. 鶴見つばさ橋の構造概要および設計思想

(1) 構造概要

図-1に鶴見つばさ橋の全体概要図を示す。鶴見つばさ橋は、中央径間510m、橋長1020m、橋幅38mの三径間連続鋼斜張橋であり、一面吊り斜張橋という特徴的な橋梁である。端部は中空RC橋脚、主塔はSRC橋脚、鋼殻、鋼製主塔で構成され、主桁は逆台形形状の5室偏平箱桁である。

端橋脚の支持構造は、鉛直支持及び橋軸方向はペンデル支承、橋軸直角方向は水平支承で構成されており、主塔部の支持構造は、橋軸方向は弾性支持である弾性拘束ケーブルとベーン型オイルダンパー、橋軸直角方向は水平支承、鉛直支持は鉛直支承から構成されている。また、

*1(株)宮地鐵工所 技術本部保全部保全技術グループ

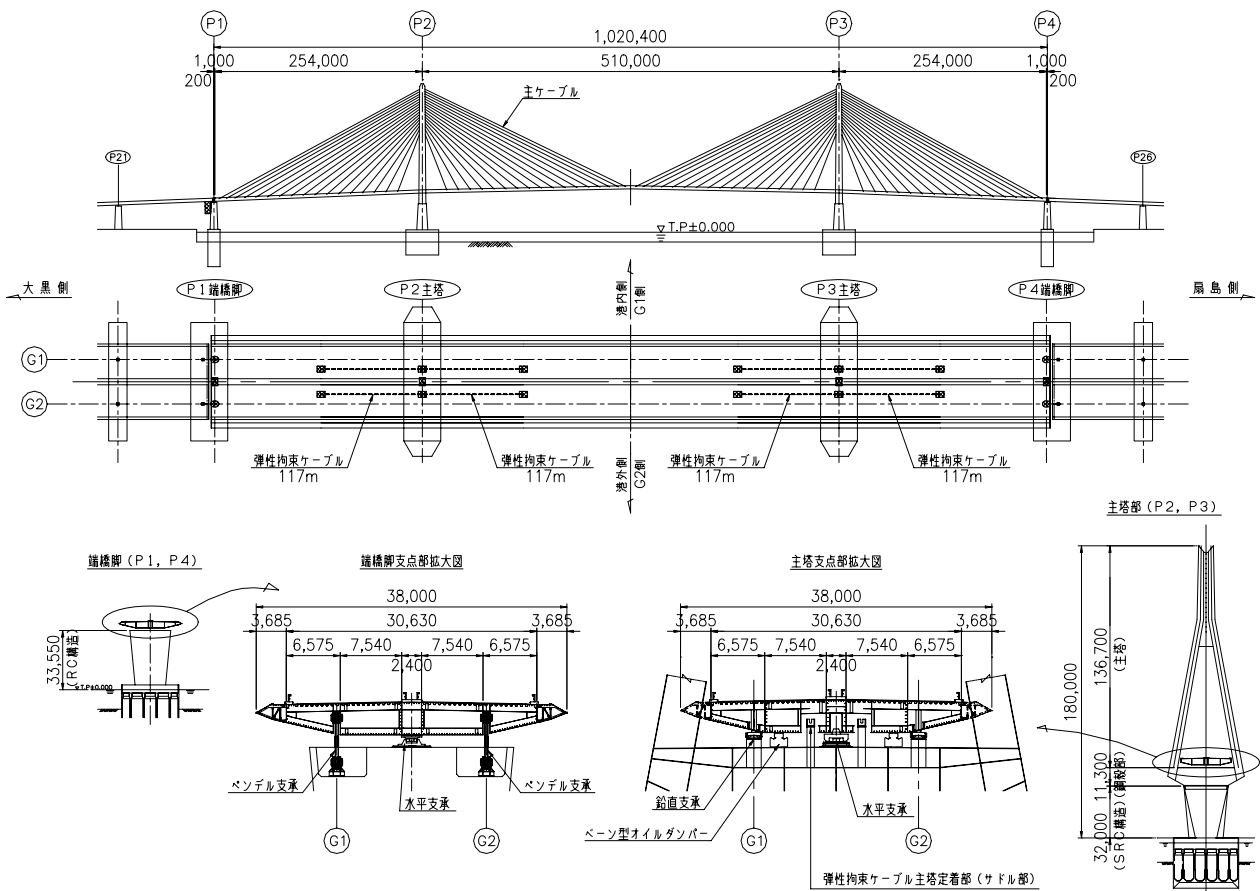
*2(株)宮地鐵工所 工事本部工事部長(現場代理人)

*3(株)宮地鐵工所 工事本部工事計画部東京計画グループ

*4(株)宮地鐵工所 工事本部工事部東京工事グループ

*5(株)宮地鐵工所 技術本部保全部保全技術グループ課長

*6(株)宮地鐵工所 技術本部保全部課長



図一 鶴見つばさ橋全体概要図

主塔部に地震時変位抑制のために弾性拘束ケーブルとストッパーが設けられている。

(2) 目標とする耐震性能

鶴見つばさ橋が目標とする耐震性能は、レベル2地震動によって生じる損傷が限定的なものにとどまり、最悪の事態である落橋や倒壊が起きないことを目標としている。損傷箇所とその状態によっては恒久的な補修に時間を要することも予想されるが、応急復旧により緊急車輛等は地震後短時間で監視下のもと通行可能であり、一般交通も走行速度制限等を行うことにより、恒久的な補修を行いながらの走行が可能な損傷程度を想定している。

(3) 耐震性能評価及び補強方針

これまで目標とする耐震性能を確認するため、橋梁全体系を対象とした非線形動的解析等を実施し、各構造要素の損傷を把握するとともに、損傷による連鎖現象を整理し、許容できる損傷と出来ない損傷に分類している。その際、損傷評価に用いた損傷評価は以下の指標で分類した。

レベルⅠ：降伏をわずかに超える塑性変形（軽微な損傷）

レベルⅡ：降伏を超えるが最大耐力に対して余裕がある場合（中程度の損傷）

レベルⅢ：降伏を大きく超え最大耐力付近まで塑性変形が生じている場合（重度な損傷）

各補強毎の損傷状況、補強方針、補強後の損傷状況を表一に示す。このうち、重度な損傷は許容できない損傷と判定し、損傷レベルⅡ以下となるように耐震補強を行うこととした。

3. 詳細設計前における補強効果の検証解析

耐震補強設計を実施するにあたり、補強効果の検証を目的でファイバー要素を用いた橋梁全体モデルを作成し、複合非線形動的解析を実施している。解析の目的は、補強する構造部材及び補強しない構造部材において、補強後において想定された損傷レベルが変化しないか、また、橋梁全体系として安定し、耐震性能を満足しているかを検証した³⁾。その結果、補強後においても当初想定していた耐震性能が確保されていることが明らかとなっている。

表-1 鶴見つばさ橋の補強前後の損傷状態と耐震

対象とする構造部位	方向判定値	補強前の損傷状況	既設損傷レベル	補強方針	補強後の損傷状況	
主桁	橋直方向部材断面力	主桁の外ウェブが降伏する。	Ⅱ	不要	ケーブル定着部の中ウェブは弾性域である。よって主桁の一部塑性化を許容する。	—
主塔 (SRC構造)	橋軸方向せん断応力	中空SRC構造部他のせん断耐力を超過する。	Ⅲ	補強	せん断力が不足しているため、炭素繊維シートを巻き立てる補強を行う。	耐力増強の結果、要求される耐震性能を満足している。
端橋脚 (RC構造)	橋直方向曲率	塑性変形が生じる。	Ⅱ	不要	降伏を超えるが許容塑性率以内である。	—
端橋脚ペンデル支承	橋軸方向移動量	ペンデル支承の可能移動量を超過する。	Ⅲ	補強	橋軸方向の変位に対応するように下フランジの開口を大きくする。	ペンデル支承の移動可能量増加により損傷を生じない。
端橋脚水平支承	橋軸方向移動量	水平支承の可能移動量を超過する。	Ⅲ	補強	水平支承のガイドレール延長を行う。	水平支承の移動可能量増加により損傷を生じない。
	橋直方向水平力	水平支承の耐力を超過する。	Ⅲ	補強	水平支承のみでは水平力に対して耐力不足であるため部材の一部を交換する。	水平支承の降伏耐力を超過する。
主塔鉛直支承	橋軸方向移動量	鉛直支承の可能移動量を超過する。	Ⅱ	不要	鉛直支承が損傷しても橋梁全体系としては安定している。	—
主塔水平支承	橋軸方向移動量	水平支承の可能移動量を超過する。	Ⅲ	補強	橋軸方向の変位に対応するように水平支承のガイドレールの延長を行う。	水平支承の移動可能量増加により損傷を生じない。
	橋直方向水平力	水平支承の降伏耐力を超過する。	Ⅱ	不要	破断耐力に対しては十分安全であるため許容する。	—
ベーン型オイルダンパー	橋軸方向速度	ベーン型オイルダンパーに100kineを超える相対速度が作用し、地震動の初期にダンパーとしての機能を喪失する。	Ⅲ	不要	設計時に想定した性能をはるかに超えるため、レベル2地震に対してはその機能を期待しない。	—
ストッパー	橋軸方向移動量	主塔と主桁の衝突によりストッパーの耐力を超過する。	Ⅲ	補強	ストッパーの損傷に伴う他部位への影響に対して検討し、ストッパーを撤去する。	ストッパー撤去による他の構造要素の耐震性は損なわれないことを確認。
ケーブル	橋軸方向張力	最下段ケーブルに張力抜けが生じる。	Ⅰ	不要	張力抜けに伴いケーブル脱落が発生しないように脱落防止構造の確認を行う。	—
弾性拘束ケーブル	橋軸方向張力	弾性拘束ケーブルに降伏を超える軸力が発生する。	Ⅱ	不要	破断耐力に対しては十分安全であるため許容する。	—
弾性拘束ケーブル定着部	橋軸方向張力	弾性拘束ケーブルの主塔側定着部、主桁側定着部の耐力を超過する。	Ⅲ	補強	主塔側定着部、主桁側定着部共に耐力不足であるため補強を行う。	定着部は弾性状態に留まり、要求される耐震性能を満足している。
桁端部	橋軸方向移動量	橋軸方向に桁端が大きく変位するため、隣接橋に衝突し、隣接橋に大きな影響を与える。	Ⅲ	補強	鶴見つばさ橋の桁端変位量を考慮した隣接橋の落橋防止対策を行う。	段差防止装置を設置することで隣接橋は落橋を回避した。

4. 耐震補強構造

今回実施する耐震補強設計は、先ほど述べた耐震性能を満足させるため、許容できない損傷が生じる構造部位に対して許容できると判断された損傷（レベルⅡ以下）にとどめることである。

各構造部位の詳細設計においては、降伏耐力を目指す構造部材と降伏耐力は超えるが最大耐力に対して余裕のある部材を考慮して詳細設計を実施している。以下に今回実施した各構造部材の耐震補強概要を述べる。

- (1) 端橋脚 隣接橋の落橋防止システム
- (2) 端橋脚 水平支承
- (3) 端橋脚 ペンデル支承

- (4) 主塔部 水平支承
- (5) 弾性拘束ケーブル定着部（主桁部、主塔部）
- (6) 橋軸方向ストッパー

なお、補強が必要な構造要素のうち、主塔部SRC構造のせん断補強は、せん断耐力不足を補う目的で炭素繊維シートによる巻き立て補強を実施しているが、詳細設計及び施工を当社で実施していないため、詳細な説明から除く。

(1) 端橋脚 隣接橋の落橋防止システム

レベル2地震時における鶴見つばさ橋の橋軸方向の桁端変位は、隣接橋との遊間量を超えることから隣接橋を押し出すように衝突し、隣接橋が支承より逸脱して落橋

する可能性がある。隣接橋は三径間連続鋼床版二主桁桁橋であり、鶴見つばさ橋の端橋脚上に設置されているピボット支承（可動、支承高さ1100mm）が逸脱した場合は、路面に大きな段差を生じる可能性がある。そこで、震災後の緊急車輛の走向を確保するために、隣接橋の落橋防止システムとして遊間50mmの段差防止装置を設けることとした。

検討当初は、鶴見つばさ橋によって押出される橋軸方向移動のみに着目して計画を行っていたが、レベル2地震時には鶴見つばさ橋だけではなく隣接橋自身も移動することから、段差防止装置が補える移動範囲を隣接橋自身が移動する範囲（橋軸、直角両方向）まで許容できる段差防止装置とした。その結果、橋脚前面のみの緑端拡幅では移動範囲を補うことが出来なくなり、橋軸直角方向へも緑端拡幅を実施する必要性が生じた。当初計画していた緑端拡幅構造は鋼製ブラケットであるが、三次元的に変化する端橋脚側面形状を鋼製構造で再現することは困難であるという判断から、緑端拡幅については、コンクリート製構造に変更を行っている。また、隣接橋支

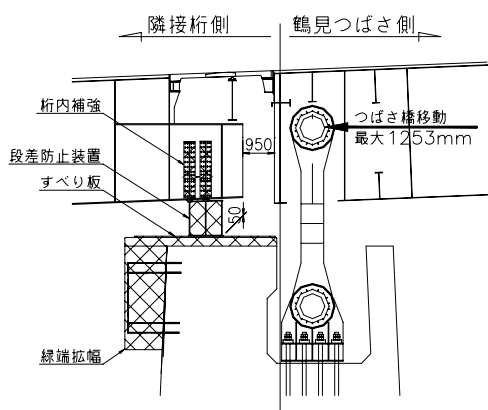


図-2 段差防止装置の構造概要



写真-1 緑端拡幅配筋状況

承が逸脱して段差防止装置が橋脚天端に落下した後も、隣接橋は移動することから、端橋脚天端にすべり板を設置して移動時の摩擦係数低減を図っている。図-2に構造概要図、写真-1に緑端拡幅配筋状況の写真を示す。

ここで、コンクリート製緑端拡幅は、既設橋脚との定着のため鉄筋1440本を差し込む。通常、既設コンクリート構造への穿孔は、ダイヤモンドコアドリルを使用するが行うが、内部の鉄筋状況は不明確であり、鉄筋を切断しないように施工するには、職人の感覚に頼って行っていた。しかし、職人の感覚では限界がある。そこで、機械的に内在物にあたると機械を停止させる機能を有する高周波コアドリルを使用して施工を行っている。高周波コアドリルについては、その機能を確認する目的で施工試験を実施しており、この結果については後述する。

(2) 端橋脚 水平支承

1) 橋軸方向移動量に対する補強

端橋脚に設置されている水平支承は、橋軸方向には可動、橋軸直角方向にはヒンジとして設計されており、橋軸直角方向に作用する地震荷重や風荷重等に対して抵抗する構造部材である。耐震性確認の結果、レベル2地震時に水平支承は橋軸方向移動可能量を超過することが明らかとなっており、その結果、上下支承が外れる可能性がある。そのため、ガイドレールを延長して、橋軸方向の移動可能量を確保することとした。

増設ガイド部材は、最大移動時における上沓衝突部の面積分の荷重を分担して受け持つものとして、既設ガイド部材と同様な構造として設計を行っている。しかし、既設ガイド部材は、RC構造にφ160のアンカーボルトで固定されているが、RC構造へ穿孔などを考えると、同等のアンカーボルトを使用して固定することは困難であることから、延長ガイド部材は、溶接にてベースプレートに固定し、増設ベースプレートを細径のアンカーボルト

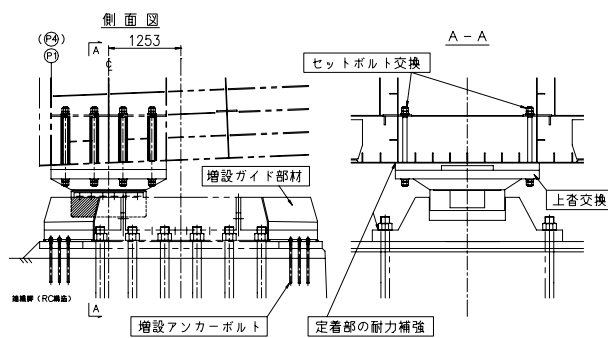


図-3 端橋脚水平支承補強概要図

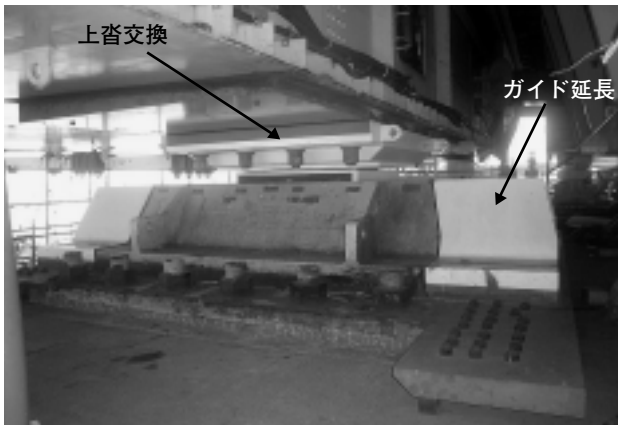


写真-2 端橋脚水平支承

でRC構造に固定することで荷重伝達を行っている。図-3に補強概略図、写真-2に設置後の写真を示す。

2) 橋軸直角方向作用水平力に対する補強

レベル2地震時における橋軸直角方向作用水平力は、端橋脚水平支承の終局耐力を超過する。そのため支承の耐力向上を行うこととした。しかし、現場の制約条件より抵抗断面の増加は不可能であるため、既設支承の材質(SCW49)を鋳鋼品では限界であるSCW550へ材質アップすることで、耐力向上を行った。

また、支承を固定する定着構造(セットボルト及びボルト定着部、溶接部等)は、支承本体以上の耐力を有していなければならない、降伏耐力以上の耐力となるように材質アップ、増盛溶接等の補強を実施した。

(3) 端橋脚 ペンデル支承

端橋脚に設置しているペンデル支承は、桁端部の鉛直力に抵抗する部材であり、橋軸方向は可動の状態である。耐震性確認の結果、橋軸方向の桁端変位により、主桁下

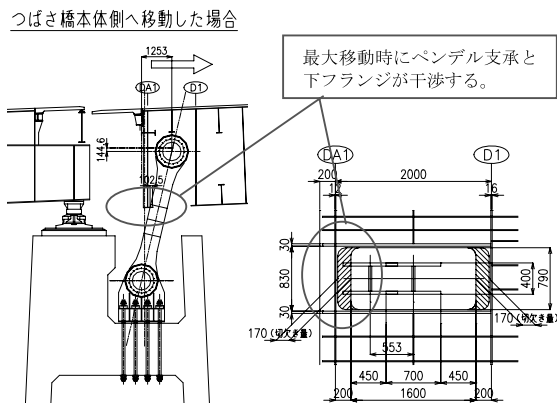


図-4 ペンデル支承補強図

フランジとペンデル支承が衝突し、ペンデル支承が損傷することが判明したため、図-4に示すように、主桁下フランジの開口を拡大する対策を実施している。

(4) 主塔部 水平支承

1) 橋軸方向移動量に対する補強

主塔部の水平支承は、端橋脚の水平支承と同様に橋軸方向には可動、橋軸直角方向にはヒンジとして橋軸直角方向に作用する荷重に抵抗する構造部材であり、耐震性確認の結果、レベル2地震時に水平支承は橋軸方向移動可能量を超過することが明らかとなっている。そのため、ガイドレールを延長して橋軸方向の移動可能量を確保する補強を実施している。

設計荷重は、最大移動時における下沓衝突部の面積分の水平力を分担して受け持つものとしており、既設ガイド部材と同様な構造として設計を行っている。図-5に補強概略図、写真-3に補強後の写真を示す。

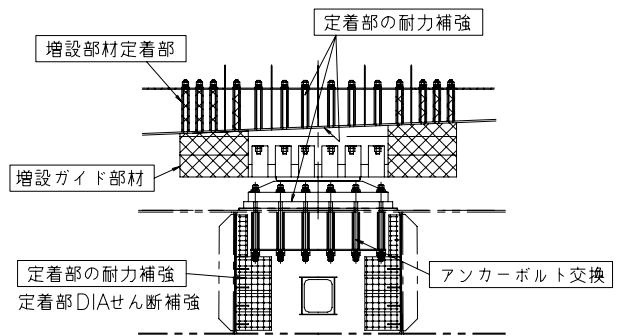


図-5 主塔部水平支承補強概要図

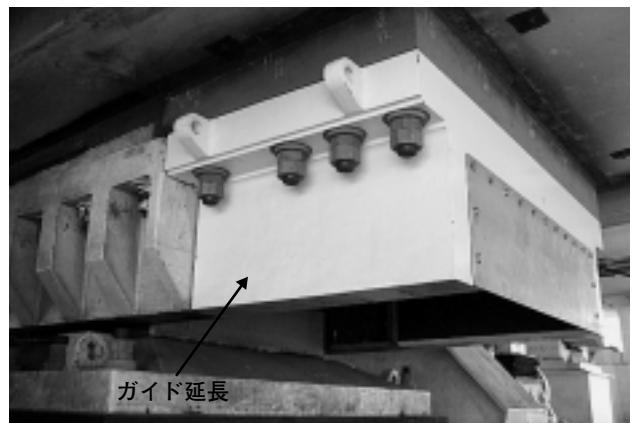


写真-3 主塔水平支承

2) 橋軸直角方向水平力に対する補強

主塔部水平支承は、レベル2地震時における橋軸直角方向作用水平力に対して降伏耐力は超過するが終局耐力

に対しては余裕があり、橋梁全体系としては安定している。従って補強は実施しない。しかし、支承を固定する定着構造（セットボルト、アンカーボルト及びそれらボルトの定着部、溶接部等）は、支承本体以上の耐力を有していなければならず、降伏耐力以上の耐力となるように材質アップ、増盛溶接、当て板補強等を実施した。

(5) 弾性拘束ケーブル定着部（主桁部、主塔部）

橋軸方向の弾性支持構造として採用されている弾性拘束ケーブルは、レベル2地震時に橋軸方向に大きな変位を生じ、弾性拘束ケーブルに降伏耐力を超える張力が発生するが、破断耐力に対しては、十分安全である。しかし、ケーブル定着部である主桁部の縦シャイベ構造及び主塔部の定着サドル部は、地震時に作用するケーブル張力によって大きな損傷が生じることが判明している。定着部が損傷すると、ケーブル張力に対する支持機能が失われるため、定着部の補強を行った。

補強設計は、ケーブルより作用する力に対し、定着部が降伏以下となるように、主桁部は図-6のような補強構造とし、主塔サドル部は鋼製フレームにて補強する構造（図-7）とした。主桁部の補強においては、弾性拘束ケーブルの軸力を一時的にジャッキで受け換えて施工

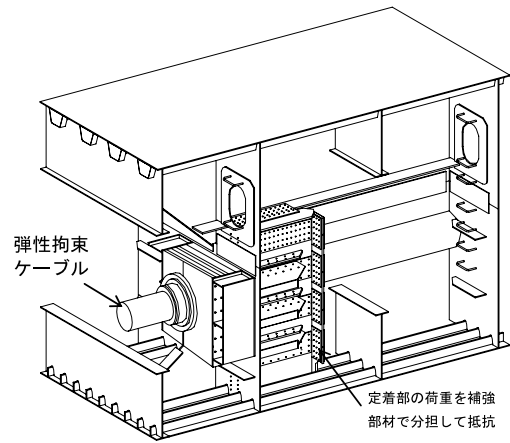


図-6 縦シャイベ部補強図

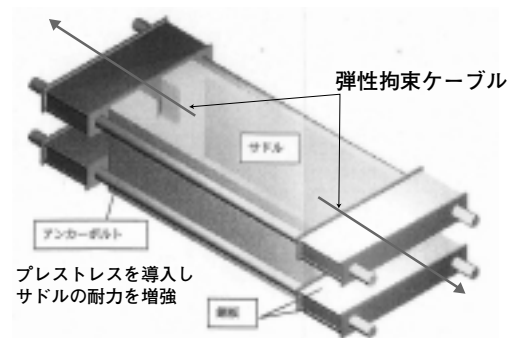


図-7 サドル部補強図



写真-4 サドル補強状況

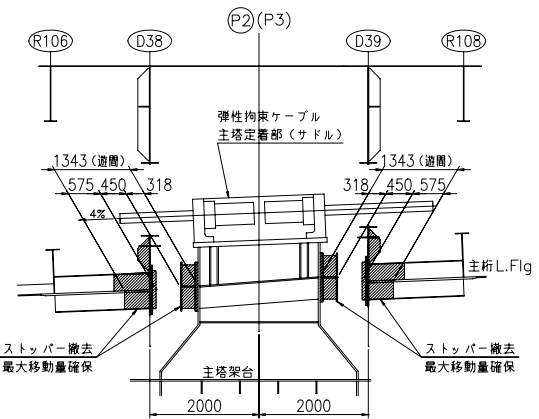


図-8 ストッパー撤去、下フランジ開口部拡大構造概要

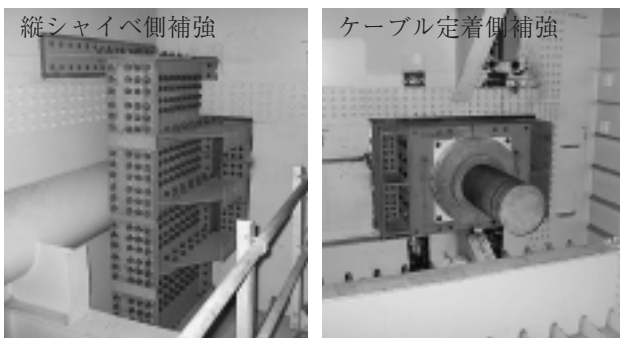


写真-5 縦シャイベ補強状況



写真-6 下フランジ開口部拡大状況

を実施した。写真－４、写真－５に補強後の写真を示す。

(6) 橋軸方向ストッパー

橋軸方向ストッパーは、レベル２地震時に衝突し、ストッパーの耐力を超える衝撃力が作用する。主塔側の衝突部は、弾性拘束ケーブル定着部と一体の構造であり、損傷の許されない箇所である。さらに、橋梁全体の移動量をこのストッパーで制約することは困難である。従って、橋軸方向の移動には制限を設けないこととし、ストッパーの撤去及び橋軸方向の最大移動量を確保する補強を実施した。図－８に構造概要図、写真－６に施工後の状況写真を示す。

5. 高周波コアドリルの採用

既設コンクリート橋脚にアンカーや鉄筋などを定着させるため、通常は、ダイヤモンドコアドリルを使用して穿孔し、樹脂やモルタルで定着を行う。コンクリートと鉄では硬度が異なるため、穿孔を行っている際の感覚で鉄筋などに当たっていることは分かるが、あくまでも人の感覚であり、過去に主鉄筋などを切断してしまっている事例も発見されている。そこで、鶴見つばさ橋では、所定の硬度以上の物体に当たった場合に自動的に穿孔をストップする機能を有する高周波コアドリルを使用した。

(1) 高周波コアドリルの特徴

高周波コアドリルは、従来のコアドリルに比べ、穿孔速度を上げ、かつ、低騒音、低振動を実現させるコアドリルとして開発された穿孔機械である。

基本的な構造は、従来のコアドリルと同様であるが、従来のコアドリルが低回転（150～800回転）高トルクで穿孔するのに対して、高周波コアドリルは、高回転（3000～8000回転）低トルクで穿孔する点が大きく異なる。高回転で穿孔作業を行うことで、コア径 $\Phi 25\text{mm}$ の場合、従来の3倍以上の速度で穿孔可能である。

また、安全性を確保する目的でコンピューター制御により、コア刃先端がコンクリート以上の硬いものに当たり、機械に一定以上の負荷がかかった時に、その回転をストップさせる機能が搭載されている。結果的に、鉄筋に接触すると機械が停止し、鉄筋を切断しないという施工が実現できた。

(2) 施工状況

写真－７に施工時の写真を示す。ハンドタイプでの穿孔が可能であり、速度も速く施工性に優れた機械である。



写真－７ 高周波コアドリル施工状況

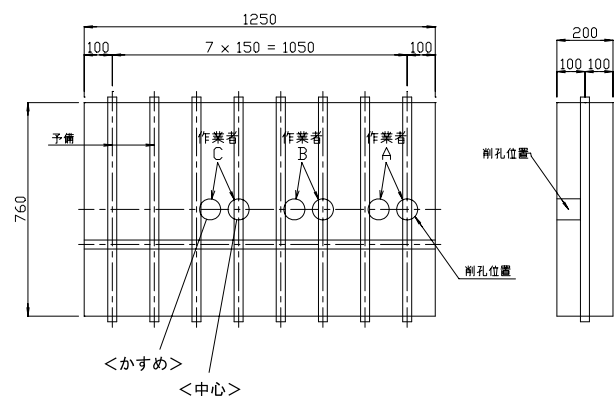
(3) 施工試験について

高周波コアドリルは、鉄筋を切断せずにコア穿孔が可能であるのか、また、作業者の技量・熟練度により違いがないかを確認する目的で施工試験を実施した。

1) 試験方法

図－９に示す形状で、鶴見つばさ橋の端橋脚と同様のコンクリート強度（ 30N/mm^2 ）を有する試験体を、鉄筋D25、D32を入れ二体製作した。これは、実際の穿孔位置に配置されている主鉄筋とスターラップの鉄筋径を再現している。穿孔径は実際に施工する最大孔径の $\Phi 75$ を使用する。

穿孔方法としては、任意の作業者が各試験体に二本穿孔を行う。一本は、円の中心に鉄筋が来るよう穿孔し、もう一本は、鉄との接触面積が小さい場合を想定して、5 mm程度かすめるように穿孔を行った。



図－９ 高周波コアドリル施工試験体

2) 試験状況

写真-8 に施工試験の状況を示す。試験中は、作業者の違いにかかわらず、鉄筋に当たったと思われる段階で一様にドリルが停止し、作業者が異なっても機械が自動的に止まることが確認できた。



写真-8 施工試験状況

3) 考察

施工試験により、高周波コアドリルは、鉄筋などの内在物に当たった場合、作業者の熟練度に関係なく機械的に穿孔やめる機能を有していることが確認できた。また、穿孔作業速度が速く、現場作業時間の短縮にも繋がることが分かった。

7. おわりに

今回報告した補強により、鶴見つばさ橋は、レベル2地震動に対して目標とする耐震性能が確保された。各補強部位の詳細設計は、当初想定した補強のシナリオを満足させるように実施しているが、隣接橋段差防止装置で示したように、鶴見つばさ橋のレベル2地震時挙動に加

えて、周辺の地震時状況も想定して設計を行っている。また、実際に施工を行う状況を想定し、荷運びや設置が可能な部材重量や大きさの制限、現場溶接や塗装作業に配慮した構造に気を配り、補強部材の細部構造を決定している。

現在、設計された構造が形となり、端橋脚及び主塔部の水平支承補強、ストッパーの撤去、弾性拘束ケーブルの定着部補強等を終え、補強工事が完了に向かいつつある。引き続き、安全に配慮しつつ工事を完成させたい。

最後に、本工事の設計、施工を行うにあたり、首都高速道路株式会社神奈川管理局をはじめ多くの関係者の方にご指導を賜りました。また、株式会社ミスミ特殊においては、高周波コアドリルという新たな技術の提案を頂き、大変感謝しております。誌面を借りてこれらの関係各位に厚く御礼を申し上げます。

<参考文献>

- 1) 小森和男, 吉川博, 小田桐直幸, 木下琢雄, 溝口孝夫, 藤野陽三, 矢部正明: 首都高速道路における長大橋耐震補強の基本方針と入力地震動, 土木学会論文集No.794/I-72, pp.1-19, 2005.7.
- 2) 小森和男, 吉川博, 小田桐直幸, 木下琢雄, 溝口孝夫, 藤野陽三, 矢部正明: 首都高速道路における長大橋耐震補強検討, 土木学会論文集No.801/I-73, pp.1-20, 2005.10.
- 3) 永谷秀樹, 栗田繁実, 小林裕輔, 佐藤昌義: 耐震補強した三径間連続1面吊り斜張橋の複合非線動的解析 (鶴見つばさ橋), 宮地技報No23, 2008.3.

2008.2.1 受付

グラビア写真説明

第502工区(野多目)高架橋上下部工(鋼橋)新設工事(その4)

福岡市南西部は鉄軌道系の大量交通機関が整備されておらず交通渋滞が恒常的に生じており、その緩和策として福岡高速5号線(外環状線。月隈JCT~福重JCT 延長18.1km)の計画が持ち上がり、現在月隈JCT~堤間10kmが供用されています。本橋は同路線の2工区(野多目~堤4.4km)の中に架かっており、平成18年3月末に供用され、渋滞緩和に大いに役立っています。本橋のタイプは連続合成開断面箱桁橋で従来の箱桁と比べ主桁重量、材片数が減って工事費が大幅に縮減されているし、床版は合成床版を採用又維持管理コストを減らす為に亜鉛アルミニウム金属溶射が採用されました。

(田中 輝)