

## かつしかハープ橋における耐震補強の設計概要

## SEISMIC STRENGTHENING OF KATSUSHIKA-HARP BRIDGE

松原拓朗\* , 小林明史\*\*

Takuro MATSUBARA and Akifumi KOBAYASHI

ABSTRACT : The Katsushika-Harp bridge is an “S” shape cable stayed bridge with four-continuous spans on the Central Circular Route of the Metropolitan Expressway. It was opened to traffic in 1987 and has been playing an important role as a part of the transportation network in the Capital Area. Recently, possible damages on the bridge caused by Level-2 earthquakes, assumed based on actual seismic records of the Hyougoken-Nanbu Earthquake, were analyzed. Then, seismic retrofitting works were executed where relatively serious damages were assumed. This paper presents the result of seismic analysis on the Katsushika-Harp Bridge using Level-2 earthquakes and the seismic retrofitting works executed.

KEYWORDS : 耐震補強, 動的解析, FEM 解析

## 1. まえがき

かつしかハープ橋は、昭和 62 年に供用が開始された中央環状線（葛飾江戸川線）のうち、綾瀬川と中川の合流部を渡河する橋長 455m の 4 径間連続鋼床版箱桁斜張橋である<sup>1)</sup>。上部構造は、架橋位置の交差条件から、S 字形となっており、下部構造は、鋼製橋脚と RC 橋脚、基礎構造は、杭基礎、ケーソン基礎および鋼管矢板基礎である。かつしかハープ橋は、兵庫県南部地震以前に設計、建設されており、レベル 2 地震動を考慮した設計がなされていない。そのため、平成 17 年 3 月より耐震補強工事を行っている。本稿では、かつしかハープ橋の耐震補強の設計概要について報告する。

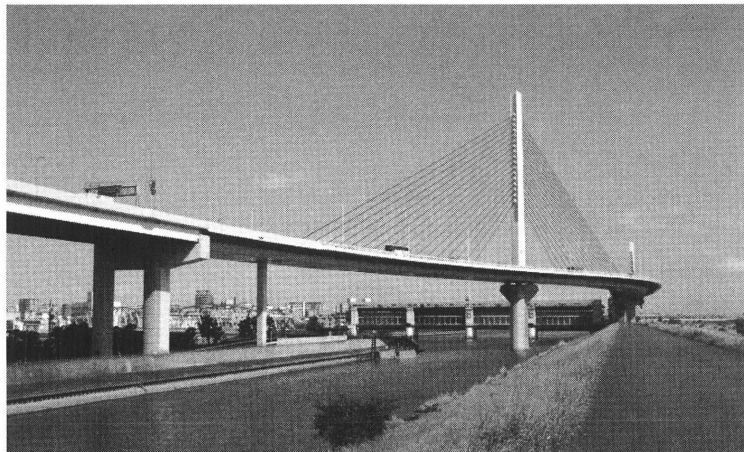


図-1 かつしかハープ橋全景

\*首都高速道路（株） 東東京管理局 保全設計第一グループ 上級メンバー（〒103-0051 東京都中央区日本橋箱崎町 43-5）

\*\*首都高速道路（株） 東東京管理局 保全設計第一グループ メンバー（〒103-0051 東京都中央区日本橋箱崎町 43-5）

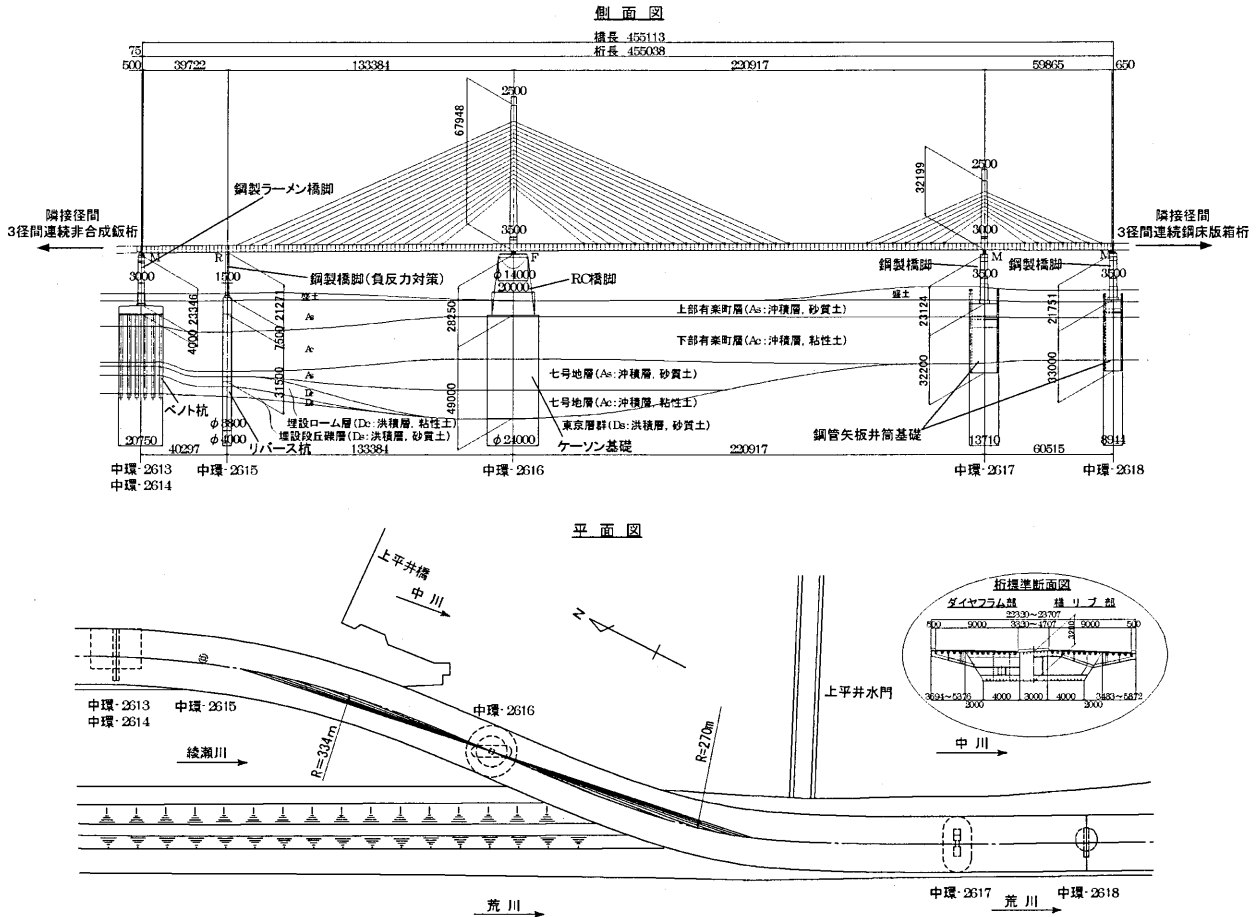


図-2 かつしかハープ橋一般図

## 2. 目標とする耐震性能

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する。具体的には、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想定されるが、応急復旧により緊急車両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なうことにより、恒久的な補修を行ないながらの走行が可能な程度を想定している。

## 3. 耐震性能の照査

### 3.1 動的解析

#### (1) 動的解析モデル

非線形動的解析は、幾何学的非線形の影響が無視できないものと考え、有限変位理論による解析を実施した。骨組みモデルは、平面線形がS字曲線のため、立体骨組みモデルとし、二軸曲げを評価するため、親塔、子塔及び鋼製橋脚はファイバー要素でモデル化した。RC橋脚は、形状が3次元的に変化しているため、3次元FEM解析によるプッシュオーバー解析を実施し、荷重-変位関係を求め、橋梁全体系動的解析モデルに反映した(図-3)。また、各橋脚が異なる形式の基礎構造に支持されている影響を適切に考慮するため、基礎構造-周辺地盤系モデルを用いた。

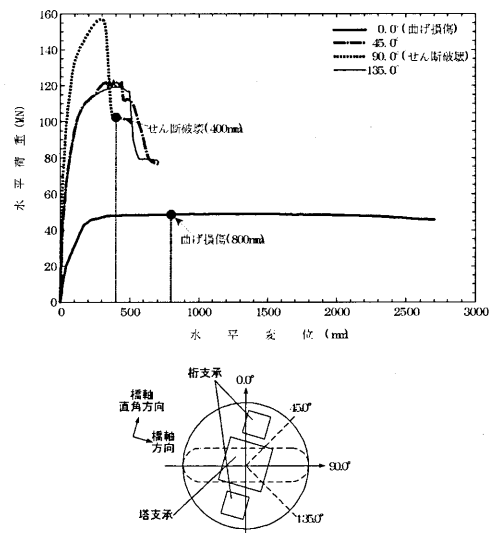


図-3 RC橋脚の荷重-変位関係

動的解析モデルを図-4に示す。なお、動的解析モデルの妥当性について、かつしかハープ橋に設置された地震計の観測記録を用いて検証を実施している。

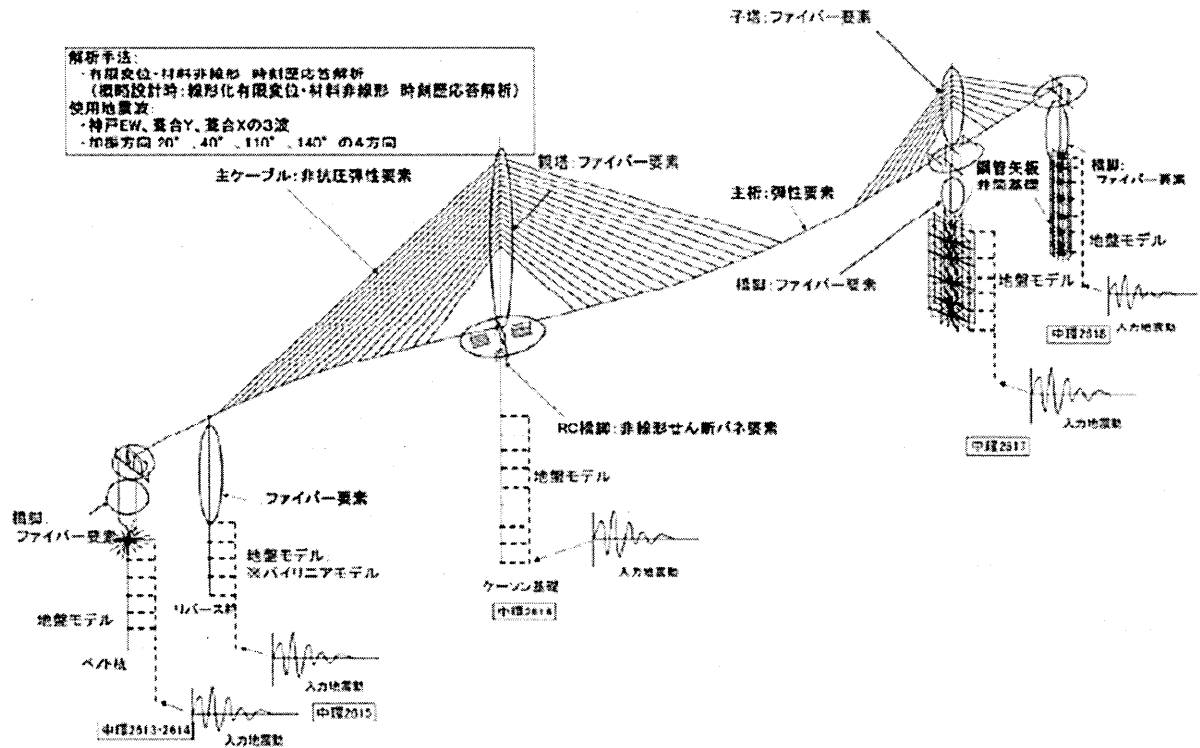


図-4 動的解析モデル

## (2) 入力地震動

基礎構造-周辺地盤系モデルを用いるため、入力地震動として工学的基盤面への入射波が必要となる。ここでは、レベル2地震動のうち、タイプIの地震動は、I種地盤上の標準加速度波形を、タイプII地震動は、1995年兵庫県南部地震において地表面で観測された地震動から工学的基盤面への入射波を算出し、その加速度応答スペクトルを平滑化したものに適合する加速度波形を用いた。

## (3) 解析

動的解析は、かつしかハープ橋の各構造部位に影響の大きい4方向、中環-2616橋脚位置における解析モデルのx座標に対する角度で、20度(中環-2616橋脚位置での橋軸方向)、40度、110度(中環-2616橋脚位置での橋軸直角方向)、140度方向について実施した。なお、地震波はタイプI地震動およびタイプII地震動の各3波形を用い、平均応答値で照査を実施した。

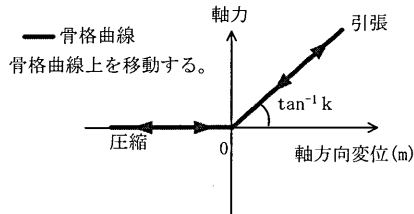
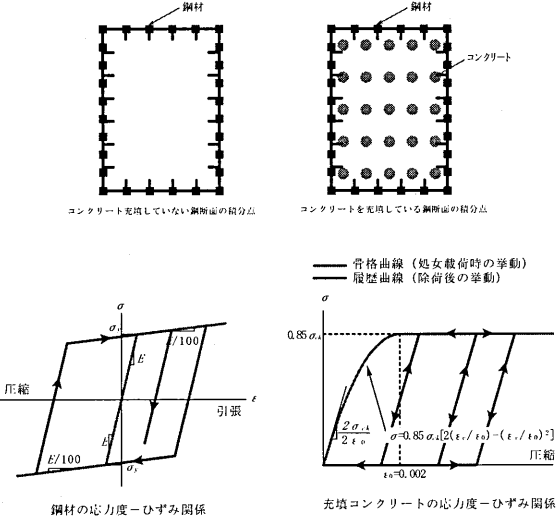
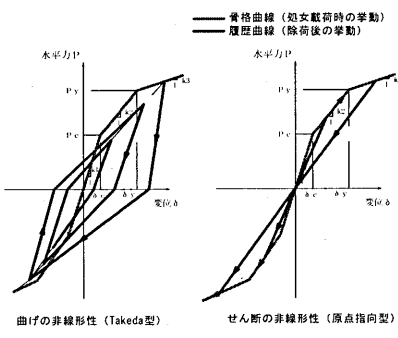
## 3.2 現橋の耐震性能

耐震性能の評価は、表-1に示す評価方法に従い実施した。ここで、ファイバーモデルでモデル化した部材は、降伏ひずみの2倍を許容できない損傷の目安として設定した<sup>2)</sup>。

その結果、以下に示す部材の損傷を許容できない損傷として、補強対象とした(図-5)。

- ① 親塔・子塔基部に生じる局部座屈
- ② 橋軸方向固定支承(中環-2616塔支承)の地震時水平力および負反力による損傷
- ③ 橋軸方向可動支承に対する移動量の超過および負反力による損傷
- ④ 鋼製橋脚に生じる局部座屈
- ⑤ RC橋脚(中環-2616)のせん断破壊

表-1 耐震性能の評価方法

構造要素	モデル化	着目量&損傷度の評価方法
桁 & 支承	線形はり要素	<p>動的解析から得られた支承の最大断面力 <math>N, M, S</math> をもとに支承の発生応力度を算出し、割増し係数 1.7 を考慮した許容応力度（基準降伏点相当）と比較する。</p> <p>1) 直応力度 <math>\sigma \leq \sigma_a \times 1.7</math></p> <p>2) せん断応力度 <math>\tau \leq \tau_a \times 1.7</math></p>
主ケーブル	 <p>骨格曲線 骨格曲線上を移動する。</p> <p>軸力</p> <p>引張</p> <p>tan<sup>-1</sup>k</p> <p>0</p> <p>軸方向変位(m)</p> <p>圧縮</p> <p>非線形トラス要素（非抗压部材）</p>	<p>動的解析から得られたケーブルの最大軸力 <math>N</math> をもとにケーブルの発生応力度を算出し、許容応力度および降伏強度、破断強度と比較する。</p> <p>1) 張力抜けの有無</p> <p>2) 直応力度 <math>\sigma \leq \sigma_y</math> (<math>\sigma_y</math>: 0.7%の伸び耐力)</p> <p>3) 直応力度 <math>\sigma \leq \sigma_u</math> (<math>\sigma_u</math>: 破断強度)</p>
P35 鋼製ラーメン 橋脚の横梁部	線形はり要素	<p>動的解析から得られた横梁の最大断面力 <math>N, M, S</math> をもとに横梁の発生応力度を算出し、割増し係数 1.7 を考慮した許容応力度（基準降伏点相当）と比較する。</p> <p>1) 直応力度 <math>\sigma \leq \sigma_a \times 1.7</math></p> <p>2) せん断応力度 <math>\tau \leq \tau_a \times 1.7</math></p>
親塔・子塔の柱部 & P35, P36, P38, P39 鋼製橋脚の柱部	 <p>鋼材</p> <p>コンクリート</p> <p>コンクリート充填していない鋼断面の積分点</p> <p>コンクリートを用いている鋼断面の積分点</p> <p>骨格曲線（短支載荷時の挙動）</p> <p>履歴曲線（除荷後の挙動）</p> <p>鋼材の応力度-ひずみ関係</p> <p>充填コンクリートの応力度-ひずみ関係</p> <p>ファイバー要素</p>	<p>動的解析から得られた鋼材の圧縮ひずみと許容圧縮ひずみを比較する。許容圧縮ひずみは、鋼材の座屈パラメータをもとに道路橋示方書あるいは宇佐美等の提案式から評価する。</p> <p>1) 圧縮ひずみ <math>\epsilon_c \leq \epsilon_a</math> (<math>\epsilon_a</math>: 許容ひずみ)</p>
P37 R C 橋脚	 <p>骨格曲線（短支載荷時の挙動）</p> <p>履歴曲線（除荷後の挙動）</p> <p>水平力P</p> <p>変位δ</p> <p>曲げの非線形性 (Takeda型)</p> <p>せん断の非線形性 (原点指向型)</p> <p>非線形せん断バネ要素</p> <p>(補足) R C 橋脚の非線形性（荷重-変位関係の骨格曲線）は、3次元 F E M 解析をもとに評価したものである。</p>	<p>動的解析から得られた橋脚への最大水平荷重と橋脚の曲げ耐力およびせん断耐力を比較する。</p> <p>1) 曲げ <math>P \leq P_a</math> (<math>P_a</math>: 曲げ耐力)</p> <p>2) せん断 <math>P \leq P_s</math> (<math>P_s</math>: せん断耐力)</p>

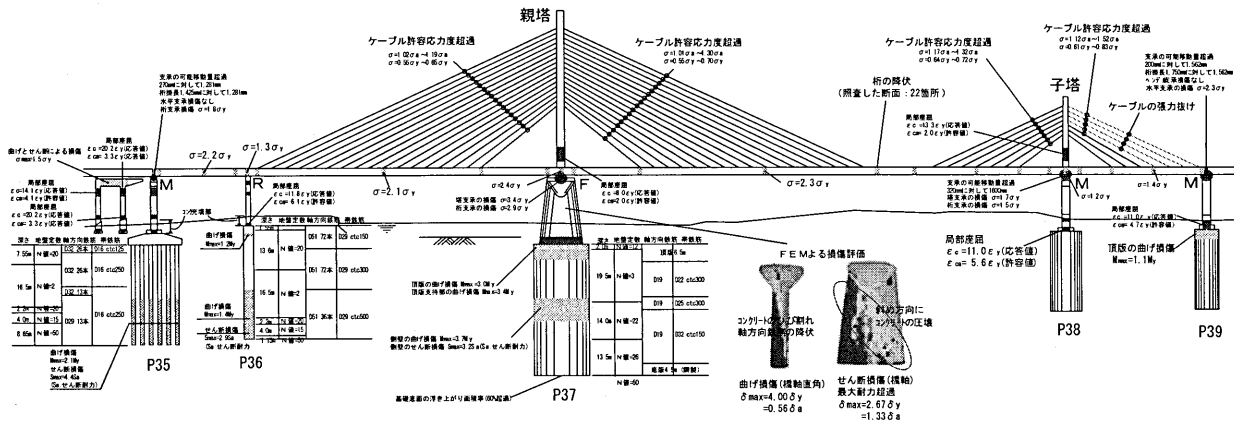


図-5 かつしかハープ橋の地震時の損傷

#### 4. 耐震補強方針

##### 4-1. 耐震補強の方針

かつしかハープ橋は、橋軸方向の支承条件が、RC橋脚(中環-2616)のみ固定条件であり(図-6)、地震時の慣性力が集中する。河川との位置関係から、RC橋脚の強軸方向と橋梁の橋軸方向が一致しており、他の鋼製橋脚より剛性が非常に大きいため、地震時の慣性力を分散させることができない。また、一面吊りのS字曲線斜張橋であることから、常時の荷重状態においても、微妙なバランスを保ちながら自立しているため、選定される耐震補強鋼増によっては、常時のバランスが大きく崩れる可能性がある。このため、できる限り現状から橋全体の構造系を変化させない補強構造を選定する必要がある。以上から、耐力の増加につながる耐震補強は、必要最小限に留め、支承損傷後に落橋するという最悪の事態を回避し、目標とする耐震性能を満足できるように、各橋脚位置において落橋防止システムの充実を図ることとした。

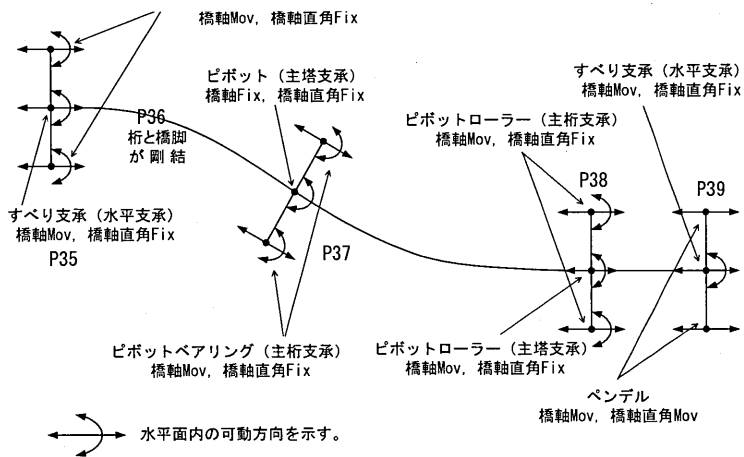


図-6 支承条件

##### 4-2. 各部材の補強方針

###### (1) 親塔・子塔の補強

親塔および子塔は、発生ひずみが、許容ひずみを超過する部位については、曲げ耐力の向上に主眼をおいた補強を行う。許容ひずみは、軸力比  $N/N_y \leq 0.2$  の場合は、道路橋示方書に従い算出し、軸力比  $N/N_y > 0.2$  の場合は、コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の耐震性能照査要領(名古屋高速道路公社)に従い算出した。

また、発生ひずみが許容ひずみ以下であっても、発生ひずみが降伏ひずみの2倍 ( $2\varepsilon_y$ ) を超える箇所は、損傷が大きくなることが考えられるため、座屈パラメータを改善する(RF,  $RR \leq 0.5$  とする)補剛を行なうものとした。

###### (2) 支承部

固定支承は、動的解析から得られた支承の応答値と許容応力度から損傷の有無を判定する。また、可動支承は応答値が移動可能量以下であるかを判定する。判定の結果、許容値を満足しない場合は、固定支承の場合、固定装置を設置し、可動支承は、移動可能量を増加させる。また、必要に応じ、ア

アップリフト対策装置、段差防止装置等の機能を付加させる。

### (3) 鋼製橋脚

塔と同様に補強または補剛を行う。ただし、柱の曲げ耐力が向上すると、アンカー部の負担が増加するため、脚柱の曲げ耐力の向上に主眼をおいた補強は、アンカー部の強度を上限とする。柱断面は、耐震上変形性能が要求されている部位となるため、塔と同様に補剛を行う。

鋼製ラーメンでは、横梁部に生じる応力度が、割増し係数 1.7 を考慮した許容応力度以下であることを確認する。

### (4) RC 橋脚

RC 橋脚では、橋軸方向の地震時に支承部に発生する大きな水平力に対し、橋脚柱のせん断耐力を確保する。

### (5) 塔および鋼製橋脚の補強効果の検証

塔および鋼製橋脚は、降伏ひずみを超えるひずみが生じる箇所があり、2 軸曲げ状態における①損傷形態（局部座屈を生じる範囲）、②橋脚系としての最大耐力と変形性能、③梁部の応力状態、④補強・補剛部材の効果を明らかとするため、別途、弾塑性 FEM 解析を実施し、補強効果を検証した。

## 5. 各部材の補強構造

### 5.1 中環-2613・2614 (P35) の補強

#### (1) 支承部の補強

橋軸直角方向の固定条件を満足させるため、変位制限構造を設置すると共に、橋軸方向の相対変位に追随できるように橋軸方向の移動制限部材を切断する。

#### (2) 落橋防止システムの構築

かつしかハープ橋の主桁が隣接桁と衝突するため、隣接桁の落橋防止装置を設置する。

#### (3) 橋脚柱の補強

ラーメン橋脚の面内方向および面外方向ともに、橋脚の耐力がアンカー部の耐力を上回っているため、曲げ耐力を向上させる補強は行わないものとした。橋脚柱の発生ひずみが  $2\varepsilon_y$  を超過し、かつ座屈パラメータが RF,  $RR \leq 0.5$  を満足しない柱の上下端部は、縦リブを追加し、座屈パラメータを改善する補剛を行う。

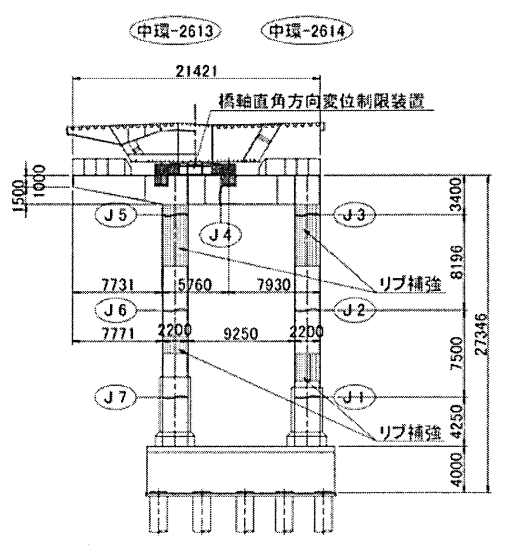


図-7 中環-2613・2614 の補強

### 5.2 中環-2615 の補強 (P36)

中環-2615 橋脚は、主桁のアップリフトを防止するために設置された橋脚であり、主桁と剛結されている。柱に発生するひずみは、許容ひずみ以下であり、耐力の向上は不要であった。

橋脚柱断面の座屈パラメータは、全ての断面において RF,  $RR \leq 0.5$  を満足するが、必要な縦リブ剛比を満足していない。よって、発生ひずみが  $2\varepsilon_y$  を超過する箇所は、横リブを追加するものとした。

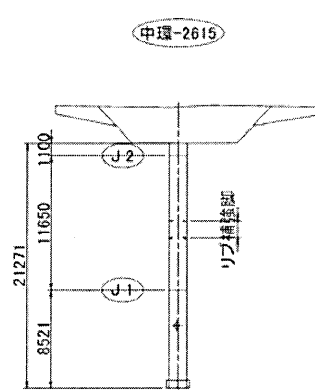


図-8 中環-2615 の補強

### 5.3 親塔 (中環-2616 (P37)) の補強

塔基部において、塔柱の発生ひずみが許容ひずみを超過する部位は、縦リブを増設し、曲げ耐力を向上させる。また、発生ひずみが  $2\varepsilon_y$  を超過している塔基部では、縦リブの追加および、縦リブ剛比を満足させるための横リブを追加し、座屈パラメータを改善する補剛を行う。

#### 5.4 中環-2616 (P37) 支承部の補強

中環-2616 は、支承条件が橋軸方向に唯一の固定となっており、全体系のバランスを保持する上で非常に重要な支承部を有している。地震時には、剛性の高い RC 橋脚であること、また、橋脚の強軸方向と橋軸方向が一致しているため、大きな慣性力が作用する。以上から、固定支承を可動支承に改造し、慣性力を支承に直接作用させないようにすると共に、軸降伏型ダンパーを設置し、橋脚に作用する慣性力を低減させる。また、橋軸直角方向の変位制限構造、段差防止装置およびアップリフト対策ケーブルの設置を行う。

##### (1) 支承改造と軸降伏型ダンパーの設計

支承は軸降伏型ダンパーをモデル化した非線形動的解析結果の応答値（最大 101mm）に余裕量を考慮し、橋軸方向の設計遊間量を 150mm とした。施工時に設置されたスペーサー（70mm）に加え、下沓を 80mm ガウジングし、設計遊間量を確保する。

支承部に使用できる制震デバイスとしては、鋼材系ダンパー、摩擦ダンパー、粘性系ダンパーが考えられるが、固定支承のベースプレート位置の固定具を撤去し、実現できる可能移動量は、±150mm と小さいために、小さな変形量で大きなエネルギー吸収が期待できるダンパーが必要である。よって、軸方向の引張力と圧縮力に対して安定したエネルギー吸収性能を発揮する軸降伏型ダンパー（鋼材系ダンパー）を用いるものとした。

なお、軸降伏型ダンパーに生じるひずみは 2% 以下（最大波で 2.4%）とし、想定する地震動に対して十分にその機能を発揮できるものとした。

##### (2) 変位制限構造および段差防止装置

橋軸直角方向の支承条件を固定としているため、支承が損傷した場合でも、移動を拘束することを可能とするため、変位制限構造を設置する。また、過大な段差が生じないように、段差防止構造を設置する。変位制限構造は、主桁に突起を設けるものとし、段差防止構造を挟み込む形状とした。

なお、段差防止構造は、RC 製としており、その形状から締め固めが困難であることから、高流動コンクリートを用いた。高流動コンクリートは、単位セメント量が多いため、発熱量が大きくなることから、温度応力解析を実施し、ひび割れ指数を許容値内とするため、鉄筋量を増加させた。

##### (3) アップリフト対策ケーブル

アップリフト対策ケーブルは、上揚力により、既設支承が損傷しても、塔や桁が橋軸直角方向に転倒することを防止するために設置する。アップリフト対策ケーブル定着部の構造は、既設橋脚のアンカー削孔等による負担の軽減、橋脚外観の改変を最小限とすることを目的として、鋼製部材とした。

荷重の伝達は、鋼製リングに設置したアンカーボルトによることを基本とするが、アンカー定着部が曲面であること、想定以上の荷重に対する安全率を確保することを考慮し、リング状のブラケット（以下、鋼製リング）を採用した。既設橋脚の梁部の形状は円錐形であり、アンカーボルトが破断した場合でも、くさび効果により確実に上揚力を橋脚に伝達することが可能である。アンカーボルトに

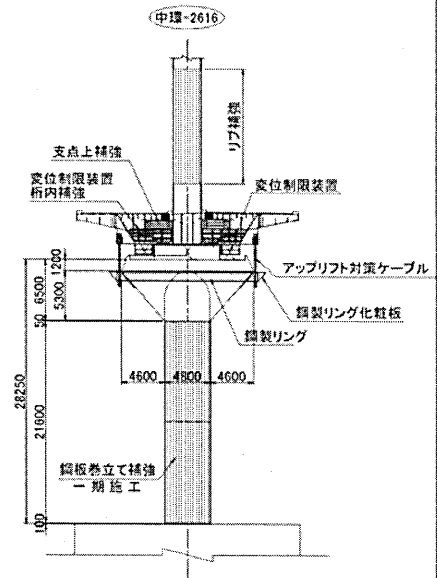


図-9 中環-2616 の補強

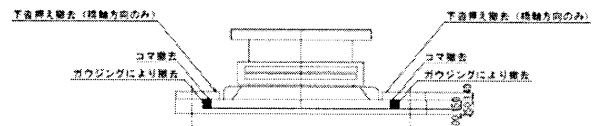


図-10 固定支承の改造

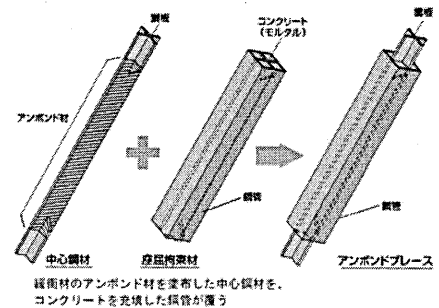


図-11 軸降伏型ダンパーの構造

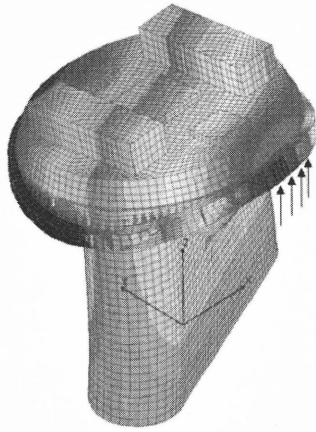


図-1 2 FEM 解析による  
挙動の確認

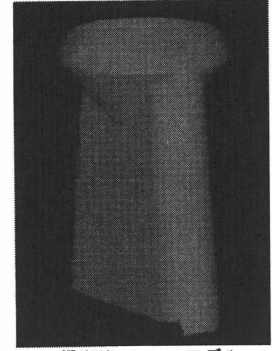
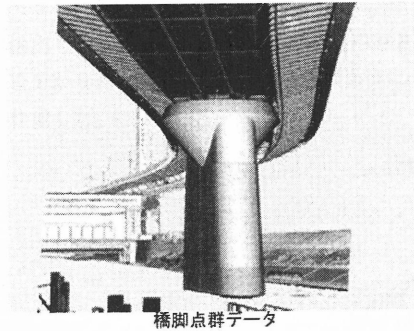


図-1 3 3D レーザー測量

作用する荷重や鋼製リングの応力状態は、FEM 解析を併用して決定した。また、鋼製リングと既設橋脚の遊間量を決定するため、3次元レーザー測量を実施し、既設橋脚の詳細な出来形を把握した。なお、遊間部には無収縮モルタルを充填するものとした。

#### (4) 補強部材取付後の景観性

中環-2616 橋脚は、建設時に景観について様々な検討を行っており、主桁、塔と一体感のある形状として、現在の形状が決定されている。鋼製リングの採用により、既設橋脚の形状の改変を最小限としたが、軸降伏型ダンパーやそのブラケットの設置により橋脚の見た目が改変される。そのため、化粧板の設置と塗装色の変更を行った。鋼製リングは、リブが設置されており煩雑な印象を与える。そのため、外面に化粧板を設置した。化粧板は、既設橋脚が斜めのラインで構成されていることから、梁部の傾斜に合わせ設置するものとした。また、主桁のラインを強調するため、下フランジより下方に設置する補強部材は、主桁より明度を落とした塗装色とした。



図-1 4 鋼製リング設置状況

#### 5.5 中環-2616 橋脚 (P37) の補強

中環-2616 橋脚は、現況の河積阻害率が 8.50%と大きく、補強による河積阻害率の増加を最小限にする必要があるため、鋼板巻立て工法によるせん断補強を行った。巻き立て鋼板厚は 13mm (SM400 材)とし、かみ合わせ継手を採用した。かみ合わせ継手を採用することで、現場溶接が不要となり、仮締切を不要とした。また、鋼板の防錆処理として、L.W.L より下方はアルミニウム合金陽極を使用した流電陽極方式による電気防食、L.W.L から湛水位+50cm の範囲を重防食塗装、さらに上の気中部においては、一般外面塗装を行った。

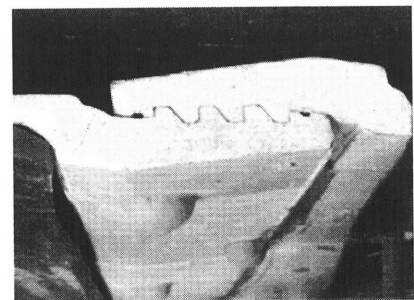


図-1 5 かみ合わせ継手

#### 5.6 子塔 (中環-2617) (P38) の補強

塔基部において、塔柱の発生ひずみ許容ひずみを超過する部位は、縦リブを増設し、曲げ耐力を



向上させる。また、発生ひずみが  $2\varepsilon_y$  を超過している塔基部では、縦リブの追加および、縦リブ剛比を満足させるための横リブを追加し、座屈パラメータを改善する補剛を行う。

### 5.7 中環-2617 (P38) 支承部の補強

中環-2617 は、橋軸直角方向の変位制限構造、段差防止装置およびアップリフト対策ケーブルの設置を行う。橋軸方向には可動であるが、斜め方向からの地震動により、相対変位が生じる。よって、可動支承の移動を確保できる負反力対策ケーブルを設置した。

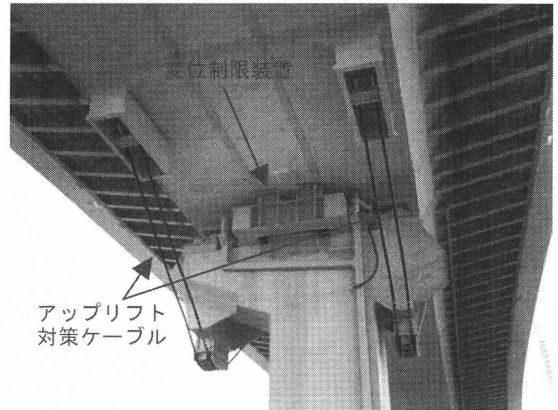


図-15 中環-2617 支承部の補強

### 5.8 中環-2617 橋脚 (P38) の補強

面内方向および面外方向ともに、橋脚の耐力がアンカー部の耐力を上回っているため、曲げ耐力を向上させる補強は行わないものとした。橋脚柱の発生ひずみが  $2\varepsilon_y$  を超過し、かつ座屈パラメータが  $RF, RR \leq 0.5$  を満足しない柱の基部は、縦リブを追加し、座屈パラメータを改善する補剛を行う。

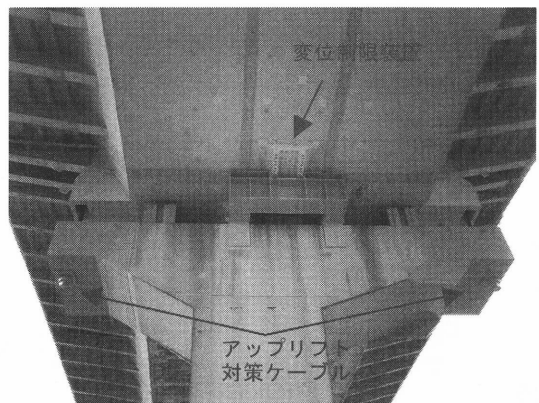


図-16 中環-2618 支承部の補強

### 5.9 中環-2618 橋脚 (P39) 支承部の補強

中環-2617 は、橋軸直角方向の変位制限構造、段差防止装置およびアップリフト対策ケーブルの設置を行う。アップリフト対策ケーブルは、橋脚梁を一部切断し、先端部に設置するものとした。

### 5.10 中環-2618 橋脚 (P39) の補強

面内方向および面外方向ともに、橋脚の耐力がアンカー部の耐力を上回っているため、曲げ耐力を向上させる補強は行わないものとした。橋脚柱の発生ひずみが  $2\varepsilon_y$  を超過し、かつ座屈パラメータが  $RF, RR \leq 0.5$  を満足しない柱の基部は、縦リブを追加し、座屈パラメータを改善する補剛を行う。

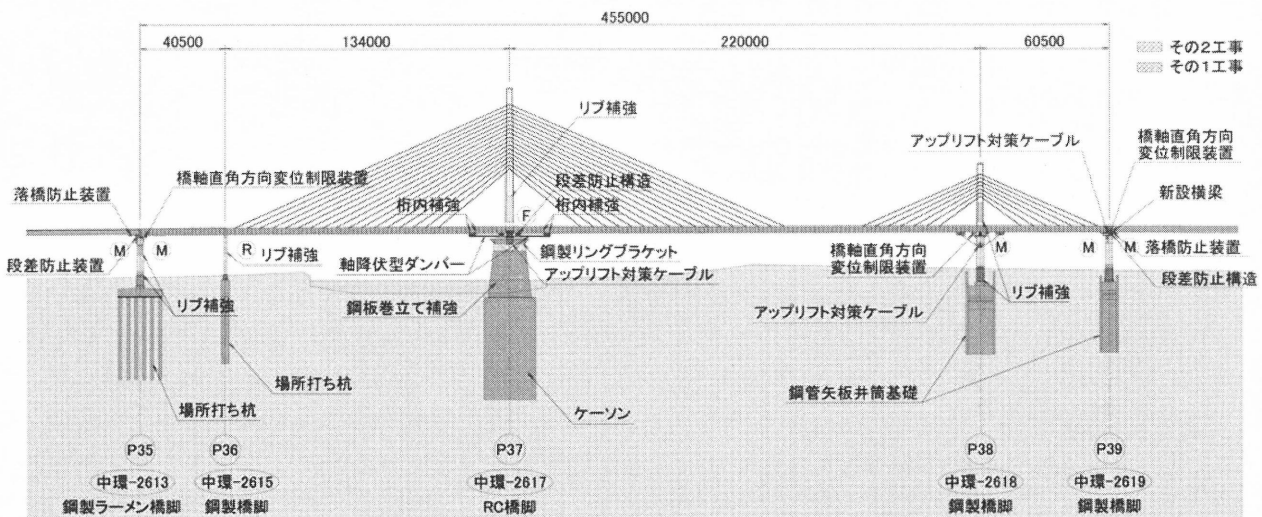


図-17 補強一般図

## 6. おわりに

かつしかハープ橋の耐震補強工事は、1期工事、2期工事に分割して発注しており、1期工事において、RC橋脚1基（中環-2616）の柱部、子塔、鋼製橋脚2基（中環-2617、中環-2618）の補強を行い、平成19年3月に完了した。現在、2期工事を実施しており、中環-2616橋脚の支承部の補強を残すのみとなっている。平成21年度中には、完了予定であり、かつしかハープ橋のレベル2地震時の安全性が確保される。

## 参考文献

- 1) 首都高速道路公団 第一建設部：かつしかハープ橋技術資料，1992
- 2) 日本鋼構造協会 鋼橋の性能照査型耐震設計法検討委員会：土木鋼構造物の動的耐震性能照査法と耐震性向上，2003