

既設鋼製橋脚の耐震性向上に関する設計

Earthquake Resistance Improvement Design for Existing Steel Piers

佐久間 正和*¹ 飯村 和義*² 目黒 大三郎*³
Masakazu SAKUMA Kazuyosi IIMURA Daizaburou MEGURO

Summary

It is commonly known that the Hyogo-Ken Nanbu Earthquake damaged many bridges. Bridge damage caused by this earthquake differed in degree and manner. Investigation revealed that bridge collapses related to the event can almost always be attributed to the collapse or extreme deformation of their piers. This inspired a review of conventional seismic construction techniques and led to revision of Specifications for Highway Bridges Part V, Seismic Design. This paper describes the earthquake resistance verification procedure and special topics considered with regard to the earthquake resistance improvement work recently performed on the steel piers of existing bridges by Miyaji Iron Works on commission by the Metropolitan Expressway Public Corporation.

キーワード：耐震設計，鋼製橋脚，耐震性向上

1. まえがき

兵庫県南部地震により、多くの橋梁が被害を受けたことは周知の通りである。被害状況は種々雑多であるが、落橋という大きな被害を受けたケースを調べると、橋脚が崩壊または大変形したことに起因するものがほとんどである。これを機に耐震構造の検討がなされ、道路橋示方書V・耐震設計編（以下道示という。）の改訂に至っている。

鋼製橋脚の補強においては、被災メカニズムの確認および補強設計方法の確立を目的として、建設省土木研究所により種々の実験が行われ、限定された条件下での結果を得ている。

一方、首都高速道路公団においては、既設鋼製橋脚の耐震性向上工事のため、設計要領²⁾が出版されている。

本報では、今回我が社で行った首都高速道路公団の既設鋼製橋脚耐震性向上工事の耐震性照査手順および設計上の留意点をまとめ報告する。

2. 耐震性照査の基本方針

(1) これまでの耐震設計との相違点

これまでの鋼製橋脚（薄肉断面の構造物）の耐震設計

は、震度法を主体に行われてきた。震度法による設計は、いわゆる基本構造系に対する強度照査を基本としており、損傷を前提としない設計であった。

これに対して、兵庫県南部地震以後の耐震設計においては、同地震レベルの地震動に対して部分的に損傷が残ることはやむを得ないと考え、構造物全体で耐震性能をいかに確保するかという点に着目している。つまり、桁、支承、橋脚及び基礎それぞれに損傷を適度に分担させることにより、耐震性能を確保しようと考えている。この考えをふまえ、鋼製橋脚の耐震設計においても損傷部位をどこにするかを明確にしていくこと（制御断面の決定）が重要なポイントとなっている。

(2) 想定している地震動

保有水平耐力の照査を行うに当たっては、兵庫県南部地震時に観測された地震動が想定されている（道示でいうタイプII地震動）。この地震動は、地盤種別により以下の地点での地震動を補正し決定されている。

- 1) I種地盤・・・神戸海洋気象台
- 2) II種地盤・・・JR西日本鷹鳥駅
- 3) III種地盤・・・東神戸大橋

ただし、これらの地震動には修正を加えているところであり、使用する場合は最新のものであるのかを確認する必要がある。

*¹技術本部設計部設計第三課

*²技術本部設計部設計第二課

*³宮地建設工業(株) 東日本橋梁事業部工事第一部橋梁工務第一課長

(3) 設計基本方針

本補強は、橋脚に対して大地震時に終局状態となる断面（制御断面）を設定し、その断面が地震力を吸収するものとし、他の重大な崩壊を防ぐ事を目的とする。

制御断面は、以下の2点を満足させる。

- ①降伏応力度以下で座屈しない断面とし、十分なじん性を確保する。
- ②大地震に耐えうる水平耐荷力を有する。

3. 設計概要

(1) 耐震性照査に用いる各種パラメータ

1) 座屈パラメータ： R_F 、 R_R

兵庫県南部地震における鋼製橋脚の損傷は、圧縮補剛板の座屈および角部の亀裂破壊がほとんどであった（写真-1）。

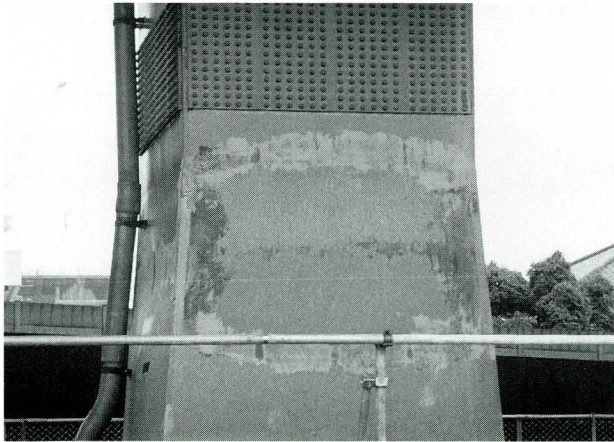


写真-1 矩形橋脚の損傷

この圧縮補剛板の座屈を左右する無次元幅厚比パラメータ(R_F 、 R_R)は、断面のじん性と密接な関係にある。

ここで、じん性は図-1に示すように最大応力をすぎから破壊までの応力-ひずみ曲線の落ち具合で表すことができる。その落ち方が緩やかなほど、「じん性がある」と判断される。

座屈パラメータは、補剛板の座屈形態により以下の2種類に分類される。

①全体座屈パラメータ： R_F

図-2(a)に座屈形態のイメージを示す。

②局部座屈パラメータ： R_R

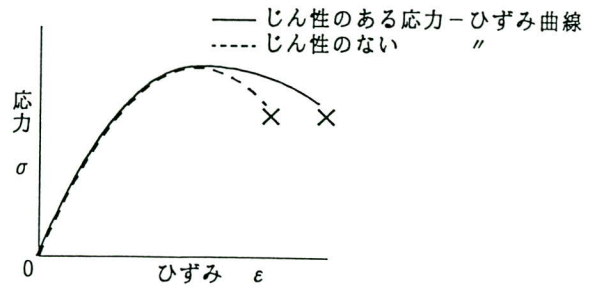


図-1

図-2(b)に座屈形態のイメージを示す。

2) 各断面の抵抗曲げモーメント

各断面の照査に用いる抵抗モーメントは、以下に従って算出する(図-3)。この場合、全断面を有効と考える。

①既設断面の抵抗モーメント： M_{cr1}

$$M_{cr1} = (\sigma_{cr} - W/A) \times Z$$

ここに、

$$\begin{aligned} \sigma_{cr} &= 1.0 \times \sigma_y & (R \leq 0.5) \\ &= \sigma_y \times (1.5 - R) & (0.5 < R \leq 1.0) \\ &= \sigma_y \times 0.5 / R^2 & (1.0 < R) \end{aligned}$$

σ_y ：鋼材の降伏応力度 (kgf/cm²)

R ：最大幅厚比パラメータ

$$R = \max(R_F, R_R)$$

但し、 $R_F = \max(R_F(\text{web}), R_F(\text{flg}))$

$R_R = \text{web, flg別々}$

W ：等価重量 (3. (2) 1) 参照)

Z ：照査軸に対する断面係数 (I/y ：cm³)

A ：照査断面の断面積 (cm²)

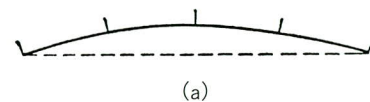
I ：照査軸に対する断面2次モーメント (cm⁴)

縦リブ増設を行った場合断面に計上する。

y ：照査軸から縁端までの距離 (cm)

②一般断面の抵抗モーメント： M_{cr2}

$$\begin{aligned} M_{cr2} &= 1.15 \times M_y & (R \leq 0.4) \\ &= M_y \times (1.75 - 1.5 \times R) & (0.4 < R \leq 0.5) \\ &= M_{cr1} & (0.5 < R) \end{aligned}$$



(a)



(b)

図-2 座屈の形態

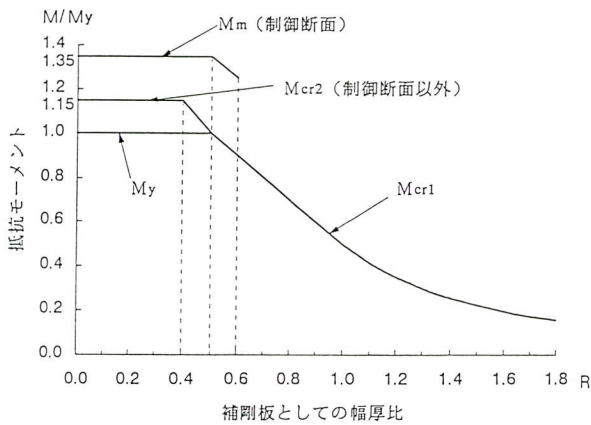


図-3 抵抗曲げモーメント

上記のように、 $R \leq 0.4$ の条件を満たす場合、全塑性状態まで期待できるものとする。このときの係数は、実験により与えられている。

③制御断面の終局抵抗モーメント：Mmc

制御断面は、終局状態まで期待できる断面とする。終局抵抗モーメントは、実験により以下のように与えられる。

$$M_{mc} = 1.35 \times M_{cr1}$$

ただし、以下の条件を満たすものとする。

$$R_F \leq 0.5, R_R \leq 0.6$$

3) アンカー部の抵抗曲げモーメント：Ma

アンカー部の抵抗曲げモーメントの算出に当たっては、基部コンクリートとアンカーボルトからなるコンクリート断面と考えるRC方式にて算出するものとする。

①抵抗断面

基本的には、ベースプレート下面断面を有効とするが、アンカーボルトの耐力が厳しい場合は、根巻きコンクリートの構造を確認した上で根巻きコンクリート断面を有効とすることもある。

②抵抗曲げモーメント (Ma) の算出

圧縮側コンクリートのひずみが、終局ひずみ $\epsilon_{cu} = 0.0035$ に達する時、もしくは引張りボルトのひずみが、終局ひずみ $\epsilon_{cu} = 0.03$ に達する時のいずれか小さい方をアンカー部の抵抗曲げモーメントとする。

(2) 設計手順

設計フローを図-4に示す。

1) 等価重量の算出および水平力作用位置

等価重量は、下式より求める。

$$W = W_u + C_p \times W_p$$

W_u ：当該鋼製橋脚が支持している上部構造部分の重量

C_p ：橋脚の等価重量算出係数 (=0.5)

W_p ：鋼製橋脚の重量

上式より算出した等価重量に等価水平震度を乗じた水平力は、橋軸方向を照査する場合橋脚天端に、橋軸直角方向を照査する場合床版下面に作用するものとする。

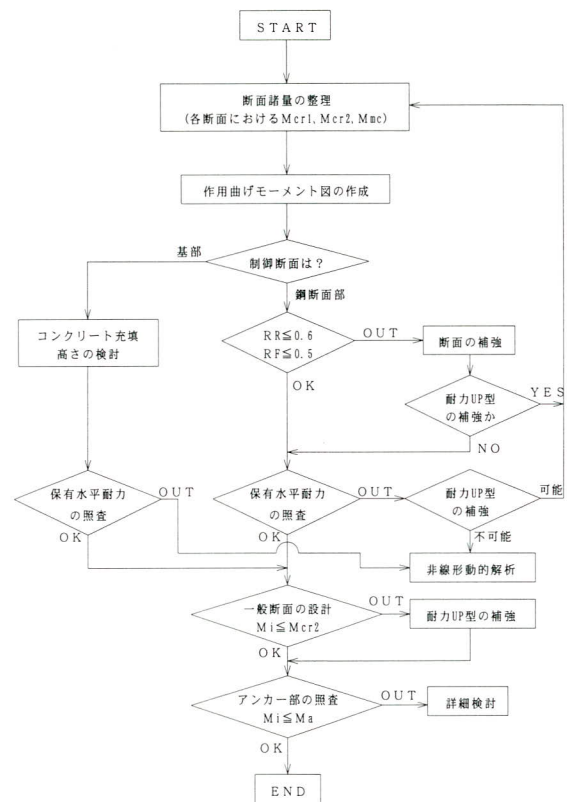


図-4 設計フロー

2) 制御断面の決定方法

制御断面は、じん性を考え有効長さを長くとり、かつアンカー部に対する影響を小さくするため、できるだけ橋脚の下方断面とするのがよい。また、各断面に作用する曲げモーメントは、制御断面での終局抵抗曲げモーメント (M_{mc}) から比例計算により求める。制御断面には、水平耐力力の一番小さい断面を選定する。制御断面は、下記の断面位置から選定される。

- ①橋脚基部
- ②中詰めコンクリート境界部
- ③境界部に一番近い断面変化点

図-5に、③境界部に一番近い断面変化点が、制御断面となる場合の例を示す。

また、図-4に示されるように耐力UP型の補強(縦リブ増設工法)を採用すると、作用曲げモーメント図をその都度描き直さなければならず、手戻りが生じてしまう。この手戻りを少なくするためには、座屈パラメータに着目し、あらかじめ断面を補強した場合の M_{mc} を算出しておくのがよい。

3) 補強工法の決定

補強工法は、抵抗曲げモーメントの大きさおよび座屈パラメータに応じて決定する。

表-1に既設断面と補強工法の関係を示す。

図-6に各種補強工法の概念図を示す。

4) 制御断面の設計

座屈パラメータに応じて制御断面を補強することにより水平耐力とじん性を兼ね備えた断面とする。また、周期特性および応力の余裕率を反映させるため地震時保有水平耐力の照査も行い、耐震性を判定する。

5) 一般断面の設計

制御断面での終局抵抗モーメント(M_{mc})を生じさせる水平力を、上部工反力作用位置に置き換えて作用させた一般断面の作用モーメントが抵抗モーメント(M_{cr2})以下となるように補強する(下式)。

$$M_i \leq M_{cr2} \quad M_i: \text{作用曲げモーメント}$$

6) アンカー部の耐力

基部コンクリート圧壊時とアンカーボルト破断時の耐力のうち小さい方をアンカー部の耐力とし、これは基部での作用曲げモーメント以上でなければならない。

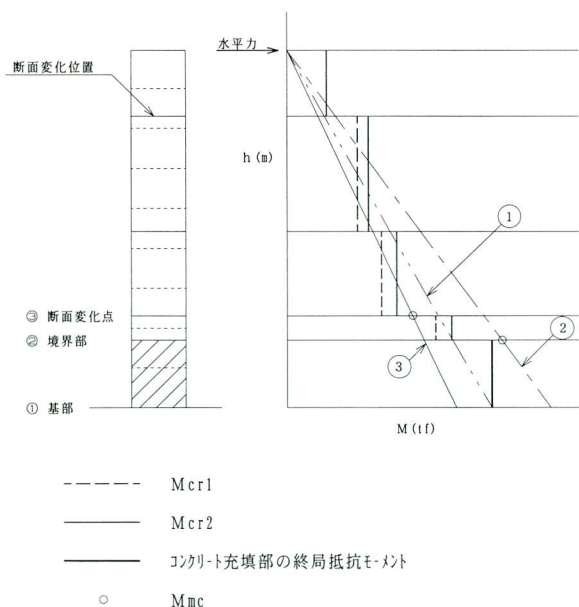


図-5 制御断面の決定

表-1 既設断面と補強工法の関係

既設断面		考えられる補強工法
じん性 不足	$R_F > 0.5$	横リブ補強, 縦リブ増設 (縦リブ増設, コンクリート充填)
	$R_R > 0.6$	縦リブ増設, コンクリート充填
保有水平耐力不足 $khe \times W > Pa$		縦リブ増設, 角補強 コンクリート充填

$$M_i \leq M_a$$

やむを得ずこれを守れない場合は、詳細検討(内容については省略)を要する。

7) 保有水平耐力の照査

制御断面がコンクリート充填部となる橋脚については、復旧仕様に従い保有水平耐力の照査を行うものとする。

制御断面が鋼断面部となる橋脚については、実験により整理された係数を用いた簡便法に従い保有水平耐力の照査を行うものとする。以下にそれを示す。

$$Pa > khe \times W$$

ここに、

$$Pa = 1.21 \times Py$$

$$Py: \text{降伏耐力} (= M_y / h : tf)$$

$$h: \text{コントロールポイントから水平力作用位置までの距離 (m)}$$

$$khe: \text{照査用水平震度} = khc / \sqrt{(2 \times \mu a / \alpha - 1)}$$

$$khc: \text{道示参照}$$

$$\mu a: \text{許容塑性率}$$

$$= \delta m / \delta y - 1.4 \times K1 / K3$$

ここに、 $P \sim \delta$ 関係に用いるスケルトンカーブの特性は以下のパラメータとする(図-7)。

$$a = \delta m / \delta y = 10^{(0.7847 - 0.6112 \times RF)}$$

$$b = P_m / P_y = 1.35$$

$$c = K3 / K1 = 10^{(-1.7509 + 1.3803 \times (RF))}$$

$$\alpha = Pa / Py$$

4. 施工条件の反映

今回の施工に当たって、施工条件を設計に反映させた点について以下にまとめる。

(1) 横リブ増設工法

①脚内への部材搬入を考慮して、部材重量が60kg程度

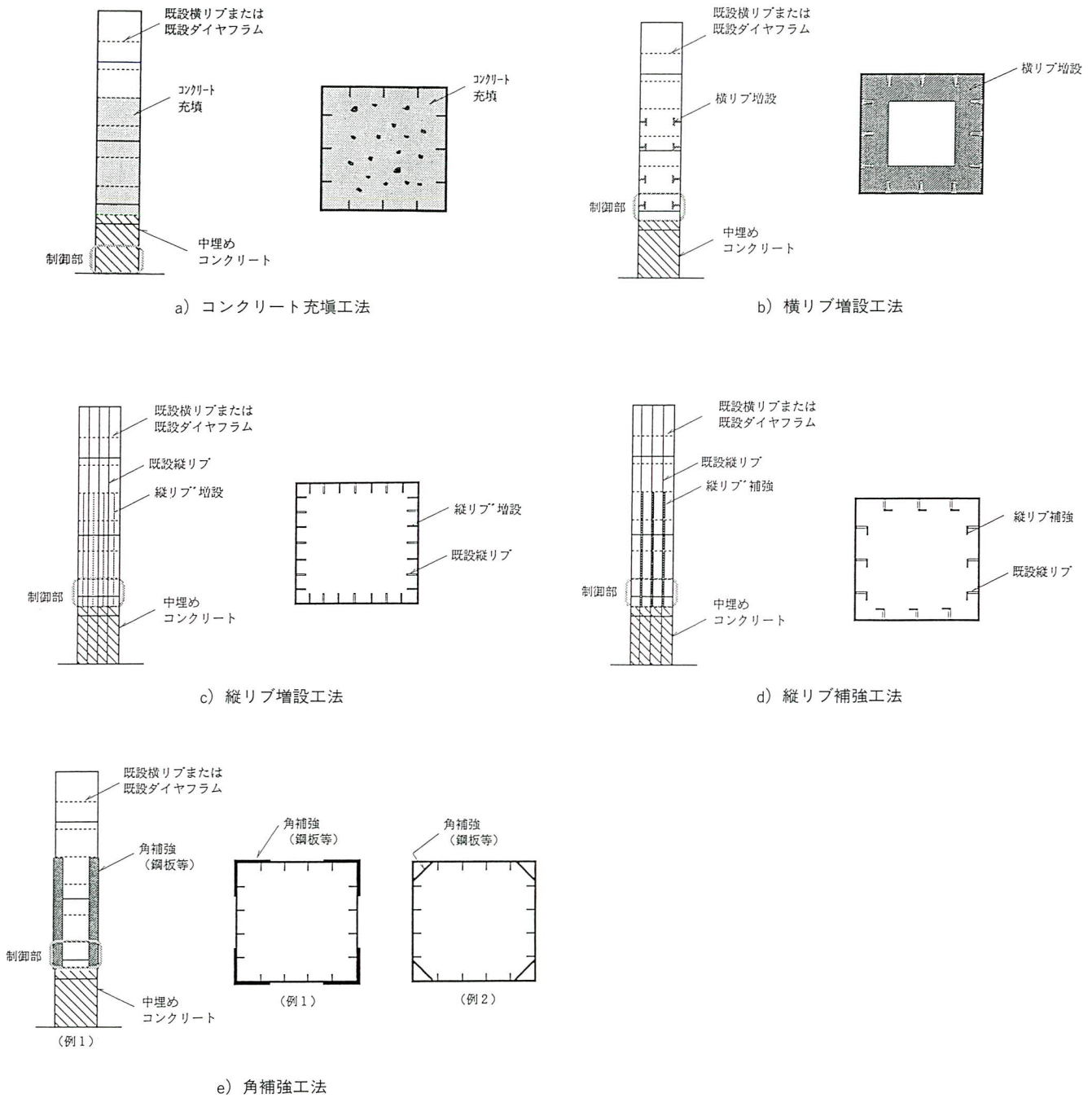


図-6 各種補強工法の概念図

を目安に継手を設ける。

- ②脚内での溶接性を考慮して、既設横リブ間隔が1.5m以下の場合は横リブの増設工法を採用しないこととする（縦リブ補強工法を検討する）。

(2) 縦リブ増設工法

- ①角部において溶接が困難である場合は、コーナーブ

レート方式として断面剛性を確保する。

- ②橋脚の添接部が高力ボルトによる場合は、十分な剛性が確保されているとものとし、その区間の補強は行わないものとする。

(3) 縦リブ補強工法

- ①補強縦リブと既設ダイヤフラム部の連結は、施工性

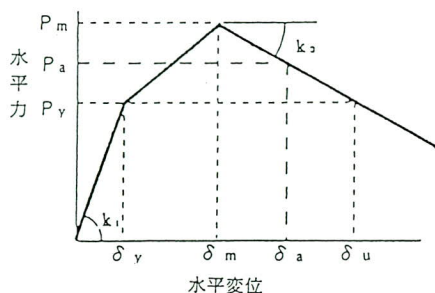


図-7 矩形橋脚の水平力～変位関係

を考慮し溶接構造とする。…図-8 (b) 参照。

- ②溶接施工性を考慮して横倒れ防止板部で補強フランジを分割する（先に横倒れ防止板と既設縦リブとの溶接を行う）。…図-8 (b) 参照。

(4) コンクリート充填工法

- ①充填コンクリートは、BB152D ($\sigma_{ck} = 150\text{kg/cm}^2$) を標準とするが、夜間にコンクリートを打設する場合は、市場性を考慮しN152D ($\sigma_{ck} = 150\text{kg/cm}^2$) を使用する。
- ②充填コンクリート天端は、シール材により止水するものとする。
- ③既設コンクリート天端をチップングした後にコンクリートを追加充填することを標準とする。
- ④既設ダイヤフラムには、 $\phi 50\text{mm}$ の空気孔を設ける。

(5) マンホールおよび換気孔

施工に当たっては、狭い橋脚内での溶接作業を余儀なくされるため、酸素濃度には十分な注意を払う必要がある。従って、換気装置の設置が不可欠となる。だが、換気孔の設置数を明確に示したものが無い。そのため、今回の施工における基本的な換気孔の設置方法を以下に記す。今回施工の最小橋脚断面は、 $1.0\text{m} \times 1.5\text{m}$ である。

1) コンクリート充填工法の場合

部材搬入用のマンホールを利用し、換気を行う。

ただし、充填高が高いとコンクリート注入用のダクトが、長時間マンホールを塞いでしまうことになるため、以下の措置をとる。

- ①既設マンホールを利用する場合
…コンクリート注入孔を1箇所新設する。
- ②新設マンホールを利用する場合
…コンクリート注入用ダクトの分だけ新設マンホールの径を大きくする。

2) 鋼補強の場合

補強範囲の上部に部材搬入口と換気孔（送風）を兼用したマンホールを1箇所設置し、なおかつ下部に換気孔（排気）を1箇所設置する。ただし、補強箇所まで離れた位置にある既設マンホールを利用する場合は、部材搬入用マンホールとは別に換気孔を設ける。

5. まとめ

この設計基準に従い設計を進めていくとかなりの作業量となる。これを少しでも少なくするために、以下の提案をする。

(1) 迅速な設計資料の入手

しゅん功当時の設計計算書が無くなっていることがある。この場合は、概略設計プログラムにより必要データを取りそろえなければならない。そのため、早期にしゅん功図書の有無を確認しておかなくてはならない。

(2) データの収集と整理

設計にて取り扱うデータは、膨大な量である。今回の工事では、表計算ソフトにてデータを管理したが、汎用性が悪く活用しきれずに終わってしまった感がある。

(3) 設計計算ソフトの有効利用

一般的な橋脚にしか対応していないため、複雑なものは多少の手作業を入れざるを得ない。

(4) 類似橋脚のグルーピング化

一概にグルーピング化とは言えないが、断面のグルーピングまたは固有周期によるグルーピング等から検討していくことが考えられる。ただ、設計対象脚本数が多い場合はこれを管理するシステムから構築していかなければならない。

(5) 特殊な橋脚の取り扱い

特殊な橋脚に対する設計例がほとんどないため、入念な検討を怠ってはいけない。ただ、2層ラーメン構造の照査（橋軸方向）方法は、ほぼ固まっている。

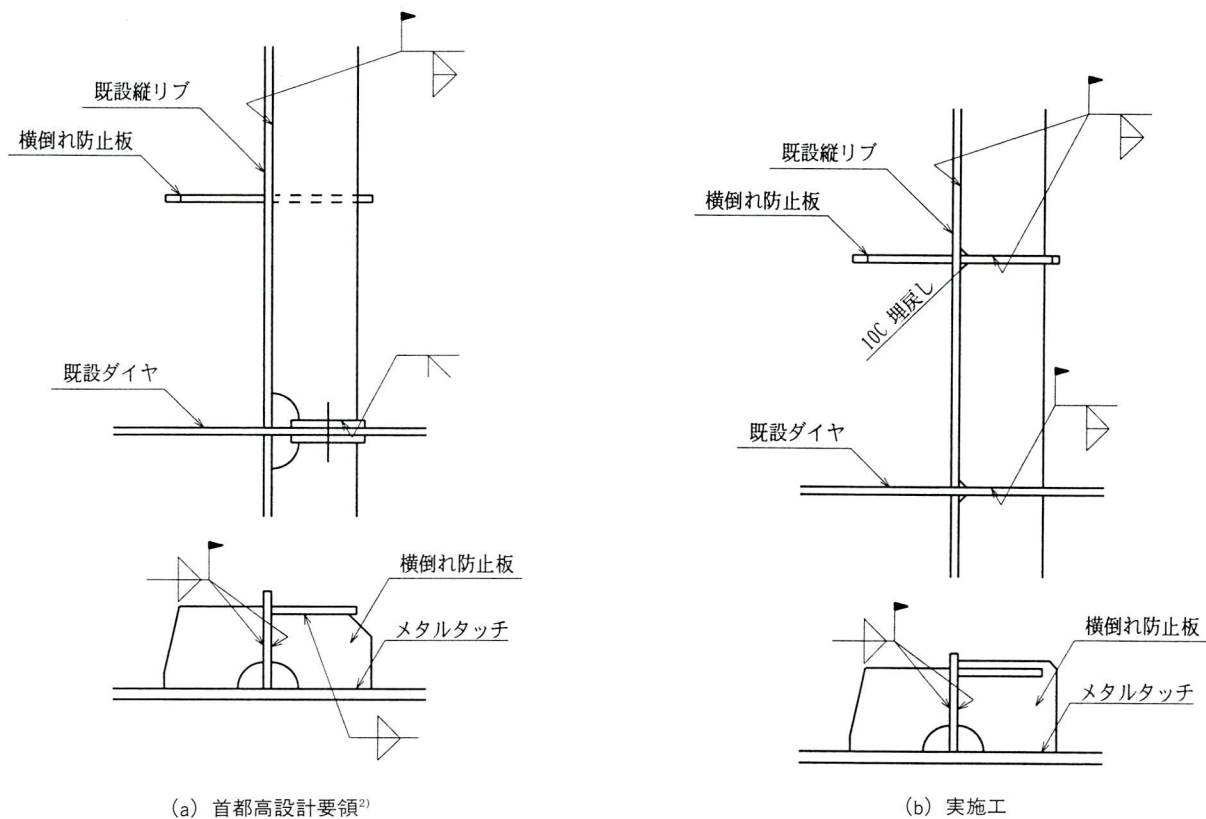


図-8 縦リブ補強の構造

6. あとがき

本報告で、既設矩形橋脚（単柱形式）の耐震設計手順および設計上の留意点を簡単にまとめたが、実際には多種多様な橋脚形状があり、補強工事特有の「やってみないと分からない」事が多いはずである。本書が、同種工事の際の参考になれば幸いである。

<参考文献>

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，耐震設計編，平成8年12月
- 2) 首都高速道路公団：既設鋼橋脚の耐震性向上設計要領（暫定案），平成8年
- 3) 日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料（案），平成7年6月

1997.10.31 受付