

## 3.2 複合構造ワーキンググループの研究成果

### 3.2.1 研究概要

耐震設計研究部会の中の複合構造WGでは、鋼・コンクリート複合構造の耐震設計において注目されているテーマの中から、鋼・コンクリート混合構造における応力伝達メカニズムの整理およびコンクリート充填鋼管柱の設計手順の背景調査を取り上げた。そして、WGのメンバーを2つのグループ（混合桁グループ、合成柱グループ）に分けて活動することとした。

混合桁グループでは、鋼・コンクリート複合構造物の鋼とコンクリートの接触面における応力伝達性状を明らかにする観点から、数種の鋼・コンクリート複合構造のモデルを対象とし、鋼部材とコンクリート部材間における応力伝達メカニズムを整理した。対象としたモデルがそのまま実構造を表しているわけではなく、また、その応力伝達メカニズムは必ずしも設計的な観点から明らかになっているわけではないが、可能な限り生じる応力伝達メカニズムを取り上げて整理し、問題点なども指摘している。さらに、現状において応力伝達メカニズムとして設計上期待できる場合には、その設計式などを示すとともに、類似の実構造の例を挙げている。

一方、合成柱グループでは、合成柱の設計のために必要な基礎的事項を把握するために、阪神高速道路公団制定の「合成柱（充填方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針（案）」を対象として、指針案作成の背景などを調査した。この指針案には、条文に加えてその内容を説明する解説が記述されているが、それらにおいて不明な点がある場合には、さらに参考文献を調べるなどできる限り詳細に調査した。そして、調査した事項をメモとしてまとめることにより、今後の実務で同構造の設計に携わる技術者の参考に供することとした。

### 3.2.2 混合桁の検討

#### （1）目的

鋼・コンクリート複合構造では、鋼とコンクリートという異なる材料を組み合わせることで、それぞれの材料の長所を活かし、短所を補い合い優れた性能を得ることができる。そのため、PC桁と鋼桁を長手方向に連結させた混合桁やコンクリート柱と鋼桁を剛結させた混合ラーメン橋など、比較的新しい形式の橋梁構造物にも鋼・コンクリート複合構造が用いられてきている。

鋼・コンクリート複合構造において鋼とコンクリートとを結合する場合、いたる所に両者の接触面が存在する。そして、鋼とコンクリートとの接触面を介して応力が伝達され、結果的に両者の一体化が図られる。このような一体化の効果はずれ止めによって確保されるのが一般的であるが、ずれ止めを意図しない場合にも、鋼とコンクリートの接触面においては両者の間に生じる支圧力や摩擦力によって何らかの応力が伝達される。したがって、これら鋼・コンクリート複合構造物を設計する場合には、鋼とコンクリートの種々の接触面における応力伝達性状を把握することが重要である。特に、地震を受ける場合には、鋼とコンクリートの接触面間の応力伝達は履歴性状を描くためにより複雑となる。しかし、今後、種々の鋼・コンクリート複合構造物の耐震設計をより合理的に行なうためには、このような応力伝達性状を把握することが必要である。

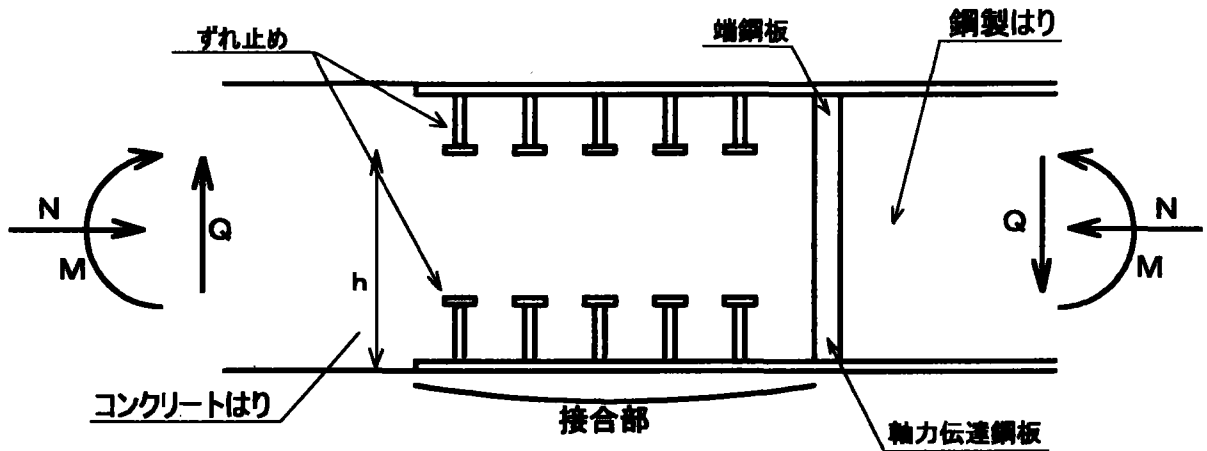
本稿では、鋼・コンクリート複合構造物の鋼とコンクリートの接触面における応力伝達性状を明らかにする観点から、鋼・コンクリート複合構造の数種のモデルを対象とし、鋼部材とコンクリート部材間における応力伝達メカニズムを整理した。対象としたモデルがそのまま実構造を表しているわけではなく、また、その応力伝達メカニズムは必ずしも設計的な観点から明らかになっているわけではないが、可能な限り生じ

る応力伝達メカニズムを取り上げて整理し、問題点なども指摘している。さらに、現状において応力伝達メカニズムとして設計上期待できる場合には、その設計式なども示すとともに、類似の実構造の例を挙げている。

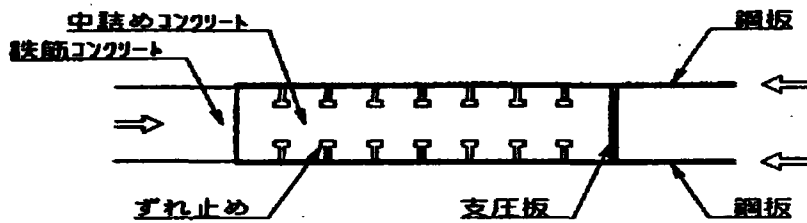
将来的には地震動下における鋼とコンクリート間の応力伝達メカニズムを明らかにする必要があるが、ここでは、その前段として、静的荷重下における応力伝達メカニズムのみを対象とした。しかし、耐震設計においてはブッシュオーバー解析を実施する機会も多く、この観点から、単調載荷状態における応力伝達メカニズムが明らかになっていることが必要である。

1. 接合方法：ずれ止め（スタッド等）により断面力を伝達する方法

概念図



a) スタッドを配置した接合部の中詰めコンクリートにより荷重を分散させ、作用力をコンクリート桁部に伝えるために、接合部にもコンクリート桁部と同等な鉄筋配置をすることが望ましい。<sup>1)</sup>

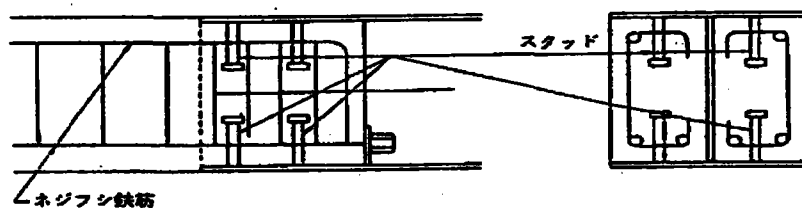


概要説明

b) 力の伝達経路

- ・ 曲げモーメント (= 偶力) → 中詰コンクリート → スタッド → 鋼製はり
- ・ 軸力 → 中詰コンクリート → スタッド → 鋼製はり

c) 中詰めコンクリートに引張力が作用しひび割れが生じる場合は、PC鋼材によるプレストレスを導入したり鉄筋を配置して、問題となるひび割れが生じないようにしている。<sup>2)</sup>



(1) スタッド

2. 強度評価式 (「鋼・コンクリート複合構造の理論と設計(1)基礎編：理論編」土木学会)<sup>3)</sup>

軸  
力

ずれ止めのせん断により力を伝達する。

$$N_u \leq n \times Q_a$$

$N_u$  : 接合部に作用する軸力  
 $Q_a$  : ずれ止め1本あたりのせん断強度  
 $n$  : ずれ止めの全本数

曲  
げ  
モ  
ー  
メ  
ン  
ト

曲げモーメントを偶力に置き換えて、ずれ止めのせん断力で力を伝達する。

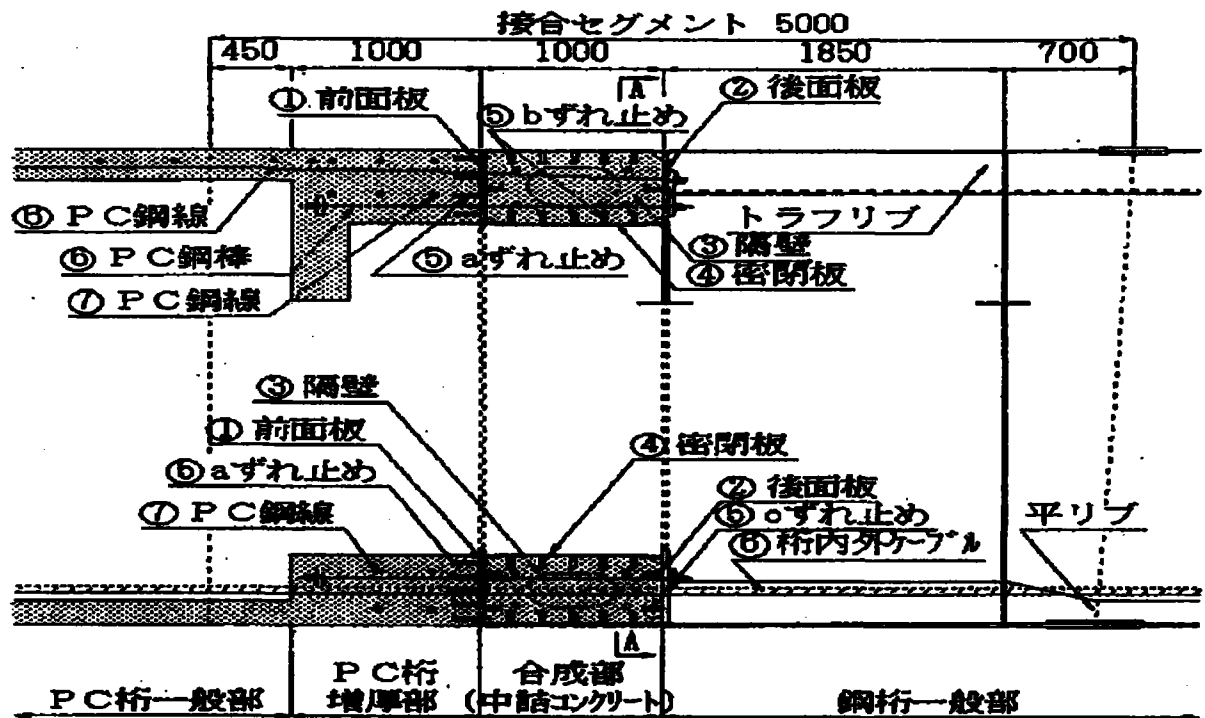
$$M_u \leq n' \times Q_a \times h$$

$M_u$  : 接合部に作用する曲げモーメント  
 $Q_a$  : ずれ止め1本あたりのせん断強度  
 $h$  : 接合部の梁高  
 $n'$  : ずれ止めの片側本数

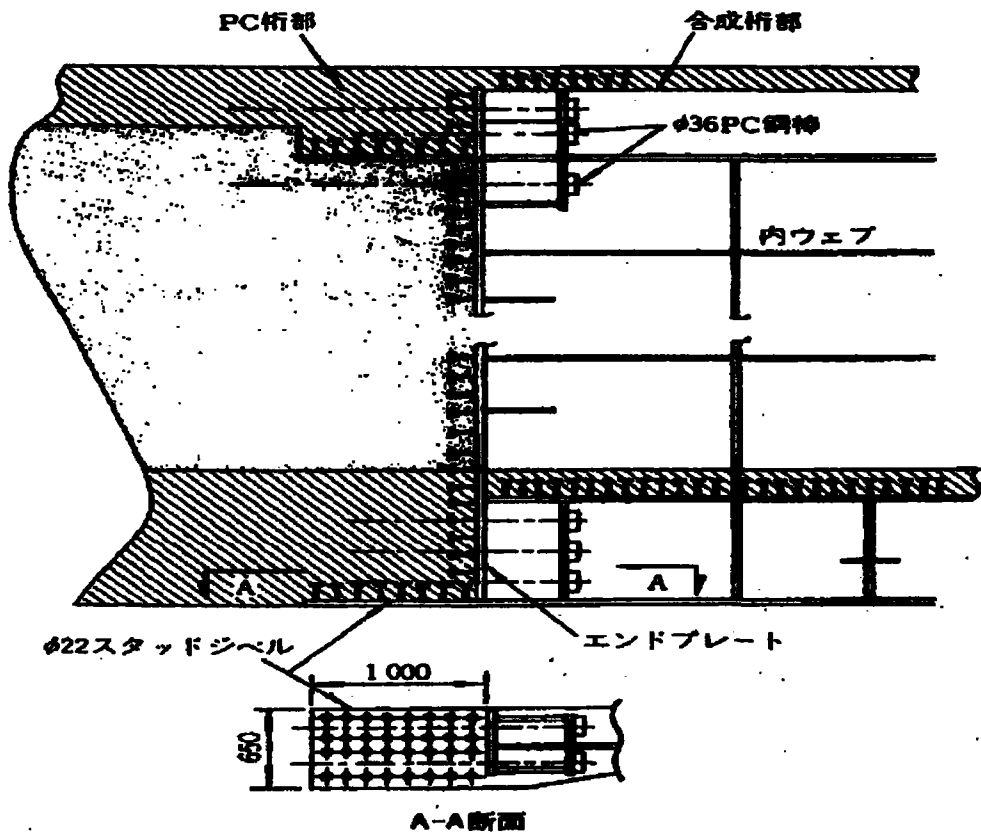
せん  
断  
力

明確な力の伝達機構なし。  
 (実際には他のせん断伝達機構を用いることになる。)

## 3. 実施例：生口橋、サマリツブリッジ、多々羅大橋、揖斐川橋、木曾川橋、汲水門橋



例2. 汲水門橋 4)



## 4. 評価上の問題点

○軸力、曲げモーメントによる圧縮力及び引張力に対する評価上の問題点

- a) 中詰めコンクリートの拘束効果と中詰めコンクリートと端鋼板の支圧。
- b) スタッド間隔の影響。(長さ方向にせん断力分布が一樣でない。) <sup>1)</sup>
- c) 端鋼板の厚さ。 <sup>2)</sup>

(鋼板を介して荷重が作用する場合のコンクリートの割裂強度は、端鋼板の厚さと線形関係にある。)

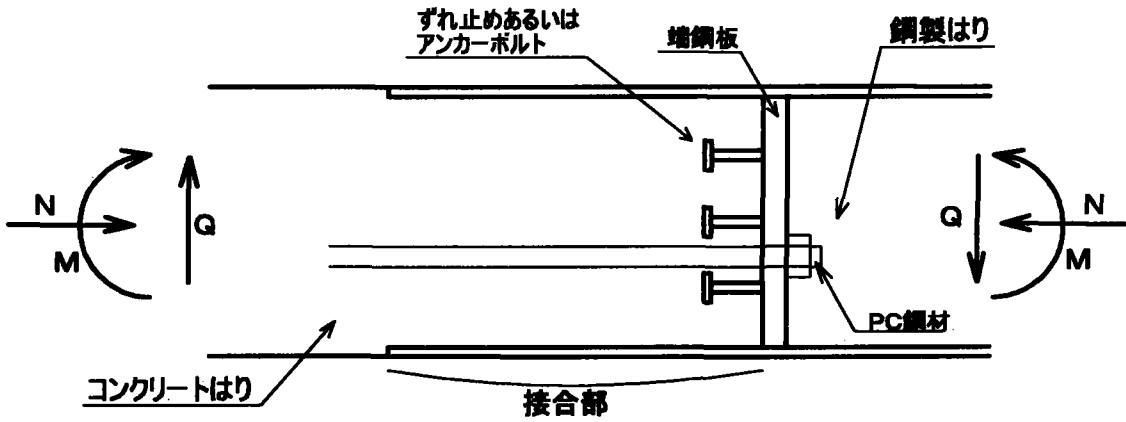
- d) 接合部とコンクリート桁部の鉄筋配置。 <sup>3)</sup>  
(スタッド→中詰コンクリート→鉄筋の力の伝達方法。)
- e) 軸力伝達鋼板の長さ、厚さ。 <sup>1)</sup>
- f) 高流動コンクリートの充填。(フリージング等) <sup>4)</sup>

## 5. 参考文献

- 1) 「複合橋設計施工規準(案)」, (社) プレストレストコンクリート技術協会
- 2) 「複合構造物設計・施工指針(案)」, (社) 土木学会
- 3) 「鋼・コンクリート複合構造の理論と設計(1)基礎編:理論編」, (社) 土木学会
- 4) 「新形式の鋼・コンクリート複合橋梁調査研究小委員会(報告書)」, (社) 土木学会
- 5) 「複合構造-複合構造システム小委員会報告-」, 日本鋼構造協会

1. 接合方法

概念図



概要説明

- ・ ずれ止めあるいはアンカーボルトなどの引張接合により断面力（軸力）を伝達する構造。
- ・ 鋼柱、鋼製橋脚の基部とフーチングコンクリートとの接合部など。大型構造物ではアンカーフレームが必要となる場合がある。
- ・ 混合桁のコンクリートと鋼桁の接合部に適用される場合は、PC鋼材にプレストレスを導入することがある。（3. 実施例 参照）

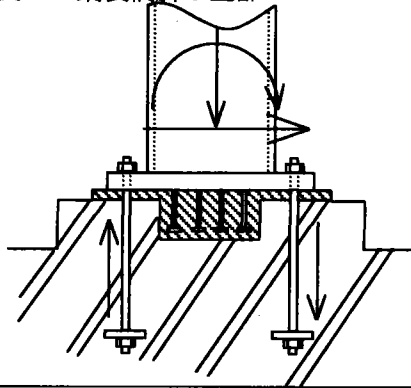
2. 強度評価式<sup>1)</sup>

軸力	<p>(1) 軸圧縮力 鋼板とコンクリートの支圧により力を伝達する。 圧縮力 <math>N_{cu}=C</math>      <math>C</math>: 接合部の支圧強度</p> <p>(2) 軸引張力 ずれ止めあるいはアンカーボルトで力を伝達する。 引張力 <math>N_{tu}=T</math> <math>T</math>: ずれ止めあるいはアンカーボルトの引張強度、またはコンクリート側ボルトの付着強度</p>
曲げモーメント	<p>明確な力の伝達機構なし。 ただし、圧縮側はコンクリート支圧、引張側はアンカーボルト引張で抵抗する単鉄筋RC断面として評価できると考えられる。</p>
せん断力	<p>ずれ止めあるいはアンカーボルトのせん断で伝達する。 せん断力 <math>Q_u=nQ_a</math>      <math>Q_a</math>: アンカーボルト1本当たりのせん断強度    <math>n</math>: アンカーボルトの本数</p> <p>道示では、<math>Q_a</math> は以下のように定義されている。<sup>1)</sup></p> $Q_a = 9.4d^2 \sqrt{\sigma_{ck}} \quad (H/d \geq 5.5)$ $Q_a = 1.72dH \sqrt{\sigma_{ck}} \quad (H/d < 5.5)$ <p><math>d</math>: スタッドの軸径(mm)、<math>H</math>: スタッドの全高(mm)、<math>\sigma_{ck}</math>: 設計基準強度 (<math>N/mm^2</math>)</p>



### 3. 実施例 2)3)

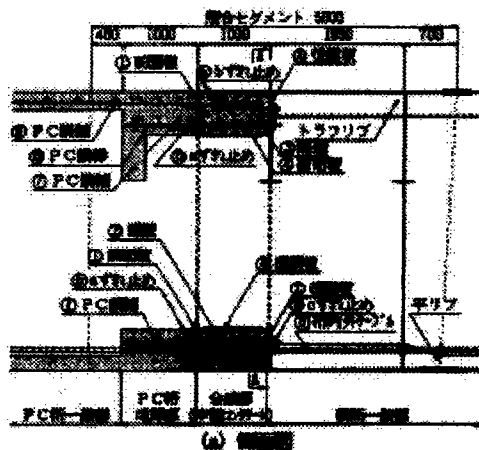
#### 例1 鋼製橋脚の基部



#### <力の伝達>

- ① 軸方向力、曲げモーメント
  - ・圧縮力はベースプレートとコンクリートの支圧により力を伝達する。
  - ・曲げモーメントによる引張力はアンカーボルトにて力を伝達する。
- ② せん断力、ねじりモーメント
  - ・ベースプレートプレート下面のスタッド耐力にて対処する。

#### 例2 揖斐川橋



#### <力の伝達>

- ① 軸方向力、曲げモーメント
  - ・合成部のずれ止め（せん断）と前・後面板（支圧）から鋼桁へ伝達される。
- ② せん断力、ねじりモーメント
  - ・前面板のスタッド（せん断）から鋼桁へと伝達される。

### 4. 評価上の問題点

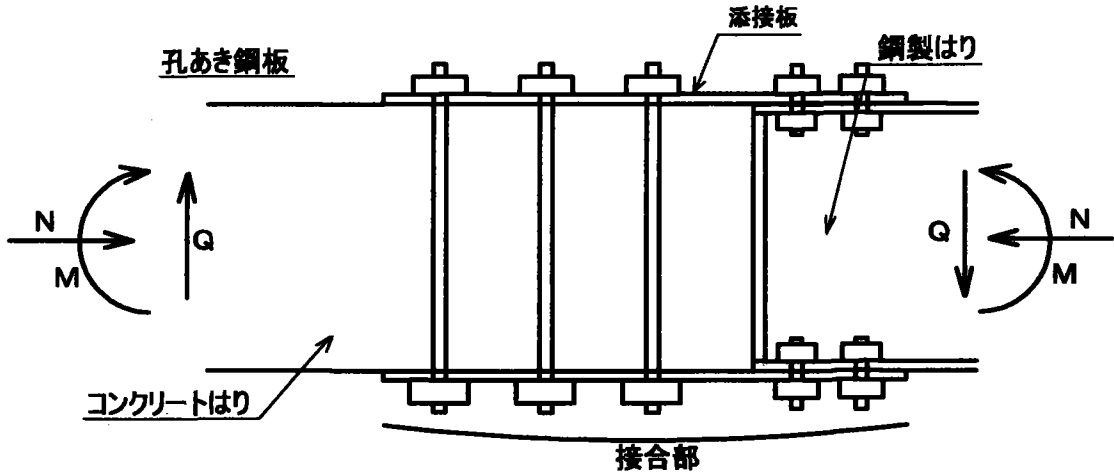
- ・端鋼板、軸力伝達鋼板の板厚の設定
- ・コンクリート梁側の鉄筋配置（スタッドから鉄筋への力の伝達）
- ・せん断スパンが短い場合のずれ止めへの力の伝達（はり高が低い場合）
- ・コンクリートの拘束効果

### 5. 参考文献

- 1) 「鋼・コンクリート複合構造の理論と設計(1) 基礎編：理論編」, (社) 土木学会
- 2) 「鋼・コンクリート複合橋梁の最近の進歩」, (社) 土木学会
- 3) 「特集 ハイブリッドの時代」, 橋梁と基礎, 平成14年8月, (株) 建設図書
- 4) 「道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編」, 平成14年3月, (社) 日本道路協会

1. 接合方法：添接板による伝達

概  
念  
図



概  
要  
説  
明

基本的には、添接板などの摩擦により断面力を伝達する

①軸力

- ・コンクリート部材側  
アンカーボルトのせん断で伝達する。ただし、アンカーボルトと添接板との間の明確な伝達機構はなし。
- ・鋼部材側  
鋼部材側は高力ボルト摩擦接合で力を伝達する。

②曲げモーメント

- ・コンクリート部材側  
曲げモーメントを偶力として置き換え、アンカーボルトのせん断で伝達する。ただし、アンカーボルトと添接板の間の明確な力の伝達機構はなし。
- ・鋼部材側  
鋼部材側は高力ボルト摩擦接合で力を伝達する。

③せん断力

明確な伝達機構はなし。

2. 強度評価式<sup>1)</sup>

軸 力	<p>(明確な式はなし。)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 軸圧縮力に対しては、鋼板とコンクリートの支圧+アンカーボルトによる力の伝達と考えられる。</li> <li>また、アンカーボルトと添接板との間は、支圧による力の伝達と考えられる。</li> </ul>
曲 げ モ ー メ ン ト	<p>(明確な式はなし。)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ アンカーボルトのせん断の他に、コンクリートの支圧などによる力の伝達と考えられる。</li> <li>また、アンカーボルトと添接板の間は、支圧による力の伝達と考えられる。</li> </ul>
せ ん 断 力	<p>(明確な式はなし。)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ コンクリートの支圧及び拘束効果などによる力の伝達と考えられる。</li> </ul>

## 3. 実施例：

調査の結果、実施例は不明であった。

## 4. 評価上の問題点

## (軸力)

- ・端鋼板の厚さ
- ・添接板（軸力伝達鋼板）の厚さ
- ・コンクリート梁側の鋼材配置（アンカーボルトから鉄筋への力の伝達）
- ・コンクリートの拘束効果の影響
- ・アンカーボルト配置による摩擦低減

## (曲げモーメント)

- ・コンクリートの支圧及び拘束効果
- ・添接板（軸力伝達鋼板）の厚さ、長さ

## (せん断力)

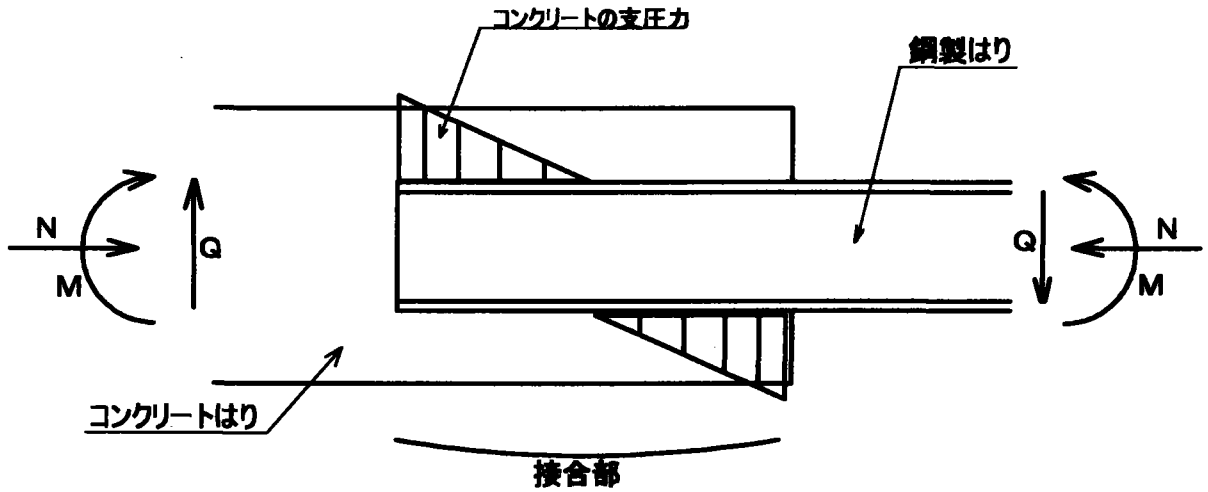
- ・コンクリートの拘束効果
- ・添接板（軸力伝達鋼板）の厚さ

## 5. 参考文献

- 1) 「複合構造物設計・施工指針（案）」，（社）土木学会

1. 接合方法：支圧により断面力を伝達する方法

概念図



概要説明

a) 接合部分の支圧により断面力を伝達する方法

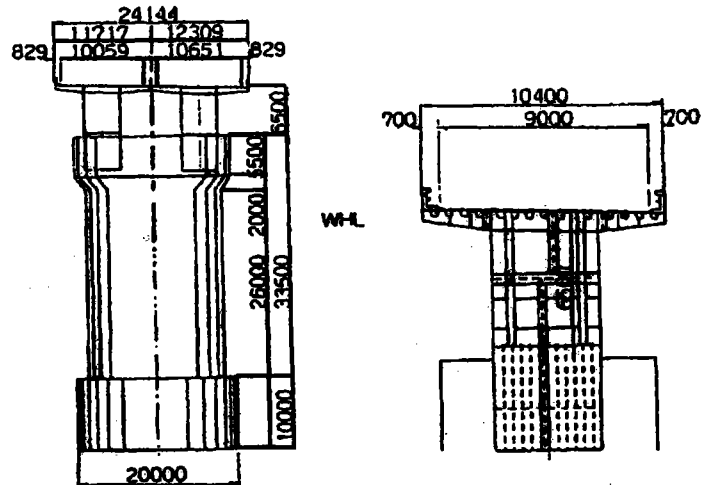
b) 力の伝達経路<sup>1)</sup>

- 軸力                   → 鋼製はり端部ベースプレート → 鋼製はり
- 曲げモーメント → 鋼製はり埋込み側部                   → 鋼製はり
- せん断力           → 鋼製はり埋込み側部                   → 鋼製はり

		構造No. 4	2/3
2. 強度評価式（「複合構造－複合システム小委員会報告」JSSCレポートNo.4 1987） <sup>2)</sup>			
軸力	鋼部材とコンクリート部材の付着で力を伝達する。		
曲げモーメント	明確な力の伝達機構なし。 （実際にはコンクリートの支圧（てこ作用）による力の伝達が考えられる。）		
せん断力	明確な力の伝達機構なし。 （実際にはコンクリートと鋼部材の付着による力の伝達が考えられる。）		
3. 実施例：鋼柱の基礎との接合部 JH吉野川橋（例1.）			

## ● JH 吉野川橋

## 4 径間連続鋼床版箱桁 (151+190+153+109m)



## 4. 評価上の問題点

## ○支圧に対する評価上の問題点

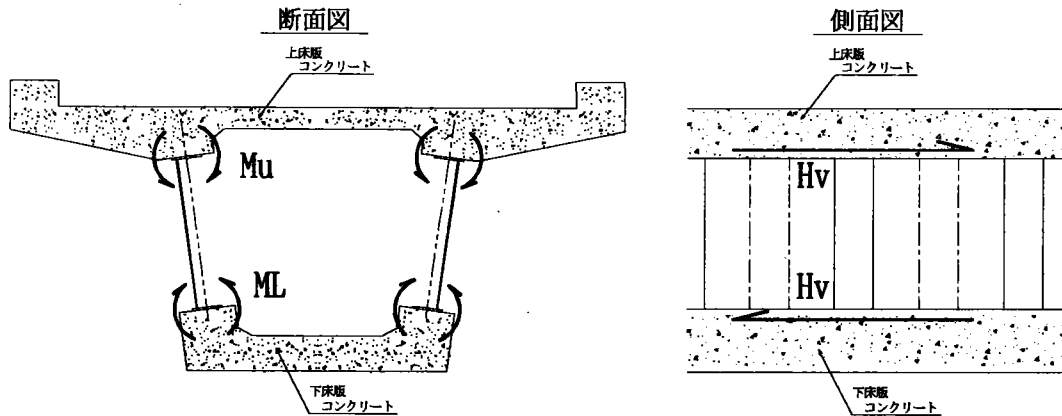
- a) 接合部の長さ。
- b) コンクリート部材と鋼部材のはり高さの関係。
- c) コンクリート梁側の鉄筋配置 (鋼部材から鉄筋への力の伝達)。

## 5. 参考文献

- 1) 「複合構造設計・施工指針 (案)」, (社) 土木学会
- 2) 「複合構造-複合構造システム小委員会報告-」, 日本鋼構造協会

1. 接合方法 (1)

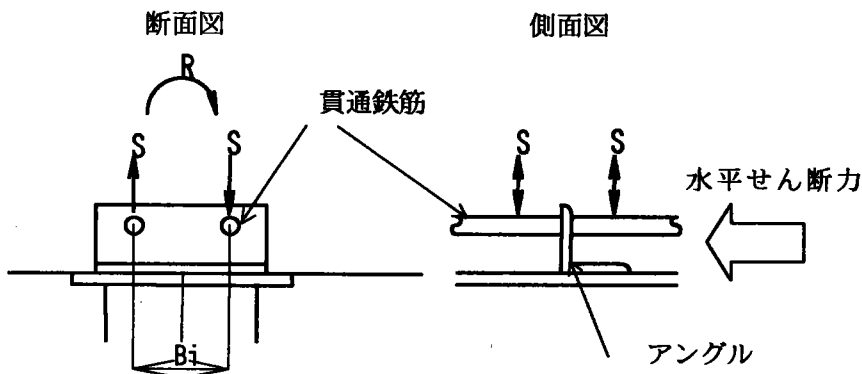
1. 断面力



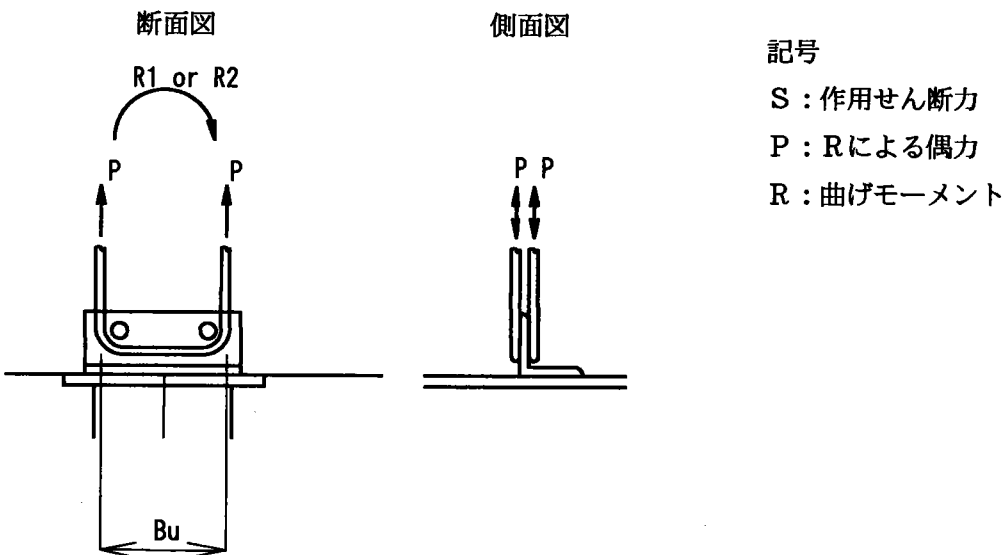
2. アンクルジベルに作用する曲げモーメントおよび水平せん断力に対する概念図<sup>1)</sup>

①アンクルジベルは橋軸方向の水平せん断力を受持ち、貫通鉄筋は橋軸直角の曲げモーメントを受持つとして設計を行う。

概念図



注) 鉄筋のせん断強度のみで曲げモーメントに抵抗できない場合はU字筋も曲げモーメントを受け持つとして設計を行う。





混合桁における応力伝達メカニズム	構造 No. 5 アングルジベル	2/4
1. 接合方法 <sup>2)</sup>		
概要説明	<p data-bbox="232 256 362 289">1. 断面力</p> <p data-bbox="239 305 467 338">(1) 水平せん断力</p> <p data-bbox="307 353 1303 387">主桁の曲げせん断挙動により発生する水平せん断力で、算出式は以下の通りである。</p> $H_v = S \cdot Q / I \quad (\text{道示 II 鋼橋編 8.2.2})$ <p data-bbox="255 497 1008 530">ここに、 <math>H_v</math> : 設計水平せん断力(橋軸方向単位長さ当たり)</p> <p data-bbox="388 546 769 579"><math>S</math> : 断面に作用するせん断力</p> <p data-bbox="388 595 1086 628"><math>Q</math> : 主桁断面 1 次モーメント(接合部位置に関する断面)</p> <p data-bbox="388 643 793 676"><math>I</math> : 主桁の断面 2 次モーメント</p> <p data-bbox="239 736 490 769">(2) 曲げモーメント</p> <p data-bbox="279 785 1412 957">特に波形鋼板ウェブ橋の場合、鋼合成桁に比べウェブの面外方向の剛性が大きくなる。そのため、接合部に作用する橋軸直角方向曲げモーメントに対して検討を行う。接合部の設計に用いる設計断面力は、床版・横方向の設計で箱桁断面をラーメン構造として各ウェブ下端に支点を設けた解析モデル(概念図参照)により求めた断面力を用いている。</p> <p data-bbox="232 973 388 1006">2. 力の伝達</p> <p data-bbox="247 1021 851 1055">作用断面力に対する力の伝達は以下の通りである。</p> <p data-bbox="239 1070 467 1103">(1) 水平せん断力</p> <p data-bbox="279 1119 1412 1196">水平せん断力はアングルの立面を介してアングルに伝達され、アングルとフランジの溶接を通じて、ウェブへと伝達される。</p> <p data-bbox="239 1212 490 1245">(2) 曲げモーメント</p> <p data-bbox="279 1260 1412 1338">貫通鉄筋からアングルに力が伝達され、アングルとフランジの溶接を通じて、ウェブへと伝達される。</p>	

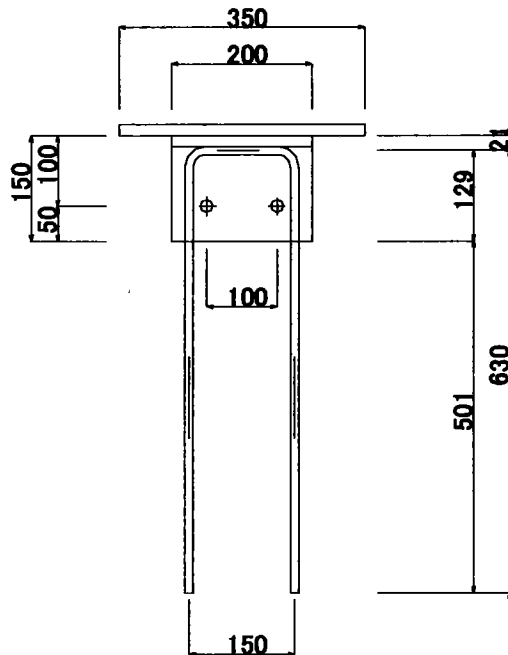
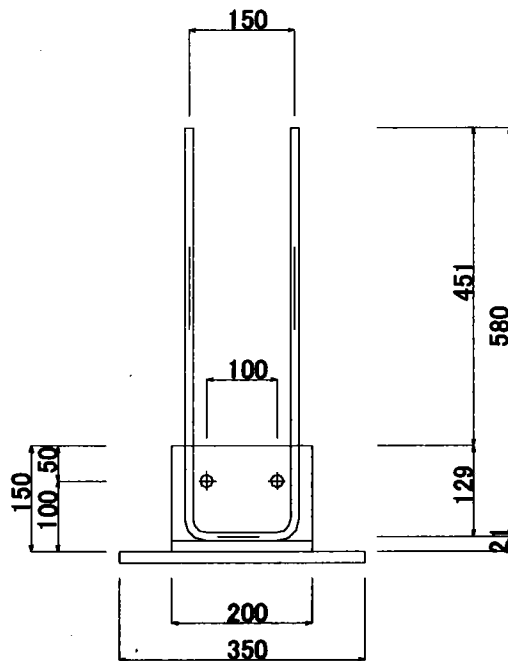
混合桁における応力伝達メカニズム	構造 No. 5 アングルジベル	3/4
2. 強度評価式		
せん断力	<p>アングルジベルが担う許容水平せん断力は、下式にて照査してよい。(ユーロコードより)<sup>3)</sup></p> $Ra=0.60 \cdot Rd$ $Rd=Rd1 \text{ と } Rd2 \text{ の小さい方}$ $Rd1=A \cdot \sigma_{ck} / 1.5$ $Rd2=\Sigma a \cdot L \cdot (\sigma_{sy} / \sqrt{3})$ <p>ここに、 Ra : ずれ止めの使用耐力                      Rd : ずれ止めの終局耐力</p> <p>Rd1 : アングル面積 (=b・h)      Rd2 : アングルとフランジの溶接</p> <p><math>\sigma_{ck}</math> : コンクリートの設計基準強度 (立方体供試体強度=円柱供試体強度/0.85)</p> <p>a : 溶接の理論のど厚                      L : 溶接長</p>	
曲げモーメント	<p>ずれ止めに作用する橋軸直角方向の曲げモーメントによる鉛直力に対して、下記に示す、貫通鉄筋のせん断強度により抵抗するものとして設計することを基本とする。<sup>4)</sup></p> $Ra=2 \cdot Ai \cdot (\sigma_{sa} / \sqrt{3}) \cdot bi$ $Rd=2 \cdot Ai \cdot (\sigma_{sy} / \sqrt{3}) \cdot bi$ <p>ここに、 Ra : 貫通鉄筋2本のせん断強度に基づく許容曲げモーメント</p> <p>Rd : 貫通鉄筋2本のせん断強度に基づく耐力</p> <p>Ai : 貫通鉄筋の断面積</p> <p>Bi : 貫通鉄筋の軸間隔</p> <p><math>\sigma_{sa}</math> : 鉄筋の許容引張応力度</p> <p><math>\sigma_{sy}</math> : 鉄筋の降伏応力度</p> <p>また、作用する橋軸直角方向の曲げモーメントによる鉛直力に対して、貫通鉄筋のせん断強度のみでは抵抗しきれない場合は、U字鉄筋の引張強度および付着強度を付加して良いものとする。ただし、U字鉄筋はアングルの表裏2組を基本とする。以下に、その照査式を示す。</p> $Rd=Rd1 \text{ と } Rd2 \text{ の小さい方}$ $Ra= Rd1 \text{ と } Rd2 \text{ の小さい方}$ $Ra1=2 \cdot Au \cdot \sigma_{sa} \cdot bu$ $Ra2=2 \cdot Uu \cdot L \cdot \tau_{ba} \cdot bu$ $Rd1=2 \cdot Au \cdot \sigma_{sy} \cdot bu$ $Rd2=2 \cdot Uu \cdot L \cdot \tau_{bk} \cdot bu$ <p>ここに、 Ra : 付加して良い、ずれ止めの許容曲げモーメント</p> <p>Rd : 付加して良い、ずれ止めの終局耐力</p> <p>Ra1 : U字鉄筋2組の引張強度に基づく許容曲げモーメント</p> <p>Ra2 : U字鉄筋2組の付着強度に基づく許容曲げモーメント</p> <p>Rd1 : U字鉄筋2組の引張強度に基づく耐力</p> <p>Rd2 : U字鉄筋2組の付着強度に基づく耐力</p> <p>Au : U字鉄筋の断面積                      Uu : U字鉄筋の周長</p> <p>L : U字鉄筋の定着長                      Bu : U字鉄筋の軸間隔</p> <p><math>\sigma_{sa}</math> : 鉄筋の許容引張応力度                      <math>\sigma_{sy}</math> : 鉄筋の降伏応力度</p> <p><math>\tau_{ba}</math> : 鉄筋の許容付着応力度                      <math>\tau_{bk}</math> : 鉄筋の付着強度</p>	

混合桁における応力伝達メカニズム	構造 No. 5 アングルジベル	4/4
3. 評価上の問題点		
<p>①強度式では、アングルとコンクリートの支圧、アングルとフランジの溶接を検討しているが、アングル自体がせん断破断などしないようにアングルを選定する必要がある。</p> <p>②水平せん断力に対するコンクリートの支圧は考慮しているが、曲げモーメントに対するコンクリート支圧を考慮していない。</p> <p>③主桁作用による鉛直方向のせん断力に抵抗できる構造形式ではないので、他の方法でせん断力に抵抗する必要がある。</p> <p>④アングルとフランジの溶接部の疲労照査等不明な部分が多いので、検討が必要である。</p>		
4. 参考文献		
<p>1) 「波形鋼板ウェブ橋設計マニュアル (案)」</p> <p>2) 「複合橋設計施工基準 (案)」, (社) プレストレスコンクリート技術協会</p> <p>3) 立神・蛭名・上平・柳下, 「アングルジベルのせん断耐力に関する基礎的研究」, 第9回シンポジウム論文集 (1999.10), (社) プレストレスコンクリート技術協会</p> <p>4) 「鉄道総合研究所; 鉄道構造物等設計標準・同解説 (鋼・合成構造物)」, 丸善 (株) (1992.10)</p>		

ドール橋

○上床版側

- ・アングル : L150×150×15
- ・U字鉄筋の径 : HA12
- ・貫通鉄筋の径 : HA12
- ・U字鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・貫通鉄筋の溶接の有無 : 溶接有
- ・鉄筋貫通孔径 :  $\phi 18$
- ・ジベルピッチ : 185(mm)~527(mm)



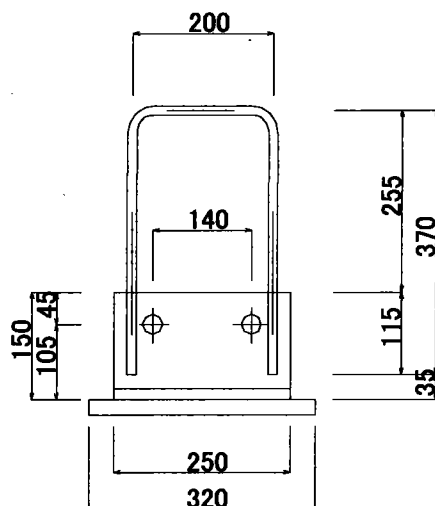
○下床版側

- ・アングル : L150×150×15
- ・U字鉄筋の径 : HA12
- ・貫通鉄筋の径 : HA12
- ・U字鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・貫通鉄筋の溶接の有無 : 溶接有
- ・鉄筋貫通孔径 :  $\phi 18$
- ・ジベルピッチ : 205(mm)~529(mm)

前谷橋

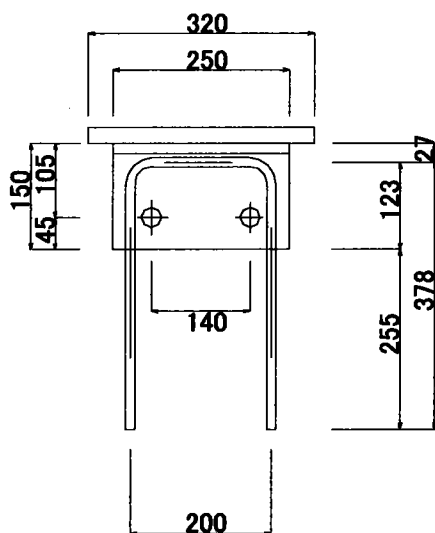
○上床版側

- ・アングル : L150×150×15
- ・U字鉄筋の径 : D16
- ・貫通鉄筋の径 : D19
- ・U字鉄筋の溶接の有無 : 溶接有
- ・貫通鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・鉄筋貫通孔径 : φ28
- ・ジベルピッチ : 300(mm)



○下床版側

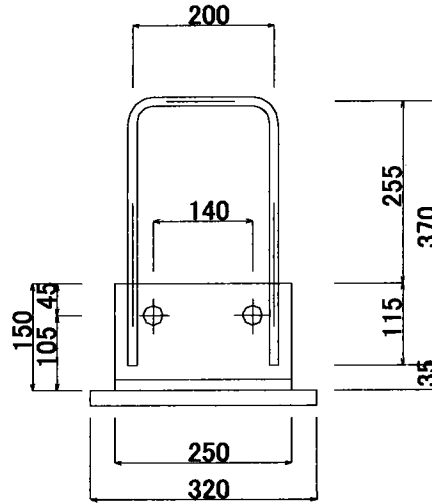
- ・アングル : L150×150×15
- ・U字鉄筋の径 : D16
- ・貫通鉄筋の径 : D19
- ・U字鉄筋の溶接の有無 : 溶接有
- ・貫通鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・鉄筋貫通孔径 : φ28
- ・ジベルピッチ : 450(mm)~600(mm)



小河内川橋

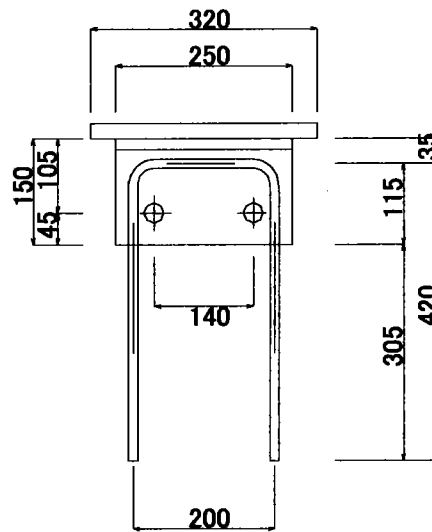
○上床版側

- ・アングル : L150×150×15
- ・U字鉄筋の径 : D16
- ・貫通鉄筋の径 : D19
- ・U字鉄筋の溶接の有無 : 溶接有
- ・貫通鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・鉄筋貫通孔径 :  $\phi 28$
- ・ジベルピッチ : 235(mm)~400(mm)



○下床版側

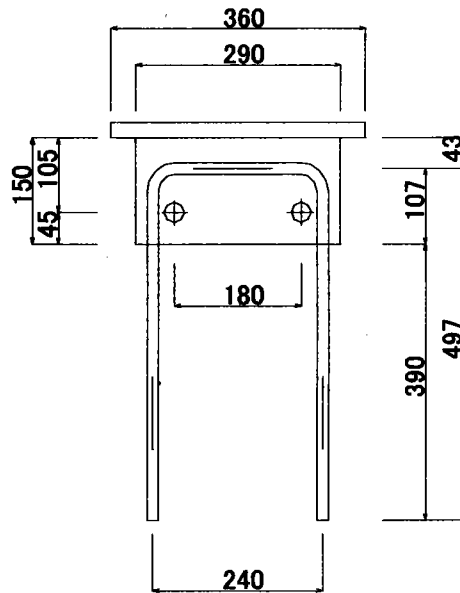
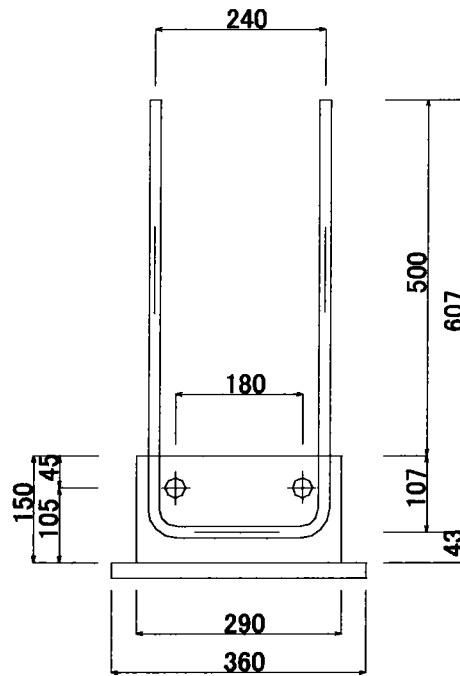
- ・アングル : L150×150×15
- ・U字鉄筋の径 : D16
- ・貫通鉄筋の径 : D19
- ・U字鉄筋の溶接の有無 : 溶接有
- ・貫通鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・鉄筋貫通孔径 :  $\phi 28$
- ・ジベルピッチ : 450(mm)~600(mm)



鍋田高架橋

○上下床版共通

- ・アングル : L150×150×15
- ・U字鉄筋の径 : D16
- ・貫通鉄筋の径 : D19
- ・U字鉄筋の溶接の有無 : 溶接有
- ・貫通鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・鉄筋貫通孔径 : φ28
- ・ジベルピッチ : 250(mm)



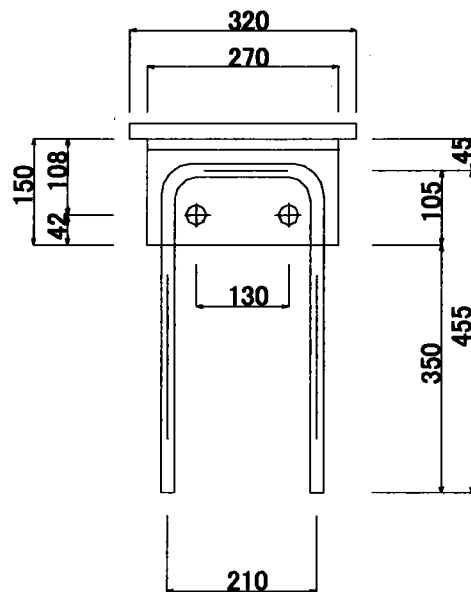
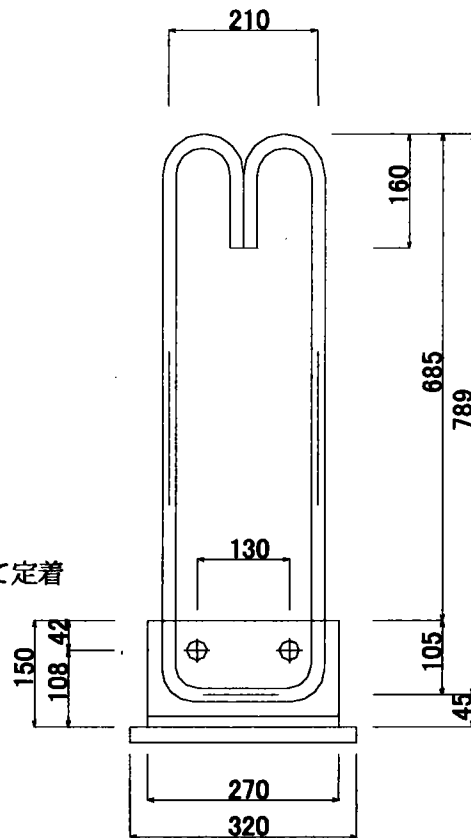
大内山川第二橋

○上下床版共通

- ・アングル : L150×150×15
- ・U字鉄筋の径 : D19
- ・貫通鉄筋の径 : D19
- ・U字鉄筋の溶接の有無 : 溶接有
- ・貫通鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・鉄筋貫通孔径 :  $\phi 28$
- ・ジベルピッチ : 200(mm)~300(mm)

ただし,

貫通鉄筋はブロック毎にフックを設けて定着

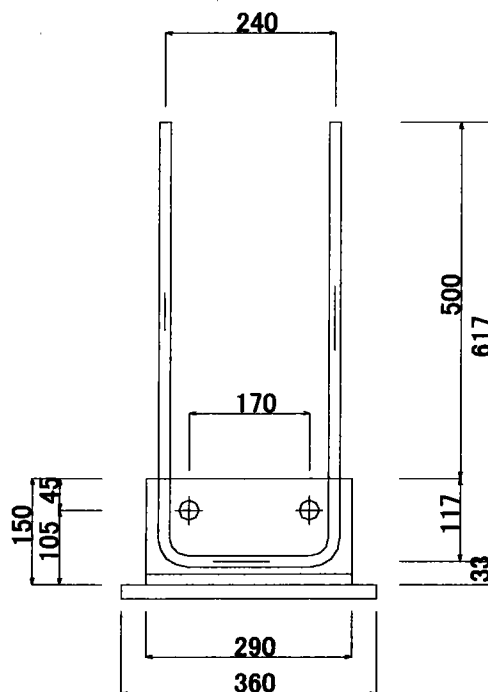




鍋田高架橋西

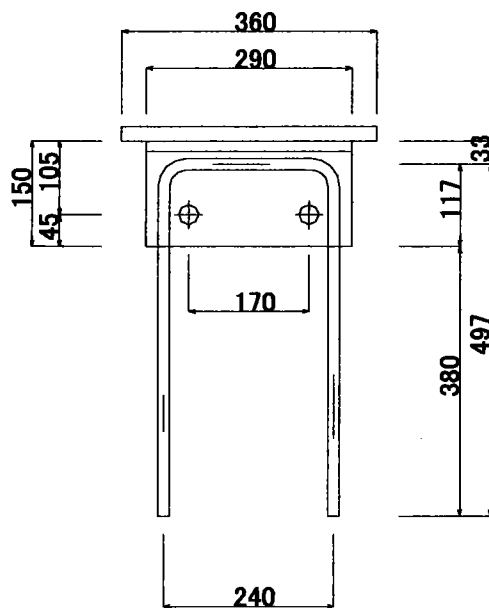
○上床版側

- ・アングル : L150×150×15
- ・U字鉄筋の径 : D16
- ・貫通鉄筋の径 : D19
- ・U字鉄筋の溶接の有無 : 溶接有
- ・貫通鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・鉄筋貫通孔径 :  $\phi 28$
- ・ジベルピッチ : 250(mm)



○下床版側

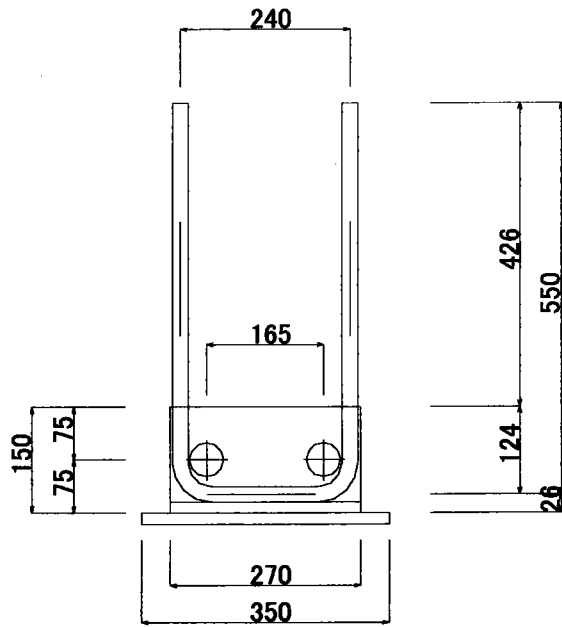
- ・アングル : L150×150×15
- ・U字鉄筋の径 : D16
- ・貫通鉄筋の径 : D19
- ・U字鉄筋の溶接の有無 : 溶接有
- ・貫通鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・鉄筋貫通孔径 :  $\phi 28$
- ・ジベルピッチ : 250(mm)



小犬丸川橋

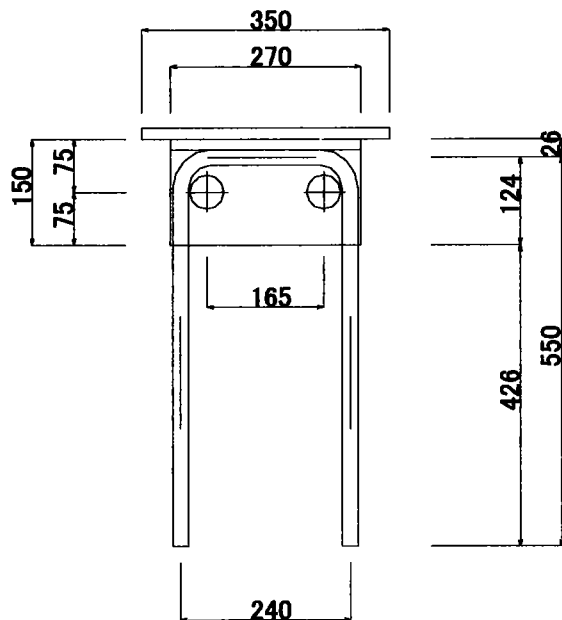
○上床版側

- ・アングル : L150×150×15
- ・U字鉄筋の径 : D22
- ・貫通鉄筋の径 : D25
- ・U字鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・貫通鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・鉄筋貫通孔径 : φ48
- ・ジベルピッチ : 375(mm)



○下床版側

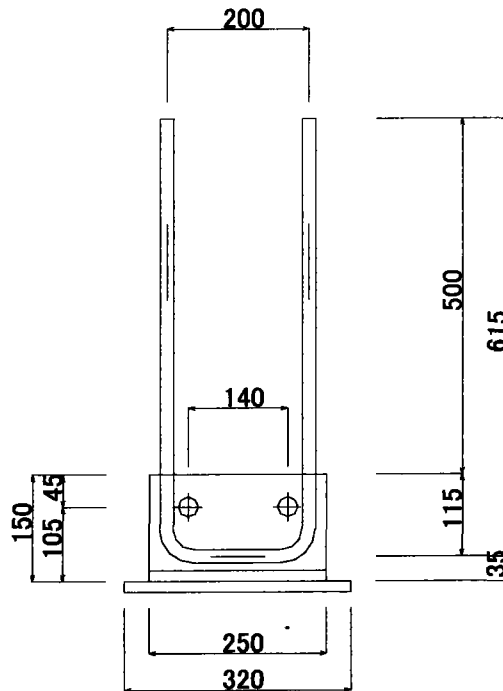
- ・アングル : L150×150×15
- ・U字鉄筋の径 : D22
- ・貫通鉄筋の径 : D25
- ・U字鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・貫通鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・鉄筋貫通孔径 : φ48
- ・ジベルピッチ : 500(mm)



下田橋

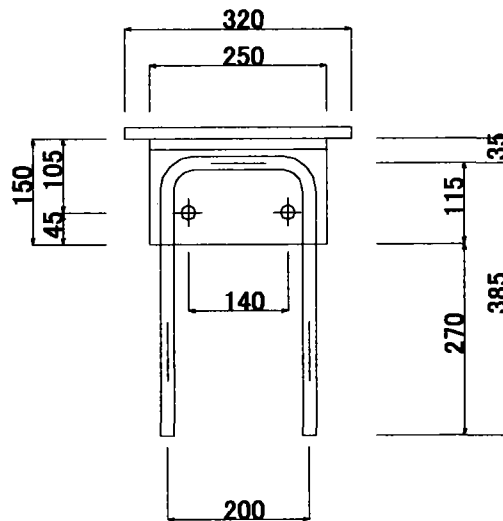
○上床版側

- ・アングル : L150×150×15
- ・U字鉄筋の径 : D19
- ・貫通鉄筋の径 : D19
- ・U字鉄筋の溶接の有無 : 溶接有
- ・貫通鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・鉄筋貫通孔径 :  $\phi 28$
- ・ジベルピッチ : 250(mm)~300(mm)



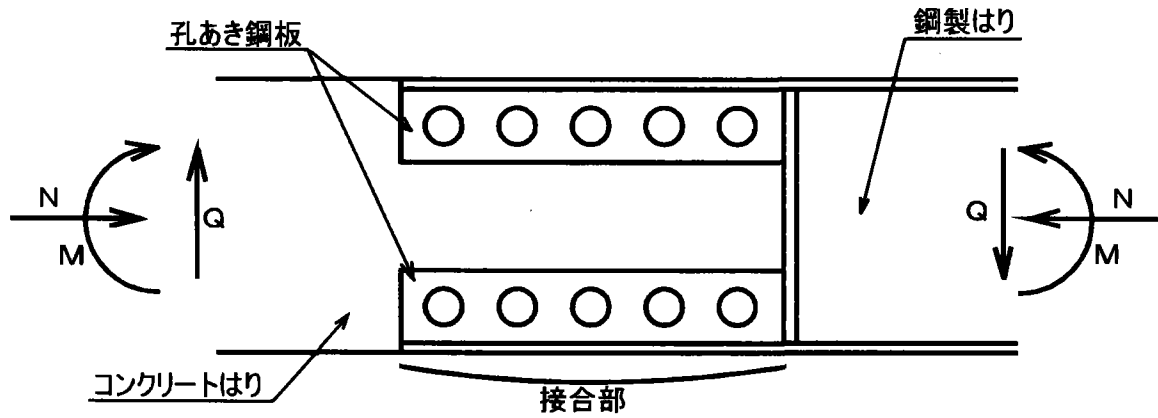
○下床版側

- ・アングル : L150×150×15
- ・U字鉄筋の径 : D19
- ・貫通鉄筋の径 : D13
- ・U字鉄筋の溶接の有無 : 溶接有
- ・貫通鉄筋の溶接の有無 : 溶接無
- ・鉄筋貫通孔径 :  $\phi 20$
- ・ジベルピッチ : 250(mm)~300(mm)



1. 接合方法：孔あき鋼板により断面力を伝達する方法

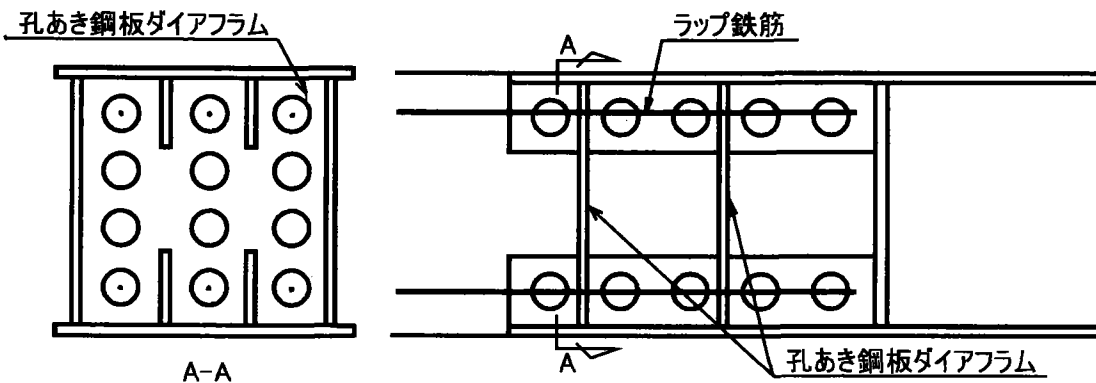
概念図



概要説明

a) 孔あき鋼板の孔開口部によるずれ止め力で曲げモーメント(=偶力), 軸力を伝達する構造である。せん断力は、接合部に配置される孔あき鋼板ダイヤフラムにより伝達させる構造が多い。また、曲げモーメント, 軸力を孔あき鋼板に伝達させる役割として、軸方向にラップ鉄筋を配置するケースがある。国内では、梁柱接合部の適用事例があるが、桁同士の連結構造では実用例はない。

- b) 力の伝達経路  
 曲げモーメント (=偶力)  
 中詰めコンクリート → 孔あき鋼板 → 鋼製はり  
 軸力  
 中詰めコンクリート → 孔あき鋼板 → 鋼製はり



		構造No. 6	2/3
2. 強度評価式			
軸力	<p>ずれ止めのせん断により力を伝達する。  <math>Qa=0.3 \cdot d^2 \cdot \sigma_{ck}</math> ……(式. 1)  <b>Qa</b> : 許容せん断耐力  <b>d</b> : 孔径 , <math>\sigma_{ck}</math> : コンクリートの設計基準強度  <b>必要孔数</b> <math>N_{req}=Pf/Qa</math>  <math>P=Pf \times</math> (部材孔数)  <b>P</b> : 照査部材に作用するせん断力</p>		
曲げモーメント	<p>曲げモーメントを偶力に置き換えて、ずれ止めのせん断力で力を伝達する。          ずれ止めの許容せん断耐力式は (式. 1) と同じ。</p>		
せん断力	<p>孔あき鋼板ダイアフラムを配置し、伝達させる。          ずれ止めの許容せん断耐力式は (式. 1) と同じ。</p>		
3. 実施例：今別府橋（梁柱結合部事例）			

## 4. 評価上の問題点

○軸力、曲げモーメントによる圧縮力及び引張力に対する評価上の問題点

- a) 孔あき鋼板ダイヤフラムによる中詰めコンクリートの拘束効果の影響。
- b) ラップ鉄筋長による軸力伝達効果
- c) コンクリートの打設方向による影響

## 5. 参考文献

- 1) Leonhardt Fritz, et. Al , 「Neues, Vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton-und Stahlbetonbau」, Heft 12/1987
- 2) 佐々木保隆・平井卓・明橋克良, 「鋼・コンクリート複合ラーメン橋の剛結部に関する実験的研究」, 構造工学論文集, Vol. 44A, 1998年3月
- 3) 保坂鐵矢・平城弘一・小枝芳樹ら, 「鉄道用連続合成桁に用いるずれ止め構造のせん断特性に関する実験的研究」, 構造工学論文集, Vol44A, 1998年3月
- 4) 明橋克良・佐々木保隆ら, 「今別府橋における上下部剛結構造の設計と架設時応力測定」, 横河ブリッジグループ技報, No31, 2002年1月

### 3.2.3 合成柱の検討

#### (1) 目的

近年、兵庫県南部地震の経験から、橋脚の耐震性の再検討が必要とされ、種々の観点から橋脚の耐震性能の改善や評価に関する検討がなされてきている。そのうち、鋼製橋脚の耐震性能の改善において注目されている構造に、コンクリート充填鋼管柱がある。この構造では、鋼管の内部にコンクリートを充填することによって、コンクリートが鋼管の座屈強度を高め、逆に、拘束効果により鋼管が内部コンクリートの圧縮強度を高めるといった特徴がある。

このような構造は、兵庫県南部地震以前に既に阪神高速道路公団によって適用が進められ、「合成柱（充填方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針（案）」が1986年3月に制定されている。これに対して、兵庫県南部地震以降、種々の機関で同構造の指針や基準の作成が行われてきている。

合成柱グループでは、合成柱の設計のために必要な基礎的事項を把握するために、阪神高速道路公団制定の「合成柱（充填方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針（案）」を対象として、指針案作成の背景などを調査した。この指針案には、条文に加えてその内容を説明する解説が記述されているが、それらにおいて不明な点がある場合には、さらに参考文献を調べるなどできる限り詳細に調査した。そして、調査した事項をメモとしてまとめることにより、今後の実務で同構造の設計に携わる技術者の参考に供することとした。

#### (2) 合成柱に関する国内外の規準（基準）

国内の合成柱に関する設計基準には、ある特定の事業主体を対象（例えば、道路橋示方書や鉄道構造物等設計標準）としたものと、構造物全般について幅広く包括する規準（例えば、土木学会制定の鋼構造物設計指針）とがある。これらの規準は、許容応力度法もしくは限界状態設計法で記述されている。近い将来、設計手法は限界状態設計法に統一され、単位系はSIに一本化されると考えられるが、現在のところ各設計基準において、同一と考えられる構造物でも、許容応力度、想定する限界状態、安全係数などに微妙な違いがある。参考までに、同類の海外の規準としては、BS5400、DIN18806、EuroCode4などがある。

現在、国内において適用されている合成柱に関する規準は、構造別の種類を基本として整理すると、下記のものがある。

##### 1) 道路橋

「道路橋示方書・同解説II 鋼橋編」, (株)日本道路協会, 1996.12

道路橋の設計基準である道路橋示方書II鋼橋編には、合成桁以外の複合構造物については特に規定されていない。道路橋示方書V耐震設計編には、コンクリートを充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力法が規定されているが、軸力に対して鋼断面のみで抵抗するなど、合成効果をあまり考慮しない設計となっている。設計方法には、許容応力度設計法を採用している。

「合成柱（充填方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針(案)」, 阪神高速道路公団, 1986.3

角形充填鋼管柱を対象とした指針で、独立端柱かつ両端拘束構造の橋脚について規定がある。本指針を採用した阪神道路公団以外の施工実績も多く、事実上、道路橋における充填式合成鋼管柱の設計・施工指針となっている。なお、円形充填鋼管柱については、準用することとしている。設計方法は、全体安全係数を使用した限界状態設計法（終局限界、使用限界、疲労限界）が採用されている。

「コンクリート充填合成柱を有する橋脚の設計・施工指針(素案)」, 首都高速道路公団, 1991.2

円形充填鋼管柱を対象とした指針で、独立端柱かつ両端拘束構造の橋脚について規定がある。設計法は、書式的に限界状態設計法になっているが、許容応力度設計法の規定をそのまま書き直したものである。

## 2) 鉄道橋

「鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの複合構造物」, (財)鉄道総合技術研究所, 1998.8

合成桁を除く鉄筋鉄骨コンクリート構造物、およびコンクリート充填鋼管構造を対象にしており、合成構造の他に混合構造についても規定がある。鉄道橋をはじめ、鉄道に関する構造物（駅舎や付帯設備）にも広く適用されている。設計法には、限界状態設計法が採用されているが、許容応力度設計法の書式と限界状態設計法の書式が等価であるという前提のもとに、許容応力度設計法に使用されていた安全率を各係数に割り振っている。

## 3) 土木構造物一般

「鋼構造物設計指針 PARTB 合成構造物」, (財)土木学会, 1997.9

道路橋や鉄道橋のような構造物を特定せず、鋼とコンクリートを使用した広範囲の合成構造物を対象としている。具体的には、合成桁、合成床版、充填式合成柱である。なお、充填式合成柱は、強固な隔壁を有する鋼製閉断面材の全体にコンクリートを充填したもので、鋼とコンクリートが一体となって挙動することを前提としている。設計方法は、限界状態設計法（終局限界、使用限界、疲労限界）が採用されている。

「コンクリート標準示方書 設計編」, (財)土木学会, 1996.3

鉄骨鉄筋コンクリートやコンクリート充填柱など、コンクリートを主体とした合成構造物について規定されている。通常はSRC構造に分類される累加型構造なども合成構造として分類している。設計方法は、限界状態設計法（終局限界、使用限界、疲労限界）が採用されている。

「複合構造物設計・施工指針(案)」, (財)土木学会, 1997.10

合成構造や混合構造など、広い範囲の複合構造物について規定されている。このうち、合成構造物については、合成梁、合成柱、合成版、合成シェルに分類され、合成柱としては、被覆形式および充填形式の鋼管構造について規定されている。設計方法は、限界状態設計法（終局限界、使用限界、疲労限界）が採用されており、内容的には「コンクリート標準示方書」と同じである。

## 4) 建築構造物

「鉄筋鉄骨コンクリート構造計算規準・同解説」, (財)日本建築学会, 1987.6

建築構造物を対象とした規準で、合成柱に関してはSRC構造の延長として、被覆形式、充填形式、および被覆と充填の併用形式について規定されている。設計方法は、累加強度方式を用いた許容応力度設計法を採用している。なお、改訂された「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法—」, (財)日本建築学会, 1999.11では、合成柱の規定は削除されている。

「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」, (財)日本建築学会, 1997.10

充填形式、および充填を主とした被覆との併用形式について規定されている。設計方法は、累加強度方式を用いた許容応力度設計法を採用している。



表-3.2.1 合成柱に関する国内外の規準の比較

規準類名称 (発行年)	(社)日本道路協会 道路橋示方書・同解説 (1996)	阪神高速道路公団 合成柱を有する鋼製橋脚 の設計施工指針(案) (1986)	(財)鉄道総合技術研究所 鉄道構造物等 設計標準・同解説 (1998)	(社)土木学会 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物 (1997)	(社)日本建築学会 鉄筋鉄骨コンクリート 構造計算規準・同解説 (1987)	British Standard Institution BS5400 Part5 (1979)	Deutsches Institut für Normung DIN18806 Teil1 (1984)	EuroCode4 Part2 (1984)
適用分野	道路橋	道路橋	鉄道橋および関連施設	土木構造物	建築構造物	道路橋, 鉄道橋	建築構造物	建築構造物
設計法	許容応力度設計法	許容応力度設計法	限界状態設計法	限界状態設計法	許容応力度設計法 (累加強度方式)	限界状態設計法	限界状態設計法	限界状態設計法
単位系	重力単位系	重力単位系	重力単位系	重力単位系	重力単位系	国際単位 SI	国際単位 SI	国際単位 SI
適用範囲	充填鋼管柱 ただし、地震時のみ	角形充填鋼管柱	充填鋼管柱	充填鋼管柱	充填鋼管柱 被覆鋼管柱 充填と被覆の併用鋼管柱	充填鋼管柱 被覆鋼管柱	充填鋼管柱 被覆鋼管柱	充填鋼管柱 被覆鋼管柱
鋼とコンクリートとの断面構成比の制限	規定なし (コンクリートに軸力を 分担させない)	$0.2 \leq \beta \leq 0.8$	$0.2 \leq \beta \leq 0.9$	$0.2 \leq \beta \leq 0.9$	$0.008Ac \leq As$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8$	$0.2 \leq \beta \leq 0.9$	$0.2 \leq \beta \leq 0.9$
$\alpha$ : コンクリートの軸力分担係数 $\alpha = \frac{N_c}{N_c + N_s}$ , $\beta$ : 鋼の軸力分担係数 $\beta = \frac{N_s}{N_c + N_s}$ , $N_c$ : コンクリートの分担軸力, $N_s$ : 鋼の分担軸力, $Ac$ : コンクリートの断面積, $As$ : 鋼の断面積								
鋼管の最小板厚	8mm 圧縮補剛板として設計	8mm 圧縮補剛板として設計	6mm 圧縮補剛板として設計	8mm 圧縮補剛板として設計	矩形断面 : $\frac{d}{t} \leq \frac{74}{\sqrt{f_y}}$ 円形断面 : $\frac{D}{t} \leq \frac{240}{f_y}$	矩形断面 : $t \geq d \sqrt{\frac{f_y}{3E_s}}$ 円形断面 : $t \geq D \sqrt{\frac{f_y}{8E_s}}$	St37 St54 矩形断面 : $\frac{t}{d} \leq 51 \quad 42$ 円形断面 : $\frac{t}{D} \leq 84 \quad 68$	矩形断面 : $\frac{t}{d} \leq 52 \epsilon$ 円形断面 : $\frac{t}{D} \leq 90 \epsilon$ $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
$t$ : 板厚, $d$ : 長辺の長さ, $D$ : 円の外径, $f_y$ : 鋼の基準降伏点, $E_s$ : 鋼のヤング係数								
細長比の制限	$\frac{l}{r} \leq 120$	$\frac{l}{r} \leq 120$	$\frac{l}{r} \leq 120$	$\frac{l}{r} \leq 120$	$\frac{l}{r} \leq 200$	矩形断面 : $\frac{l}{b} \leq 65$ 円形断面 : $\frac{l}{D} \leq 55$	$\beta < 0.5$ のとき $\bar{\lambda} \leq 2.0$	規定なし
$l$ : 柱の有効長, $b$ : 短辺の長さ, $D$ : 円の外径, $\bar{\lambda}$ : 換算細長比, $r$ : 断面二次半径, $\beta$ : 鋼の軸力分担係数								
ずれ止め (コンクリート と鋼の付着)	規定なし	柱基部や接合部に スタッドを配置	規定なし	柱基部や接合部に スタッドを配置	規定なし	$\tau \geq 40\text{N/mm}^2$ の場合に ずれ止めを設ける	$\tau \geq \max \tau$ の場合に ずれ止めを設ける	$\tau \geq 40\text{N/mm}^2$ の場合に ずれ止めを設ける
$\tau$ : コンクリートと鋼の接触面におけるせん断応力度								
コンクリートの 基準強度	低強度が望ましい 160kgf/cm <sup>2</sup> 程度	240kgf/cm <sup>2</sup> 以上	240kgf/cm <sup>2</sup> 以上	240kgf/cm <sup>2</sup> 以上		20N/mm <sup>2</sup> 以上	B25 以上	20N/mm <sup>2</sup> 以上
拘束効果による コンクリートの 強度増加	密閉状態で 設計基準強度の2倍	考慮しない	考慮しない	コンクリートの 応力-ひずみ曲線で考慮	考慮しない	円形断面の場合のみ 細長比と偏心量の 関数として考慮	円形断面の場合のみ 細長比の関数として考慮	円形断面の場合のみ 細長比と偏心量の 関数として考慮
鋼部材(充填前) としての設計	鋼断面として設計	鋼断面として設計	鋼断面として設計	鋼断面として設計	規定なし	規定なし	規定なし	規定なし
縦方向補剛材	補剛板として設計	補剛板として設計	補剛板として設計	補剛板として設計	規定なし	補剛材として規定	規定なし	規定なし
横方向補剛材	補剛板として設計	補剛板として設計 合成柱の両端部に剛な ダイヤフラムを設置	補剛板として設計	補剛板として設計 合成柱の両端部に剛な ダイヤフラムを設置	規定なし	補剛材として規定	規定なし	規定なし
特徴	コンクリートは鋼断面の 局部座屈と変形抑制を目的 として充填され、鋼とコン クリートの合成効果は 期待しない。	鋼部材の中にコンクリート を閉じこめることにより、 鋼とコンクリートの一体化 を図っている。	鋼とコンクリートが一体 として挙動する、完全な合 成構造として定義されて いる。	鋼部材の中にコンクリート を閉じこめることにより、 鋼とコンクリートの一体化 を図っている。	合成構造物として規定さ れているが、鋼とコンクリ ートのひずみ差を無視して いるため、設計的には反 映されていない。	鋼とコンクリートが一体 として挙動する、完全な合 成構造として定義されて いる。	鋼とコンクリートが一体 として挙動する、完全な合 成構造として定義されて いる。小規模構造物を対象 としている。	鋼とコンクリートが一体 として挙動する、完全な合 成構造として定義されて いる。小規模構造物を対象 としている。

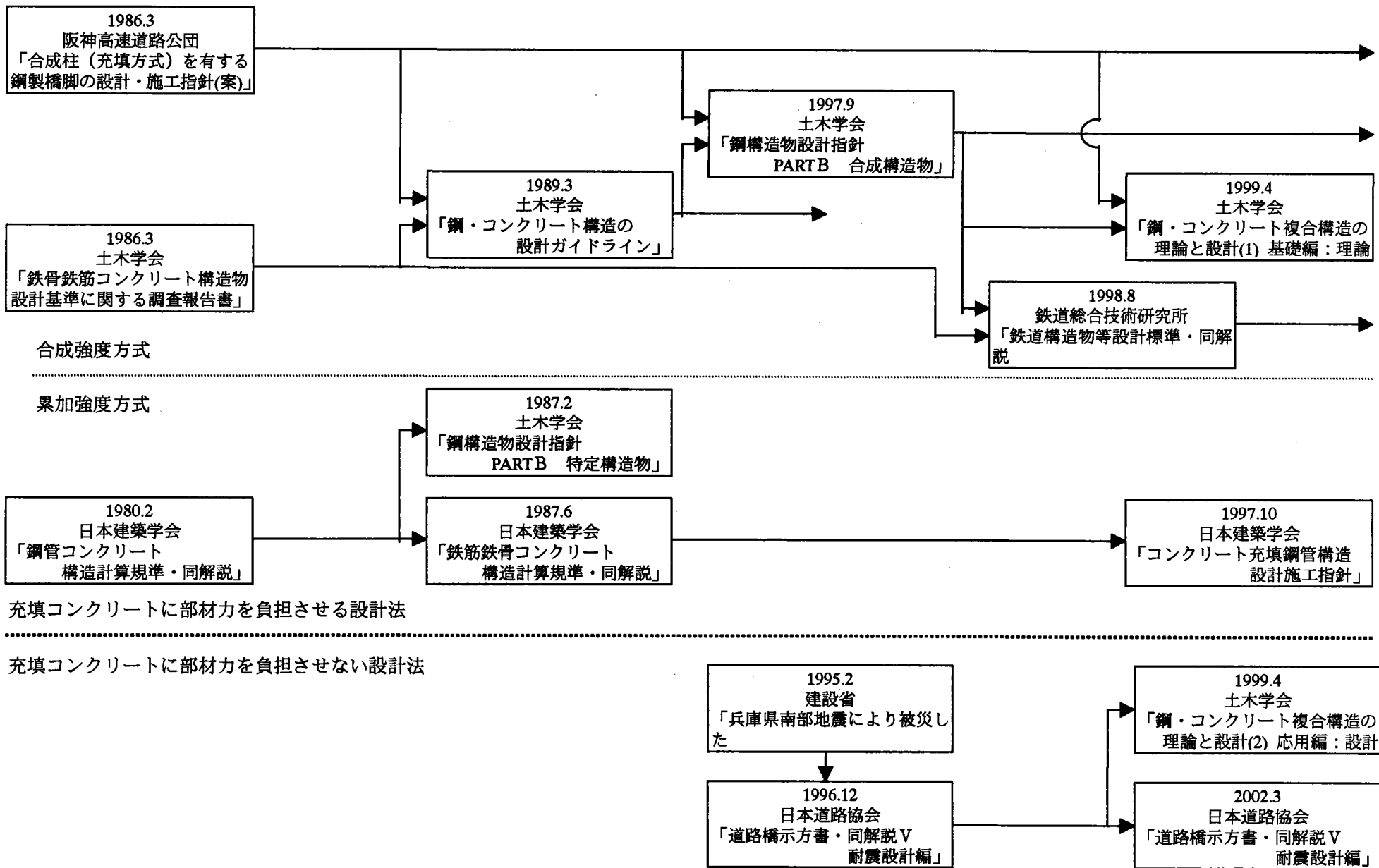


図-3.2.2 国内における合成柱設計指針の変遷

### (3)「合成柱（充填方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針（案）」（阪神高速道路公団）の内容調査

前述したように、国内における合成柱の設計に関する基準類は、阪神高速道路公団の「合成柱（充填方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針(案)」，（1986年3月）が最初であり、以降に作成された基準類は、この指針を参考としているものが多い。そのため、合成柱の設計基準を研究する題材として、阪神道路公団の「合成柱（充填方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針(案)」を使用することにした。

ここで取り上げた「合成柱（充填方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針(案)」には、本文である各条文の他に、条文を補足する解説が記載されている。また、解説には設計手順をまとめたフローチャートが付属している。WGにおける内容調査としては、はじめに、このフローチャートの各項目別に該当する条文や解説の整理を行い、続いて、その設計思想や背景の調査を行った。

指針条文中の照査式などに不明な点がある場合には、参考文献などを遡る形で調査を行い、可能な限り根拠となる理論や実験結果を把握した。なお、WGで調査した背景や参考文献は、*斜体文字*を使用して表現している。

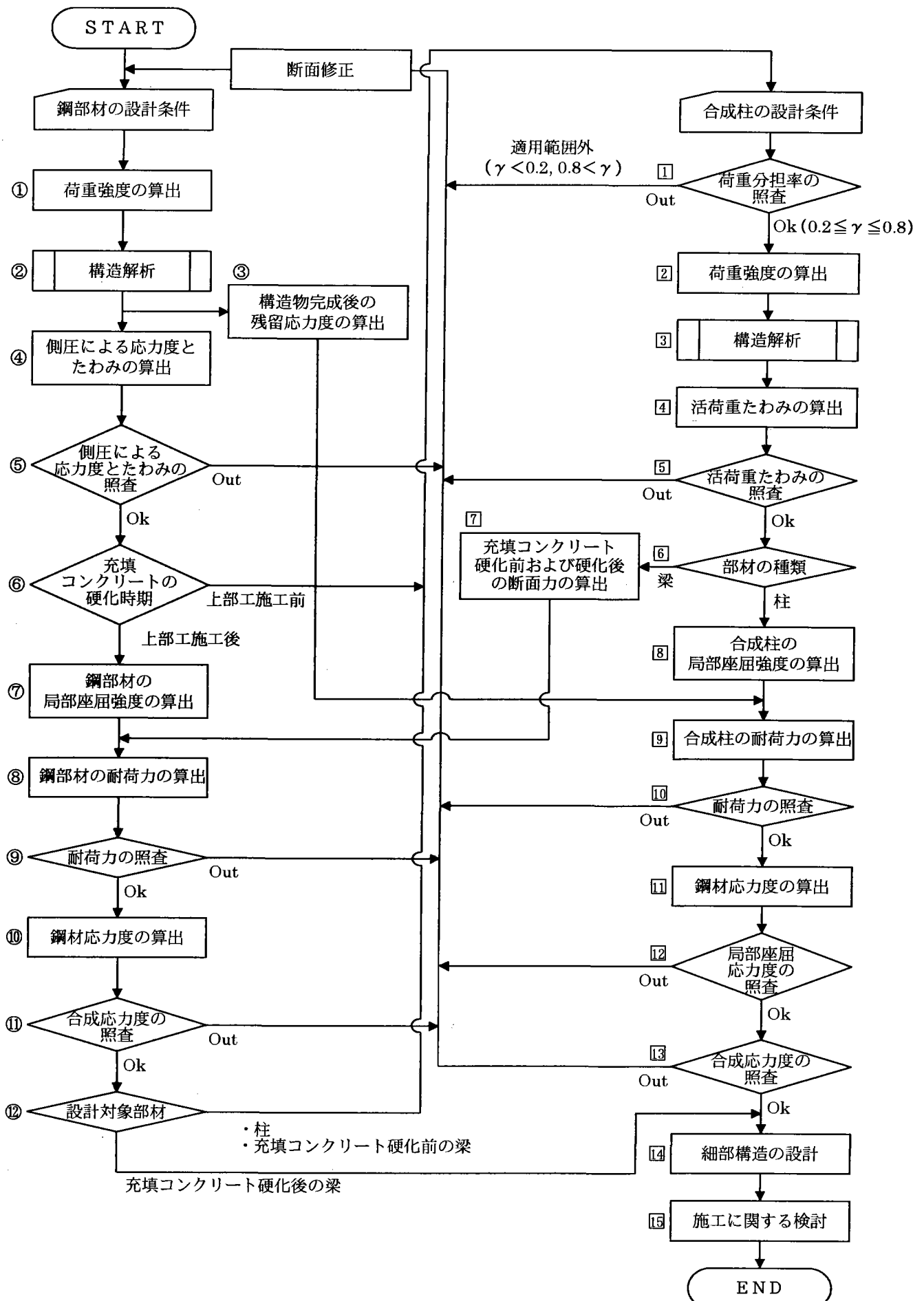


図-3. 2. 3 合成柱橋脚設計のフローチャート (阪神高速道路公団「合成柱(充填方式)を有する鋼製橋脚の設計・施工指針(案)」)

#### ① 荷重強度の算出

- ・ 荷重の種類および強度は、阪神高速道路公団設計基準および道路橋示方書に従う。
- ・ 充填コンクリートは無筋コンクリートとし、死荷重算出に使用する単位重量は  $2.35\text{tf/m}^3$  とする。

#### ② 構造解析

- ・ 充填コンクリート硬化前に作用する断面性能や荷重に対して、弾性理論を用いた構造解析により、断面力の算出を行う。

#### ③ 構造物完成後の残留応力度の算出

- ・ 充填コンクリート硬化前に作用している断面力のうち、充填コンクリート硬化後も鋼部材のみで負担していると考えられる断面力（例えば、充填コンクリート硬化前に作用している柱の曲げや軸力など。）について、応力度の算出を行う。

#### ④ 側圧による応力度とたわみの算出

- ・ 充填コンクリート打設時に発生する側圧は、充填コンクリートの打設速度、温度、および打設高さを考慮して、土木学会提唱の方法により算出する。
- ・ 横リブまたはダイヤフラム間は、横リブまたはダイヤフラムで支持された両端固定梁と仮定する。
- ・ 縦リブ間は、縦リブで固定された両端固定梁と仮定する。

#### ⑤ 側圧による応力度とたわみの照査

- ・ まだ固まらない充填コンクリートの側圧によって生じる圧縮板の圧縮応力度 $\sigma_{cc} < 0.1\sigma_{cuo}$   
 $\sigma_{cc}$  : まだ固まらない充填コンクリートの側圧によって生じる圧縮板の圧縮応力度  
 $\sigma_{cuo}$  : 局部座屈を考慮しない軸方向圧縮強度
- ・ まだ固まらない充填コンクリートの側圧によって生じる圧縮板のたわみ（変位）

$$\delta c \leq \frac{L}{2000} \quad (\text{横リブまたはダイヤフラム間})$$

$$\delta c \leq \frac{b}{600} \quad (\text{縦リブ間 ただし、無補剛板の場合は腹板間})$$

- $\delta c$  : まだ固まらない充填コンクリートの側圧によって生じる圧縮板のたわみ
- $L$  : 横リブまたはダイヤフラムで区切られるパネルの間隔
- $b$  : 縦リブ間隔（無補剛板の場合は、腹板間隔）

合成柱における充填コンクリート硬化前の圧縮板の局部座屈強度は、圧縮残留応力度として  $\sigma_r = -0.4\sigma_y$ 、初期たわみとして、ダイヤフラム間に対して  $W_{ol} = L/1000$ 、腹板間あるいは縦リブ間に対して  $W_{ob} = b/150$  と仮定して求めている。

したがって、ここでは鋼板の板厚が薄い場合でも過度の局部座屈強度の低下や、部材製作精度の精密化を避けるために側圧によって生じる鋼板の圧縮応力度及びたわみを制限したものである。

- (1) まだ固まらない充填コンクリートの側圧によって生じる圧縮板の応力度は  $\sigma_{cc} \leq 0.1\sigma_{cuo}$  ( $=1/4\sigma_r$ ) に制限することとした。実際の橋脚にてコンクリート打設時に側厚の計測を行ったところ、鋼管の発生フープ応力は許容応力の5%程度であったことから、鋼管のフープ応力が合成柱の強度に与える影響は小さいものと考えられる。
- (2) まだ固まらない充填コンクリートの側圧によるたわみは、充填コンクリート硬化後、縦補剛材がコンクリートに拘束され圧縮板の座屈強度が増加することを考慮し、ダイヤフラム間で  $L/2000$  ( $=W_{ol}/2$ ) まで許容することとした。また、縦補剛材間については  $W_{ob} = 1/150$  に対して十分小さいと考えられる  $b/600$  まで許容することとした。

(参考文献)

合成柱研究会：合成橋脚とその計算例・解説—コンクリート充填方式合成柱の応力—  
，現代理工学出版，1992 年

⑥ 充填コンクリートの硬化時期

- ・ 充填コンクリート硬化後に上部工の施工を行う場合は、鋼断面柱としての照査は不要である。
- ・ 充填コンクリート硬化前に上部工の施工を行う場合は、鋼断面柱としての照査を行う。

⑦ 鋼部材の局部座屈強度の算出

- ・ 圧縮力を受ける両端支持板、圧縮力を受ける自由突出板、もしくは圧縮力を受ける補剛板として局部座屈強度の算出を行う。
- ・ 基準耐荷力曲線は、現行の道路橋示方書II（鋼橋編）と同一であり、幅厚比の大きな領域では、オイラー座屈強度の半分を基準耐荷力としている。そのため、鋼部材の局部座屈強度は、現行の道路橋示方書II（鋼橋編）の局部座屈に対する許容応力度を安全率 1.7 で割り戻した値と等しい。

⑧ 鋼部材の耐荷力の算出

- ・ 引張強度は、鋼種別の降伏点または耐力に基づいて規定されている。
- ・ 軸方向圧縮強度は、圧縮部材の不完全性（初期曲がりや残留応力など）を考慮した耐荷力曲線に基づき、部材の細長比や局部座屈に対応した強度が規定されている。
- ・ 曲げ圧縮強度は、圧縮断面の支持条件による面外座屈を考慮し、固定点と曲げモーメントの分布状態に着目して規定されている。
- ・ せん断強度は、ミーゼスの降伏条件を適用して規定されている。
- ・ 各種の耐荷力は、基本的に現行の道路橋示方書II（鋼橋編）と同一であり、その許容応力度を安全率 1.7 で割り戻した値と等しい。

⑨ 耐荷力の照査

- ・ 軸方向力、曲げモーメント、せん断力、ねじりモーメントに対して、次式を用いて耐荷力の照査を行う。

1. 軸方向力を受ける部材

(1) 引張力を受ける部材

$$\nu \frac{P}{P_{tu}} \leq 1$$

(2) 圧縮力を受ける部材

$$\nu \frac{P}{P_{cu}} \leq 1$$

2. 曲げを受ける部材

$$\nu \frac{M_y}{M_{tuy}} + \nu \frac{M_z}{M_{tuz}} \leq 1$$

$$\nu \frac{M_y}{M_{cuy}} + \nu \frac{M_z}{M_{cuz}} \leq 1$$

$$\nu \frac{M_y}{P_{cul}} \frac{A_g}{I_{yy}} y + \nu \frac{M_z}{P_{cul}} \frac{A_g}{I_{zz}} z \leq 1$$

3. 軸方向力と曲げモーメントを受ける部材

(1) 軸方向力が圧縮の場合

$$\nu \frac{P}{P_{tu}} + \nu \frac{M_y}{M_{tuy}} + \nu \frac{M_z}{M_{tuz}} \leq 1$$

$$-\nu \frac{P}{P_{tu}} + \nu \frac{M_y}{M_{cu_y}} + \nu \frac{M_z}{M_{cu_z}} \leq 1$$

$$-\nu \frac{P}{P_{cul}} + \nu \frac{M_y}{P_{cul}} \frac{A_g}{I_{yy}} y + \nu \frac{M_z}{P_{cul}} \frac{A_g}{I_{zz}} z \leq 1$$

(2) 軸方向力が引張の場合

$$\nu \frac{P}{P_{cu}} + \nu \frac{M_y}{M_{cu_y} \left( 1 - 1.7 \frac{P}{P_{cry}} \right)} + \nu \frac{M_z}{M_{cu_z} \left( 1 - 1.7 \frac{P}{P_{crz}} \right)} \leq 1$$

$$\nu \frac{P}{P_{cul}} + \nu \frac{M_y}{P_{cul} \left( 1 - 1.7 \frac{P}{P_{cry}} \right)} \frac{A_g}{I_{yy}} y$$

$$+ \nu \frac{M_z}{P_{cul} \left( 1 - 1.7 \frac{P}{P_{crz}} \right)} \frac{A_g}{I_{zz}} z \leq 1$$

#### 4. せん断を受ける部材

(1) せん断力が作用する部材

$$\nu \frac{S}{S_u} \leq 1$$

(2) ねじりモーメントの影響を考慮しなければならない場合

$$\nu \frac{S}{S_u} + \nu \frac{T_s}{T_{su}} \leq 1$$

$\nu$  : 安全率

$P$  : 軸方向力

$P_{tu}$  : 断面の引張耐力

$P_{cu}$  : 断面の基本圧縮耐力

$P_{cry}, P_{crz}$  : それぞれ弱軸および強軸まわりのオイラー座屈強度

$M_y, M_z$  : それぞれの弱軸および強軸まわりに作用する曲げモーメント

$I_{yy}, I_{zz}$  : それぞれ照査する断面における弱軸および強軸まわりの  
断面二次モーメント

$M_{tu_y}, M_{tu_z}$  : それぞれ照査する断面の引張側における弱軸および強軸まわりの  
降伏曲げモーメント

$M_{cu_y}, M_{cu_z}$  : それぞれ照査する断面の圧縮側における弱軸および強軸まわりの  
降伏曲げモーメント

$y, z$  : それぞれ  $y$  軸および  $z$  軸の中立軸から着目点までの距離

$P_{cul}$  : 局部座屈を考慮した板の圧縮耐力

$A_g$  : 照査する断面の総断面積

$S$  : 断面に作用するせん断力

$S_u$  : 断面のせん断耐力

$T_s$  : 断面に作用する純ねじりモーメント

$T_{su}$  : 断面の降伏ねじりモーメント

・ 照査を行う荷重の組合せと安全率は、下表の通りである。

表-3.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せ	安全率	荷 重 計 数																			
		P									S			PP					PA		
		D	L	I	PS	CR	SH	E	HP	U	W	T	EQ	SW	GD	SD	WP	CF	BK	ER	CO
P+PP	1.70	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0				1.0	1.0	1.0	1.0	1.0			
P+PP+T	1.50	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		1.0			1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
P+PP+W	1.35	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		1.0			1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
P+PP+T+W	1.25	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		1.0	1.0		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
P+PP+CO (鋼)	1.00	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0					1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		1.0
P+PP+CO (コンクリート)	1.15	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0											
W	1.40											1.0									
BK	1.40																			1.0	
P(excent I. + I)+EQ+T	1.00	1.0			1.0	1.0	1.0	1.0	1.0			1.0	1.0								
P(excent I. + I)+EQ	1.15	1.0			1.0	1.0	1.0	1.0	1.0				1.0								
ER	1.35																				1.0

表-3.2.3 荷重の種類

主 荷 重 (P)		縦 荷 重 (S)		主荷重に相当する特殊荷重 (PP)			特 殊 荷 重 (PA)	
D	死 荷 重	W	風 荷 重	SW	雪 荷 重	BK	制 動 荷 重	
L	活 荷 重	T	温 度 変 化 の 影 響	GD	地 盤 変 動 の 影 響	ER	施 工 時 荷 重	
I	衝 撃	EQ	地 震 の 影 響	SD	支 点 移 動 の 影 響	CO	衝 突 荷 重	
PS	ブ レ ス ト レ ス 力			WP	波 圧		そ の 他	
CR	コンクリートのクリープの影響			CF	遠 心 荷 重			
SH	コンクリートの乾燥収縮の影響							
E	土 圧							
HP	水 圧							
U	浮力または揚圧力							

・ 照査式の構成は、現行の道路橋示方書II（鋼橋編）と同一である。

⑩ 鋼材応力度の算出

・ 鋼断面のみを有効として、鋼材に作用する応力度を算出する。

⑪ 合成応力度の照査

・ 次式により、鋼断面のみを有効と考えた、合成応力度および二軸応力度の照査を行う。

1. 合成応力度

(1) 軸方向力、曲げモーメント、およびせん断力の合成応力度を考慮する場合

$$\left( \nu \frac{P}{P_u} + \nu \frac{M_y}{M_{tuy}} \right)^2 + \left( \nu \frac{S}{S_u} \right)^2 \leq 1.0$$

(2) ねじりモーメントの影響を考慮する場合

$$\left( \nu \frac{P}{P_u} + \nu \frac{M_y}{M_{tuy}} \right)^2 + \left( \nu \frac{S}{S_u} + \nu \frac{T_s}{T_{su}} \right)^2 \leq 1.0$$

2. 二軸応力状態

$$\left( \nu \frac{\sigma_x}{\sigma_{tu}} \right)^2 - \left( \nu \frac{\sigma_x}{\sigma_{tu}} \right) \left( \nu \frac{\sigma_y}{\sigma_{tu}} \right) + \left( \nu \frac{\sigma_y}{\sigma_{tu}} \right)^2 + \left( \nu \frac{\tau}{\tau_u} \right)^2 \leq 1.0$$

- ν : 耐荷力の照査で使用する安全率を1.1で除した値
- M<sub>y</sub> : 弱軸まわりに作用する曲げモーメント
- M<sub>tuy</sub> : 照査する断面の引張側における弱軸まわりの降伏曲げモーメント



$S$	: 断面に作用するせん断力
$S_u$	: 断面のせん断耐力
$T_s$	: 断面に作用する純ねじりモーメント
$T_{su}$	: 断面の降伏ねじりモーメント
$\sigma_x, \sigma_y$	: 照査する箇所でお互いに直交する方向に生じる垂直応力度 ただし、引張応力度を正、圧縮応力度を負とする
$\tau$	: 照査する箇所に生じるせん断応力度
$\sigma_{tu}$	: 軸方向力引張強度
$\tau_u$	: せん断強度

- ・ 照査式の構成は、現行の道路橋示方書II（鋼橋編）と同一である。

## ⑫ 設計対象部材

- ・ 設計対象部材が、柱もしくは充填コンクリート硬化前の梁の場合は、合成柱としての設計へ進み、充填コンクリート硬化後の梁の場合は、細部構造や施工方法の検討へ進む。

### ① 荷重分担率の照査

- 合成柱における鋼材の荷重分担率 $\gamma$ は、おおむね  $0.2 \leq \gamma \leq 0.8$  の範囲とする。

$$\gamma = \frac{P_{ss}}{P_{ss} + P_{cs}}$$

$P_{ss}$  : 鋼部材の圧壊荷重

$P_{cs}$  : コンクリートの圧壊荷重

- 鋼材の荷重分担率 $\gamma$ が小さいと、コンクリートの荷重分担が大きくなり、合成柱は鉄筋コンクリートの挙動をし、コンクリートと鋼管との合成効果が発揮される。
- 鋼材の荷重分担率 $\gamma$ が大きいと、鋼の荷重分担が大きくなり、合成柱は鋼部材的な挙動を示す。
- 鋼材の荷重分担率 $\gamma$ の範囲は、DIN18806 Teil1 が参考にされている。
- 鋼材の荷重分担率 $\gamma$ の範囲は、以下の論文のパラメトリック解析により決定されている。

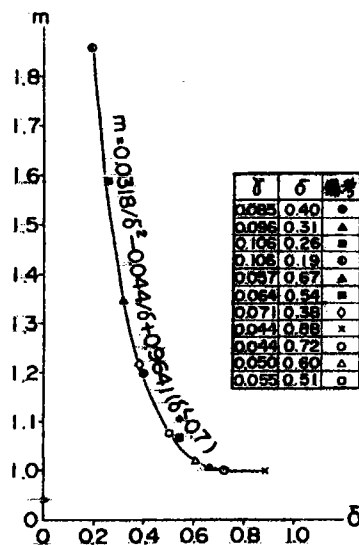


図-3. 2. 4 荷重分担率( $\delta$ )と係数 $m$ の関係

(参考文献)

中井・吉川・古田：軸方向圧縮力と曲げを受ける長方形断面合成柱の一耐荷力解析、土木学会論文集、第374号 I-6、p447-456、1986年

### ② 荷重強度の算出

- 荷重の種類および強度は、阪神高速道路公団設計基準および道路橋示方書に従う。
- 充填コンクリートは無筋コンクリートとし、死荷重算出に使用する単位重量は  $2.35 \text{tf/m}^3$  とする。
- 合成柱の構造系が施工中と施工後で変化する場合は、換算弾性係数比を使用して、充填コンクリートのクリープにより生ずる不静定力の影響を考慮する。
- 充填コンクリートは柱内の密閉された状態で固結するため、乾燥収縮の影響は無視する。

### ③ 構造解析

- 合成柱としての断面性能や荷重に対して、弾性理論を用いた構造解析により、断面力の算出を行う。
- 変形性能および不静定力の計算に使用する鋼材と充填コンクリートのヤング係数比は、ずれ止めの有無に関わらず  $n=10$  とし、充填コンクリートの全断面を有効とする。

④ 活荷重たわみの算出

- ・ 荷重係数を 1.0 として活荷重たわみの算出を行う。

⑤ 活荷重たわみの照査

- ・ 安全率を 1.0 として、活荷重たわみの照査を行う。なお、たわみの限界値は、道路橋示方書 II（鋼橋編）に従う。

⑥ 部材の種類

- ・ 設計対象部材が、柱の場合は合成柱としての耐荷力や局部座屈の照査へ進み、梁の場合は鋼部材としての耐荷力や合成応力度の照査を行う。

⑦ 充填コンクリート硬化前および硬化後の断面力の算出

- ・ 充填コンクリート硬化前、および硬化後に作用する荷重に対する安全性を照査するため、充填コンクリート硬化前と硬化後の断面力を算出する。

⑧ 合成柱の局部座屈強度の算出

- ・ 次式により、充填コンクリート硬化後の圧縮板の局部座屈強度を求める。

1. 無補剛板の場合

$$\sigma_{cul} = \sigma_{cuo} \quad (Rf \leq 0.5)$$

$$\sigma_{cul} = \sigma_{cuo} \times \left\{ 0.433 (Rf - 0.5)^2 - 0.831 (Rf - 0.5) + 1.0 \right\} \quad (0.5 < Rf \leq 1.3)$$

$$Rf = 0.323 \sqrt{\frac{\sigma_{cuo}}{E_s}} \times \frac{b}{t}$$

周辺が固定支持された圧縮板の解析結果から、最小二乗法により推定した終局応力度曲線を使用している。

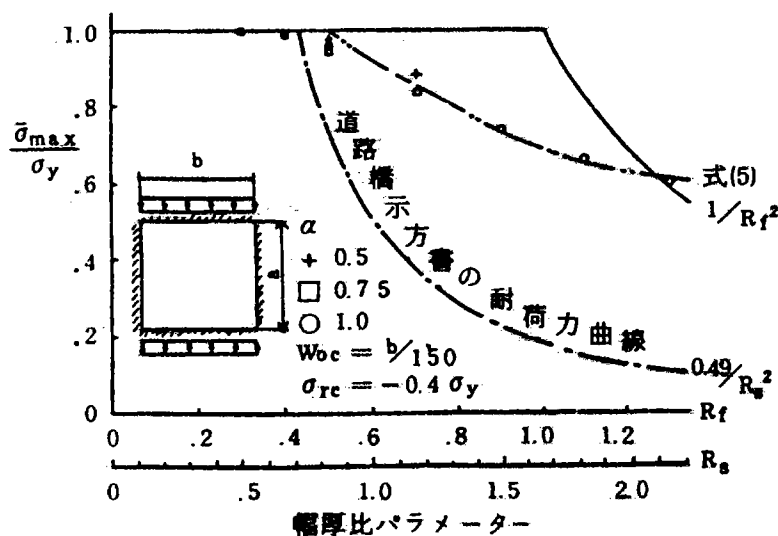


図-3. 2. 5 周辺固定支持板の限界応力度曲線

(参考文献)

中井, 北田, 吉川, 「コンクリートを充填した鋼製角形柱の鋼板要素の一設計法」  
土木学会論文集 第356号 I-3 p405~p413, (1985.4) p408 の式(5)ab および(6)

なお、幅厚比  $Rf$  は、周辺固定板の圧縮1次モード座屈を想定した座屈係数  $kf$  を用いて下式により算出される値で設定している。

$$Rf = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{cu0}}{Es} \cdot \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 \cdot kf}} = 0.323 \sqrt{\frac{\sigma_{cu0}}{Es}} \times \frac{b}{t}$$

$$kf = 4 \left( \alpha^2 + \frac{1}{\alpha^2} + \frac{2}{3} \right)$$

$\alpha=1$  のとき、 $kf_{min}=10.67$

$\alpha$  : アスペクト比

$\mu$  : ポアソン比 ( $\mu=0.3$ )

## 2. 補剛板の場合

$$\sigma_{cul} = \chi \sigma_{cu0}$$

$$\chi = 1.0 \quad (\bar{\lambda} \leq 0.2)$$

$$\chi = \beta - \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\lambda^2}} \quad (\bar{\lambda} > 0.2)$$

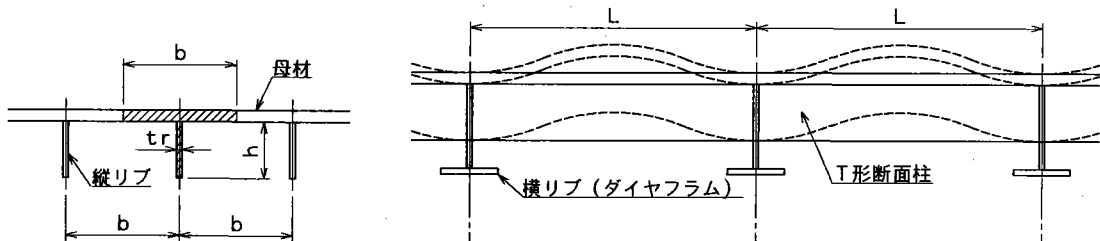
$$\beta = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1 + \alpha \sqrt{\bar{\lambda}(\bar{\lambda} - 0.2)}}{\lambda^2} + 1 \right\}$$

$$\alpha = 0.412$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{cu0}}{Es}} \times \frac{Le}{r}$$

$$Le = \frac{L}{2}$$

母材と縦方向補剛材(縦リブ)で構成されたT形断面の柱が、横方向補剛材(ダイヤフラムや横リブ)で固定支持された座屈モード(1次モード)を想定して、ヨーロッパ鋼構造協会連合のC曲線(残留応力度の割合が降伏点の0.5)を用いて座屈強度を設定している。



母材と縦リブで構成されるT形断面

縦リブの座屈モード

図-3.2.6 補剛板の座屈

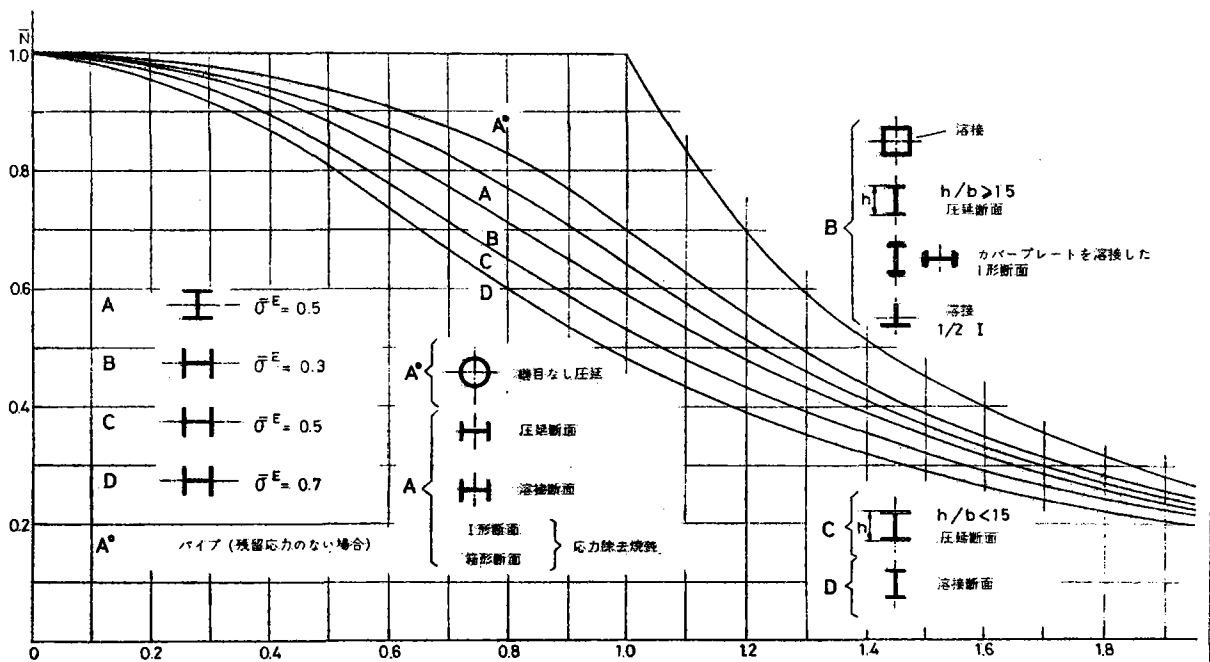


図-3. 2. 7 ECCSの鋼柱座屈曲線

(参考文献)

成岡 福本 伊藤 「ヨーロッパ鋼構造連合・VIII委員会の鋼柱座屈曲線について」  
*J S S C Vol.6 No.55 p56-71, (1970.7)*

- $\sigma_{cul}$  : 局部座屈強度
- $b$  : 長方形板の幅
- $t$  : 長方形板の板厚
- $E_s$  : 鋼材のヤング係数
- $\sigma_{cu0}$  : 局部座屈を考慮しない軸方向圧縮強度の上限値
- $L$  : 横リブまたはダイヤフラムの間隔
- $r$  : 縦リブを含むT形断面の断面二次半径
- $E_s$  : 鋼材のヤング係数

- ・ 補剛板の局部座屈強度は、ヨーロッパ鋼構造協会連合のC曲線を利用している。

### ⑨ 合成柱の耐荷力の算出

- ・ 鋼部材の引張強度は、鋼種別の降伏点または耐力に基づいて規定されている。
- ・ 鋼部材の軸方向圧縮強度は、圧縮部材の不完全性（初期曲がりや残留応力など）を考慮した耐荷力曲線に基づき、部材の細長比や局部座屈に対応した強度が規定されている。
- ・ 鋼部材の曲げ圧縮強度は、圧縮断面の支持条件による面外座屈を考慮し、固定点と曲げモーメントの分布状態に着目して規定されている。
- ・ 鋼部材のせん断強度は、ミーゼスの降伏条件を適用して規定されている。
- ・ 充填コンクリートの圧縮強度は、設計基準強度の85%とする。
- ・ 鋼材の耐荷力は、基本的に現行の道路橋示方書II（鋼橋編）と同一であり、その許容応力度を安全率1.7で割り戻した値と等しい。
- ・ 充填コンクリートの圧縮強度は、現行の道路橋示方書III（コンクリート橋編）と同じである。

## 10 耐荷力の照査

・ 軸方向力、曲げモーメント、せん断力、ねじりモーメントに対して、次式を用いて耐荷力の照査を行う。

1. 軸方向圧縮力のみを受ける場合 ( $\frac{M}{M_p} \leq 0.1$ )

$$\nu \frac{P}{P_u} \leq 1.0$$

$$P_u = \kappa P_{cq}$$

$$P_{cq} = \sigma_{cuo}^* A_s + 0.85 \sigma_{ck} A_c$$

$$\sigma_{cuo}^* = \sigma_{cul} - \sigma_{cc} - \sigma_e$$

$$\kappa = 1.0 \quad (\bar{\lambda} \leq 0.2)$$

$$\kappa = \eta - \sqrt{\eta^2 - \frac{1}{\lambda^2}} \quad (\bar{\lambda} > 0.2)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1 + \alpha \sqrt{\lambda (\bar{\lambda} - 0.2)}}{\lambda^2} + 1 \right\}$$

$\alpha = 0.314$  (ヨーロッパ鋼構造協会連合のB曲線に相当する)

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{P_p}{P_{cr}}} = \frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{cuo} A_s + 0.85 \sigma_{ck} A_c}{E_s I_v}}$$

$$I_v = I_s + \frac{I_c}{n}$$

以上は、CDC法による様々な断面形状寸法を有する合成柱の耐荷力を求めたパラメトリック解析に基づいている。既往の研究によると、最大で  $M=0.1M_p$  の曲げモーメントが付加された柱の  $P/P_u$  (柱の軸方向圧縮力と耐荷力の比) は、ヨーロッパ鋼構造協会連合のB曲線とよい一致を示すこと (定量的な数値については、引用元の文献だけでは不明確な点がある。) から、 $M/M_p \leq 0.1$  の範囲においては、中心軸圧縮力のみを受ける柱として、ヨーロッパ鋼構造協会連合のB曲線を用いている。

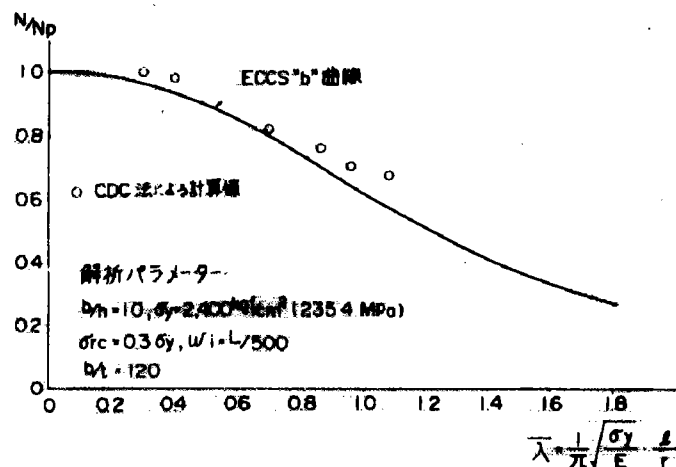


図-3. 2. 8 ECCSの“b”曲線とCDC法による解析結果との比較

(参考文献)

吉川, 中井, 中村, 古田, 「軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける角形断面合成柱の耐荷力相関曲線について」  
第40回土木学会年次学術講演会概要集, p955-956, (1985.4)

中井, 富田, 吉川, 由井, 「軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける合成柱の耐荷力」  
 橋梁と基礎 p24-32, (1984.4)  
 中井, 吉川, 古田, 「軸方向圧縮力と曲げを受ける長方形断面合成柱の一耐荷力解析」  
 土木学会論文集 第374号 I-6 p447-456., (1986.10)

また、合成柱の圧壊荷重を算出する場合に、鋼材の圧壊荷重を  $(\sigma_{cul} - \sigma_{cc} - \sigma_e) A_s$  としている（圧縮板の局部座屈強度から、コンクリート充填時の側圧による影響と、コンクリート充填以前に鋼材が負担していた残留応力を差し引いている）のは、道路橋示方書に準じて、局部座屈と全体座屈の連成（重ね合わせ）を考慮したためである。

なお、コンクリート充填時の側圧による影響  $\sigma_{cc}$  ( $=0.1\sigma_{cuo}$ ) は、板厚全体で考えると圧縮と引張が吊り合うこととなるが、圧縮板の座屈強度に影響を与える可能性もあるため、安全を考えて鋼材の強度より減じている。

## 2. 軸方向圧縮力と一軸曲げモーメントを受ける場合 $(\frac{M}{M_p} > 0.1)$

$$\nu \frac{M}{M_u} \leq \psi$$

$$M = M_o \frac{1}{1 - \frac{P}{P_{cr}}}$$

$$\psi = 1.0 - \nu^2 (1 + \beta) \left( \frac{P}{P_u} \right)^2 + \nu \beta \frac{P}{P_u}$$

$$\beta = 9.17 \gamma^2 - 13.75 \gamma + 4.63$$

$$\gamma = \frac{P_{ss}}{P_{ss} + P_{cs}}$$

$$P_{ss} = \sigma_{cuo} A_s$$

$$P_{cs} = 0.85 \sigma_{ck} A_c$$

CD C法を利用した合成断面柱のパラメトリック解析結果を整理することにより、柱の全体座屈が起こらない軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける合成柱の実用的な相関曲線として、次式が提案されている。

(参考文献)

中井, 吉川, 古田, 「軸方向圧縮力と曲げを受ける長方形断面合成柱の一耐荷力解析」  
 土木学会論文集 第374号 I-6 p447-456., (1986.10)

$$\alpha \left( \frac{P}{P_p} \right)^2 - \beta \left( \frac{P}{P_p} \right) + \left( \frac{M}{M_p} \right) \leq 1.0$$

ただし、 $M = M_o \frac{1}{1 - \frac{P}{P_{cr}}}$  なる拡大係数を使用する。

一般的に、長柱の場合は  $P_p$  (合成柱の全塑性軸力)  $\geq P_u$  (合成柱の耐荷力) であり、局部座屈が卓越する場合は  $M_p$  (合成柱の全塑性モーメント)  $\geq M_u$  (合成柱の抵抗モーメント) であるため、安全側に式を書き換えると、

$$\alpha \left( \frac{P}{P_u} \right)^2 - \beta \left( \frac{P}{P_u} \right) + \left( \frac{M}{M_u} \right) \leq 1.0$$

が得られる。ここで、 $M=0$ かつ $P=P_u$ なる限界状態を考えると、 $\alpha-\beta=1.0$ であるため、

$$(1+\beta) \left( \frac{P}{P_u} \right)^2 - \beta \left( \frac{P}{P_u} \right) + \left( \frac{M}{M_u} \right) \leq 1.0$$

と表される。

合成柱のうち鋼材が受け持つ分担率 $\gamma$ は、

$$\gamma = \frac{P_{ss}}{P_{ss} + P_{cs}}$$

であるため、 $\beta$ と $\gamma$ との関係を多数のパラメトリック解析により、 $\gamma$ に対して $\beta$ が最大となるような3点を選び出して二次曲線で近似すると、

$$\beta = 9.17\gamma^2 - 13.75\gamma + 4.63$$

が得られる。

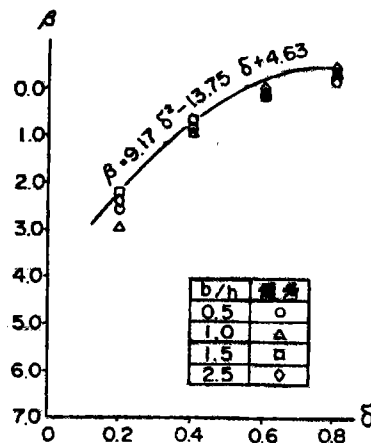


図-3. 2. 9 荷重分担率( $\delta$ )とパラメータ $\beta$ の関係

また、安全率 $\nu$ を採用し、相関曲線をモーメントのみで表現すると、

$$(1+\beta) \left( \nu \frac{P}{P_u} \right)^2 - \beta \left( \nu \frac{P}{P_u} \right) + \left( \nu \frac{M}{M_u} \right) \leq 1.0$$

$$\left( \nu \frac{M}{M_u} \right) \leq 1.0 - (1+\beta) \left( \nu \frac{P}{P_u} \right)^2 + \beta \left( \nu \frac{P}{P_u} \right)$$

と書き直すことができ、

$$\nu \frac{M}{M_u} \leq \psi$$

$$\psi = 1.0 - \nu^2 (1+\beta) \left( \frac{P}{P_u} \right)^2 + \nu \beta \frac{P}{P_u}$$

を得ることができる。



3. 軸方向圧縮力と二軸曲げモーメントを受ける場合

$$\nu \frac{M_y}{M_{uy}} + \nu \frac{M_z}{M_{uz}} \leq \psi$$

$$M_y = M_{y0} \frac{1}{1 - \frac{P}{P_{cry}}}$$

$$M_z = M_{z0} \frac{1}{1 - \frac{P}{P_{crz}}}$$

4. せん断力を受ける合成柱

$$\nu \frac{S}{S_{us}} \leq 1.0$$

$$S_{us} = A_g \tau_{us}$$

5. ねじりモーメントを受ける合成柱

(1) ねじりモーメントのみを受ける場合

$$\nu \frac{MT}{M_{tus}} \leq 1.0$$

$$M_{tus} = K_t \tau_{us}$$

$$K_t = 2 A_c \times t$$

(2) ねじりモーメントとせん断力を受ける場合

$$\nu \frac{S}{S_{us}} + \nu \frac{MT}{M_{tus}} \leq 1.0$$

$\nu$  : 安全率

$M$  : 付加曲げを考慮した作用曲げモーメント

$M_y$  : 付加曲げを考慮した  $y$  軸まわりの作用曲げモーメント

$M_z$  : 付加曲げを考慮した  $z$  軸まわりの作用曲げモーメント

$M_0$  : 断面に作用する曲げモーメント

$M_{y0}$  :  $y$  軸まわりの断面に作用する曲げモーメント

$M_{z0}$  :  $z$  軸まわりの断面に作用する曲げモーメント

$M_u$  : 断面の破壊抵抗モーメント

$M_{uy}$  :  $y$  軸まわりの断面の破壊抵抗モーメント

$M_{uz}$  :  $z$  軸まわりの断面の破壊抵抗モーメント

$M_p$  : 断面の全塑性モーメント

$P$  : 軸方向圧縮力

$P_u$  : 柱断面の耐荷力

$P_{cq}$  : 合成柱断面の圧壊荷重

$\sigma_{cuo}$  : 鋼材の局部座屈を考慮しない軸方向圧縮強度の上限値

$\sigma_{cul}$  : 圧縮板の局部座屈強度

$\sigma_{cc}$  : 充填コンクリート打設時に側圧によって生じる圧縮板の圧縮応力度  $= 0.1 \sigma_{cuo}$

$\sigma_e$  : 充填コンクリート硬化前の応力度のうち、構造物完成後まで残留する圧縮板の圧縮応力度  
(ただし、充填コンクリートの側圧によって生じる応力度を除く。)

$P_{cr}$  : 柱の弾性座屈荷重

$P_{cry}$  :  $y$  軸まわりの柱の弾性座屈荷重

$P_{crz}$  :  $z$  軸まわりの柱の弾性座屈荷重

$P_p$  : 合成柱断面の全塑性モーメント

$L$  : 柱部材の有効座屈長

$I_v$	: 鋼材に換算した合成柱の断面二次モーメント
$I_s$	: 鋼材の断面二次モーメント
$I_c$	: 充填コンクリートの断面二次モーメント
$n$	: 鋼とコンクリートのヤング係数比 $n=10$
$E_s$	: 鋼材のヤング係数
$P_{ss}$	: 鋼部材の圧壊荷重
$P_{cs}$	: コンクリートの圧壊荷重
$S$	: 断面に作用するせん断力
$S_{us}$	: 鋼断面のせん断耐力
$A_g$	: 鋼断面において、せん断を負担すると考えられる有効断面積
$\tau_{us}$	: 鋼材のせん断強度
$MT$	: 断面に作用するねじりモーメント
$M_{tus}$	: 鋼断面の降伏純ねじりモーメント
$K_t$	: ねじりモーメントによる鋼断面のせん断応力度に関する係数
$t$	: 鋼板厚
$A_c$	: 鋼板の板厚中心線の囲む面積
$A_s$	: 鋼板断面積

- ・ 照査を行う荷重の組合せと安全率は、鋼断面の場合と同じである。
- ・ 軸圧縮力に関する柱の耐荷力は、ヨーロッパ鋼構造協会連合のB曲線を利用している。
- ・ 合成柱断面の圧壊荷重は、側圧の影響と残留応力度の影響を減じている。
- ・ これらの照査式は、圧縮応力度が作用することを前提としたものであり、引張方向力が作用する場合は、別途、RC断面などに見なして検討する必要がある。
- ・ パラメータ $\beta$ と荷重分担率 $\gamma$ との関係は、パラメトリック解析から得られたものである。
- ・ せん断力やねじりモーメントが卓越する合成柱の強度に関しては、鋼とコンクリートの接合作用について、未解明な点が多いため、せん断力とねじりモーメントは鋼材のみで分担している。

#### 11 鋼材応力度の算出

- ・ 合成断面として、鋼材に作用する応力度を算出する。
- ・ 合成柱部材断面のひずみ分布は、平面保持の仮定に従うものとする。
- ・ 引張側コンクリートの断面は無視するものとする。
- ・ 応力度の計算に用いる鋼部材と充填コンクリートのヤング係数比 $n$ は、道路橋示方書IIIと同様な考え方にもとづき、 $n=15$ とする。
- ・ 隅角領域にコンクリートを充填する場合は、充填コンクリート硬化後に作用する荷重に対して、隅角設計におけるせん断遅れの影響を考慮しなくてもよい。

#### 12 局部座屈応力度の照査

- ・ 次式により、合成柱鋼板の局部座屈に対する照査を行う。

$$\nu \frac{\sigma_{cyz}}{\sigma_{cul}} \leq 1$$

$$M_y = M_{y0} \frac{1}{1 - \frac{P}{P_{cry}}}$$

$$M_z = M_{z0} \frac{1}{1 - \frac{P}{P_{crz}}}$$

- ν : 安全率
- σ<sub>cyz</sub> : 充填コンクリート硬化前と硬化後の断面に作用する軸方向力、y軸およびz軸まわりの断面二次モーメントによる鋼材の圧縮応力度の合計
- σ<sub>cul</sub> : 局部座屈強度
- M<sub>y</sub> : 付加曲げモーメントを考慮したy軸まわりの曲げモーメント
- M<sub>z</sub> : 付加曲げモーメントを考慮したz軸まわりの曲げモーメント
- M<sub>yo</sub> : y軸まわりに作用する曲げモーメント
- M<sub>zo</sub> : z軸まわりに作用する曲げモーメント
- P : 軸方向圧縮力
- P<sub>cry</sub> : y軸まわりの弾性座屈荷重
- P<sub>crz</sub> : z軸まわりの弾性座屈荷重

### 13 合成応力度の照査

- ・次式により、合成柱断面としての合成応力度および二軸応力度の照査を行う。

#### 1. 合成応力度

- (1) 軸方向力、曲げモーメントおよびせん断力が作用する場合

$$\nu^2 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{tu}} \right)^2 + \nu^2 \left( \frac{\tau}{\tau_u} \right)^2 \leq 1.0$$

- (2) ねじりモーメントを考慮する場合

$$\nu^2 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{tu}} \right)^2 + \nu^2 \left( \frac{\tau + \tau_T}{\tau_u} \right)^2 \leq 1.0$$

#### 2. 二軸応力度

$$\left( \nu \frac{\sigma_x}{\sigma_{tu}} \right)^2 - \left( \nu \frac{\sigma_x}{\sigma_{tu}} \right) \left( \nu \frac{\sigma_y}{\sigma_{tu}} \right) + \left( \nu \frac{\sigma_y}{\sigma_{tu}} \right)^2 + \left( \nu \frac{\tau}{\tau_u} \right)^2 \leq 1.0$$

- ν : 所定の安全率を 1.1 で除した値
- σ : 鋼断面に作用する垂直応力度
- σ<sub>tu</sub> : 鋼材の軸方向引張応力度
- τ : せん断力により鋼断面に作用するせん断応力度
- τ<sub>T</sub> : ねじりモーメントにより鋼断面に作用するせん断応力度
- τ<sub>u</sub> : 鋼材のせん断強度
- σ<sub>x</sub>, σ<sub>y</sub> : 照査する箇所でお互いに直交する方向に生じる垂直応力度  
ただし、引張応力度を正、圧縮応力度を負とする
- σ<sub>tu</sub> : 軸方向力引張強度

### 14 細部構造の検討

- ・隅角部の設計は、阪神道路公団設計基準に従って行う。
- ・コンクリートを充填する範囲は、柱と隅角領域（梁幅の半分程度）とする。
- ・コンクリートが充填される柱の中間ダイヤフラムは、コンクリートの施工性を考慮した形状とする。
- ・合成柱の両端部には、強固なダイヤフラムを配置する。
- ・ラーメン隅角部や柱基部など、断面力の作用方向が急変する箇所や断面力が集中して作用する箇所には、スタッドジベルあるいはスラブアンカー等のずれ止めを設置して、鋼板と充填コンクリートの一体化を図る。
- ・柱の中間部には、ずれ止めを設置しなくてもよい。

以下の2編の論文（解析と実験）による。

- ・中井・北田・吉川：コンクリートを充填した鋼製角型柱の鋼板要素の設計法、土木学会論文集、第356号I-3、p405-413、1985年

座屈防止のためにスタッドを考慮した弾塑性有限要素解析を行い、スタッドでたわみを拘束するものとして解析した。その結果、スタッドジベルは引張力が大きく、コンクリートの付着力のみでジベルを完全にアンカーできないことが分かった。

- ・中井・吉川：コンクリートを充てんした鋼製橋脚の耐荷性に関する実験的研究、土木学論文集、第344号I-1、p195-204、1984年

合成柱の模型実験により、スタッドジベルの有無にはあまり関係なく鋼とコンクリートとのひずみの適合性は満たされており、また、合成柱の剛度とスタッドの有無はあまり関係しない結果が得られた。

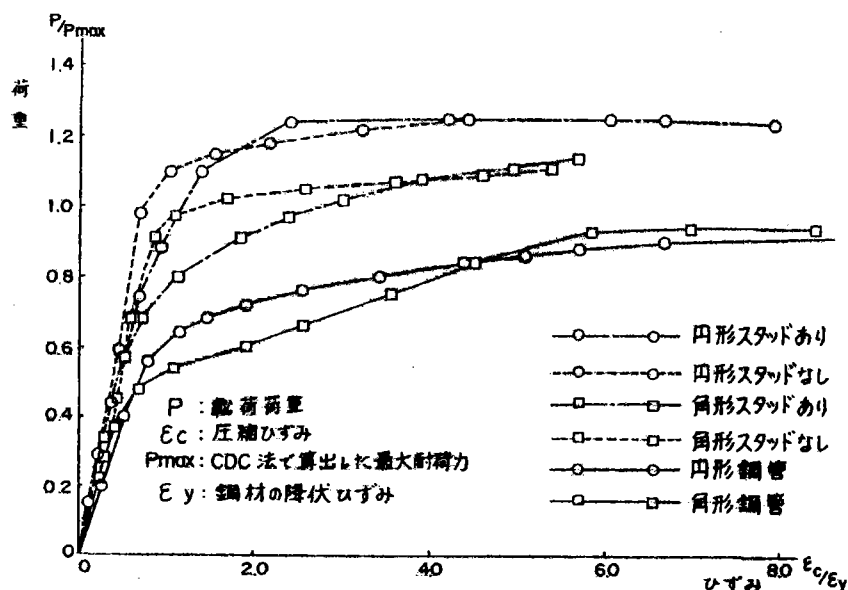


図-3. 2. 10 スタッドの有無による荷重-ひずみ曲線

- ・ 柱の現場継手は、維持補修および充填コンクリート打設時の施工性から、現場溶接を原則とする。
- ・ 充填コンクリート施工のためのマンホールは、コンクリート打設後に溶接して密閉する。
- ・ ダイヤフラムおよび梁上フランジには、充填コンクリート打設のための空気抜き孔を設置する。
- ・ 合成柱のフランジと腹板のかど溶接は、全断面溶け込みグループ溶接とする。

#### 15 施工に関する検討

- ・ 充填コンクリートの打設は、骨材とモルタルの分離が生じないような施工方法とする。
- ・ 充填コンクリートの打設速度は、側圧の影響を考慮して決定する。
- ・ 鋼板と充填コンクリートとの間に肌隙を生じないように、充填コンクリートは十分な締め固めを行い、柱（梁）天端上面部については、コンクリート硬化後に無収縮モルタルを注入する。
- ・ 上部工の架設は、原則として充填コンクリートが所定の強度に達した後に行う。