

# 現在の設計法

日本橋梁建設協会

橘 吉宏

## 現在の設計法

—連続合成桁橋を例にして—

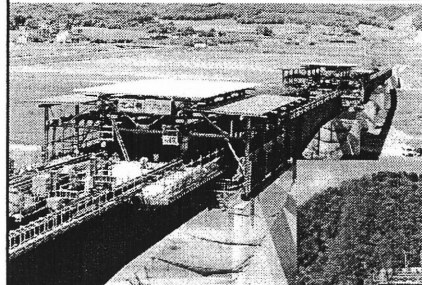
(平成18年12月 土木学会)

(社)日本橋梁建設協会

技術委員会 床版小委員会

橋 吉宏

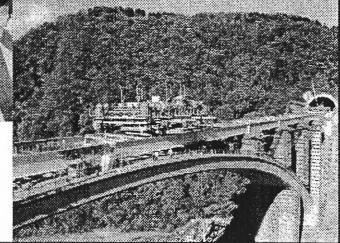
## 最近の連続合成桁橋の例



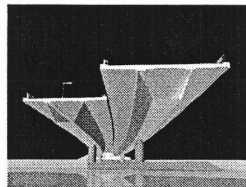
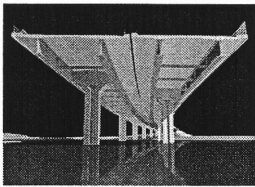
富士川橋 (JH静岡)  
プレキャストPC床版  
連続合成2主桁橋

利別川第1橋 (JH北海道)  
PC床版連続合成2主桁橋 (最大  
支間長86.5m)

NEXT



## 1 わが国における合成桁の歴史と設計の留意点



## 合成桁橋の歴史と設計法の変遷 1

昭和28年: 神崎橋(旧橋)竣工以降急速に普及

昭和34年: 単純合成桁を対象とした「鋼道路橋の合成ゲタ設計施工指針」が制定された。



支間12mの単純死活荷重  
合成桁

昭和28年 旧神崎橋(大阪市)

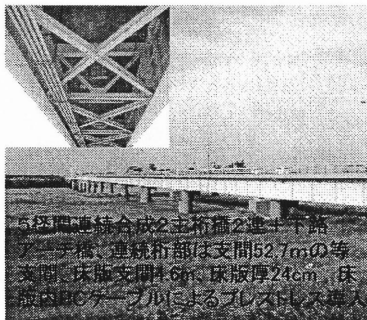
NEXT

現在の設計法

## 合成桁橋の歴史と設計法の変遷 2

昭和39年: 鋼道示にプレストレスする連続合成桁が加えられた。

中間支点部プレストレス導入;  
ジャッキアップダウンあるいはPCケーブルによるプレストレス



5径間連続合成2主桁橋2連(1号路)  
橋、連続桁部は支間52.7mの等  
支間、床版支間16m、床版厚24cm、床  
版内PCケーブルによるプレストレス

昭和42年 新石狩大橋(北海道開発局)

NEXT

現在の設計法

## 合成桁橋の歴史と設計法の変遷 3

昭和48年: 道示にプレストレスしない連続合成桁が加えられた。

プレストレスしない連続合成桁; ひび割れを許容する  
ひび割れ制御;  
鉄筋比2%、  
周長率0.045cm/cm<sup>2</sup>



3径間連続合成桁橋、橋長100m  
中央径間89m

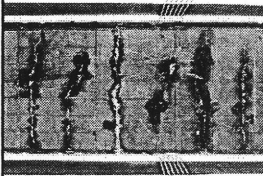
昭和50年 神崎橋(大阪  
市)

NEXT

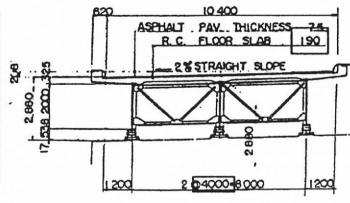
現在の設計法

## 床版損傷と連続合成桁橋の衰退

- ・1970年ごろからRC床版の損傷事故が多く報告されるようになった。
- ・原因は、鉄筋量不足など床版設計法自体の問題、過積載を含む交通量の増大。
- ・床版損傷により連続合成桁橋の採用が控えられるようになった。ただし、大阪市では建設が続けられた。



床版の損傷状況



名神高速における断面例

現在の設計法

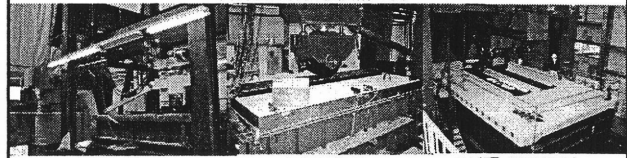
NEXT

## 床版に対する研究の進展

輪荷重走行試験により床版の耐久性に関する研究が進められた。

- ・床版の疲労損傷メカニズムの解明
- ・床版のSN曲線
- ・高耐久性床版の検証 など

輪荷重走行試験設備の例



大阪大学

土木研究所

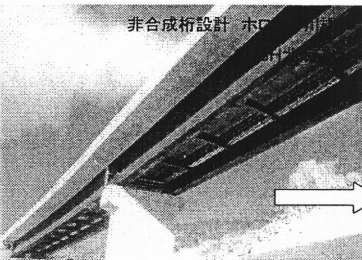
JH(現:NEXCO)

現在の設計法

NEXT

## 合理化橋梁によるコスト削減

高耐久性床版による鋼構造の単純化 再び少数主桁へ



非合成桁設計 ホル

- ・非合成桁で設計されていても実挙動は合成桁
- ・高耐久性床版であれば合成桁設計が合理的

新石狩大橋から約30年後

新石狩大橋 (JH七海)

NEXT

## 連続合成桁としての設計方法

連続合成桁の中間支点部

**プレストレスしない手法**  
鉄筋や鋼桁断面を調整して、床版のひび割れ幅を制御

- ・経済性に勝る。
- ・大阪市やJHの連続桁橋では中間支点上の耐久性に問題が生じていない。
- ・ユーロコードではひび割れ制御による設計方法を採用。

**プレストレスする手法**  
橋軸方向プレストレスを与えて、床版の応力を制御

**ジャッキアップダウン**  
床版打設前・後に支点を上昇・下降

**PC鋼材の緊張**  
橋軸方向に配置したPC鋼材を緊張

- ・経済性に劣る。
- ・クリープ・乾燥収縮度の見積りにも依存する設計であり、設計どおりの挙動をしない橋もある。

NEXT

現在の設計法

## 連続合成桁橋の復活

- ・旧JH「PC床版鋼2主桁橋の連続合成化に関する技術検討」委員会(伊藤学先生委員長)による連続合成桁の設計検討
- ・成果としてひび割れ制御による連続合成桁の設計施工マニュアルが整備された。(以下「JH関西マニュアル」と称す)
- ・合理化桁に対して採用が増加傾向である。



検討対象橋梁となった、大津呂川橋 (JH関西)

現在の設計法

NEXT

## ひび割れ制御の設計のランク

- ・プレストレスする方法、しない方法をさらに細分化したランク分け
- ・JH関西マニュアルでは、ひび割れ制御のランクとしてC~Eランクを設けている。

ランク	プレストレス (PS)	荷重					要求性能
		死荷重	PS	クランプ	乾燥収縮	温度差	
A	フルPS	○	○	○	○	○	引張応力を許さない
B	部分PS	○	○	○	○	○	ひび割れを許さない
C	付加的なPS	○	○	○	○	△	引張応力を許さない
D	PS	○	○	○	○	△	ひび割れを許さない
E	PSなし	△	-	△	△	△	ひび割れ幅を制限

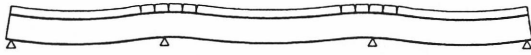
- 注) 1. ○印の組合せにおいて、各要求性能限を満足させる。  
2. △印の組合せにおいて、ひび割れ幅制限を行う。  
3. プレストレス (PS) は支点上のジャッキアップダウン、ケーブルによるプレストレスを示す。

NEXT

現在の設計法

## 連続合成桁の設計のポイント

引張力 引張力



鋼構造(単一材料)の設計との相違

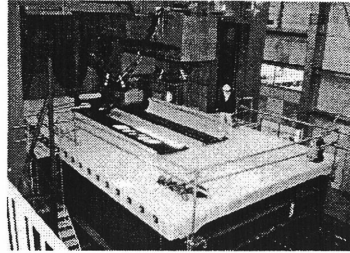
- 1 鋼とコンクリートとの合成断面の剛性の取扱い  
構造解析時・断面照査時
- 2 クリーブ・乾燥収縮・温度差の取扱い  
現象の理解と数値解析上の取り扱い
- 3 ひび割れ制御方法
- 4 ずれ止めの設計
- 5 合成効果が及ぼす主構造の設計法

NEXT



現在の設計法

## 2 断面剛性の設定について

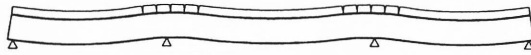


## コンクリートの剛性の評価について

断面力算定時・たわみ算定時の剛性・応力算定時の剛性の整理が必要

	鋼桁のみ $I_s$ (非合成断面)	床版コンクリート+鋼桁 $I_c$ (合成断面)	鋼桁+床版鉄筋 $I_r$ (コンクリート断面を考慮せず)
断面剛性			

引張力 引張力



NEXT



現在の設計法

## 断面力算定時の剛性と荷重の作用範囲

適用基準・設計ランクにより相違があるので留意する必要がある。

- 1 道路橋示方書
  - ・許容応力度設計法で使用状態を想定している。
  - ・コンクリート断面を全橋にわたり全断面有効 ( $n=7$ ) として断面力を計算する。
- 2 JH関西マニュアル
  - ・限界状態設計法のユーロコードを参考にしてしている。
  - ・中間支点部(支間Lに大して0.15Lの区間)は、活荷重時はひび割れ状態を考慮して断面力の計算を行う。
- 3 Eランクで設計する場合
  - ・ひび割れ状態を考慮した場合、クリープ・乾燥収縮の荷重の作用範囲は全橋ではないので留意する。

NEXT



現在の設計法

## JH関西マニュアルによる断面剛性の例

設計基準・ランクにより相違	断面力および変形の計算		応力の計算		備考
	鋼桁断面	鋼桁断面	鋼桁断面	鋼桁断面	
鋼桁架設時 前死荷重	鋼桁断面	鋼桁断面	鋼桁断面	鋼桁断面	迷出し架設など
床版打設時 ジャッキアップ ダウン きむ	逐次合成 既設床版部：合成 ( $n=7$ )		床版合成前は前死荷重を扱い、床版合成後は後死荷重扱いとする。		ジャッキアップ ダウンについては、 II編 5.2 参照。
後死荷重	全区間：合成 ( $n=7$ ) {支間部：合成 ( $n=7$ )、 中間支点部：鋼桁+鉄筋}				床版引張応力度の照査には合成断面の値を使う (後死荷重算定時の構造解析は、中間支点付近をひび割れた状態として計算する。 詳細についてはII編 3.6参照)
クリープ	全区間：合成 ( $n=14$ ) (全区間にクリープ荷重)		全区間を合成とする計算値と、鋼桁+鉄筋断面とする計算値の2つのケースを計算し、荷重の組合せ時の床版引張応力度によって、2つの計算値を使い分けて照査を行う。		
乾燥収縮	全区間：合成 ( $n=21$ ) (全区間に乾燥収縮荷重)				
温度差	全区間：合成 ( $n=7$ ) (全区間に温度差荷重)				
活荷重	支間部：合成 ( $n=7$ ) 中間支点部：鋼桁+鉄筋				活荷重算定時の構造解析は、中間支点付近をひび割れた状態として計算する。

注) [ ]内は床版の設計ランクがE (II編 3.7参照) の場合

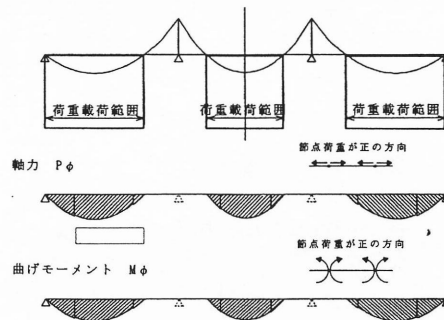
NEXT



現在の設計法

## Eランクにおける荷重作用範囲・クリープ

持続荷重によるモーメントが正の範囲



NEXT



現在の設計法

### Eランクにおける荷重作用範囲・乾燥収縮

0.15Lを除く範囲

荷重作用範囲  $L_1$   $L_2$   $L_3$

0.15-L1 0.15-L2 0.15-L2 0.15-L3

軸力 P2

曲げモーメント MV2

現在的设计法

### 3 クリープ・乾燥収縮・温度差の扱い

Concrete

Steel

### コンクリートの変形と鋼桁の拘束

Actually, Not. You can't deform!

I do want to deform !!

Concrete

Steel

現在的设计法

### クリープ・乾燥収縮・温度差による応力度

① 鋼桁と同じ長さになるまでの荷重・すなわち拘束力をコンクリートに作用させる。

Apply Load

Concrete

Steel

断面的応力

Combine the two materials

Concrete

Steel

② その力を合成断面に作用させる。

Release the Loads

Concrete

Steel

現在的设计法

### クリープの現象

Strain  $\epsilon$

$$\Delta \epsilon_c = \frac{\sigma_{c0}}{E_c} \psi$$

$\psi = \Delta \epsilon_c / \epsilon_0$

$\epsilon_0$

$\Delta \epsilon_c$

time

$\psi$  : クリープ係数  $\psi=2.0$

$\Delta \epsilon_c$  : クリープひずみ

$\sigma_{c0}$  : 持続荷重による応力度

$E_c$  : ヤング係数

持続応力が作用してないと生じない

現在的设计法

### クリープの一般式

$$\Delta \epsilon_c = \frac{1}{E_c} \left( \sigma_{c0} + \frac{1}{2} \Delta \sigma_{c0} \right) \psi + \frac{\Delta \sigma_{c0}}{E_c}$$

持続荷重によるクリープひずみ

クリープにより変化する応力度による弾性ひずみ

$\frac{1}{2} \{ (\sigma_{c0}) + (\sigma_{c0} + \Delta \sigma_{c0}) \} = \sigma_{c0} + \frac{1}{2} \Delta \sigma_{c0}$

クリープ前の持続応力度

クリープ後の持続応力度

$\psi$  : クリープ係数

$\Delta \epsilon_c$  : クリープひずみ

$\sigma_{c0}$  : クリープ前の持続応力度

$E_c$  : ヤング係数

$\Delta \sigma_{c0}$  : クリープにより変化する応力度

As a reference...

basic Formula

$$\Delta \epsilon_c = \frac{\sigma_{c0}}{E_c} \psi$$

現在的设计法

### 道路示方書のクリープの一般式

$$\Delta \varepsilon_c = \frac{1}{E_c} \left( \sigma_{co} + \frac{1}{2} \Delta \sigma_{co} \right) \psi + \frac{\Delta \sigma_{co}}{E_c}$$

$$= \frac{\sigma_{co}}{E_c} \psi + \frac{1}{2} \frac{\Delta \sigma_{co}}{E_c} \psi + \frac{\Delta \sigma_{co}}{E_c}$$

$$= \frac{\sigma_{co}}{E_c} \psi + \frac{1}{E_c} \left( 1 + \frac{1}{2} \psi \right) \Delta \sigma_{co} = \frac{\sigma_{co}}{E_c} \psi + \frac{1}{E_c \left( 1 + \frac{1}{2} \psi \right)} \Delta \sigma_{co}$$

求めたい  
応力度

Here

$$E_{cl} = \frac{E_c}{1 + \frac{1}{2} \psi}$$

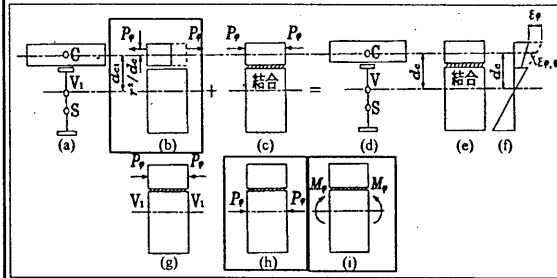
初期持続応力  
に対する項

変化する応力  
に対する項

NEXT

現在の設計法

### クリープにより変化する応力度の算出



- Concrete= (h)+(i)+(b)
- Steel = (h)+(i)

NEXT

現在の設計法

### 道示における応力算定式 クリープ

床版コンクリート

$$\Delta \sigma_c = \frac{1}{n_1} \left( \frac{P_\phi}{A_{v1}} + \frac{M_\phi y_{v1}}{I_{v1}} \right) - E_{c1} \frac{\sigma_c}{E_c} \phi_1$$

鋼桁

$$\Delta \sigma_s = \frac{P_\phi}{A_{v1}} + \frac{M_\phi y_{v1}}{I_{v1}}$$

ここに

$$P_\phi = E_{c1} \cdot A_c \cdot \varepsilon_{\phi} = E_{c1} A_c \frac{N_c}{E_c A_c} \phi_1 = \frac{2\phi_1}{2 + \phi_1} N_c$$

$$M_\phi = P_\phi (d_{c1} + r c^2 / d c) \approx P_\phi \cdot d_{c1}$$

$$r c^2 = I_c / A_c$$

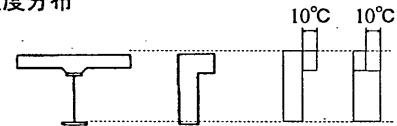
NEXT

現在の設計法

### 床版と鋼桁の温度差

•床版と鋼桁の温度差  $\Delta t = \pm 10^\circ\text{C}$

•温度分布



温度の分布

•線膨張係数  $1.2 \times 10^{-6}$

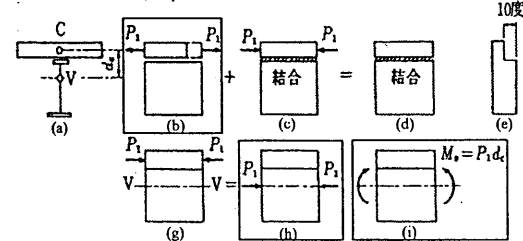
NEXT

1.2 times 10 to the -6 power

現在の設計法

### 温度変化により変化する応力度の算出

$$P_1 = E_s \varepsilon_t A_c / n, \quad M_v = P_1 d_c \quad \varepsilon_t = \alpha t$$



- Concrete= (h)+(i)+(b)
- Steel = (h)+(i)

NEXT

現在の設計法

### 道示における応力算定式 温度差

床版コンクリート

$$\sigma_c = \frac{1}{n} \left( \frac{P_1}{A_v} + \frac{M_v y_v}{I_v} \right) - E_c \cdot \varepsilon_t$$

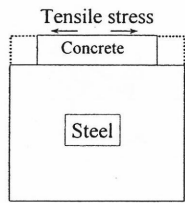
鋼桁

$$\sigma_s = \frac{P_1}{A_v} + \frac{M_v y_v}{I_v}$$

NEXT

現在の設計法

### 乾燥収縮



持続応力に関係なく生じる

1. コンクリートが収縮する
2. 鋼桁が変形を拘束する
3. 引張応力が生じる
4. クリープ現象も伴う

乾燥収縮度  $\epsilon_s = 20 \times 10^{-5}$   
 クリープ係数  $\psi_2 = 4.0$

NEXT

現在の設計法

### 道示における応力算定式 乾燥収縮

床版コンクリート

$$\sigma_c = \frac{1}{n_2} \left( \frac{P_2}{A_{o2}} + \frac{M_{o2}y_{o2}}{I_{o2}} \right) - E_{c2} \epsilon_s$$

鋼桁

$$\sigma_s = \frac{P_2}{A_{o2}} + \frac{M_{o2}y_{o2}}{I_{o2}}$$

ここに

$$E_{c2} = E_s/n_2, P_2 = E_s \epsilon_s A_c/n_2 = E_{c2} \epsilon_s A_c$$

$$M_{o2} = P_2 d c_2$$

NEXT

現在の設計法

### その他 留意事項

- ・「長支間になると、中間支点上の必要なところにプレストレス導入したい！」要求に対して
- ・PC構造とRC構造が混在した床版では、境界部でクリープおよび乾燥収縮に依存する引張力が発生するので、その扱いが非常に重要である。

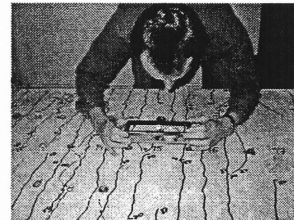
PC構造とRC構造  
 接合部は  
 要検討



NEXT

現在の設計法

### 4 ひび割れ制御



### ひび割れ制御の方法

#### 1 道路橋示方書

- ・みなし規定として、鉄筋比2%、  
 周長率0.045cm/cm<sup>2</sup>

#### 2 JH関西マニュアル

- ・床版厚が厚い少数主桁橋では、道示の周長率の規定を満足することができない。
- ・ひび割れ幅を算定し許容値以下とする。
- ・ひび割れ幅算定式は、テンションスティフニングを考慮した合成桁に対する算定式。

NEXT

現在の設計法

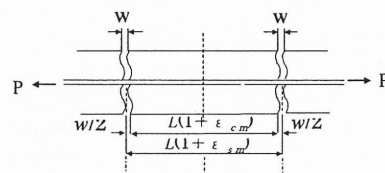
### ひび割れ幅算定式の考え方

ひび割れ幅算定式

$$w = \text{ひび割れ間隔 } L \times (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$$

$\epsilon_{sm}$ : ひび割れ間の鉄筋の平均ひずみ

$\epsilon_{cm}$ : コンクリートの平均ひずみ



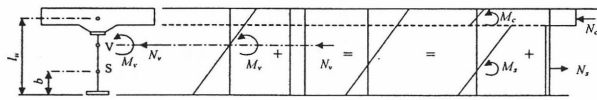
NEXT

現在の設計法

## 分担断面力について

全断面有効  
引張無視

テンションステイフニング考慮 床版分担断面が変わる



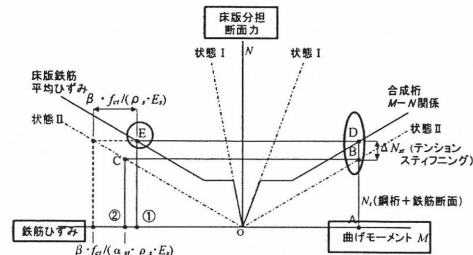
ひずみ分布と分担断面力

NEXT

現在の設計法

## 合成桁における鉄筋の平均ひずみ

- ・テンションステイフニングを考慮すると、断面剛性が変わり、分担断面力も変わる(B点→D点)。
- ・これに対応する鉄筋の平均ひずみはE点



NEXT

現在の設計法

## ひび割れ幅の算定式

$$w = 1.1 k_1 k_2 k_3 [4c + 0.7(c_s - \phi)] \left( \frac{\sigma_{s0}}{E_s} + \varepsilon_{cs} \right)$$

ひび割れ間隔      平均ひずみ

ここに  $\sigma_{s0} = \sigma_s - \beta f_{ct} \{1/\rho_s - 1/(\rho_s \alpha_{st})\}$

- $k_1$ : 鉄筋の付着性状を表す係数で、異形鉄筋の場合は1.0
- $k_2$ : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数  $k_2 = 15 / (\sqrt{f_{ct}} + 20) + 0.7$
- $k_3$ : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)。一般に設計圧縮強度を用いて良い
- $k_3$ : 引張鋼材の段数の影響を表す係数  $k_3 = 5(n+2)/(7n+8)$
- $n$ : 引張鋼材段数       $c$ : ひび割れに抵抗する鉄筋の純かぶり (mm)
- $c_s$ : 鉄筋の中心間隔 (mm)       $\phi$ : 鉄筋径 (mm)
- $\sigma_{s0}$ : テンションステイフニングを考慮した鉄筋平均応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $E_s$ : 鉄筋のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\varepsilon_{cs}$ : コンクリートの収縮クリープ、付着などの不確定要素を考慮したひずみ量  $= 15 \times 10^{-3}$
- $\sigma_s$ : (鋼桁+鉄筋)断面で算出される鉄筋応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\beta$ : テンションステイフニングによる付着の程度を表す係数  $= 0.2$
- $f_{ct}$ : コンクリート有効引張強度 ( $f_{ct} = 0.2 f_{ck}^{2/3}$ )
- $\rho_s$ : 鉄筋比
- $\alpha_{st}$ : (鋼桁+鉄筋断面の  $A_p$ ) / (鋼桁断面の  $A_s$ )

NEXT

現在の設計法

## ひび割れ幅 照査時の荷重

中間支点部は、負の曲げモーメントに対して、床版コンクリート上面側のひび割れ照査を下表の組合せにて照査する。

	照査荷重	床版上面
活	① 床版作用 (T荷重)	-
荷	② 主桁作用 (L荷重)	-
重	③ ②×0.6	○
	④ 死荷重 (床版施工を考慮)	○
	⑤ クリープ・乾燥収縮	○

支間部はT荷重載荷による床版としての作用力により、床版コンクリート下面側のひび割れ照査を行う。

NEXT

現在の設計法

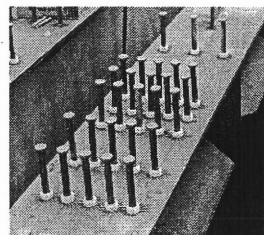
## ひび割れ制御 参考文献

中蘭・安川・稲葉・橋・秋山・佐々木  
PC床版を有する鋼連続合成2主桁橋の設計法(上)  
一連続合成桁における中間支点部の設計—  
橋梁と基礎 No.36 No.2 2002-2

NEXT

現在の設計法

## 5 ずれ止めの設計





## ずれ止めの許容せん断力

### 1 道路橋示方書

$$Q_a = 9.4 d^2 \sqrt{\sigma_{ck}} \quad (H/d \geq 5.5)$$

$$Q_a = 1.72 d H \sqrt{\sigma_{ck}} \quad (H/d < 5.5)$$

$Q_a$  : スタッドの許容せん断力 (N/本)  
 $d$  : スタッドの軸径 (mm)  
 $H$  : スタッドの全高 (mm)  
 $\sigma_{ck}$  : 設計基準強度 (N/mm<sup>2</sup>)

### 2 JH関西マニュアル・設計要領二集

$$Q_a = 12.0 d^2 \cdot \sqrt{\sigma_{ck}} \cdot (H/d \geq 5.5)$$

NEXT

現在の設計法

## 鋼構造物設計指針PartB による強度式

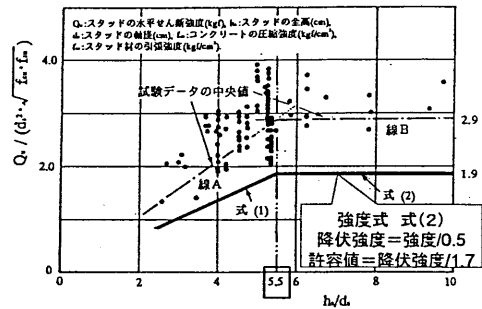


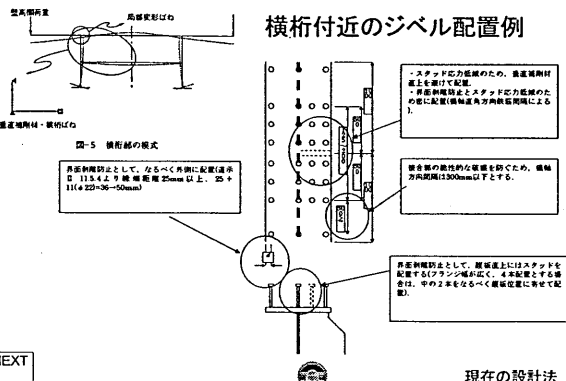
図1 静的押抜き試験データと指針の提案式との比較

NEXT

現在の設計法

## 横桁付近のジベルについて

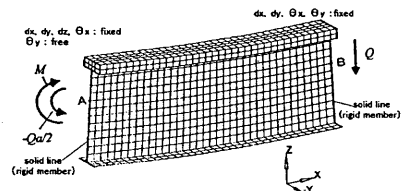
### 横桁付近のジベル配置例



NEXT

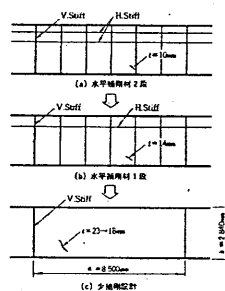
現在の設計法

## 6 合成効果が及ぼす主構造の設計法



## 鋼桁ウェブの少補剛設計

床版と鋼桁との合成効果を期待すると鋼桁ウェブの少補剛設計が選択できる。



### 参考文献

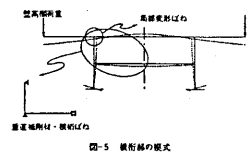
中園・稲葉・大垣・川口  
 PC床版を有する鋼連続合成2主桁橋の設計法  
 (中) 一腹板の省補剛設計—  
 橋梁と基礎 No.36 No.3 2002-3

NEXT

現在の設計法

## 床版の設計法

ラーメンフレームとしての挙動  
 死荷重モーメント算出モデル  
 横桁部のジベル配置



### 参考文献

中園・安川・稲葉・坂本・大垣・済藤  
 PC床版を有する鋼連続合成2主桁橋の設計法(下)  
 一床版およびずれ止めの設計法—  
 橋梁と基礎 No.36 No.4 2002-4

NEXT

現在の設計法

合成桁設計： 実際の挙動に近い設計  
国際競争力からも必要  
限界状態設計法へ

ご清聴 ありがとうございました。