

## 第 2 章 連続合成桁の床版中間支点設計に関する研究

## 第2章 連続合成桁の床版中間支点設計に関する研究

2.1	はじめに	5
2.2	仕様規定によるひび割れ制御	6
2.3	性能規定によるひび割れ制御	10
2.3.1	検討方針	10
2.3.2	鉄筋応力度の算出	11
2.3.3	ひび割れ幅の算出	15
2.3.4	計算結果の比較と考察	38
2.4	まとめ	44
2.5	文献調査	47

## 2.1 はじめに

鋼橋の合理化を目指した一形式として、PC床版を有する少主桁橋が各地で建設されている。これらの多くは非合成桁であるが、更なる合理化を考えた場合、床版の剛性を考慮した連続合成桁とするのが理想的である。

連続合成桁の設計では、中間支点部の取り扱い方が重要であるが、現状の設計法ではここに仕様規定（鉄筋の応力度、鉄筋比）が用いられており、不経済な設計となる問題がある。そこで本WGでは、連続合成桁の中間支点部の設計法に着目し、より合理的な設計を目指してひび割れ幅を直接的に制御することにより、中間支点部の耐久性を保証しつつ、かつ経済的な設計法を目指すものである。

本章では、この連続合成桁の床版中間支点について、文献調査および試設計により、設計手法の調査・検討を行った。すなわち、「2.2 仕様規定によるひび割れ制御」にて、ひび割れ幅、周長率、鉄筋量等の仕様規定の根拠を示し、「2.3 性能規定によるひび割れ制御」では、連続合成桁の試設計を行い国内外の設計基準にて床版表面に発生するひびわれ幅について比較設計を行った。また、「2.5 文献調査」では、関連する文献を列挙すると共にその概要を示している。

なお、そもそも中間支点部の鉄筋量、周長率の規定は何のためにあるのかという疑問も提起された。常識的に考えれば、これはひび割れ幅の制御であるが、では何のためにひび割れ幅を制御しなければならないか、鉄筋の錆を防ぐためなのか、引張力を受けるコンクリートの損傷、ひいては床版の損傷を防ぐためなのか、鉄筋の錆さえ防げばよいのか、逆に、この規定で錆を防ぐことができるのか、等々が疑問となるのである。

このための文献調査、有識者の意見聴取等を行ったが、ついにはこの疑問を解明するには至らなかった。ただ、上記のようにひび割れ幅を予測する手法に関しては資料を提供することができた。

## 2.2 仕様規定によるひび割れ制御

### 2.2.1 はじめに

連続合成桁の中間支点付近は、負の曲げモーメント領域のため中間支点上の床版は引張応力を受ける。この引張応力を受ける床版の設計に対して“鋼道路橋の合成ゲタ設計施工指針 昭和40年6月(社)日本道路協会”の“引張応力をうける版の配筋18条”では、コンクリートに引張応力負担させないために、版に作用する引張応力は全て鉄筋で受け持たせ、その鉄筋の応力度を許容応力度で規定していた。

その後、昭和48年2月の“道路橋示方書・同解説 II鋼橋編”(以降、道示II.)の“引張応力を受ける床版の鉄筋量及び配筋”という項目で、引張応力を受けるコンクリート床版については、橋軸方向の最小鉄筋量とその鉄筋の周長率が規定されるようになり、今日に至っている。

#### 道示IIの規定内容

最小鉄筋量 : コンクリート断面積の2%.

鉄筋の周長率 : コンクリート断面積に対して  $0.0045\text{mm}/\text{mm}^2$  以上.

本項では、上記の“最小鉄筋量”“鉄筋の周長率”の根拠について調査を行い、その結果について報告を行う。

### 2.2.2 最小鉄筋量と鉄筋の周長率について

最小鉄筋量と鉄筋の周長率に対する規定“引張応力を受ける床版の鉄筋量及び配筋”は、道示IIの昭和48年2月から記載されている。また、“鋼道路橋設計便覧(昭和54年2月)”にも同じ内容が記載されている。それぞれ根拠に結びつく参考文献<sup>1,2,3)</sup>が出典されている。

ここで、参考文献1)の概要を示す。

参考文献1)では、実験的に軸方向鉄筋の鉄筋量と周長率を変えた7種類14本の合成桁モデルを製作し、その桁を逆さ(床版を下側)に単純支持させて支間中央付近に、静的に荷重を載荷して中間支点上の負の曲げモーメント状態にすることによって、実験的に検証するものである。そして、床版の軸方向鉄筋の応力度が  $1000\text{kg}/\text{cm}^2$  と  $2000\text{kg}/\text{cm}^2$  時にコンクリート表面のひびわれ幅を計測し、試験体毎の鉄筋量、周長率、ひびわれ幅を比較している。

その結果として、コンクリート表面の最大ひびわれ幅は、鉄筋量、鉄筋直径、周長率の

影響を受け以下のように、鉄筋量の多いほど、また周長率の大きいほど最大ひびわれ幅は小さくなると述べている。

鉄筋量 : コンクリートとの断面積比が 1.5% 程度となるように D16 または D13 を配置すれば、鉄筋応力  $2000\text{kg/cm}^2$  のとき最大ひびわれ幅は 0.2mm 程度内に収めることができる。

周長率 : 周長率  $0.03\text{cm/cm}^2$  程度と  $0.04\text{cm/cm}^2$  以上を比較すると、周長率の大きいほうがよい結果を示す。

以上の結論から、道示 II の最小鉄筋量と鉄筋の周長率は、上記の文献などを参考にして、更に実験と実施工の差や鉄筋コンクリートの品質のバラツキなどを勘案して安全率を見込み、コンクリート表面のひびわれ幅を 0.2mm 程度以下に抑えるために、最小鉄筋量 2.0% 以上、周長率  $0.0045\text{mm/mm}^2$  以上を規定したと考えられる。

### 2. 2. 3 ひびわれ幅「0.2mm」について.

参考文献 1) では、“ヨーロッパコンクリート委員会は、構造物の許容ひびわれ幅を屋外で 0.2mm と提案しており、内外の研究においても 0.2mm 程度であれば無害であると報告されている。”と述べられている。

当時の研究報告<sup>4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)</sup>では、実験の目的や条件、方法が異なっているため、結果は全て一致するものではなかった。しかしながら、コンクリート表面のひびわれ幅を 0.2mm 程度に抑えておけば、コンクリート中の鉄筋は概ね健全であると評価されている。

### 2. 2. 4 まとめ

連続合成桁の中間支点付近は負の曲げモーメント領域のため、床版は引張応力を受ける。この際のコンクリートの引張に対する抵抗力は小さいことから、ひび割れが生じる可能性が高い。そこで床版表面に発生するひび割れ幅を規制することで、床版内の鉄筋の健全性を確保することが重要と考えられた。そして、既往の文献・実験報告から、“引張応力を受ける床版の鉄筋量及び配筋”は、ひび割れ幅を 0.2mm 以下に抑えるために、軸方向の最小鉄筋量 2.0% と、その鉄筋の最小周長率  $0.0045\text{mm/mm}^2$  を規定したと考えられる。

## 2. 2. 5 あとがき

今回、いろいろと調査した文献の中に、実橋におけるプレストレスした連続合成桁の床版損傷についての調査報告<sup>11)</sup>がある。ここで調査された橋梁は床版に損傷が認められている。しかし、この損傷は施工時の打ち継目によるもので、負曲げモーメントの影響による損傷ではないことが報告されている。また、この報告書では、床版の耐久性について幾つかの実橋載荷試験の報告より、プレストレスしない連続合成桁は、プレストレスする連続合成桁や非合成連続桁と同様な状況であると推察している。

この報告書から、連続合成桁の中間支点付近の床版は、道示IIで規定された“軸方向の最小鉄筋量”と“鉄筋の最小周長率”を満足させ、ひびわれ幅制御等の対策を行うことにより、耐久性が確保されていると考えられる。

<参考文献>

- [1] 橋, 向山, 湊: プレストレスしない連続ゲタの静的実験, 土木学会誌 10号 1968
- [2] Maeda, Y. and Kajikawa, Y. :Fatigue Behavior of Composite Beams Subjected to Negative Moment, Proc. of the Symposium on Ultimate Strength of Structures and their Components, Japan Society for the Promotion of Science, Sep. 1971
- [3] 前田, 佐伯, 日種, 梶川: 鋼道路橋の合成桁の設計, 道路 1972.7
- [4] B.Trempel:The Corrosion of Reinforcing Steel in Cracked Concrete, ACI journal, june 1947
- [5] H.J.J.Engel, J.Van Leewen;Research on Admissible Crack Width in the Netherlands, Proc.RILEM symposium, 1957
- [6] 岡村 甫: 高張力異形鉄筋の使用に関する基礎研究(2), コンクリートジャーナル, 1966年6月
- [7] 神山 一: コンクリート中の鉄筋さび, セメントコンクリート, 1972年10月
- [8] 関 博, 丸山 浩: 長期間海水作用を受けたコンクリートはりのひびわれと内部鉄筋の腐食について, 港研報告, 1973年9月
- [9] 西山啓伸, 秋元泰輔, 富沢修次: ひびわれによる鉄筋の腐食に関する実験(その2), 土木学会年次学術講演会, 1975年10年
- [10] 西田勝美, 杉木六郎, 富山勝三: 鉄筋コンクリートのひびわれと鉄筋のさび一塩沢における20年放置実験の結果一, コンクリート工学, 1976年5月
- [11] 第1回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集(1998年8月) 連続合成桁への取組み

以上

## 2.3 性能規定によるひび割れ制御

### 2.3.1 検討方針

本章では、国内外の設計基準について比較検討し、各基準の傾向と特徴を調査した。すなわち、「2.3.2 鉄筋応力度の算出」では連続合成桁の試設計を行い、比較検討に用いる床版の鉄筋応力度を算出し、「2.3.3 ひび割れ幅の算出」では試設計の結果を各基準の計算式に代入し、床版表面に発生するひび割れ幅を算出するとともに、各計算式の特徴を示した。

鉄筋応力度の算出に用いた試設計のモデルは、今日想定される標準的な規模のものとして、総幅員 10.63m、床版支間 6.0m、支間長 50.0m+50.0m の 2 径間連続合成 I 桁であり、床版は横締めを考慮した 320mm 厚の PRC 床版とした。

ひび割れ幅計算を行った基準は、代表的なもの、最新のものとして①ハンスビレ式、②土木学会式、③JH式、④CEB-FIP式、⑤ACIの5式である。これらについて、鉄筋比、鉄筋径、かぶり厚をパラメータとして変化させて計算を行い、各計算式の傾向を調査した。鉄筋比について、道路橋示方書には 2%以上と規定されているが、床版厚が厚くなると鉄筋量が過剰となることが考えられることから、この妥当性を確認するため、2%以下の鉄筋比についても検討を行った。

最後に、「2.3.4 計算結果の比較と考察」では、これら 5 式の計算結果をグラフ化し、重ね合わせを行った。これによって相互に比較し、傾向をより客観的に示すとともに、計算式の構成も考慮して結果について考察を加えた。

## 2.3.2 鉄筋応力度の算出

### 1. 構造一般図

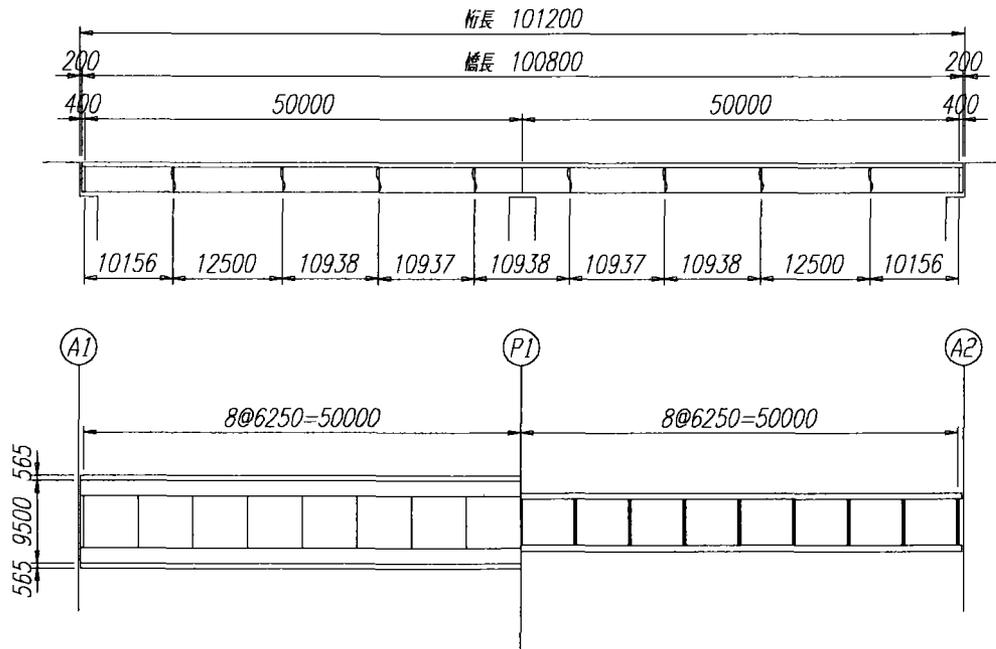


図-2.3.1 骨組図

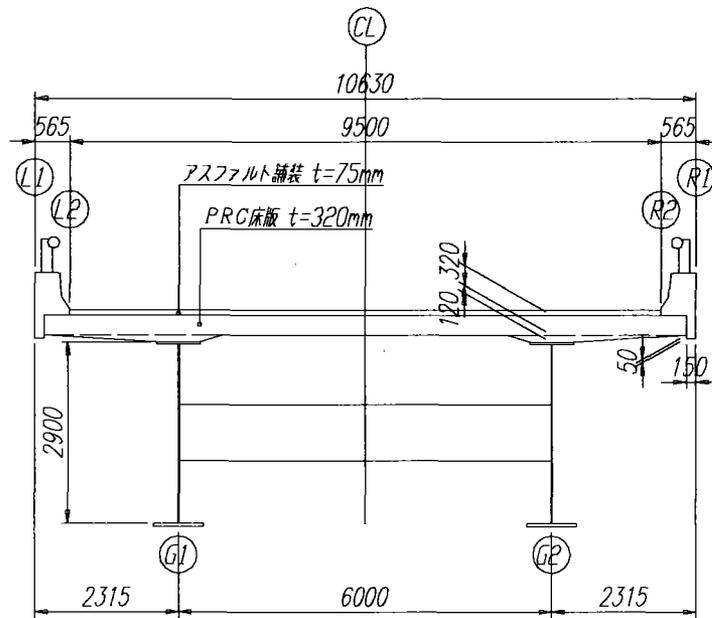


図-2.3.2 標準断面図

## 2. 断面形状

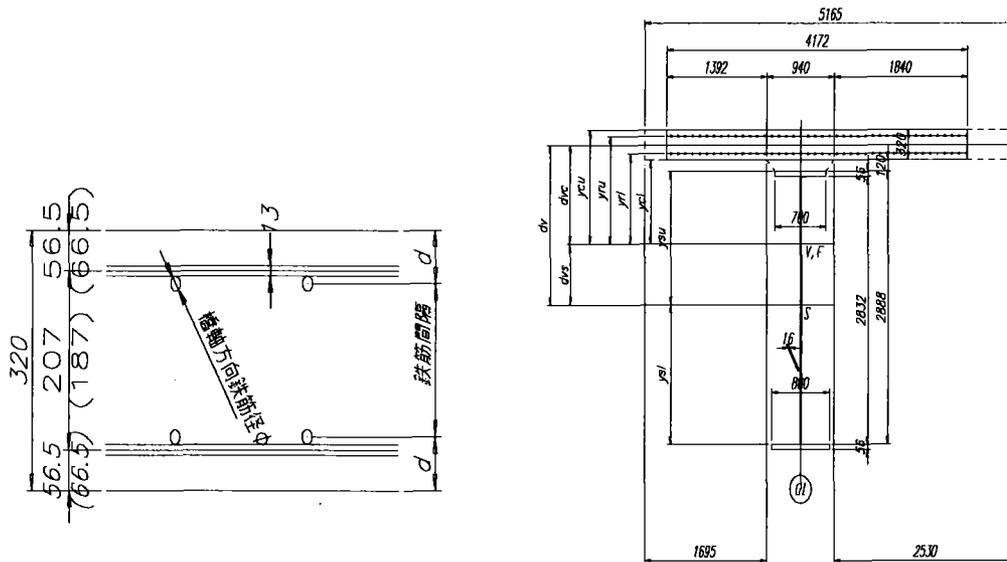


図-2.3.3 断面形状図

## 3. 鉄筋応力度の算出

記号説明	
$A$ ( $\text{cm}^2$ )	抵抗断面別の有効断面積
$A^*$ ( $\text{cm}^2$ )	軸力算出用の断面積
$\Sigma(A \times y)$ ( $\text{cm}^3$ )	抵抗断面別の断面1次モーメント
$\delta s, v$ (cm)	桁高中心と中立軸までの偏心量
$I^*$ ( $\text{cm}^4$ )	抵抗断面別の断面2次モーメント (偏心無考慮)
$I_s, I_v$ ( $\text{cm}^4$ )	抵抗断面別の断面2次モーメント (偏心考慮)
$dvc$ (cm)	合成後中立軸から床版厚中心までの距離
$dvs$ (cm)	合成前中立軸から合成後中立軸までの距離
$dv$ (cm)	合成前中立軸から床版厚中心までの距離
$ycu$ (cm)	合成後中立軸から床版上面までの距離
$ycl$ (cm)	合成後中立軸から床版下面までの距離
$yru$ (cm)	合成後中立軸から上側鉄筋までの距離
$yrl$ (cm)	合成後中立軸から下側鉄筋までの距離
$ysu$ (cm)	合成前中立軸から上フラジ上縁までの距離
$ysl$ (cm)	合成前中立軸から下フラジ下縁までの距離

計算結果の一例を下記に示す。

・詳細結果

かぶり50mm：鉄筋比一定

断面番号		Case - 1							
断面力	Ms (kN・m)	Mv (kN・m)	Mvd (kN・m)	Ml (kN・m)	Ss (kN)	Ns (kN)	Nvd (kN)	Nl (kN)	
断面力	-19537.0	-9952.0	-1061.0	-8891.0	1979.0	---	---	---	
不静定断面力 (kN・m)	クリープ	乾燥収縮	温度差(+)	温度差(-)	Sv (kN)				
	---	---	---	---	1383.0				
その他の条件	ハンチ (cm)	かぶり (cm)	鉄筋間隔 (cm)	曲率半径 (m)	床版全幅 (mm)				
	12.0	6.30	18.4	0.0	5165				
	固定点間距離 (cm)		基準桁高 (mm)	$\sigma_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋比 (%)				
	上フランジ側	下フランジ側							
	625.0	625.0	2000	40	1.500				
床版	4172	320	PCコンクリート	断面積 (cm <sup>2</sup> )	y (cm)	$\sigma_{ta}$ (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋ピッチ		
上側鉄筋	79.02	D13	SD345	13350.4	-176.00	---	52.80 mm		
下側鉄筋	79.02	D13	SD345	100.1	-185.70	140.0	52.80 mm		
U. Flg	700	60	SM490Y	420.0	-145.00	210.0	板厚 ok	210.0	
Web	2840	17	SM490Y	482.8	0.00	210.0	(道示 3.2.2 表-3.2.3)		
l. Flg	800	60	SM490Y	480.0	145.00	210.0	板厚 ok	210.0	
	鋼桁	鋼桁+鉄筋	n=7	n=14	n=21				
A (cm <sup>2</sup> )	1382.8	1583.0	3290.0	2336.4	2018.5				
A' (cm <sup>2</sup> )	1382.8	1630.7	3743.9	2563.4	2169.8				
$\Sigma(A \times y)$ (cm <sup>3</sup> )	8700.0	-26539.5	-326987.2	-159133.6	-103189.1				
$\bar{O}_{s,v}$ (cm)	6.3	-16.8	-99.4	-68.1	-51.1				
I' (cm <sup>4</sup> )	22170260	28391251	81410435	51790347	41916985				
I <sub>s,lv</sub> (cm <sup>4</sup> )	22115523	27946315	48915739	40951663	36641876				
dvc (cm)	---	---	-76.6	-107.9	-124.9				
dvs (cm)	---	---	-83.1	-61.8	-44.8				
dv (cm)	---	---	-169.7	-169.7	-169.7				
ycu (cm)	---	---	-92.6	-123.9	-140.9				
ycl (cm)	---	---	-60.6	-91.9	-108.9				
yru (cm)	---	-168.9	---	---	---				
ycl (cm)	---	-149.5	---	---	---				
ysu (cm)	-154.3	-131.2	-48.6	-79.9	-96.9				
ysl (cm)	141.7	164.6	247.4	216.1	199.1				
応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	床版応力度		鋼桁応力度				鉄筋応力度		
	床版+鋼桁		床版+鋼桁		鉄筋+鋼桁		鉄筋+鋼桁		
	$\sigma_{cu}$	$\sigma_{cl}$	$\sigma_{su}$	$\sigma_{sl}$	$\sigma_{su}$	$\sigma_{sl}$	$\sigma_{ru}$	$\sigma_{rl}$	
1. 合成前死荷重	---	---	136.30	-125.19	136.30	-125.19	---	---	
2. 合成後死荷重	0.29	0.19	1.05	-5.37	4.98	-6.26	6.41	5.68	
3. 活荷重	2.40	1.57	8.84	-44.96	41.75	-52.42	53.75	47.57	
4. クリープ	---	---	---	---	---	---	---	---	
5. 乾燥収縮	---	---	---	---	---	---	---	---	
許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{cu}$	$\sigma_{cl}$	$\sigma_{su}$	$\sigma_{sl}$	$\sigma_{su}$	$\sigma_{sl}$	$\sigma_{ru}$	$\sigma_{rl}$	
スリットを考慮した判定値	---	---	210.00	190.16	210.00	190.16	---	---	
A. 架設時 (1)	---	---	136.30	-125.19	136.30	-125.19	---	---	
許容応力度	---	---	262.50	-237.70	262.50	-237.70	---	---	
B. 常時 (A+2+3)	2.69	1.76	---	---	183.04	-183.86	60.16	53.25	
許容応力度	---	---	---	---	210.00	-190.16	140.00	140.00	
組合せ応力度の判定	---	---	ok	ok	ok	ok	ok	ok	
その他応力度	鋼桁せん断応力度		合成応力度		合成応力度				
	合成前 =		40.99	0.39	0.34	0.39	0.34		
	合成後 =		28.65	---	---	1.10	1.10		
	$\tau$ =		69.64	---	---	1.10	1.10		
	$\tau_a$ =		120.00	ok	ok	ok	ok		
降伏点最大合計値	5.18	3.39	---	---	267.17	-275.71	115.83	102.53	
安全度	---	---	---	---	355.00	-355.00	345.00	345.00	
降伏安全度判定	---	---	---	---	ok	ok	ok	ok	

#### 4. 鉄筋応力度一覧表

① かぶり56.5mm：鉄筋比一定

	鉄筋間隔	鉄筋径	鉄筋比	鉄筋応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
case-1	52.80	D13	1.50	60.16
case-2	82.75	D16	1.50	60.10
case-3	119.40	D19	1.50	60.06
case-4	161.30	D22	1.50	60.00
case-5	211.10	D25	1.50	59.95

② かぶり66.5mm：鉄筋比一定

	鉄筋間隔	鉄筋径	鉄筋比	鉄筋応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
case-1	52.80	D13	1.50	59.81
case-2	82.75	D16	1.50	59.76
case-3	119.40	D19	1.50	59.71
case-4	161.30	D22	1.50	59.65
case-5	211.10	D25	1.50	59.60

③ かぶり56.5mm：鉄筋間隔一定

	鉄筋間隔	鉄筋径	鉄筋比	鉄筋応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
case-1	125.00	D13	0.63	72.91
case-2	125.00	D16	0.99	66.95
case-3	125.00	D19	1.43	60.88
case-4	125.00	D22	1.94	55.17
case-5	125.00	D25	2.53	49.66

④ かぶり66.5mm：鉄筋間隔一定

	鉄筋間隔	鉄筋径	鉄筋比	鉄筋応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
case-1	125.00	D13	0.63	72.51
case-2	125.00	D16	0.99	66.57
case-3	125.00	D19	1.43	60.53
case-4	125.00	D22	1.94	54.84
case-5	125.00	D25	2.53	49.35

⑤ かぶり56.5mm：鉄筋径一定

	鉄筋間隔	鉄筋径	鉄筋比	鉄筋応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
case-1	200.00	D19	0.90	68.40
case-2	175.00	D19	1.02	66.44
case-3	150.00	D19	1.19	64.00
case-4	125.00	D19	1.43	60.88
case-5	100.00	D19	1.79	56.74

⑥ かぶり66.5mm：鉄筋径一定

	鉄筋間隔	鉄筋径	鉄筋比	鉄筋応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
case-1	200.00	D19	0.90	68.02
case-2	175.00	D19	1.02	66.07
case-3	150.00	D19	1.19	63.64
case-4	125.00	D19	1.43	60.53
case-5	100.00	D19	1.79	56.40

## 2.3.3 ひび割れ幅の算出

### 1. ハンスビレの式

#### (1) ひび割れ幅の計算式

##### ① 曲げモーメント

a) 初期ひび割れが生じる曲げモーメント  $M_R$

$$M_R = \frac{J_{i,0}}{S_{i,0}} A_b \frac{\beta_{zB} - \sigma_{b,0}^e}{1 + \frac{d}{2Z_{i,0}}}$$

ここに、

- $J_{i,0}$  : 全断面有効時の断面 2 次モーメント
- $S_{i,0}$  : コンクリート断面と断面 2 次モーメント
- $Z_{i,0}$  : コンクリート断面と全断面有効時の重心間距離
- $\beta_{zB}$  : コンクリートの引張強度
- $\sigma_{b,0}^e$  : 乾燥収縮により上鉄筋に生じる圧縮応力
- $A_b$  : コンクリート面積
- $\beta_{zB}$  : コンクリート最大曲げ引張強度
- $d$  : 床版厚

b) 初期ひび割れを終結させる曲げモーメント  $M_{ER}$

$$M_{ER} = \frac{J_a}{Z_a} \left[ \sigma_{s,r} \frac{A_{st} J_{st}}{A_a J_a} - \frac{0.45}{1-N} \Delta \sigma_{s,r} \right]$$

ここで、

- $A_a, J_a$  : 鋼桁断面だけの断面積および断面 2 次モーメント
- $A_{st}, J_{st}$  : 鋼桁と鉄筋からなる断面積と断面 2 次モーメント
- $\Delta \sigma_{s,r}$  : ひび割れ発生前後の鉄筋応力の変化量
- $\sigma_{s,r}$  : 初期ひび割れが生じた場合のひび割れ部における鉄筋応力
- $d_s$  : 鉄筋径
- $E_s$  : 鉄筋のヤング率

$$Z_a = \frac{d}{2} + t_{uf} + \frac{H_w}{2} + e_a$$

$t_{uf}$  : フランジ厚

$H_w$  : 腹板高

$$e_a = \frac{Q_a}{A_a}$$

- $Q_a$  : 鋼桁断面積  
 $A_a$  : 鋼桁断面 1 次モーメント  
 $N=0.30$  付着特性

c) 鉄筋が降伏に達するときの曲げモーメント  $M_u$

$$M_u = \frac{J_a}{Z_{s,a} - Z_{s,1}} \times (\beta_{s,s} \cdot a_{st} - 0.45 \times \Delta\sigma_{s,r}^N)$$

$Z_{s,1}$  : 床版から鉄筋までの距離

$\beta_{ss}$  : 鉄筋の降伏応力

$$\alpha_{st} = \frac{A_{st} \cdot J_{st}}{A_a \cdot J_a}$$

## ②ひび割れ幅

a) 初期ひび割れ幅

$$W^1_R = 2 \left\{ \frac{(1+N) \cdot d_s \cdot (1+\mu \cdot n_0)}{A \cdot B_w \cdot 8 \cdot E_s} \cdot (\Delta\sigma^1_{s,r})^2 \right\}^{\frac{1}{1+N}}$$

$A=0.58$  付着特性

$\beta_w$  : コンクリート圧縮強度

$d_s$  : 鉄筋径

$n_0$  : ヤング係数比

$E_s$  : 鉄筋のヤング係数

$\Delta\sigma^1_{s,r}$  : 鉄筋の増加応力

b) 鉄筋が降伏に達する時のひび割れ幅

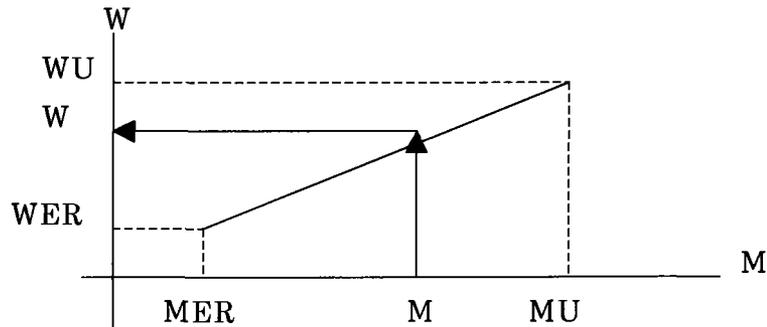
$$W^1_u = W^1_R \left\{ 2 \cdot \left( \frac{\beta_{s,s}}{\sigma^1_{s,r}} \right)^{\frac{1-N}{1+N}} - 1 \right\}$$

c) 任意の曲げモーメントに対するひび割れ幅

$$M < M_R \quad W = 0$$

$$M_R < M < M_{ER} \quad W = W^1_R$$

$$M_{ER} < M \quad W = W^1_R + \frac{(W^1_u - W^1_R)}{M_u - M_{ER}} \times (M - M_{ER})$$



[特徴]

1) 計算に用いる各種パラメーター

a) コンクリート強度

ハンスビレの式に入力するコンクリート強度には立方体圧縮強度を使用する。コンクリートのシリンダー圧縮強度から立方体圧縮強度への変換は以下の式を用いる。  
 立方体圧縮強度 = シリンダー圧縮強度 / 0.83

b) 乾燥収縮

ハンスビレの式から算出されるひび割れ幅は乾燥収縮の影響を大きく受ける。乾燥収縮度としてコンクリート標準示方書の最小値である  $120\mu$  と最大値である  $400\mu$  の2ケースで比較するとひび割れ幅に2倍程度のばらつきが見られる。

c) 付着特性

鉄筋の断面形状の影響を受ける付着特性を表すパラメータを用いて、鉄筋とコンクリートの付着の影響を考慮することが可能。

2) ハンスビレの式から算出可能なもの

a) ひび割れ発生モーメント

コンクリートに引張り力が作用し、コンクリート部材にひび割れが発生し始める時の曲げモーメントを算出可能。ひび割れ発生モーメントは乾燥収縮の影響を強く受け、乾燥収縮が大きい場合はひび割れ発生モーメントが小さくなる。  
 ひび割れ発生モーメントは鉄筋比が大きい場合、乾燥収縮による拘束力が大きくなるため、ひび割れ発生モーメントが小さくなる。

b) ひび割れ間隔

ひび割れ間隔は乾燥収縮の影響を大きく受ける。乾燥収縮が大きくなるとひび割れ間隔が大きくなり、ひび割れ幅が大きくなる。

c) ひび割れ幅

・初期ひび割れ幅

コンクリートに引張り力が作用し、コンクリート部材にひび割れが発生し始めた時のひび割れ幅を算出することが可能。初期ひび割れ幅は乾燥収縮の影響を強く受け、乾燥収縮が大きい場合は初期ひび割れ幅が大きくなる。

・任意の曲げモーメントに対するひび割れ幅

(2) 計算結果

1) 鉄筋比を一定とした場合 (かぶり 56.5mm)

			Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
床版幅	BS	cm	417.20	417.20	417.20	417.20	417.20
床版厚	d	cm	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00
床版断面積	Ac	cm <sup>2</sup>	13350.40	13350.40	13350.40	13350.40	13350.40
鉄筋間隔		cm	5.28	8.28	11.94	16.13	21.11
鉄筋本数	n	本	79.02	50.42	34.94	25.86	19.76
鉄筋径	φ	mm	13	16	19	22	25
	As	cm <sup>2</sup>	1.267	1.986	2.865	3.871	5.067
	As1	cm <sup>2</sup>	100.11	100.13	100.11	100.12	100.14
	As2	cm <sup>2</sup>	100.11	100.13	100.11	100.12	100.14
Σ(As1,As2)		cm <sup>2</sup>	200.22	200.26	200.21	200.25	200.28
鉄筋比		%	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
ひび割れ幅	w	mm	0.130	0.150	0.180	0.200	0.220

2) 鉄筋比を一定としてかぶりを変更した場合 (かぶり 66.5mm)

			Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
床版幅	BS	cm	417.20	417.20	417.20	417.20	417.20
床版厚	d	cm	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00
床版断面積	Ac	cm <sup>2</sup>	13350.40	13350.40	13350.40	13350.40	13350.40
鉄筋間隔		cm	5.28	8.275	11.94	16.13	21.11
鉄筋本数	n	本	79.02	50.42	34.94	25.86	19.76
鉄筋径	φ	mm	13	16	19	22	25
	As	cm <sup>2</sup>	1.267	1.986	2.865	3.871	5.067
	As1	cm <sup>2</sup>	100.11	100.13	100.11	100.12	100.14
	As2	cm <sup>2</sup>	100.11	100.13	100.11	100.12	100.14
Σ(As1,As2)		cm <sup>2</sup>	200.22	200.26	200.21	200.25	200.28
鉄筋比		%	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
ひび割れ幅	w	mm	0.130	0.150	0.170	0.190	0.210

3) 鉄筋間隔を一定とした場合 (かぶり 56.5mm)

			Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
床版幅	BS	cm	417.20	417.20	417.20	417.20	417.20
床版厚	d	cm	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00
床版断面積	Ac	cm <sup>2</sup>	13350.40	13350.40	13350.40	13350.40	13350.40
鉄筋間隔		cm	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50
鉄筋本数	n	本	33.38	33.38	33.38	33.38	33.38
鉄筋径	φ	mm	13	16	19	22	25
	As	cm <sup>2</sup>	1.267	1.986	2.865	3.871	5.067
	As1	cm <sup>2</sup>	42.29	66.28	95.62	129.20	169.12
	As2	cm <sup>2</sup>	42.29	66.28	95.62	129.20	169.12
Σ(As1,As2)		cm <sup>2</sup>	84.57	132.57	191.24	258.40	338.23
鉄筋比		%	0.63	0.99	1.43	1.94	2.53
ひび割れ幅	w	mm	0.053	0.270	0.190	0.130	0.100

4) 鉄筋間隔を一定としてかぶりを変更した場合 (かぶり 66.5mm)

			Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
床版幅	BS	cm	417.20	417.20	417.20	417.20	417.20
床版厚	d	cm	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00
床版断面積	Ac	cm <sup>2</sup>	13350.40	13350.40	13350.40	13350.40	13350.40
鉄筋間隔		cm	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50
鉄筋本数	n	本	33.38	33.38	33.38	33.38	33.38
鉄筋径	φ	mm	13	16	19	22	25
	As	cm <sup>2</sup>	1.267	1.986	2.865	3.871	5.067
	As1	cm <sup>2</sup>	42.29	66.28	95.62	129.20	169.12
	As2	cm <sup>2</sup>	42.29	66.28	95.62	129.20	169.12
Σ(As1,As2)		cm <sup>2</sup>	84.57	132.57	191.24	258.40	338.23
鉄筋比		%	0.634	0.993	1.433	1.936	2.534
ひび割れ幅	w	mm	0.070	0.270	0.180	0.140	0.110

5) 鉄筋径を一定とした場合 (かぶり 56.5mm)

			Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
床版幅	BS	cm	417.20	417.20	417.20	417.20	417.20
床版厚	d	cm	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00
床版断面積	Ac	cm <sup>2</sup>	13350.40	13350.40	13350.40	13350.40	13350.40
鉄筋間隔		cm	20.00	17.50	15.00	12.50	10.00
鉄筋本数	n	本	20.86	23.84	27.81	33.38	41.72
鉄筋径	φ	mm	19	19	19	19	19
	As	cm <sup>2</sup>	2.865	2.865	2.865	2.865	2.865
	As1	cm <sup>2</sup>	59.76	68.30	79.69	95.62	119.53
	As2	cm <sup>2</sup>	59.76	68.30	79.69	95.62	119.53
Σ (As1, As2)		cm <sup>2</sup>	119.53	136.60	159.37	191.24	239.06
鉄筋比		%	0.90	1.02	1.19	1.43	1.79
ひび割れ幅	w	mm	0.280	0.260	0.240	0.180	0.160

6) 鉄筋径を一定としてかぶりを変更した場合 (かぶり 66.5mm)

			Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
床版幅	BS	cm	417.20	417.20	417.20	417.20	417.20
床版厚	d	cm	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00
床版断面積	Ac	cm <sup>2</sup>	13350.40	13350.40	13350.40	13350.40	13350.40
鉄筋間隔		cm	20.00	17.50	15.00	12.50	10.00
鉄筋本数	n	本	20.86	23.84	27.81	33.38	41.72
鉄筋径	φ	mm	D19	D19	D19	D19	D19
	As	cm <sup>2</sup>	2.865	2.865	2.865	2.865	2.865
	As1	cm <sup>2</sup>	59.76	68.30	79.69	95.62	119.53
	As2	cm <sup>2</sup>	59.76	68.30	79.69	95.62	119.53
Σ (As1, As2)		cm <sup>2</sup>	119.53	136.60	159.37	191.24	239.06
鉄筋比		%	0.895	1.023	1.194	1.433	1.791
ひび割れ幅	w	mm	0.370	0.290	0.230	0.180	0.140

## 2. JH式

### (1) ひび割れ幅の計算式

$$w = k \times \{4 \times C + 0.7 \times (C_s - \phi)\} \times (\sigma_{se} / E_s + \varepsilon_{csd})$$

$$\sigma_{se} = \sigma_s - \beta \times \sigma_{ct} \times \{1 / \rho - 1 / (\rho \times \alpha_{st})\} \quad \text{ただし, } \alpha_{st} > 1$$

- w : 発生ひび割れ幅 (mm)  
k : 鉄筋の付着性状を表す定数で、異型鉄筋の場合は1.0  
C<sub>s</sub> : ひび割れに抵抗する鉄筋の純かぶり (mm)  
C<sub>s</sub> : 鉄筋の中心間隔 (mm)  
φ : 鉄筋径 (mm)  
σ<sub>se</sub> : テンションスティフニングを考慮した鉄筋平均応力度 (N/mm<sup>2</sup>)  
E<sub>s</sub> : 鉄筋のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)  
ε<sub>csd</sub> : 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で150μmとしてよい。  
σ<sub>s</sub> : I f (鋼桁+鉄筋) 断面で算出される鉄筋応力度 (N/mm<sup>2</sup>)  
β : テンションスティフニングによる付着の程度を表わす係数で0.2としてよい。  
σ<sub>ct</sub> : コンクリート有効引張強度 (σ<sub>ck</sub>=40N/mm<sup>2</sup>に対してσ<sub>ct</sub>=2.5N/mm<sup>2</sup>)  
ρ : 鉄筋比  
α<sub>st</sub> : (鋼桁+鉄筋断面のA・I<sub>f</sub>) / 鋼桁断面のA・I<sub>s</sub>

#### [特徴]

- 1) 基本は土木学会式である。違いは、コンクリートがある程度の引張力を分担できると考え、鉄筋の平均応力度を求めている点にある。

(2) 計算結果

1) 鉄筋比を一定とした場合 (かぶり 56.5mm)

		単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径	$\phi$	mm	13	16	19	22	25
鉄筋間隔	Cs	mm	125	125	125	125	125
鉄筋比	$\mu$	—	0.634	0.993	1.433	1.936	2.534
純かぶり	c	mm	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5
	$\sigma_s$	N/mm <sup>2</sup>	72.91	66.95	60.88	55.17	49.66
	$\sigma_{se}$	N/mm <sup>2</sup>	60.39	55.46	50.45	45.73	41.18
	A·If	m6	0.03635	0.03962	0.04362	0.04821	0.05365
	A·Is	m6	0.03058	0.03058	0.03058	0.03058	0.03058
ひび割れ間隔	L		304.4	302.3	300.2	298.1	296.0
鉄筋のひずみ	$\epsilon$		0.000452	0.000427	0.000402	0.000379	0.000356
ひび割れ幅	w	mm	0.138	0.129	0.121	0.113	0.105

2) 鉄筋比を一定としてかぶりを変更した場合 (かぶり 66.5mm)

		単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径	$\phi$	mm	13	16	19	22	25
鉄筋間隔	Cs	mm	52.8	82.75	119.4	161.3	211.1
鉄筋比	$\mu$	%	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
純かぶり	c	mm	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5
	$\sigma_s$	N/mm <sup>2</sup>	59.81	59.76	59.71	59.65	59.60
	$\sigma_{se}$	N/mm <sup>2</sup>	49.52	49.47	49.42	49.36	49.31
	A·If	m6	0.04423	0.04424	0.04423	0.04423	0.04424
	A·Is	m6	0.03058	0.03058	0.03058	0.03058	0.03058
ひび割れ間隔	L		293.9	312.7	336.3	363.5	396.3
鉄筋のひずみ	$\epsilon$		0.000398	0.000397	0.000397	0.000397	0.000397
ひび割れ幅	w	mm	0.117	0.124	0.134	0.144	0.157

3) 鉄筋間隔を一定とした場合 (かぶり 56.5mm)

		単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径	$\phi$	mm	13	16	19	22	25
鉄筋間隔	Cs	mm	125	125	125	125	125
鉄筋比	$\mu$	—	0.634	0.993	1.433	1.936	2.534
純かぶり	c	mm	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5
	$\sigma_s$	N/mm <sup>2</sup>	72.91	66.95	60.88	55.17	49.66
	$\sigma_{se}$	N/mm <sup>2</sup>	60.39	55.46	50.45	45.73	41.18
	A·If	m6	0.03635	0.03962	0.04362	0.04821	0.05365
	A·Is	m6	0.03058	0.03058	0.03058	0.03058	0.03058
ひび割れ間隔	L		304.4	302.3	300.2	298.1	296.0
鉄筋のひずみ	$\varepsilon$		0.000452	0.000427	0.000402	0.000379	0.000356
ひび割れ幅	w	mm	0.138	0.129	0.121	0.113	0.105

4) 鉄筋間隔を一定としてかぶりを変更した場合 (かぶり 66.5mm)

		単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径	$\phi$	mm	13	16	19	22	25
鉄筋間隔	Cs	mm	125	125	125	125	125
鉄筋比	$\mu$	—	0.634	0.993	1.433	1.936	2.534
純かぶり	c	mm	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5
	$\sigma_s$	N/mm <sup>2</sup>	72.51	66.57	60.53	54.84	49.35
	$\sigma_{se}$	N/mm <sup>2</sup>	59.99	55.08	50.10	45.40	40.87
	A·If	m6	0.03635	0.03962	0.04362	0.04820	0.05364
	A·Is	m6	0.03058	0.03058	0.03058	0.03058	0.03058
ひび割れ間隔	L		344.4	342.3	340.2	338.1	336.0
鉄筋のひずみ	$\varepsilon$		0.000450	0.000425	0.000401	0.000377	0.000354
ひび割れ幅	w	mm	0.155	0.145	0.136	0.127	0.119

5) 鉄筋径を一定とした場合 (かぶり 56.5mm)

		単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径	$\phi$	mm	19	19	19	19	19
鉄筋間隔	Cs	mm	200	175	150	125	100
鉄筋比	$\mu$	—	0.895	1.023	1.194	1.433	1.791
純かぶり	c	mm	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5
	$\sigma_s$	N/mm <sup>2</sup>	68.40	66.44	64.00	60.88	56.74
	$\sigma_{se}$	N/mm <sup>2</sup>	56.64	55.02	53.02	50.45	47.03
	A·If	m6	0.03873	0.03990	0.04145	0.04362	0.04689
	A·Is	m6	0.03058	0.03058	0.03058	0.03058	0.03058
ひび割れ間隔	L		352.7	335.2	317.7	300.2	282.7
鉄筋のひずみ	$\epsilon$		0.000433	0.000425	0.000415	0.000402	0.000385
ひび割れ幅	w	mm	0.153	0.142	0.132	0.121	0.109

6) 鉄筋径を一定としてかぶりを変更した場合 (かぶり 66.5mm)

		単位	Case-6	Case-7	Case-8	Case-9	Case-10
鉄筋径	$\phi$	mm	19	19	19	19	19
鉄筋間隔	Cs	mm	200	175	150	125	100
鉄筋比	$\mu$	—	0.895	1.023	1.194	1.433	1.791
純かぶり	c	mm	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5
	$\sigma_s$	N/mm <sup>2</sup>	68.02	66.07	63.64	60.53	56.40
	$\sigma_{se}$	N/mm <sup>2</sup>	56.26	54.66	52.66	50.10	46.69
	A·If	m6	0.03873	0.03989	0.04145	0.04362	0.04688
	A·Is	m6	0.03058	0.03058	0.03058	0.03058	0.03058
ひび割れ間隔	L		392.7	375.2	357.7	340.2	322.7
鉄筋のひずみ	$\epsilon$		0.000431	0.000423	0.000413	0.000401	0.000383
ひび割れ幅	w	mm	0.169	0.159	0.148	0.136	0.124

### 3. 土木学会式

#### (1) ひび割れ幅の計算式

$$w = \frac{1.1 \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times (4C + 0.7 \times (C_s - \phi)) \times (\sigma_{se} / E_s + \varepsilon'_{csd})}{\text{ひび割れ間隔 } L \quad \text{鉄筋のひずみ } \varepsilon}$$

w : ひび割れ幅

k<sub>1</sub> : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす係数 異形鉄筋の場合は1.0, 普通丸鋼及びPC鋼材の場合は1.3としてよい.

k<sub>2</sub> : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす係数

$$k_2 = 15 / (f'_{c'} + 20) + 0.7$$

f'\_{c'} : 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 f'\_{cd} を用いて良い.

k<sub>3</sub> : 引張鋼材の段数の影響を表す係数

$$k_3 = 5(n+2) / (7n+8)$$

n : 引張鋼材の段数

C : 鉄筋のかぶり(mm)

C<sub>s</sub> : 鉄筋の中心間隔(mm)

φ : 鉄筋径(mm)

σ<sub>se</sub> : 鉄筋応力度の増加量(N/mm<sup>2</sup>)

E : 鉄筋のヤング係数 200kN/mm<sup>2</sup>

ε'\_{csd} : コンクリートの収縮, クリーブ等によるひび割れ幅の増加を増加を考慮するための数値. 一般の場合 ε'\_{csd} = 150 μ としてよい.

#### [特徴]

- 1) 基本的な考え方は, 「ひび割れ幅 = ひび割れ間隔 × 鉄筋のひずみ」である.
- 2) パラメータとして, 鉄筋およびコンクリートの引張強度が入っていないため, 高張力異形鉄筋には対応していない.
- 3) 同一断面で径が異なる鉄筋を使用する際には対応できない.
- 4) ε'\_{csd}の値については, ひび割れ幅の算定に与える影響が大きいにもかかわらず, 基礎となるデータが少ない. したがって, その値については今後さらに検討を要する.
- 5) 鉄筋径が太くなる程, 鉄筋間隔が広くなる程, ひび割れ間隔が広くなる.

(2) 計算結果

1) 鉄筋比を一定とした場合 (かぶり 56.5mm)

	単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
C	mm	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5
Cs	mm	52.8	82.75	119.4	161.3	211.1
$\phi$	mm	13	16	19	22	25
$\sigma_{se}$	N/mm <sup>2</sup>	60.16	60.10	60.06	60.00	59.95
L	mm	253.86	272.73	296.28	323.51	356.27
$\epsilon$		0.00045	0.00045	0.00045	0.00045	0.00045
k1		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
k2		0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
k3		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
w	mm	0.13	0.13	0.15	0.16	0.18

2) 鉄筋比を一定としてかぶりを変更した場合 (かぶり 66.5mm)

		Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
C	mm	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5
Cs	mm	52.8	82.75	119.4	161.3	211.1
$\phi$	mm	13	16	19	22	25
$\sigma_{se}$	N/mm <sup>2</sup>	59.81	59.76	59.71	59.65	59.60
L	mm	293.86	312.73	336.28	363.51	396.27
$\epsilon$		0.00045	0.00045	0.00045	0.00045	0.00045
k1		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
k2		0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
k3		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
w	mm	0.14	0.15	0.17	0.18	0.19

3) 鉄筋間隔を一定とした場合 (かぶり 56.5mm)

		Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
C	mm	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5
Cs	mm	125	125	125	125	125
$\phi$	mm	13	16	19	22	25
$\sigma_{se}$	N/mm <sup>2</sup>	72.91	66.95	60.88	55.17	49.66
L	mm	304.40	302.30	300.20	298.10	296.00
$\epsilon$		0.00051	0.00048	0.00045	0.00043	0.00040
k1		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
k2		0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
k3		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
w	mm	0.17	0.16	0.15	0.14	0.13

4) 鉄筋間隔を一定としてかぶりを変更した場合 (かぶり 66.5mm)

		Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
C	mm	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5
Cs	mm	125	125	125	125	125
$\phi$	mm	13	16	19	22	25
$\sigma_{se}$	N/mm <sup>2</sup>	72.51	66.57	60.53	54.84	49.35
L	mm	344.40	342.30	340.20	338.10	336.00
$\epsilon$		0.00051	0.00048	0.00045	0.00042	0.00040
k1		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
k2		0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
k3		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
w	mm	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15

5) 鉄筋径を一定とした場合 (かぶり 56.5mm)

		Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
C	mm	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5
C s	mm	200	175	150	125	100
$\phi$	mm	19	19	19	19	19
$\sigma_{se}$	N/mm <sup>2</sup>	68.40	66.44	64.00	60.88	56.74
L	mm	352.70	335.20	317.70	300.20	282.70
$\epsilon$		0.00049	0.00048	0.00047	0.00045	0.00043
k1		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
k2		0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
k3		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
w	mm	0.19	0.18	0.16	0.15	0.13

6) 鉄筋径を一定としてかぶりを変更した場合 (かぶり 66.5mm)

		Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
C	mm	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5
C s	mm	200	175	150	125	100
$\phi$	mm	19	19	19	19	19
$\sigma_{se}$	N/mm <sup>2</sup>	68.02	66.07	63.64	60.53	56.40
L	mm	392.70	375.20	357.70	340.20	322.70
$\epsilon$		0.00049	0.00048	0.00047	0.00045	0.00043
k1		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
k2		0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
k3		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
w	mm	0.21	0.20	0.18	0.17	0.15

#### 4. アメリカ：ACI 基準 (ACI318-71) によるひび割れ幅の計算

##### (1) ひび割れ幅の計算式

$$w = k \times \beta \times \sigma_s \times \sqrt[3]{(dc \times A)} \times 10^{-3}$$

$w$  : はり底面における最大ひび割れ幅 (in)

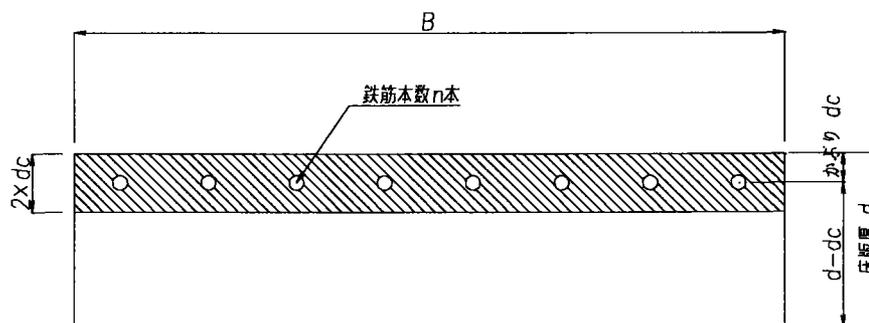
$k$  : 0.076

$\beta$  : はり底面から中立軸までの距離  $h_2$  の, 鉄筋重心から中立軸  $h_1$  に対する比 --> 一般に設計のための簡略化で  $\beta = 1.2$  で計算

$\sigma_s$  : 鉄筋応力度 (ksi)

$dc$  : 引張縁からそこに最も近い鉄筋中心までのコンクリートのかぶり (in)

$A$  : 鉄筋中心に対称にとったコンクリート引張り有効断面積を鉄筋本数で割ったもの (in<sup>2</sup>)



$$A = B \times (2 \times dc) / n$$

##### [特徴]

- 1) 鉄筋位置の発生応力度が同程度であれば、鉄筋径を小さくして密に鉄筋を配置した方が、ひび割れ幅が小さくなる (上式Aを小さくできる)。
- 2) かぶり ( $dc$ ) が大きくなるほどひび割れ幅が大きくなる ( $dc$  の  $1/3$  乗に比例してひび割れ幅が増加)。

-->「鉄筋のかぶりは鉄筋コンクリート部材の耐久性の観点から別の要因によって定められ (ACI 基準では 7.14. 項にかぶりの規定がある), また, 必要以上のおおきなかぶりはその有効性が疑問視されるところの問題もあるため, 上式はかぶりとの関連で議論するよりも鉄筋本数  $n$  と関連させて議論するのが妥当である」との記述有り。

## (2) 計算結果

## 1) 鉄筋比を一定とした場合 (かぶり 56.5mm)

	単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径	—	D13	D16	D19	D22	D25
鉄筋間隔	—	52.8	82.75	119.4	161.3	211.1
鉄筋比 $\mu$	—	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
断面幅 B	mm	52.8	82.75	119.4	161.3	211.1
	In	2.079	3.258	4.701	6.350	8.311
かぶり dc	mm	63.0	64.5	66.0	67.5	69.0
	In	2.480	2.539	2.598	2.658	2.717
鉄筋本数 n	本	1	1	1	1	1
$A=(B \times 2 \times dc/n)$	In <sup>2</sup>	10.312	16.544	24.426	33.757	45.162
$\beta$	—	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
$\sigma_s$	kgf/cm <sup>2</sup>	590	589	589	588	588
	ksi	8.392	8.377	8.377	8.363	8.363
k	—	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076
ひび割れ幅 w	In	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004
	mm	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10

## 2) 鉄筋比を一定としてかぶりを変更した場合 (かぶり 66.5mm)

	単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径	—	D13	D16	D19	D22	D25
鉄筋間隔	—	52.8	82.75	119.4	161.3	211.1
鉄筋比 $\mu$	—	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
断面幅 B	mm	52.8	82.75	119.4	161.3	211.1
	In	2.079	3.258	4.701	6.350	8.311
かぶり dc	mm	73.0	74.5	76.0	77.5	79.0
	In	2.874	2.933	2.992	3.051	3.110
鉄筋本数 n	本	1	1	1	1	1
$A=(B \times 2 \times dc/n)$	In <sup>2</sup>	11.950	19.111	28.131	38.748	51.694
$\beta$	—	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
$\sigma_s$	kgf/cm <sup>2</sup>	586	586	585	585	584
	ksi	8.335	8.335	8.321	8.321	8.306
k	—	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076
ひび割れ幅 w	In	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004
	mm	0.06	0.07	0.08	0.10	0.11

3) 鉄筋間隔を一定とした場合 (かぶり 56.5mm)

	単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径	—	D13	D16	D19	D22	D25
鉄筋間隔	—	125	125	125	125	125
鉄筋比 $\mu$	—	0.634	0.993	1.433	1.936	2.534
断面幅 B	mm	125	125	125	125	125
	In	4.921	4.921	4.921	4.921	4.921
かぶり dc	mm	63	64.5	66	67.5	69
	In	2.480	2.539	2.598	2.658	2.717
鉄筋本数 n	本	1	1	1	1	1
$A=(B \times 2 \times dc/n)$	In <sup>2</sup>	24.408	24.989	25.570	26.160	26.741
$\beta$	—	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
$\sigma_s$	kgf/cm <sup>2</sup>	715	656	597	541	487
	ksi	10.170	9.330	8.491	7.695	6.927
k	—	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076
ひび割れ幅	In	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003
w	mm	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07

4) 鉄筋間隔を一定としてかぶりを変更した場合 (かぶり 66.5mm)

	単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径	—	D13	D16	D19	D22	D25
鉄筋間隔	—	125.0	125	125	125	125
鉄筋比 $\mu$	—	0.634	0.993	1.433	1.936	2.534
断面幅 B	mm	125.0	125	125	125	125
	In	4.921	4.921	4.921	4.921	4.921
かぶり dc	mm	73.0	74.5	76	77.5	79
	In	2.874	2.933	2.992	3.051	3.110
鉄筋本数 n	本	1	1	1	1	1
$A=(B \times 2 \times dc/n)$	In <sup>2</sup>	28.286	28.867	29.447	30.028	30.609
$\beta$	—	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
$\sigma_s$	kgf/cm <sup>2</sup>	711	652	593	537	484
	ksi	10.113	9.273	8.434	7.638	6.884
k	—	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076
ひび割れ幅 w	In	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
	mm	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07

5) 鉄筋径を一定とした場合 (かぶり 56.5mm)

	単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径	—	D19	D19	D19	D19	D19
鉄筋間隔	—	200	175	150	125	100
鉄筋比 $\mu$	—	0.895	1.023	1.194	1.433	1.791
断面幅 B	mm	200	175	150	125	100
	In	7.874	6.890	5.906	4.921	3.937
かぶり dc	mm	66	66	66	66	66
	In	2.598	2.598	2.598	2.598	2.598
鉄筋本数 n	本	1	1	1	1	1
$A=(B \times 2 \times dc/n)$	In <sup>2</sup>	40.913	35.800	30.688	25.570	20.457
$\beta$	—	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
$\sigma_s$	kgf/cm <sup>2</sup>	670	651	627	597	556
	ksi	9.529	9.259	8.918	8.491	7.908
k	—	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076
ひび割れ幅	In	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003
w	mm	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07

6) 鉄筋径を一定としてかぶりを変更した場合 (かぶり 66.5mm)

	単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径	—	D19	D19	D19	D19	D19
鉄筋間隔	—	200	175	150	125	100
鉄筋比 $\mu$	—	0.895	1.023	1.194	1.433	1.791
断面幅 B	mm	200	175	150	125	100
	In	7.874	6.89	5.906	4.921	3.937
かぶり dc	mm	76	76	76	76	76
	In	2.992	2.992	2.992	2.992	2.992
鉄筋本数 n	本	1	1	1	1	1
$A=(B \times 2 \times dc/n)$	In <sup>2</sup>	47.118	41.23	35.342	29.447	23.559
$\beta$	—	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
$\sigma_s$	kgf/cm <sup>2</sup>	667	647	624	593	553
	ksi	9.487	9.202	8.875	8.434	7.865
k	—	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076
ひび割れ幅	In	0.004503	0.004178	0.003827	0.003423	0.002963
w	mm	0.11	0.11	0.10	0.09	0.08

## 5. ヨーロッパコンクリート委員会：CEB-FIPによるひび割れ幅の計算

### (1) ひび割れ幅の計算式

$$w_{\max} = (1.50c + 16\phi / p_f) \times \sigma_s \times 10^{-7}$$

$w_{\max}$  : ひびわれ幅の最大値及び制限値 (mm)

$c$  : かぶり (mm)

$\phi$  : 鉄筋直径 (mm)

$\sigma_s$  : ひびわれの生じた断面での鋼材応力度 (N/cm<sup>2</sup>)

$p_f$  : ひびわれの影響を受けるコンクリートの断面に対する鉄筋比であり、

$$p_f = 100 A_s / B_f$$

$p_0$  : コンクリートの断面に対する鉄筋比であり、 $p_0 = 100 A_s / 4 B_t$

$B_f$  : 引張部材では、 $B_f = B_t$  (部材断面積)

### [特徴]

- 1) 本式は、最大値で、100回以上の繰返し作用を受ける場合に適用する。
- 2) 本式は、異形鉄筋を使用した「はり」についての試験結果の解析によって、妥当性の検討をしている。
- 3) ひび割れ幅は、鉄筋径と鋼材応力度に比例し鉄筋比に反比例する。また、1本当りの鉄筋径が大きい場合、付着が切れる時のひび割れ幅が大きくなる。

(2) 計算結果

1) 鉄筋比を一定とした場合 (かぶり 56.5mm)

	単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径 $\phi$	—	D13	D16	D19	D22	D25
鉄筋間隔	—	52.8	82.75	119.4	161.3	211.1
鉄筋比 $p_0$	—	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
かぶり $c$	mm	63.0	64.5	66.0	67.5	69.0
$p_f$		6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
$\sigma_s$	N/cm <sup>2</sup>	6016	6010	6060	6000	5995
ひび割れ幅	mm	0.078	0.084	0.091	0.096	0.102

2) 鉄筋比を一定でかぶりを変更した場合 (かぶり 66.5mm)

	単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径 $\phi$	—	D13	D16	D19	D22	D25
鉄筋間隔	—	52.8	82.75	119.4	161.3	211.1
鉄筋比 $p_0$	—	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
かぶり $c$	mm	73.0	74.5	76.0	77.5	79.0
$p_f$		6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
$\sigma_s$	N/cm <sup>2</sup>	5981	5976	5971	5965	5960
ひび割れ幅	mm	0.086	0.092	0.098	0.104	0.110

3) 鉄筋間隔を一定とした場合 (かぶり 56.5mm)

	単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径 $\phi$	—	D13	D16	D19	D22	D25
鉄筋間隔	—	125	125	125	125	125
鉄筋比 $p_o$	—	0.634	0.993	1.433	1.936	2.534
かぶり $c$	mm	63	64.5	66	67.5	69
$p_f$		2.536	3.972	5.732	7.744	10.136
$\sigma_s$	N/cm <sup>2</sup>	7291	6695	6088	5517	4966
ひび割れ幅	mm	0.129	0.108	0.093	0.081	0.071

4) 鉄筋間隔を一定でかぶりを変更した場合 (かぶり 66.5mm)

	単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径 $\phi$	—	D13	D16	D19	D22	D25
鉄筋間隔	—	125	125	125	125	125
鉄筋比 $p_o$	—	0.634	0.993	1.433	1.936	2.534
かぶり $c$	mm	73.0	74.5	76.0	77.5	79.0
$p_f$		2.536	3.972	5.732	7.744	10.136
$\sigma_s$	N/cm <sup>2</sup>	7251	6657	6053	5484	4935
ひび割れ幅	mm	0.139	0.117	0.101	0.089	0.078

5) 鉄筋径を一定とした場合 (かぶり 56.5mm)

	単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径 $\phi$	—	D19	D19	D19	D19	D19
鉄筋間隔	—	200	175	150	125	100
鉄筋比 $p_0$	—	0.895	1.023	1.194	1.433	1.791
かぶり $c$	mm	63	64.5	66	67.5	69
$p_f$		3.580	4.092	4.776	5.732	7.164
$\sigma_s$	N/cm <sup>2</sup>	6840	6644	6400	6088	5674
ひび割れ幅	mm	0.126	0.115	0.104	0.093	0.080

6) 鉄筋径を一定としてかぶりを変更した場合 (かぶり 66.5mm)

	単位	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
鉄筋径 $\phi$	—	D19	D19	D19	D19	D19
鉄筋間隔	—	200	175	150	125	100
鉄筋比 $p_0$	—	0.895	1.023	1.194	1.433	1.791
かぶり $c$	mm	73.0	74.5	76.0	77.5	79.0
$p_f$		3.580	4.092	4.776	5.732	7.164
$\sigma_s$	N/cm <sup>2</sup>	6802	6607	6364	6053	5640
ひび割れ幅	mm	0.135	0.124	0.113	0.101	0.088

### 2.3.4 計算結果の比較と考察

連続合成桁の中間支点上の床版について、鉄筋比を一定とし、鉄筋径・鉄筋間隔をパラメータとした床版のひび割れ計算を実施した結果を図-2.3.4、図-2.3.5に、また、鉄筋間隔を一定とし、鉄筋比をパラメータとした計算結果を図-2.3.6、図-2.3.7に示す。

ひび割れ幅の算出方法は、ハンスビル方式、土木学会方式、JH方式、CEB-FIP方式、ACI方式に着目し比較を行なった。

#### 1. 鉄筋径比較

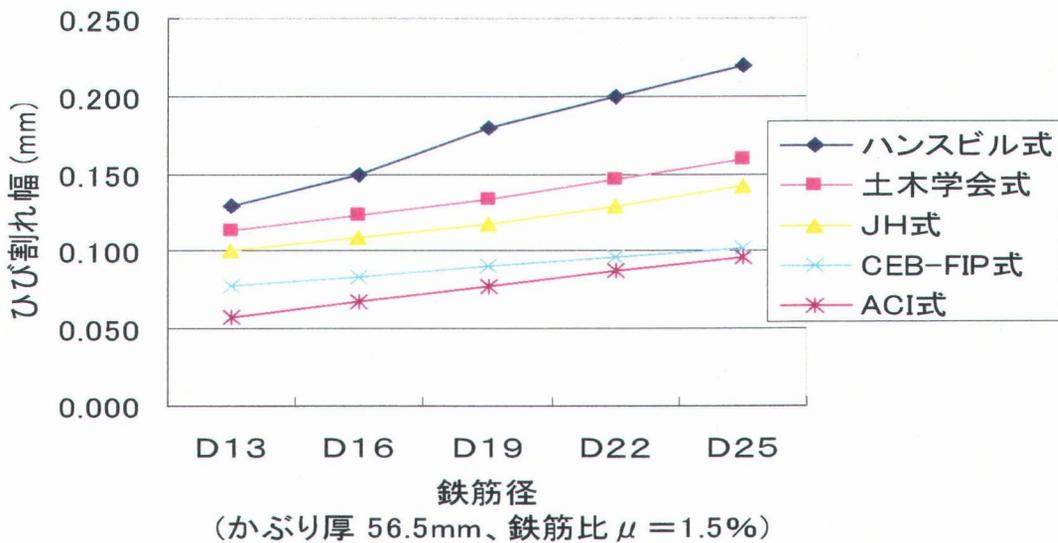


図-2.3.4 ひび割れ幅 (鉄筋比一定)

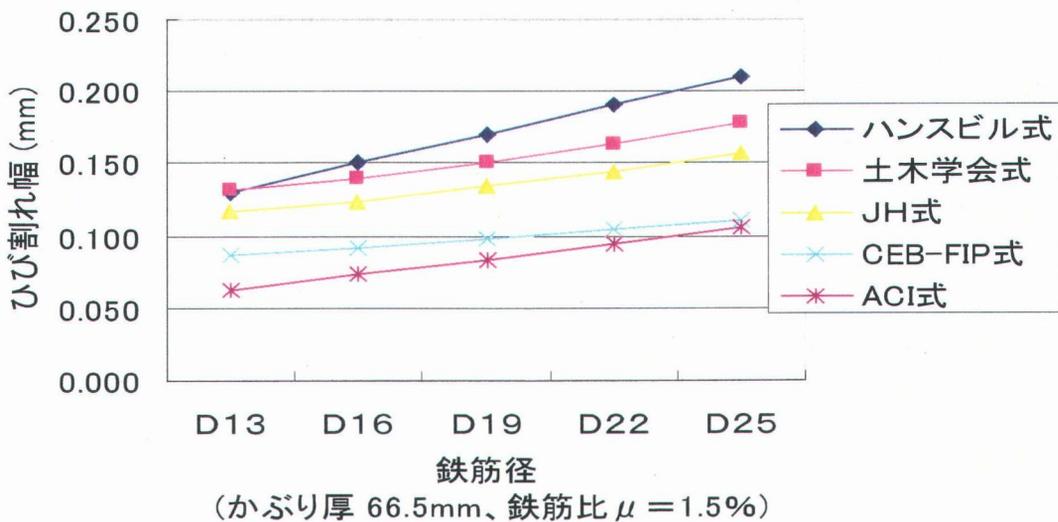


図-2.3.5 ひび割れ幅 (鉄筋比一定)

図-2.3.4, 図-2.3.5 より, 全体的に, 鉄筋比一定の場合鉄筋径が大きくなるにしたがい, ひび割れ幅が増大する傾向がある。

グラフの傾きは, ハンスビレ式の場合他の計算式に比べて大きく, 逆にCEB-FIP式は小さい結果となった。このことから, 同じ鉄筋比であれば, ハンスビレ式は比較的鉄筋径の影響を受けやすく, CEB-FIP式は鉄筋径の影響を受けにくいといえる。

土木学会式, JH式においては, 算定式の基本式が同じであるためグラフの傾きも同じであるが, JH式はテンションスティフニングを考慮しているため, 鉄筋応力度が土木学会式よりも小さくなりひび割れ幅も小さくなったと考えている。

絶対的なひび割れ幅の大きさは, かぶり厚が 56.5mm, 66.5mm 共に

ハンスビレ式>土木学会式>JH式>CEB-FIP式>ACI式

の順であった。

2. 鉄筋比比較

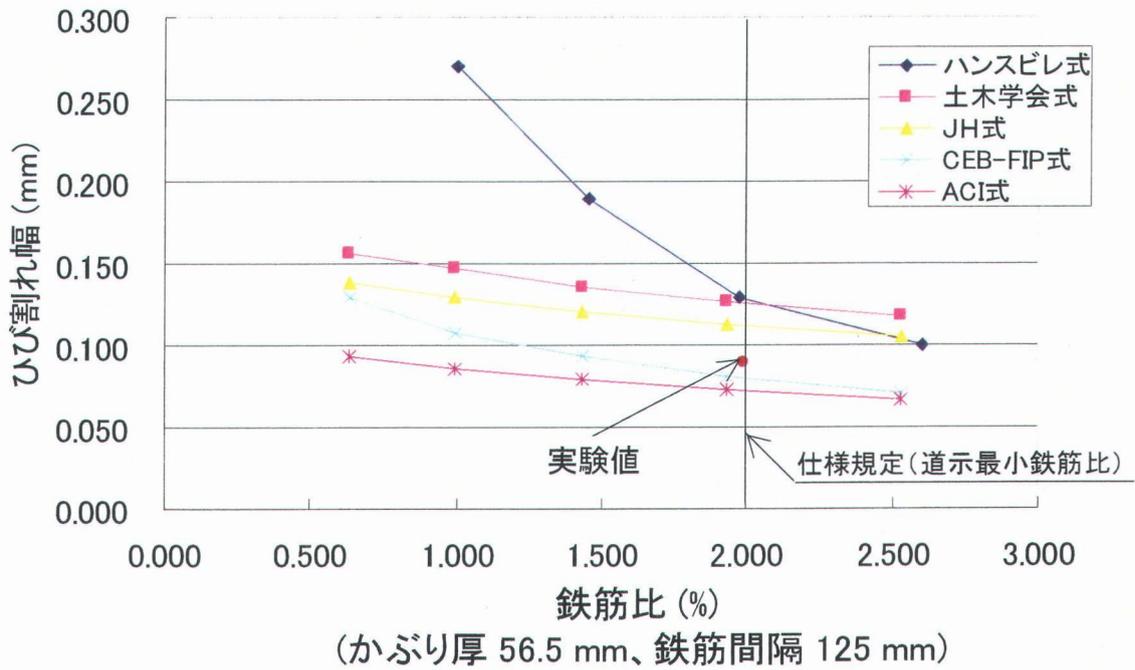


図-2.3.6 ひび割れ幅 (鉄筋間隔一定)

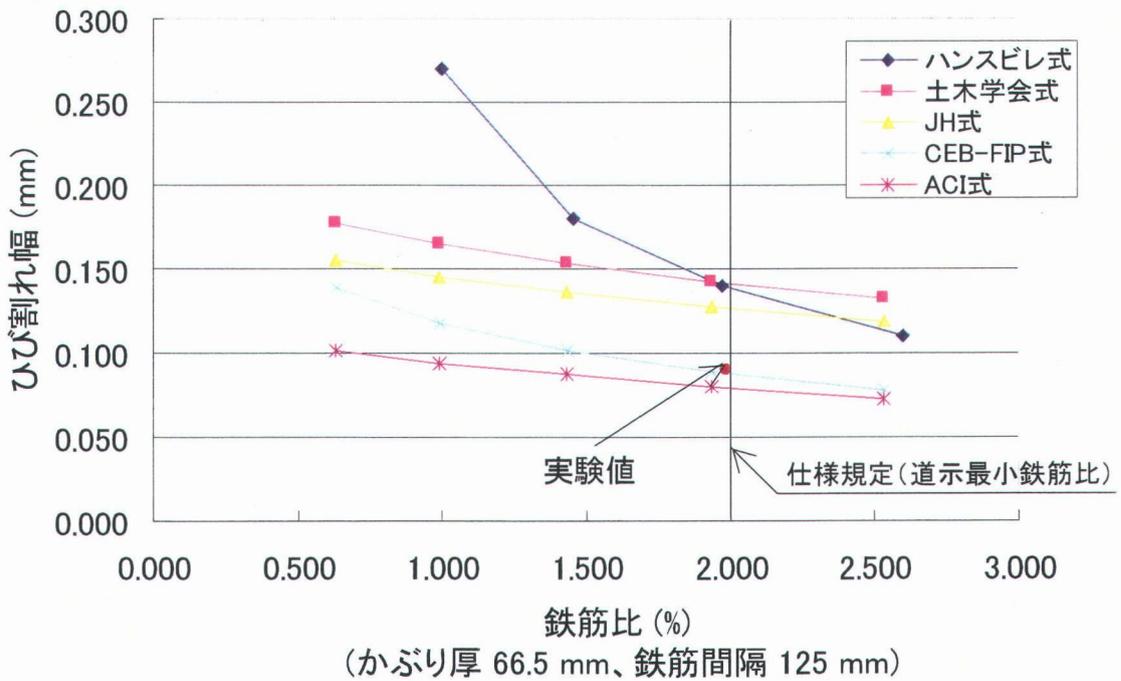


図-2.3.7 ひび割れ幅 (鉄筋間隔一定)

図-2.3.6, 図-2.3.7より, 全体的に鉄筋間隔を一定とし鉄筋比をパラメータとした場合, 鉄筋比が増加するに従いひび割れ幅は小さくなる. これは鉄筋量が増加したため, 鉄筋応力度が減少したことに起因する.

ひび割れ幅が減少する割合は, 土木学会式, JH式, ACI式ではほぼ一定であったが, CEB-FIP式, ハンスビレ式では前述の3式に比べて大きい. ハンスビレ式では鉄筋比 0.638 (D13) から鉄筋比 1.003 (D16) 間は適用外の結果となり省略した. その後の減少率は他に比べ大きい.

ハンスビレ式が床版に着目した算定式であるのに対し, 他の4式は, RC柱等RC構造に対する算定式である. また, ACI式は建築構造物も含め適用されている評価式で, 小断面柱のデータも含んでいる.

以上からハンスビレ式は, 床版の配力筋としてあまり使用されていない D13 の細径鉄筋には適用できず, 注意が必要である.

土木学会式とJH式については, 鉄筋比を大きくすることによってひび割れ間隔は共に大きくなるが, 鉄筋応力度の減少によってひび割れ幅は小さくなっていく. 両式は算定式の基本式が同じものを用いているため近い値となっているが, JH式において鉄筋応力度にテンションステイフニングを考慮しているため, 土木学会式よりひび割れ幅は小さくなっている.

ハンスビレを除く絶対的なひび割れ幅の大きさは, かぶり厚が 56.5mm・66.5mm 共に土木学会式>JH式>CEB-FIP式>ACI式の順であった.

道路橋示方書の仕様規定である最小鉄筋比 2.0%について, ひび割れ幅を比較する. かぶり厚 56.5mm の場合ひび割れ幅は 0.07mm~0.13mm, かぶり厚 66.5mm の場合ひび割れ幅は 0.08mm~0.15mm と, 最大ひび割れ幅は 0.15mm 以下となっている. なお, ひび割れ幅 0.15mm はコンクリート標準示方書設計編 (第7章) において高い水密性を確保する場合の許容ひび割れ幅 0.1mm と, 一般の水密性を確保する場合の許容ひび割れ幅 0.2mm の中間の値である.

また, 図-2.3.6, 図-2.3.7に示す●印は, 連続合成桁の実験値<sup>1)</sup>を示す. なお, この実験値は, 鉄筋比 1.99%, かぶり厚 37mm の実験で得られたひび割れ幅 0.09mm である.

### 3. かぶり厚比較

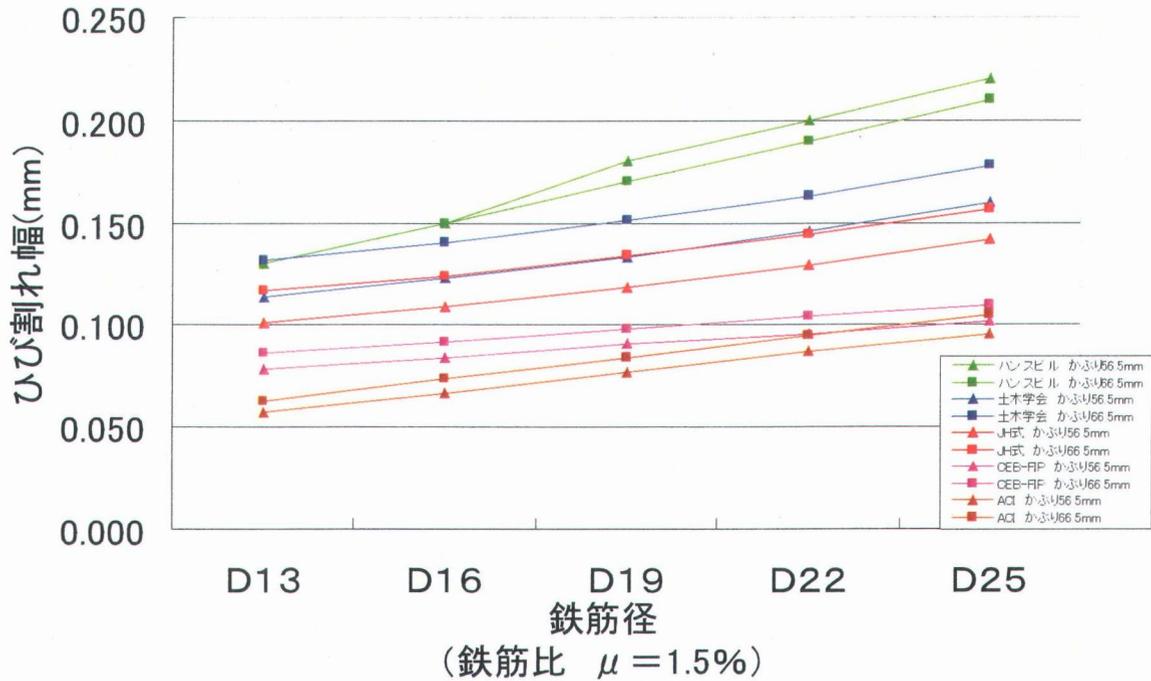


図-2.3.8 ひび割れ幅 かぶり厚比較 (鉄筋比一定)

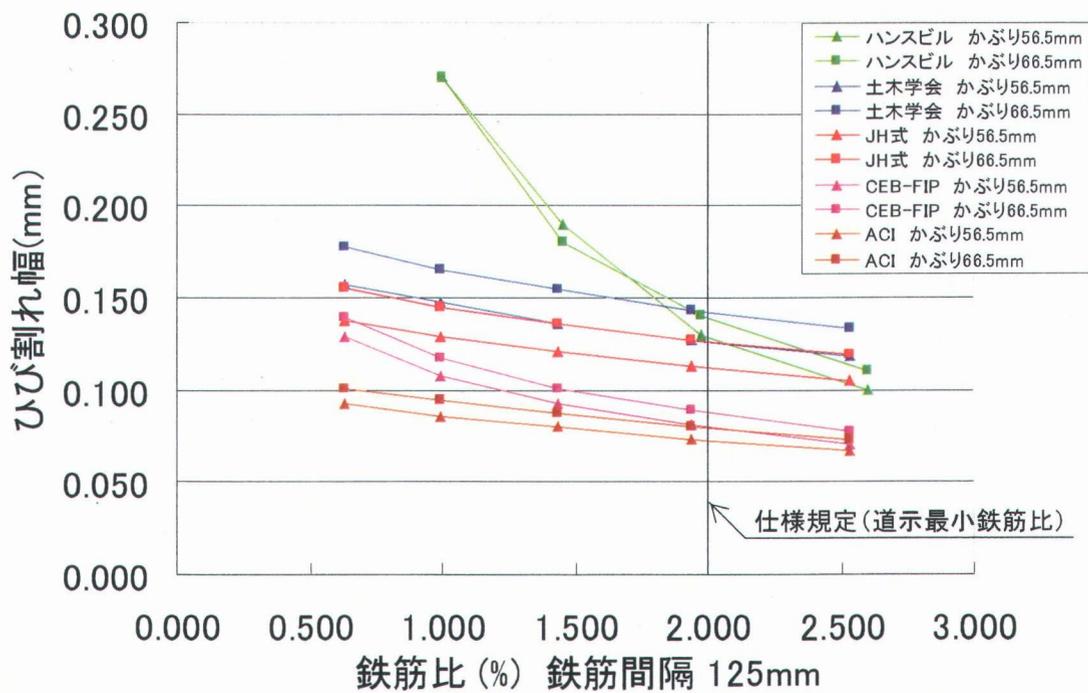


図-2.3.9 ひび割れ幅 かぶり厚比較 拡大図 (鉄筋間隔一定)

図-2.3.8 は鉄筋比を一定とし鉄筋径をパラメータとした場合、かぶり 56.5mm とかぶり 66.5mm のひび割れ幅を比較したグラフである。図中の▲印はかぶり 56.5mm，■印はかぶり 66.5mm を示す。

同様に、図-2.3.9 は鉄筋間隔を一定とし鉄筋比をパラメータとした場合、かぶり 56.5mm とかぶり 66.5mm のひび割れ幅を比較したグラフである。

ハンスビレ式を除き、かぶり 66.5mm のひび割れ幅はかぶり 56.5mm に比べ大きくなっている。これはこの 4 式が、RC 柱等 RC 構造に曲げモーメントが作用した場合のひび割れ幅を想定していることに起因している。一方、ハンスビレ式は、床版のみに適用する式で、実構造の床版は上下面で多少応力勾配はあるものの、上下面で応力一定とした軸引張力に起因すると考えられる。

### <参考文献>

- [1] 木水隆夫，新井恵一，春日井俊博，永田淳，長井正嗣：連続合成桁における合成床版のひび割れ性状に関する実験，構造工学論文集，Vol.48A,pp1417-1427,2002 年 3 月

## 2.4 まとめ

「2.2 仕様規定によるひび割れ制御」では、①道示 II に示される「最小鉄筋量 2%」「鉄筋の周長率  $0.0045\text{mm}/\text{mm}^2$  以上」の規定は床版表面の「ひびわれ幅  $0.2\text{mm}$  以下」を守るための仕様規定であること、②床版表面の「ひび割れ幅  $0.2\text{mm}$  以下」は複数の実験により、床版中の鉄筋の健全性が確認されている仕様であることが示された。

しかし、これらは比較的古くからある知見に基づくものであり、最近の研究では新しい指標に基づく評価方法が示されている。すなわち、2002 年度制定コンクリート標準示方書構造性能照査編（土木学会）では「鋼材の腐食」「水密性」「耐久性」に着目し、それぞれ「環境条件、かぶり、鋼材の種類」「構造物の使用条件、作用荷重特性」「鋼材位置の塩化物イオン濃度、中性化深さ」を指標とすることが示されており、注意が必要である。

すなわち、コンクリート標準示方書では下記の点が指摘されている。

- ① コンクリートの耐久性に最も大きく関与するのは鋼材の腐食である。
- ② 鋼材の腐食には環境条件が大きく作用する。よって、3 段階の環境条件区分を設け、それぞれに対して許容ひび割れ幅を設定する。（表-2.4.1, 表-2.4.2）
- ③ 鋼材の腐食には環境条件の他、かぶりが影響する。よって、許容ひび割れ幅算出式のパラメータには鉄筋のかぶりを含む。
- ④ 環境条件には「一般の環境」「腐食性環境」「特に厳しい腐食性環境」の 3 段階があるが、全てについてひび割れ制御を行う必要がある他、「腐食性環境」「特に厳しい腐食性環境」については塩化物イオン濃度の照査に合格しなければならない。
- ⑤ 構造物の所要の性能がコンクリートの中性化によって損なわれてはならない。次式により確認する。

$$\gamma_i \cdot y_d / y_{\text{lim}} \leq 1.0$$

ここに、

$$y_{\text{lim}} = c - c_k$$

$$y_d = \gamma_{\text{cb}} \cdot \alpha_d \sqrt{t}$$

$$\alpha_d = \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c$$

$\gamma_i$ : 構造物係数。一般に 1.0, 重要構造物は 1.1 とするのがよい。

$y_{\text{lim}}$ : 鋼材腐食発生限界深さ。

$c$ : かぶりの期待値 (mm)。一般に、設計かぶりとしてよい。

$c_k$ : 中性化残り (mm)。通常環境下で 10mm, 塩分環境下で 10~25mm

$y_d$ : 中性化深さの設計値

$\alpha_d$ : 中性化速度係数の設計値 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$ )

$\alpha_k$ : 中性化速度係数の特性値 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$ )

- t : 中性化に対する耐用年数 (年) . 一般に, 100 年を上限とする.
- $\beta_e$  : 環境作用の程度を表す係数. 一般に, 乾燥しにくい環境・北向きの面では 1.0, 乾燥しやすい環境・南向きの面などでは 1.6 としてよい.
- $\gamma_{cb}$  : 中性化深さの設計値  $y_d$  のばらつきを考慮した安全係数.  
一般に 1.0, 高流動コンクリートを用いる場合は 1.1 としてよい.
- $\gamma_c$  : コンクリートの材料係数. 一般に 1.0, 上面の部位は 1.3 とするのがよい.  
構造中のコンクリートと標準養生供試体の間で品質に差が生じない場合は全て 1.0 としてよい.

表-2.4.1 鋼材の腐食に対する環境条件の区分

一般の環境	塩化物イオンが飛来しない通常の屋外の場合, 土中の場合等
腐食性環境	1. 一般の環境に比較し, 乾湿の繰返しが多い場合および特に有害な物質を含む地下水位以下の土中の場合等, 鋼材の腐食に有害な影響を与える場合等 2. 海洋コンクリート構造物で海水中や特に厳しくない海洋環境にある場合等 (海岸から 0.1~1kmにある構造物はこの環境にあると考えるのがよい)
特に厳しい腐食性環境	1. 鋼材の腐食に著しく有害な影響を与える場合等 2. 海洋コンクリート構造物で干満帯や飛沫帯にある場合および激しい潮風を受ける場合等 (塩化カルシウム等の凍結防止剤をたびたび使用する場所にある構造物もこの環境にあると考えるのがよい)

表-2.4.2 許容ひび割れ幅

単位:mm

鋼材の種類	鋼材の腐食に対する環境条件		
	一般の環境	腐食性環境	特に厳しい腐食性環境
異形鉄筋・普通丸鋼	0.005 c	0.004 c	0.0035 c
PC 鋼材	0.004 c	--	--

c : かぶり (100mm 以下)

「2.3 性能規定によるひび割れ制御」では連続合成桁の試設計を行い, 国内外の設計基準にて比較検討を行った。「鉄筋比」「鉄筋径」「かぶり厚」をパラメータとしてひびわれ幅の計算・比較を行ったところ, 以下の結果を得た. すなわち, ①値の差はあるものの, 各計算式ともほぼ同様の傾向を示すこと, ②値の差は最大で2倍程度となること,

③ハンスビレ式では鉄筋比が1%未満となる場合は適用できないこと，④かぶり厚が大きくなるほど表面ひび割れ幅が大きくなること，⑤鉄筋比が2%以下でも表面ひび割れ幅を0.2mm以下とすることができること，である。

このうち，かぶり厚と表面ひび割れ幅の関係については，かぶり厚を増せば鉄筋の防錆性能が高まるはずであるにも関わらず，計算式では表面ひび割れが増大し，悪影響となる矛盾が生じている。これについては，土木学会示方書のように，許容ひび割れ幅をかぶりに比例させるなど，新しい指標と併せて評価することにより妥当な結果を得ることができると考える。

以下，「2.5 文献調査」では，これらの調査・検討時に参考とした文献，およびその他関連文献が紹介されている。一覧を示すとともに，内容についても文献毎に調査シートにまとめたものを掲載しているので，参考とされたい。

合成桁中間支点上の設計 文献調査シートの分類

文献の種類	No.	文献名	著者名	出典		小分類(該当キーワードに1を記入)										キーワード		
				名称	年月日	連続合成桁	ひび割れ制御	乾燥収縮	プレストレス	ジャッキアップ	PC床版	合成床版	少数主桁	中間支点	試験設計			
論文	1	合成桁の設計	長井正嗣	橋梁と基礎	2002年8月	1	1	1	1	1								歴史と連続合成桁、ひび割れ制御設計、全体解析
	2	連続合成桁の各種ひび割れ幅算定法とその相違に関する一考察	長井正嗣 奥井義昭 岩崎栄治	土木学会論文集No.710/1-60	2002年7月	1	1											ひび割れ制御設計、Hanswille、CEB/FIP-90、tension stiffening
	3	ひび割れ制御をした連続合成橋梁のクリープ・乾燥収縮解析	笠原竜介 奥井義昭	土木学会第54回年次学術講演会	1999年9月	1	1	1										合成桁、クリープ、乾燥収縮、ひび割れ、せん断遅れ
	4	連続合成桁への取組み	安松敏雄 中須誠 長谷俊彦 八部順一 春日井俊博 三ツ木幸子	第1回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集	1998年8月	1					1		1	1				PC床版、少数主桁、連続合成桁、経済性、耐久性、次世代橋梁
	5	連続合成桁の中間支点部床版に発生するひび割れに関する実験	精方紀夫 木曾茂 岩立次郎 八部順一 大垣賢雄 作川孝一	土木学会第50回年次学術講演会	1995年9月	1	1									1		連続合成桁、中間支点部、ひび割れ幅、鉄筋比、ひび割れ分散効果、ひび割れ幅制御
	6	合成桁橋の復権と合成構造の開発と研究	松井繁之	鋼構造論文集第1巻第2号	1994年6月				1			1				1		RC床版の劣化、合成桁橋の復活、用意周到な実験計画、試験法による破壊の違い
設計マニュアル、設計要領	7	名岐道路等 連続鋼成げた設計要領	名古屋高速道路公社 工務部 設計課		2000年12月	1	1			1							現場打ちRC床版、ひび割れ幅制限、ジャッキアップダウンによる橋軸方向プレストレスの導入	
	8	平成11年度 第二東名高速道路 鋼橋の新技術に関する調査研究 少数主桁橋設計・施工指針(案)フォローアップ検討 報告書	財団法人 高速道路技術センター		2000年3月						1		1	1			プレキャストPC床版	
	9	平成11年度 第二東名高速道路 鋼橋の新技術に関する調査研究 少数主桁橋設計・施工指針(案)フォローアップ検討 資料編	財団法人 高速道路技術センター		2000年3月	1									1		連続桁中間支点上の負曲げ	
	10	PC床版設計・施工マニュアル(案)	(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会		1999年5月	1	1				1		1	1				ひびわれ制限、プレキャストPC床版、RCループ継手
	11	平成11年度 近畿自動車道(教賀線) PC床版鋼2主桁橋の連続合成桁化に関する技術検討(その2) 第2回委員会	財団法人 高速道路技術センター		1999年12月	1			1	1	1					1		中間支点部の床版の設計、橋軸方向のせん断に対するずれ止めの照査、ジャッキアップダウンによるプレストレス導入効果
	12	平成11年度 近畿自動車道(教賀線) PC床版鋼2主桁橋の連続合成桁化に関する技術検討(その2) 第1回委員会	財団法人 高速道路技術センター		1998年5月	1				1	1					1		床版の橋軸方向断面力の算出手法、中間支点部の床版剛性評価と取り扱い方法
	13	PC床版2主桁橋の最適化に関する技術検討(その2) PC床版2主桁橋 設計マニュアル(案)	財団法人 高速道路技術センター		1998年5月	1	1	1	1	1	1			1	1			中間支点部の床版の取り扱い、ユーロロード、ジャッキアップダウン工法、膨張コンクリート
	14	PC床版を有すプレストレスしない連続合成桁 設計要領(案)	(社)日本橋梁建設協会 連続合成桁 ワーキンググループ		1996年3月	1	1				1				1			少数主桁、PC床版、連続合成鋼桁、設計要領
設計事例報告	15	新形式橋梁の現況調査	新形式橋梁(少数主桁橋梁等)の調査小委員会 (社団法人 日本鋼構造協会)		2001年2月	1	1		1	1					1		新形式橋梁	
	16	宿茂高架橋の計画・設計	望月秀次 雨森慶一 築山有二 中嶋浩之 成瀬隆弘	橋梁と基礎	2000年4月		1				1			1			複合ラーメン鋼2主桁橋、PRC床版、剛結部の床版	
	17	PC床版連続合成桁2主桁橋「千鳥の沢川橋」の設計	田村陽司 大垣賢雄 川尻克利 作川孝一	橋梁と基礎	1998年9月	1	1		1	1	1				1	1	連続合成桁の設計、少数主桁、PC床版	
海外の基準、研究報告、設計事例	18	ヨーロッパ基準4.鋼・コンクリート合成構造物の設計 第2編・橋梁(1996年版(上))	栗田章光 江頭慶三 長井義則 恩知俊一	橋梁と基礎	2000年5月		1		1								合成桁の曲げ剛性の評価、使用限界状態、床版ひび割れ幅の制御	
	19	スイスにおける合成桁橋	Jean-Paul Lebet (訳:橋吉宏 長井正嗣)	橋梁と基礎	2000年3月		1		1						1		橋軸直角方向のひび割れ幅制御方法、外ケーブルによるプレストレスの導入等	
	20	鋼橋床版の各国での取組みとこれからの床版	松井繁之 大田孝二 西川和廣	橋梁と基礎	1999年3月		1		1		1				1		鉄筋によるひび割れ制御法、版理論	
	21	合成桁におけるひび割れ幅の制限	(著)K.Roil G.Hanswille (訳)伊藤敏一 平城弘一	橋梁と基礎	1993年5月	1	1	1	1									プレストレスしない連続合成桁橋の設計、研究報告、DIN1045、DIN4227
	22	合成桁におけるひび割れ幅制限の問題	(著)K.Roil G.Hanswille (訳)伊藤敏一 平城弘一	橋梁と基礎	1988年5月	1	1	1	1									プレストレスしない合成桁におけるひび割れ幅制限の簡便な照査法の提案
連続合成桁計算例	23	PC床版を有するプレストレスしない連続合成2主桁橋の設計例と解説	(社)日本橋梁建設協会		2001年7月	1	1		1	1			1	1			プレストレスしない連続合成桁、ひびわれ幅制御	
	24	連続合成桁設計法調査検討業務	(社)日本橋梁建設協会 設計部会 連続合成桁ワーキンググループ		1995年3月	1	1		1	1			1	1				プレストレスしない連続合成桁の試験設計、少数主桁、PC床版

題 名	合成桁の設計
著 作 者 名	長井正嗣
出 典	橋梁と基礎
年 月 日	2002年8月
ペ ー ジ	45-48
キーワード	歴史と連続合成桁、ひび割れ制御設計、全体解析
資料作成者	長大 廣井
概 要	<p>1) 歴史と連続合成桁</p> <p>連続合成桁は1957年には建設されており、連続合成桁では中間支点到負曲げモーメントが生じ、これに伴いコンクリートに引張り応力が生じることから、それを打ち消すためのプレストレスを導入する合成桁が当時主流であった。</p> <p>プレストレスの導入方法として、ジャッキアップダウン工法、PC鋼材によるプレストレス導入、水置換法等が用いられた。1970年までのほとんどの連続合成桁はプレストレスする合成桁であったが、その施工には手間を要することから、プレストレスしない、ひび割れを許す設計が1970年のはじめごろから採用されるようになり、1973年には道路橋示方書にプレストレスしない連続合成桁の規準が導入された。</p> <p>2) ひび割れ制御設計</p> <p>連続合成桁には、プレストレスを導入してひび割れを許さない設計と、プレストレスを導入せずひび割れを許す設計があり、最近ではひび割れを許容しひび割れ幅を要求性能以下に制限しようという、ひび割れ制御設計法が主流になりつつある。</p> <p>ひび割れ制御設計は、1973年の規定(鉄筋比2%以上)以降、EC4-2(ENV)の規定に関する勉強が行われたが、現状ではコンクリート標準示方書の鉄筋ひずみの評価に、「鋼桁+鉄筋」断面としてのひずみを用いる方法と、コンクリートのtension stiffeningを考慮し、かつ平均ひずみを用いる方法が提案されている。</p> <p>なお、これらの扱いはあくまで安定ひび割れ状態を対象としており、初期ひび割れ状態での扱いが不明である。</p> <p>3) 全体解析</p> <p>また、全体解析を行う場合の曲げ剛性の設定方法、コンクリートが圧縮側フランジを拘束することに着目した腹板の薄板化に関する取組みを紹介している。</p> <p>合成桁の設計では、このほかにクリープ、乾燥収縮、温度変化による鋼とコンクリートの応力移行の計算を行う必要があるが、誌面の制約で省略している。</p>

題 名	連続合成桁の各種ひび割れ幅算定法とその相違に関する一考察
著 作 者 名	長井正嗣 奥井義昭 岩崎栄治
出 典	土木学会論文集No.710/I-60
年 月 日	2002年7月
ペ ー ジ	427-437
キーワード	ひび割れ制御設計、Hanswille、CEB/FIP-90、tension stiffening
資料作成者	長大 廣井
概 要	<p>Hanswilleの論文及び、コンクリート標準示方書、CEB/FIP-90の合計4種の算定法を説明するとともに、付着すべり区間長、ひび割れ幅を具体的に計算し比較考察を行っている。その結果をまとめると以下ようになる。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 初期ひび割れ時における付着すべり区間長は、今回扱った手法の範囲で78%(Type-1)、86%(Type-2)の差異が生じる。この原因はコンクリート標準示方書の式は基本的には安定ひび割れ状態に対して提案されたためと言える。</li> <li>2) Hanswilleの論文の提案式を除いて、ひび割れ幅は付着すべり区間長と鉄筋とコンクリートの平均ひずみの差異との積で表されていることから、付着すべり区間長の差異がひび割れ幅の差異となってくる。したがって、今回扱ったモデルで、コンクリート標準示方書(平均ひずみ)、Hanswilleの論文、CEB/FIP-90間でのひび割れ幅の推定にあたり、最大生じる差異は27%程度である。</li> <li>3) Hanswilleの論文による安定ひび割れ状態でのひび割れ幅は、モーメントが大きくなるほど小さい値を与える傾向にある。この原因として、モーメントとともにひび割れ間隔が急激に狭くなるように定式化されているためと考えられる。</li> <li>4) Hanswilleの論文より、<math>M-Nc-\sigma_s</math>関係を求める際の矛盾点、すなわち、一様引張問題を合成桁に導入する場合の矛盾点を指摘した。</li> <li>5) Hanswilleの提案式で挙動を予測する場合、初期ひび割れ軸力を正確に予測することの重要性を明らかにした。初期軸力の設定で、その後の挙動予測が大きく変化することになる。これは、Hanswilleの提案式に準じる場合に限定される問題ではなく、実務上ひび割れ時に発生する鉄筋応力を評価する上で重要な課題となる。</li> <li>6) 実構造物が初期ひび割れ状態にあるときには、鉄筋の応力評価に注意が必要で、状態II、すなわち[鋼桁+鉄筋]断面をベースに検討を行うと、ひび割れ時、鉄筋の応力ジャンプを見逃すことになる。</li> <li>7) <math>M-Nc-\sigma_s</math>関係を明らかにするとともに、安定ひび割れ状態での作用モーメント下における状態IIならびに”tension stiffening”を考慮した場合の最大、平均応力(ひずみ)の3つの応力の大小関係を明らかにするとともに、その理由を説明した。</li> </ol>

題名	ひび割れ制御をした連続合成橋梁のクリープ・乾燥収縮解析
著者名	笠原竜介 奥井義昭
出典	土木学会第54回年次学術講演会
年月日	平成11年9月
ページ	336-337
キーワード	合成桁、クリープ、乾燥収縮、ひび割れ、せん断遅れ
資料作成者	長大 廣井
概要	<p>本研究では、コンクリート床版のひび割れ発生を想定した連続合成橋梁のクリープ・乾燥収縮解析を行いひび割れの影響を検討した。また、ひび割れを考慮した連続合成橋梁のせん断遅れの影響についても解析を行っている。</p> <p>ひび割れ領域の影響においては、ひび割れを考慮した場合と非考慮の場合について解析を行い、クリープ・乾燥収縮の収束した載荷400日後の床版上縁部応力(<math>\sigma_{cu}</math>)、及び床版下縁部応力(<math>\sigma_{cl}</math>)を算出し比較した結果、クリープのみを考慮した場合の床版応力分布比較図より、クリープに関してはひび割れ領域の影響は少ない結果が得られている。</p> <p>乾燥収縮のみを考慮した場合の床版応力分布比較図より、乾燥収縮による応力に対しては、ひび割れ制御の影響が大きく現れ、橋軸方向全領域で応力増分が20%程度低減することが確認された。</p> <p>ひび割れを許容した連続合成桁においてクリープ・乾燥収縮時のせん断遅れの影響を検討するため、ブロック有限要素法を用いた解析を行った。</p> <p>梁理論による解析結果と比べると、桁端部、中間支点部付近で大きく応力が減少しており、この部分でせん断遅れの影響が大きく現れている。</p> <p>中間支点部付近ではひび割れ領域モデル化の際に床版コンクリートを無視した結果、桁端部同様にせん断遅れが生じている。この部分でもせん断遅れが生じていることから、せん断力が円滑に伝達できるように補強する必要があると思われる。</p>

題 名	連続合成桁への取組み
著 作 者 名	安松敏雄 中須誠 長谷俊彦 八部順一 春日井俊博 三ツ木幸子
出 典	第1回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集
年 月 日	1998年8月
ペ ー ジ	59-72
キーワード	PC床版、少主桁、連続合成桁、経済性、耐久性、次世代橋梁
資料作成者	長大 廣井
概 要	<p>(1)「PC床版を有すプレストレスしない連続合成桁設計要領(案)」についての概要</p> <p>(2)連続合成桁の実態調査</p> <p>①プレストレスする連続合成桁とプレストレスしない連続合成桁の差</p> <p>適用支間長、鋼重、桁高に関して両者の差はほとんど無い。施工の煩雑さを考えると、プレストレスしないもののほうが経済的に有利と考えられる。</p> <p>また、当時の論文では経済比較がなされ、支間60m程度まではプレストレスしない連続合成桁がやや有利であると報告されている。</p> <p>②床版の耐久性</p> <p>プレストレスしない連続合成桁の床版損傷事例の検証では、負曲げモーメントの影響ではなく、打ち継目の施工上の問題と思われる。また、非合成連続桁の実橋載荷実験より、通常の供用荷重に対しては完全合成桁としての挙動を示すとの報告も幾つかある。</p> <p>すなわち、プレストレスしない連続合成桁の床版損傷に関するデータは今回の調査では得ることは出来なかったが、プレストレスする連続合成桁や非合成連続桁と状況は余り変わらないものと思われる。</p> <p>しかし、プレストレスしない連続合成桁がほとんど使われなくなった理由として、中間支点付近の床版のひび割れが耐久性にかなり大きな影響を及ぼすのではないかと危惧があると思われる。従って、プレストレスしない連続合成桁形式を採用する場合には、中間支点付近での床版の耐久性が支間部と変わらず十分であることを力学的に保証する必要がある。</p> <p>(3)検証実験</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・連続合成桁中間支点の負曲げ実験</li> <li>①鉄筋量が増えることによりひび割れ間隔および、ひび割れ幅が小さくなるひび割れ分散効果を確認した。</li> <li>②Hanswilleのひび割れ制御理論を用いて、ひび割れ幅・間隔・発生曲げモーメント等を正確に推定するには、乾燥収縮度や付着力等のパラメータの正確な評価が重要である。</li> <li>③乾燥収縮度が理論値に与える影響が卓越している。</li> <li>④今回の実験結果から得られたひび割れ幅から、鉄筋比は1.4%程度あれば十分であると考えられる。</li> </ul>

合成桁中間支点上の設計 文献調査シート

分類 No. 5

題名	連続合成桁の中間支点部床版に発生するひび割れに関する実験
著作者名	日本道路公団 緒方紀夫 木曾 茂 岩立次郎 川崎重工 八部順一 大垣賀津雄 作川孝一
出典	土木学会第50回年次学術講演会
年月日	平成7年9月
ページ	I-294 588頁
キーワード	連続合成桁 中間支点部 ひび割れ幅 鉄筋比 ひび割れ分散効果 ひび割れ幅制御
資料作成者	作川 孝一 (川崎重工)
概要	<p>連続合成桁の中間支点上ではコンクリートに引張り応力が発生するため、従来の設計ではプレストレスの導入を必要とした。近年、コンクリートの引張応力を無視したいわゆるプレストレスしない連続合成桁が主流になりつつある。その設計を実現するためには、中間支点部床版に発生するひび割れを定量的に制御する必要がある。</p> <p>この必要性に基づき、連続合成桁の中間支点部床版に発生するひび割れに関する実験を行った結果をまとめたものが本論文である。本論文の結論では以下の項目を結論付けている。</p> <p>①ひび割れ分散効果 鉄筋本数、鉄筋比を大きくすることによりひび割れ本数が増加し、ひび割れ間隔が小さくなるひび割れ分散効果を実験的に確認している。</p> <p>②鉄筋比とひび割れ幅の関係 鉄筋比が大きくなるとひび割れ幅が小さくなる。</p> <p>③ひび割れ幅制御 橋軸方向鉄筋によってひび割れ幅を制御することがほぼ可能である。また、橋軸方向鉄筋は鉄筋比1.4%以上必要である。</p>

題名	合成桁橋の復権と合成構造の開発と研究
著作者名	松井繁之
出典	鋼構造論文集第1巻第2号
年月日	1994年6月
ページ	1-9
キーワード	RC床版の劣化、合成桁橋の復活、用意周到な実験計画、試験法による破壊の違い
資料作成者	長大 廣井
概要	<p>1. 合成桁の合理性</p> <p>合成桁橋のRC床版に、たくさんのひびわれが入っていても、その床版と鋼桁とは合成されており主桁は、ほぼ設計時の曲げ剛性が残存しており、主桁作用に対しては十分耐荷力がある。RC床版の損傷は非常に局部的なものであり、この部位を補修することによって主桁の安全性はほとんど損なわれなとおもわれる。</p> <p>さらに、床版に若干の配慮を加えることによって、床版の損傷を防ぐことができれば、合理的構造である合成桁は非常に望ましい構造と言えるであろう。</p> <p>2. 実挙動に見合った実験方法の選択</p> <p>鋼板とコンクリートを合成した合成床版2種の開発研究を行った。一つは、上側と下側に鋼板を使用し、その間にコンクリートを充填したサンドイッチ床版であり、他の一つは下側にのみ鋼板を有するロビンソン型床版で鋼床版箱桁の上フランジとコンクリート床版を合成した鋼板・コンクリート合成床版である。</p> <p>これら両床版とも道路橋の床版として使用することを目的とし、床版供試体を作製し、輸荷重載荷面をとおして静的載荷試験を行い、弾性挙動特性ならびに破壊形式・終局強度を確認した。そして、輸荷重の繰り返し載荷を受けるため、疲労強度の照査を行うべきであるとして疲労実験も実施した。</p> <p>床版中央に載荷板を置き、その上に設計輸荷重に衝撃を考慮した荷重、あるいは、その1.5倍とか、2倍の荷重を掛けて疲労実験を実施し、S-N曲線を求めた。</p> <p>この床版の疲労破壊現象は、スタッドのせん断力が作用する溶接止端から疲労亀裂が発生し、それが鋼板下面にまで貫通し、その後、横方向へも進展しゆき、鋼板が破れると言うものであった。</p> <p>同様な疲労破壊現象はプレストレスしない合成桁の、中間支点上の鋼桁の疲労破壊にも見られ、床版のS-N曲線がこの合成桁のS-N曲線とほぼ同じになるとの検証もできた。</p>

題名	名岐道路等 連続鋼合げた設計要領
著作者名	名古屋高速道路公社 工務部 設計課
出典	
年月日	平成12年12月8日
ページ	全37ページ(表紙除く)
キーワード	現場打ちRC床板 ひび割れ幅制限 ジャッキアップダウによる橋軸方向プレストの導入
資料作成者	三菱重工業(株) 工藤
概要	<p>名古屋高速道路公社の標準的な現場打ちRC床版を有する鋼I断面および鋼箱断面プレートガーターを対象とした連続鋼活荷重合げたの設計について示されたもの</p> <p>「PC床版を有すプレストしない連続合成桁(平成8年3月31日)：(社)日本橋梁建設協会 連続合成桁ワーキンググループ」と異なる点は以下である。</p> <p>(1) 床版は現場打ちRC床版とし、床版支間は原則として3.3m以下とする。</p> <p>(2) 床版の設計照査は以下とする。</p> <p>①死荷重+プレスト+クリープ+乾燥収縮の荷重組合せに対して、コンクリートの引張強度以下とする。</p> <p>②死荷重+プレスト+クリープ+乾燥収縮+活荷重の荷重組合せに対して、許容ひびわれ幅以下とする。</p> <p>許容ひび割れ幅 <math>W_a = 0.005C</math> (cm) (但し最大0.02cm)</p> <p>C：ひびわれに抵抗する鉄筋の純かぶり (cm)</p> <p>(3) ひびわれ制限を満足しない場合は次に示す方法を検討し、現場施工性を考慮の上、適切な方法を採用する。</p> <p>①床版コンクリート強度の見直し。</p> <p>②ジャッキアップダウによる橋軸方向プレストの導入。</p> <p>③上記の組み合わせ</p> <p>(4) 床版打設ステップ(剛度、荷重載荷範囲の逐次変化)を考慮して前死荷重(床板荷重)に対する断面力を算出する。</p> <p>(5) 後死荷重、活荷重に対する断面力算出時の格子解析剛度は設計の簡便さから全橋長にわたり合成断面(鋼げた+コンクリート床板)として算出してよい。</p> <p>ただし、中間支点付近のコンクリート床板および鋼桁の応力度照査の関してはコンクリートのひび割れを考慮した断面力を用いる。</p>

題名	平成11年度 第二東名高速道路 鋼橋の新技术に関する調査研究 少数主桁橋設計・施工指針(案) フォローアップ検討 報告書
著作者名	財団法人 高速道路技術センター
出典	
年月日	平成12年 3月
ページ	III編 プレキャストPC床版編 P24
キーワード	
資料作成者	長大 岩井
概要	<p>連続桁中間支点付近は、非合成桁であってもずれ止めによる合成効果の影響で、床版に引張力が働くことになる。一般的な合成桁の場合、床版に作用する軸方向力は完全合成桁の場合より、40%程度小さくなるとの結果が報告されている。</p> <p>一方、東海太府高架橋の実橋載荷試験では合成挙動が確認されたことから、ここでは非合成桁であっても、中間支点上の床版は完全合成桁として照査を行う。</p> <p>照査は、非合成桁として算出した後死荷重と活荷重の曲げモーメントに対して、照査断面としてコンクリート断面を無視し、橋軸方向鉄筋を桁の断面性能に算出した合成断面として照査する。</p> <p>照査は「PC床版を有するプレストレスしない連続合成桁設計要領(案)」( (社) 日本橋梁建設協会) のひび割れ制御を用いるのが好ましい。</p> <p>ひび割れ幅を照査し、満足しない場合は、ジャッキアップダウンや床版に橋軸方向のプレストレスを与えることを検討するのがよい。</p>

合成桁中間支点上の設計 文献調査シート

分類 No. 9

題名	平成11年度 第二東名高速道路 鋼橋の新技术に関する調査研究 少数主桁橋設計・施工指針（案）フォローアップ検討 資料編
著作者名	財団法人 高速道路技術センター
出典	
年月日	平成12年 3月
ページ	10.連続桁中間支点上の負曲げに対する検討
キーワード	
資料作成者	長大 岩井
概要	

本施工指針での基本的な考えは、

- a) 非合成桁の中間支点付近の設計（負曲げモーメントに対する設計）は、コンクリート断面を有効とする（日本道路公団の設計要領）。
- b) 合成桁中間支点付近の設計は道示に基づく。道示では床版を無視する場合と有効とする場合の2通りがある。

とする。また、「プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工」（編者／中井博）によれば、合成効果の度合いは実験結果よりスタッドのフレキシビリティ定数  $f$  により判定している。

$$f = \sqrt{\frac{k_0 L_d}{k n_s}}$$

$k$  : スタッド一本当りのバネ定数 (tf/cm/本)     $n_s$  : スタッドの1列当りの本数  
 $k_0$  : 基準バネ定数 (20tf/cm/cm)     $L_d$  : ずれ止め間隔

スタッドφ19-6本を1.0m間隔で配置した場合、 $f=1.1$ 、75%程度の合成効果となる。

ここでは①完全合成・床版考慮、②完全合成・床版無視、③75%合成・床版考慮、④75%合成・床版無視の4ケースを比較検討した。結果は①と③の引張応力度ではひびわれが発生し、抵抗できないと思われる。②と④は、この場合、いずれも同じ配筋で (D19-150mm) よいとの結論が出た。

合成桁中間支点上の設計 文献調査シート

分類 No. 10

題 名	PC床版設計・施工マニュアル(案)
著 者 名	(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会
出 典	
年 月 日	平成11年5月
ペ ー ジ	
キーワード	ひびわれ制限、プレキャストPC床版、RCループ継手
資料作成者	井上 治郎
概 要	<p>(1) 概 要</p> <p>有効幅、床版剛性低下による中立軸の移動等の主桁の設計に関する記述がない。 また、ひび割れを考慮したスタッドジベルの設計方法についても、本文献には、記述なし。</p> <p>(2) 連続合成桁についての記述のある箇所を列挙</p> <p>○PC床版の設計における制限値の規定 「PC床版2主桁の最適化に関する技術検討」による</p> <p>○プレキャストPC床版本体の設計 連続合成桁の中間支点付近におけるプレキャストPC床版の設計についての記述</p> <p>○プレキャストPC床版のRCループ継手部の設計 連続合成桁の中間支点付近におけるプレキャストPC床版の橋軸方向継手部の設計についての記述</p> <p>○場所打ちPC床版の設計 連続合成桁の中間支点付近における場所打ちPC床版の設計についての記述</p> <p>○補強PC鋼材の配置 連続合成桁の中間支点付近における負の曲げモーメント区間に対して、補強PC鋼材配置の記述</p> <p>○補強鉄筋の配置 連続合成桁の中間支点付近における負の曲げモーメント区間に対して、補強鉄筋配置の記述</p>

# 合成桁中間支点上の設計 文献調査シート

分類 No. 11

題名	平成11年度 近畿自動車道(敦賀線) PC床版鋼2主桁橋の連続合成桁化に関する技術検討(その2) 第2回委員会
著作者名	財団法人 高速道路技術センター
出典	
年月日	平成11年 12月
ページ	全37ページ
キーワード	
資料作成者	岡田 (日立造船)
概要	<p>第2回委員会資料として、以下の内容がまとめられている。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 第1回委員会議事要旨</li> <li>2. 中間支点部の床版の設計</li> <li>3. 床版死荷重曲げモーメント算出時における簡易モデルの提案</li> <li>4. 橋軸方向のせん断力に対するずれ止めの照査</li> <li>5. ジャッキアップダウンによるプレストレスの導入効果</li> <li>6. ずれ止めの曲げ引抜き実験計画</li> </ol> <p>上記のほかに、ひび割れ幅の算定式について、土木学会式を合成桁に適用した場合の理論づけを行っている。</p> <p>2. 中間支点部の床版の設計 要旨</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 基本方針           <p>照査は引張鉄筋の強度と、床版自体の耐久性について以下のとおり行う。</p> <p>上側鉄筋</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・主桁作用(L荷重100%)で鉄筋応力度の照査</li> <li>・主桁作用(L荷重60%)でひび割れ幅の制限</li> <li>・最小鉄筋量の照査</li> </ul> <p>下側鉄筋</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・主桁作用(L荷重60%)と床版作用(T荷重)の重ね合わせで鉄筋応力度の照査</li> <li>・最小鉄筋量の照査</li> </ul> </li> <li>2. 耐久性の照査           <ol style="list-style-type: none"> <li>①ひび割れ幅               <p>コンクリート標準示方書の算出式を適用する。</p> <p>許容ひび割れ幅は0.0035Cを採用する。</p> </li> <li>②最小鉄筋量               <p>現行の道示を準用する。(2%以上)</p> <p>周長率0.045cm/cm<sup>2</sup>は適用外とする。</p> </li> <li>③照査荷重の組み合わせ               <p>主桁作用(L荷重60%) + 死荷重 + クリープ・乾燥収縮</p> </li> </ol> </li> </ol>

合成桁中間支点上の設計 文献調査シート

分類 No. 12

題名	平成11年度 近畿自動車道(敦賀線) PC床版鋼2主桁橋の連続合成桁化に関する技術検討(その2) 第1回委員会
著作者名	財団法人 高速道路技術センター
出典	
年月日	平成10年 5月
ページ	全72ページ
キーワード	
資料作成者	岡田 (日立造船)
概要	<p>第1回委員会資料として、時代背景と目的・適用範囲・検討項目・工程についてまとめている。以下に合成桁中間支点上の設計に関係すると思われる事項をピックアップする。</p> <p><b>適用範囲</b> 平面線形：直線(曲線、斜角に対しては適用範囲と構造上の問題点を明示)          道路幅員：10m程度(暫定2車線をイメージ)          支間長：40m~65m(それを超える支間長については問題点を明示)          結合条件：支承を介して下部工と分離する。          床版：橋軸直角方向にプレストレスされたPC床版          床版支間長は5~6m          移動形枠を用いた現場打ち          鋼桁：鋼2主桁          ずれ止め：スタッドジベル</p> <p><b>検討項目</b> 床版厚          床版の橋軸直角方向断面力の算出手法          中間支点部の床版剛性評価と取り扱い方法          中間支点部の負曲げに対する設計手法          桁作用重ね合わせ時の橋軸方向床版の照査方法          クリープ、乾燥収縮、温度差荷重の評価方法          ジャッキアップダウンによるプレストレス導入効果の評価方法</p>

題 名	PC床版2主桁橋の最適化に関する技術検討（その2） PC床版2主桁橋 設計マニュアル（案）
著 者 名	財団法人 高速道路技術センター
出 典	
年 月 日	平成10年 5月
ペ ー ジ	IV編 連続合成桁への取り組み
キーワード	
資料作成者	長大 岩井
概 要	

中間支点部の床版の取り扱いには道示とユーロコードで異なる。ユーロコードは内力（後死、活）と外力（クリープ、乾燥収縮）に対して分けて取り扱い、それぞれに対して道示よりより安全側になっている。（具体的な取り扱い方法は本文中では触れていない）

ユーロコードにおけるひび割れ制御の方法を取り入れた「PC床版を有するプレストレスしない連続合成桁設計要領（案）」（（社）日本橋梁建設協会 H8.3）のひび割れ制御の概要の説明がある。

千鳥の沢川橋の検討項目についての説明。

- ・連続合成桁として設計。
- ・主桁剛度は各主桁に対して実情に即した剛度。
- ・床版は移動型枠により打設、順次合成として扱う。前死荷重と後死荷重に区別する。
- ・移動型枠荷重を考慮し、一時的な引張応力は認めるがひび割れは許容しない。
- ・ジャッキアップダウン工法を用いて中間支点上には死荷重時、ひびわれを発生させない。
- ・床版は膨張コンクリートを使用するので、乾燥収縮量を低減。
- ・完成時主桁剛度は道示の2パターン両方で計算を行う。結果、鋼断面＋鉄筋のみのケースの方が鋼断面は大きくなる。
- ・活荷重については中間支点部ひび割れを許容してひび割れ幅を制御している。

合成桁中間支点上の設計 文献調査シート

分類 No. 14

題名	PC床版を有すプレストレスしない連続合成桁 設計要領(案)
著作者名	(社)日本橋梁建設協会 連続合成桁ワーキンググループ
出典	
年月日	平成8年 3月31日
ページ	全69ページ
キーワード	少数主桁、PC床版、連続合成鋼I桁、設計要領
資料作成者	長大 廣井
概要	<p>1) 基本的な考え方</p> <p>当指針の基本的な考え方は、現行の道路橋示方書「第9章合成げた」をベースに、ドイツを中心にヨーロッパで採用されている連続合成桁の設計・施工指針を参考にまとめている。</p> <p>また、この設計要領は、鋼桁本数を2～3本に減らした少数主桁と橋軸直角方向にプレストレスした現場打ちPC床版を、ずれ止めにより強固に結合した橋軸方向にはプレストレスしない連続合成鋼I桁の一般的な設計要領について示している。</p> <p>2) 特徴</p> <p>設計要領の特徴としては以下の事項があげられる。</p> <p>①中間支点付近の床版コンクリートのひび割れ制御</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・床版の耐久性確保からひび割れ幅を制限</li> <li>・作用曲げモーメントによるひび割れ幅の照査方法を記載</li> </ul> <p>②断面力算定時の中間支点付近の床版剛性の取扱い</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・外力(後死荷重、活荷重)、内力(クリープ、乾燥収縮、温度変化)に対して記載</li> </ul> <p>③床版の引張り領域における応力度の照査</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・乾燥収縮、クリープに対する応力度算出方法を記載</li> </ul> <p>④φ25大口径スタッドジベルの使用</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・少主桁を対象とした効率化より、実験結果を踏まえ大口径ジベルを採用</li> </ul> <p>⑤スタッドジベルの設計法</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・中間支点付近のずれ止めの破壊に対する照査</li> <li>・水平荷重(地震・風)に対する中間支点付近のずれ止め照査</li> <li>・横桁位置での引抜きに対する照査</li> </ul>

題名	新形式橋梁の現況調査								
著作者名	新形式橋梁（少数主桁橋梁等）の調査小委員会（社団法人 日本鋼構造協会）								
出典									
年月日	平成13年2月								
ページ									
キーワード	新形式橋梁								
資料作成者	三井造船 浅野								
概要	<p>・床版に関する事項：PRC床版を中心に道示や日本道路公団第二集を踏まえて概要が述べられている</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・使用材料は道示・第二集の規定外の高材質・サイズの材料が性能試験を行いながら柔軟に使用されている。</li> <li>・コンクリート強度30N/mm<sup>2</sup>以上の規定に対し、単純合成桁でよく使用されていた35N/mm<sup>2</sup>より高強度な40、50N/mm<sup>2</sup>の施工例も増加している。</li> <li>・スタッドはφ19, 22を標準としているがJIS規格外のφ25も使用されている。</li> <li>・床版支間と床版厚は、基本的には道示に従うが、連続合成桁のPC床版は安全側を考慮して割増係数を乗じた例（千島の沢川橋）も報告されている。</li> <li>・許容ひびわれ幅 <math>W_a = 0.005C</math> : 鉄筋に対して一般の環境  <math>W_a = 0.0035C</math> : 鉄筋に対して特に厳しい腐食性環境</li> </ul> <p>・主桁設計に関する事項</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・橋軸方向にプレストレスを導入しない場合は中間支点部にひびわれを許容し、支間長の15%程度の範囲は鉄筋と鋼からなる主桁断面を想定して設計</li> </ul> <p>・鉄道橋における連続合成桁（断続合成桁、二重合成桁（完全合成桁））に関する事項</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・断続合成桁は橋軸方向にプレストレスせず、中間支点部は断続合成区間とし、柔ヅベルを使用して対応している（合成区間は合成断面、非合成区間は鋼桁とコンクリートの重ね梁として断面力を求め、合成部は合成断面、非合成部は鋼と鉄筋の断面にて断面計算）。</li> <li>・二重合成桁は上側のコンクリートだけでなく、中間支点部では下側のコンクリート断面（正曲げ区間では防音コンクリート）も有効とした二重合成桁を採用。上側コンクリート床版は伸縮目地を設けない連続構造とし、鋼桁との合成方法は正曲げ区間は馬蹄形ヅベル、負曲げ区間は新しいヅベル・孔明け鋼板ヅベルを配置した完全合成桁としている。</li> </ul> <p>・その他：新形式橋梁実績調査シートに最近施工された新形式橋梁のリスト・概要が添付されている</p> <p>→連続合成桁の実績は下記8橋がリストアップされている</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">① 千島の沢川橋（JH北海道：北海道横断道）</td> <td style="width: 50%;">⑤ 佐分利川橋（JH関西：近畿自動車）</td> </tr> <tr> <td>② ボクサナイ橋（JH札幌：北海道縦貫道）</td> <td>⑥ 小貝川橋梁（鉄建公団：常磐新線）</td> </tr> <tr> <td>③ 員弁川橋（JH名古屋：第二名神）</td> <td>⑦ 物延川橋梁（鉄建公団：阿佐線）</td> </tr> <tr> <td>④ 日計平高架橋（JH名古屋：東海北陸道）</td> <td>⑧ 野友大橋（高知県：国道493号）</td> </tr> </table>	① 千島の沢川橋（JH北海道：北海道横断道）	⑤ 佐分利川橋（JH関西：近畿自動車）	② ボクサナイ橋（JH札幌：北海道縦貫道）	⑥ 小貝川橋梁（鉄建公団：常磐新線）	③ 員弁川橋（JH名古屋：第二名神）	⑦ 物延川橋梁（鉄建公団：阿佐線）	④ 日計平高架橋（JH名古屋：東海北陸道）	⑧ 野友大橋（高知県：国道493号）
① 千島の沢川橋（JH北海道：北海道横断道）	⑤ 佐分利川橋（JH関西：近畿自動車）								
② ボクサナイ橋（JH札幌：北海道縦貫道）	⑥ 小貝川橋梁（鉄建公団：常磐新線）								
③ 員弁川橋（JH名古屋：第二名神）	⑦ 物延川橋梁（鉄建公団：阿佐線）								
④ 日計平高架橋（JH名古屋：東海北陸道）	⑧ 野友大橋（高知県：国道493号）								

題名	宿茂高架橋の計画・設計
著作者名	望月秀次、雨森慶一、築山有二、中嶋浩之、成瀬隆弘
出典	橋梁と基礎2000年4月号
年月日	2000年4月
ページ	25-32
キーワード	
資料作成者	直江
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・橋軸直角方向はPRC構造、橋軸方向はRC構造である。</li> <li>・PRC構造の設計において考慮するコンクリートの応力状態は下記の通り。             <ul style="list-style-type: none"> <li>①死荷重：引張り応力を発生させない</li> <li>②死+活荷重：引張り応力を許容するが、ひび割れを発生させない許容引張り応力度以下とする。</li> <li>③風荷重：ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅に制限値を設ける。</li> <li>④衝突荷重：ひび割れ幅の照査は行わず、割増を考慮した鉄筋の許容応力度にて照査する。</li> </ul> </li> <li>・床版厚は道示IIIのプレストレスコンクリート床版の式により算出する。</li> <li>・死荷重曲げモーメントは「主桁位置単純支持」と「主桁位置固定支持」の両方を検討した。</li> </ul>

題名	PC床版連続合成桁2主桁橋「千鳥の沢川橋」の設計
著作者名	田村陽司 大垣賀津雄 川尻克利 作川孝一
出典	橋梁と基礎
年月日	1998年9月
ページ	18-22
キーワード	連続合成桁の設計、少数主桁、PC床版
資料作成者	長大 廣井
概要	

本文は、千鳥の沢川橋で採用したPRC床版、連続合成桁、鋼桁腹板の少補剛薄板化および送出し架設などの各種検討内容と、それを踏まえた設計方法を報告するものである。ここでは、このうちPC床版の設計概要を抜粋して示す。

#### 1)橋軸直角方向

床版コンクリートの設計基準強度は $40\text{N}/\text{mm}^2$ であり、打設初期の乾燥収縮ひび割れを抑えるため、膨張剤を使用している。床板厚は主桁間隔を床版支間として道示式から算出した値に、合成桁で取替え困難とのことから5%増しの $320\text{mm}$ としている。また床版のハンチは $80\text{mm}$ とし、1:5の緩やかなテーパをつけ局所応力を緩和している。

死荷重状態の床版設計曲げモーメントの算出においては、道示式や単純梁モデルの計算によらず、横桁が床版挙動に与える影響を考慮して、床版を主桁位置にて固定支持した梁として計算した。一方、活荷重については、道示の設計曲げモーメント式に従っている。これらの設計断面力に対して、PC鋼線は経済性を考慮して偏心配置とした。

PCの導入軸力が鉄筋に拘束されることを考慮して、鉄道構造物設計基準・同解説-コンクリート構造物10.4.2に従い、床版の応力計算やひび割れ幅の照査を行った。橋軸直角方向の鉄筋はひび割れ分散性をよくするため、細径鉄筋D10を密( $100\text{mm}$ ピッチ)に配置している。ただし、道示III2.2.5により引張り鉄筋量の照査を行った。

#### 2)橋軸方向

床版施工時に発生する引張り応力度は、上記と同様にひび割れを発生させない許容引張り応力度以下となるようにその打設順序、ジャッキアップ量を決定した。

配力鉄筋はRCの断面計算によるが、中間支点付近の負曲げモーメント領域では、ジャッキアップの影響が完成時にも残るため、床版打設ステップに従って算出した床版断面力に対して、ひび割れ幅の照査を実施した。また支間部の正曲げモーメント領域では、主桁作用と床版作用の重ね合わせの照査を行った。

# 合成桁中間支点上の設計 文献調査シート

分類 No. 18

題 名	ヨーロッパ基準4:鋼・コンクリート合成構造物の設計 第2編・橋梁(1996年版)(上)
著 作 者 名	栗田章光、江頭慶三、長井義則、恩知俊一
出 典	橋梁と基礎 2000年5月号
年 月 日	2000年5月
ペ ー ジ	32-40
キーワード	
資料作成者	直江
概 要	<p>・主な特徴</p> <p>①3段階に合成桁の曲げ剛性が評価されている。すなわち、引張り域のコンクリートがひび割れを生じないと仮定した場合、引張り域のコンクリートは無視するが鉄筋を含めて計算する場合、および引張り域のコンクリートのテンションスティフニング効果の影響を考慮する場合の3種類。</p> <p>②使用限界状態では、照査事項をデコンプレション状態/ひび割れ幅/応力/変形/振動の5つのカテゴリーに分類している。</p> <p>③使用限界状態では、緊張材でプレストレスされる場合とされない場合について、最小鉄筋量、鉄筋の応力および鉄筋の最大間隔に制限値を設けることにより、床版のひび割れ幅の制御を行う。</p>

題名	スイスにおける合成桁橋
著作者名	Jean-Paul Lebet (訳：橋吉宏、長井正嗣)
出典	橋梁と基礎 2000年3月号
年月日	2000年3月
ページ	37-46
キーワード	
資料作成者	直江
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 橋軸直角方向の最大ひび割れ幅を制御する方法を採用している。</li> <li>・ 場所打ちが主流</li> <li>・ 以下の点が留意されている             <ul style="list-style-type: none"> <li>① 橋軸方向の、とくに中間支点上では床版断面積の1.5~2%の手金を配置する。 その際、小径鉄筋を密に配置するのがよい。</li> <li>② 中間支点上の床版打設は、支間部の打設終了後に行い、支点上の床版の引張り力を可能な限り低減する。</li> <li>③ 床版と鋼桁との合成効果を遅らせ、収縮による影響を減らす。例えば、床版の打設時にスタッドジベル部分を箱抜きして、できる限り遅くこの空隙を充填することで達成できる。</li> <li>④ 床版の橋軸方向全長にわたってプレストレスを導入する。拘束度が高い場合、プレストレスは合成前に導入する方が効果的である。これは、合成効果があるとプレストレス力が合成断面全体に作用し分散するためである。拘束度が小さい床版にプレストレスを導入する場合は、鋼桁断面積が小さいため、床版と鋼桁の合成後でも導入可能である。</li> <li>⑤ 外ケーブルでプレストレスを導入する。</li> </ul> </li> <li>・ 橋軸方向へのプレストレス導入は支間長が長い橋に限定されている。</li> </ul>

題名	鋼橋床版の各国での取組みとこれからの床版
著作者名	松井繁之、大田孝二、西川和廣
出典	橋梁と基礎99年3月号
年月日	1999年3月
ページ	37-45
キーワード	
資料作成者	直江
概要	<p>ドイツの事例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・連続合成桁の床版中間支点部の設計においては、鉄筋によるひび割れ制御法を採用している。</li> <li>・床版支間が6mを超えてもRCとしている例が多い。</li> <li>・PC床版も含め、全て場所打ち。</li> <li>・「コンクリート橋と鋼橋の張出し床版」というガイドを作成・出版している。</li> <li>・設計は版理論による。</li> <li>・中間支点部では、横桁を床版と分離して、負の橋軸方向モーメントが桁から床版に伝わりにくいように、かつ、橋軸方向にプレストレスが入れやすいようにしている。</li> <li>・鉄筋によるひび割れ制御を行う場合、中間支点部の床版に作用する鉄筋の応力度からコンクリートのひび割れ幅制御の照査を行う。</li> <li>・ひび割れ幅制御の照査は、ひび割れによる鉄筋の付加応力を加味して鉄筋に作用する応力から鉄筋径あるいはその間隔を照査する方法を採用している。</li> <li>・具体的には下記のことが通達で定められている。             <ol style="list-style-type: none"> <li>①上側鉄筋と下側鉄筋はそれぞれ2段まで重ねて配置することができる。</li> <li>②一般部の最大鉄筋径は20mm以下を採用する。</li> <li>③40cmを超える床版厚では中心部にφ20mm以下の付加的な鉄筋を10cm間隔以上で入れることができる。</li> <li>④鉄筋間隔は10cm以上とする。</li> <li>⑤鉄筋の総断面積は合わせてコンクリート断面の2.5%を超えてはならない。</li> <li>⑥外側に配置する鉄筋間隔は方向を問わず、15cm以下、10cm以上とする。</li> </ol> </li> <li>・その他、一般的に             <ol style="list-style-type: none"> <li>①引張り側においては両方向とも、10cm以上15cm以下の間隔で配置する。</li> <li>②圧縮側でも15cmとするのが通例になっている</li> <li>③張出し床版には自由端から1mの範囲に、断面積に対して最低0.80%の鉄筋を版の上下縁に10cm以下の間隔で配置しなければならない（一般にD12を配置）。</li> <li>④鉄筋は降伏点500N/mm<sup>2</sup>の異形鉄筋が使用されている。</li> </ol> </li> </ul> <p style="text-align: right;">以上</p>

題名	合成桁におけるひび割れ幅の制限
著作者名	(著)K.Roil G.Hanswille (訳)伊藤鉦一 平城弘一
出典	橋梁と基礎
年月日	1993年5月
ページ	33-40
キーワード	
資料作成者	田子
概要	<p>本論文は「合成桁におけるひび割れ幅制限の問題」をさらに発展させて、ドイツにおけるRCおよびPCの構造に対する最近の規格に基づいて、プレストレスしない連続合成桁橋の設計を簡易化するために行われた研究報告である。</p> <p>鋼合成桁の設計および施工に関する指針では、ひび割れ幅制限の照査については、コンクリート構造規格に基づくことを指示している。DIN1045およびDIN4227の第一部のひび割れ幅制限に関する規定の改訂に伴い、合成桁指針の該当する条項もそれらに適合させることが必要になった。合成桁指針の9章の新条項は、DIN1045に基づいており、また合成桁におけるひび割れ幅制限の問題に対する新しい知見をも同時に考慮している。本論文は、緊張材によりプレストレスを導入しない建築および土木の構造物の合成桁に関する新しい規定を、特に合成構造特有の観点から解説し、そして新规定の適用例を示している。</p> <p>ひび割れ発生時の変形挙動を説明するための基礎事項として「鉄筋コンクリート引張り部材の軸力-ひずみ関係（3つの特徴的な領域に分けられる）」、「ひび割れ発生時の合成断面の挙動（特有の3つの領域があきらかになる、領域①は、まだひび割れが生じていない断面の断面諸量を用いて表現される。領域②は、初期ひび割れ発生の状態を表す。領域③は完全なひび割れ状態に到達する）」、「乾燥収縮による固有応力の影響（合成断面では、コンクリートの乾燥収縮変形が鋼桁および鉄筋によって拘束されるために、固有応力状態が生じる）」とある。</p> <p>不静定構造系における断面力分配に及ぼすひび割れの影響。モーメント-曲率の関係を用いると、不静定系における断面力分配に及ぼすひび割れの影響を現実的に評価することができるが、このような数値計算は非常に煩雑であり、実際上不適当であるので、パラメータ解析の結果に基づいて、近似解法が導かれた。</p> <p>ひび割れ幅の制限に関する構造規定。DIN1045による照査は、個々の開口した状態のひび割れを防止するための最小鉄筋量の条件、ならびに完全ひび割れ状態での、ひび割れ幅を制限するための荷重に関する照査に基礎を置いている。実際上、基準となるそれぞれのひび割れ状態に対する手間のかかる対応を回避する為に、新しい規定では「初期ひび割れ状態に対する最小鉄筋量の規定」、「完全ひび割れ状態に対する照査」の二重の照査が計画された。</p> <p>計算例。土木構造物の2径間合成桁を例として、中央支点の断面に対するひび割れ幅制限の照査を行い、コンクリート引張り応力が小さい桁領域に対する所要の最小鉄筋量を求める。</p> <p>新しい規定の内容は、「ひび割れが発生するおそれのある桁領域内において個々のひび割れを制限するためのひび割れ断面力に基づく鉄筋量の必要条件」「完全ひび割れ状態の桁領域における設計計算上必要な鉄筋に対する鉄筋配置に関する規定」である。</p>

題名	合成桁におけるひび割れ幅制限の問題
著作者名	(著)K.Roil G.Hanswille (訳)伊藤鉦一 平城弘一
出典	橋梁と基礎
年月日	1988年5月
ページ	21-29
キーワード	
資料作成者	田子
概要	<p>1. まえがきおよび問題提起. 負の曲げモーメントを受けている合成断面に対しては, 曲げモーメント<math>M</math>あるいはフランジ床版の軸力<math>N_s</math>と曲率<math>x</math>の間には定性的関係が生じる. ひび割れモーメント<math>MR</math>以下で, コンクリート床版の縁繊維がコンクリートの引張り強さに到達するまでは, 弾性理論に近い線形の関係が存在する(状態I). <math>MR</math>に到達すると, ひび割れ軸力<math>N_{s,r}</math>のもとで, まず比較的大きなひび割れ間隔をもった若干のひび割れが生じる. <math>M</math>がさらに増大し, 新しいひび割れができて, それに伴う<math>N_s</math>の減少, あるいは曲率の増加はあまり顕著ではない. 床版軸力が<math>N_{s,r}</math>レベルを超えて増加しない領域を「初期ひび割れの領域」と呼ぶことにする. <math>M</math>がさらに増大すると, <math>N_s</math>は<math>N_{s,r}</math>のレベルを超えて増大する. その場合, ひび割れ幅も大きくなる. 鉄筋とコンクリートとの間の合成作用はまだ幾らか有効であるので, ひび割れ間において力はさらにコンクリートに導入され, ひび割れ間のコンクリートは再びその引張り強さに到達するまで抵抗し, さらに「後続ひび割れ」が発生する. 合成桁におけるひび割れ挙動を予測するには, 引張り域にあるコンクリートの協力を無視した鉄筋コンクリートの状態(状態II)のコンクリート床版のひび割れ進展と変形挙動, および全断面積のそれに関係する曲率を, 互いに関連させて考察しなければならない. この方法はひび割れ幅の制限のためのみならず, 変形を求める上からもそして外荷重および不静定構造系における拘束力による断面力の計算に対しても適切な方法である.</p> <p>2. ひび割れ幅および状態IIにおけるモーメントと曲率の関係. ひび割れ幅およびひび割れを生じたコンクリート床版をもつ合成桁のモーメントと曲率の関係を計算するための基礎式の誘導. 「ひび割れモーメント<math>MR</math>」「初期ひび割れ幅<math>w_r</math>」「初期ひび割れが完了した応力状態, 後続ひび割れ状態における<math>M</math>と<math>x</math>の関係」「初期ひび割れおよび後続ひび割れの領域におけるひび割れ幅」</p> <p>3. 現行規格の規定と試験結果の比較. 試験結果の検算から, ひび割れおよび変形の挙動が正確に予測できることを示した. コンクリート構造の規格と比較して, 規定がもつ種々の欠点を明らかにした.</p> <p>4. プレストレスしない合成桁におけるひび割れ幅制限の簡便な照査法の提案. 2. で展開した<math>M</math>と<math>x</math>の挙動をあらわす公式, ならびにそれにより得られたひび割れ幅とひび割れ間隔に対する関係は, 実際上かなりの計算労力を必要とするが, 安全側に幾つかの簡略化を行うと, 上記の基準事項から簡単な「ひび割れ幅制限の照査法」を導くことが出来る.</p> <p>5. 総括および展望. ここに紹介したモデルは, 鉄筋だけを使用した場合のものだが, 評価方法は鉄筋とPC鋼材との非常に異なった合成特性の影響, 異なった鋼材直径の影響, ならびにPC鋼材の時間に関係する合成挙動を考慮しなければならない.</p>

題 名	PC床版を有するプレストレスしない連続合成2主桁橋の設計例と解説
著 者 名	(社)日本橋梁建設協会
出 典	
年 月 日	平成13年 7月
ペ ー ジ	全102ページ
キーワード	プレストレスしない連続合成桁、ひびわれ幅制御
資料作成者	長大 廣井
概 要	

床版を含む合成桁としての主要部分の計算例を示すと共に、用いた設計手法の根拠を解説編として掲載している。

本テキストにおける設計の基本的な考え方は以下の通り。

- 1) 本橋は、プレストレスしない連続合成桁として設計した。
- 2) 桁作用として負の曲げモーメントを受ける範囲の床版コンクリートに対しては、ひび割れを許容し、ひび割れ幅を制御する設計を行った。
- 3) 床版は、固定型枠による場所打ちプレストレストコンクリート床版とした。
- 4) 床版は、橋軸方向をRC橋造、橋軸直角方向をPRC構造として設計した。
- 5) 主桁の設計は、鋼道路橋設計ガイドライン(案)に準じた。

計算例の橋梁諸元

橋梁形式： 3径間連続合成2主I桁橋

床版形式： 橋軸直角方向をPRC床版、橋軸方向をRC床版として設計

橋 長： 151.200m / 支 間： 3 @ 50.0m

活 荷 重： B荷重

平面線形： R=∞

幅 員： 10.700m / 有効幅員： 9.500m

主桁高さ： 2.950m

主桁間隔： 5.5m

床 版 厚： 30cm

ひびわれ幅は以下の土木学会式で算出して照査をしている。

$$W = k \{ 4C + 0.7(Cs - \phi) \} [\sigma_{se}/E + \epsilon'_{csd}]$$

また、参考として国内、海外の主なひび割れ制御に関する基準一覧が掲載されている。

# 合成桁中間支点上の設計 文献調査シート

分類 No. 24

題名	連続合成桁設計法調査検討業務
著作者名	(社)日本橋梁建設協会 設計部会 連続合成桁ワーキンググループ
出典	
年月日	平成 7年 3月
ページ	全92ページ
キーワード	プレストレスしない連続合成桁の試設計、少数主桁、PC床版
資料作成者	長大 廣井
概要	

プレストレスしない連続合成桁の検討を行うために、具体的橋梁を対象とした試設計。

・試設計対象とした橋梁の緒元

橋名：ホロナイ川橋(日本道路公団札幌建設局)

(工事詳細設計中だったため、基本設計における諸元を使用している。)

橋梁形式：2径間連続2主桁桁橋

床版形式：橋軸直角方向にPC床版で橋軸方向にRC床版(非合成桁)

橋長：107.0m / 支間：2 @ 53.0m

活荷重：B荷重

平面線形：R=1000m

幅員：11.400m / 有効幅員：10.490m

主桁高さ：3.0m

主桁間隔：6.0m

床版厚：30cm

試設計は、

ア)道路橋示方書(II鋼橋編平成6年2月)による場合、

イ)DINの設計に近いユーロコード4による場合、

の2通りについて行い、非合成桁としての基本設計と比較し、問題点の把握を行っている。

平面線形は、Rがかなり大きいので、試設計では直線として設計している。

・合成桁と非合成桁の鋼重比較(主構造本体のみ)

		鋼重(t)	差(t)	比率
非合成桁		180.813	—	—
合成桁	道示	150.774	30.039	16.6%
	ユーロコード	168.702	12.111	6.7%

