

プレキャスト床版連続合成桁の曲げひび割れ幅に関する実験

Experimental study on cracking behavior of pre-cast concrete slab in continuous composite girders under negative bending moment

大城壮司*, 上條崇**, 奥井義昭***, 長井正嗣****

Takeshi Oshiro, Takashi Kamijo, Yoshiaki Okui and Masatsugu Nagai

*西日本高速道路株式会社 関西支社 (〒567-0871 大阪府茨木市岩倉町 1-13)

** 工修, 株式会社 住金ブリッジ 技術部 (〒550-0004 大阪市西区靱本町 1-4-12)

*** 工博, 埼玉大学教授, 大学院理工学研究科 環境社会基盤国際コース
(〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)

**** 工博, 長岡技術科学大学教授, 工学部環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

The construction of the continuous composite girder bridge with two or three I-girder has been increasing in expressway due to its economical advantage. In the design of continuous composite girder bridges, one of important design issues is preventing the cracking in the concrete slab subjected to tensile force at intermediate supports. The crack width control design has been employed, and cast-in concrete with transversely pre-stressing slab has been preferably used. By employing pre-cast concrete slab, it is expected to shorten the construction period, obtain higher quality and durability. However, the crack width control design method of this type of slab has not been established. In this paper, through the experiment, cracking behaviors of the pre-cast slab are clarified.

Key Words: continuous composite girder, pre-cast concrete slab, crack width

キーワード: 連続合成桁, プレキャスト床版, ひび割れ幅

1. はじめに

鋼少数主桁橋は高速道路における鋼橋の標準的な橋梁形式として定着し、現在では連続合成桁として建設されるようになった。連続合成桁の場合、中間支点部の床版に引張力が生じるため、プレストレスを導入してひび割れを許容しない方法と、プレストレスを導入せずひび割れを許容しひび割れ幅を許容値以下に制御する方法があり、省力化の観点から後者の方法が主流となっている。この場合、床版の曲げひび割れ幅制御のために配筋の自由度が高い場所打ち PC 床版が採用される。一方で、熟練工不足が指摘される中、品質の安定化や施工期間短縮等の要求から非合成桁にはプレキャスト PC 床版(以下、PCa 床版)が採用されており、老朽化した鋼橋床版の取替え工事でも交通規制期間が短くてよい PCa 床版が採用されている。

ここで、連続合成桁にもひび割れ幅制御設計による PCa 床版を採用することは、長期間の供用を経て床版が損傷した場合でも部分的な取替えが容易であるなどのメ

リットも期待でき、更なる構造合理化に寄与できるものと考えられるが、「PCa 床版」、「連続合成桁」および「ひび割れ幅制御設計」を組合せた設計方法について示されたものはなく、負曲げの影響を受ける領域のひび割れ性状の解明は適用における課題の一つと考えられる。

そこで、著者らは図-1 に示す PCa 床版連続合成桁の実現化に向けて、PCa 床版のひび割れ性状の確認とひび割れ幅の評価方法に関する検討を実施した。本論文では、曲げひび割れ幅算定上の問題点を整理し、次に、合成桁の負曲げ領域に着目した合成挙動と PCa 床版のひび割れ性状に関する実験から既往のひび割れ幅算定法の適用性

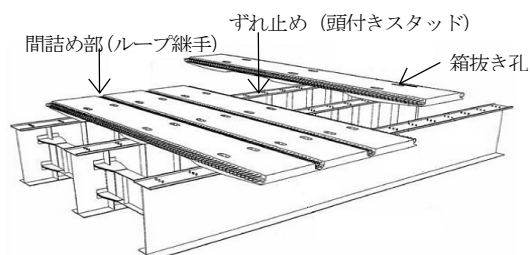


図-1 PCa 床版連続合成桁

について考察し、PCa 床版連続合成桁のひび割れ幅制御方法について一提案を行う。

2. 曲げひび割れ幅算定における問題点

2.1 ループ継手の影響

図-2 に示すように、ループ継手部はループ鉄筋の交互配置や打継ぎ目の存在など複雑な構造である。したがって、合成桁として床版が全断面引張力を受ける場合、PCa 床版の曲げひび割れ幅はループ継手部のひび割れ性状を考慮する必要があると考えられるが、これまで明らかにされておらず、既往のひび割れ幅制御設計法（たとえば文献 1)) を PCa 床版の曲げひび割れに適用するためには検証が必要である。

2.2 スタッド箱抜き孔の影響

道路橋示方書²⁾によれば、床版のひび割れ幅制御の観点から橋軸方向鉄筋量（床版の配力鉄筋）はコンクリート断面積の 2% 以上と規定されている。しかし、図-2 に示すように、箱抜き孔によって分断された床版の橋軸方向鉄筋を無効とすれば鉄筋比は 1.3% 程度になることから、箱抜き孔付近のひび割れ幅は局所的に大きくなることが懸念される。これが有害なひび割れと判断される場合には補強鉄筋の配置等の対策を講じる必要がある。

また、PCa 床版では箱抜き孔内にスタッドを配置することとなるが、道路橋示方書²⁾に基づく場合、合成桁として必要なスタッド本数を最大間隔（床版厚の 3 倍かつ 600mm 以内）の規定に従い配置することは、PCa 床版の構造上からも困難であることから、PCa 床版連続合成桁として配置可能なスタッドに対する性能の照査が必要である。

3. 負曲げ載荷実験供試体

2. で述べた問題点とその対処方法の有効性を検証するために合成桁模型による負曲げ載荷実験を実施した。供試体はウェブ高 1m、全長 6.6m、床版厚 250mm、床版幅 1100mm の合成桁で、各供試体のスタッド本数は 48 本で統一し³⁾、スタッドの橋軸方向配置間隔と床版形式が異なる 4 体を作製して単調増加荷重を与えた。実験ケース一覧を表-1 に示す。実験供試体は以下の考え方にに基づき設定した。

- ・スタッド間隔の違いが曲げひび割れ性状に与える影響（A-2、B-2 供試体）
- ・スタッド間隔を同じとした場所打ち床版と PCa 床版とでループ継手部やスタッド箱抜き孔が曲げひび割れ性状に与える影響（B-2、C-2、C-3 供試体）

表-1 実験ケース一覧

供試体	頭付きスタッド			床版 タイプ	配力筋			実験意図
	橋軸方向 間隔 (mm)	1 列当り 本数	総本数		径 降伏点	かぶり (mm)	鉄筋比 (%)	
A-2	240	2	48	場所打ち	D19 (SD345) 397N/mm ²	53	1.36	比較の基準
B-2	800	6		場所打ち				橋軸方向スタッド間隔の影響のみを抽出
C-2	800	6		PCa				実橋適用イメージ (箱抜き孔補強なし)
C-3	800	6		PCa				箱抜き孔の周囲に補強鉄筋を追加

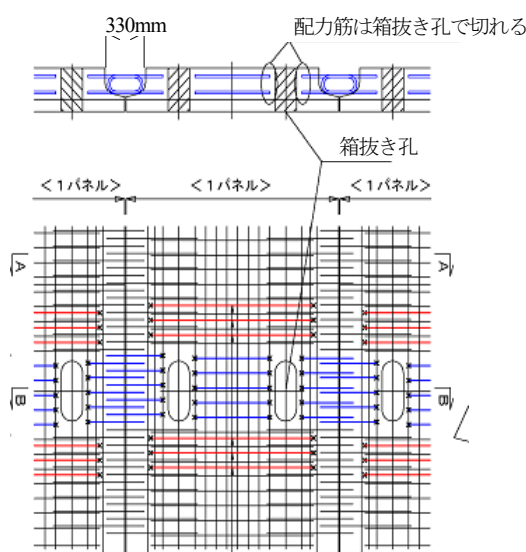


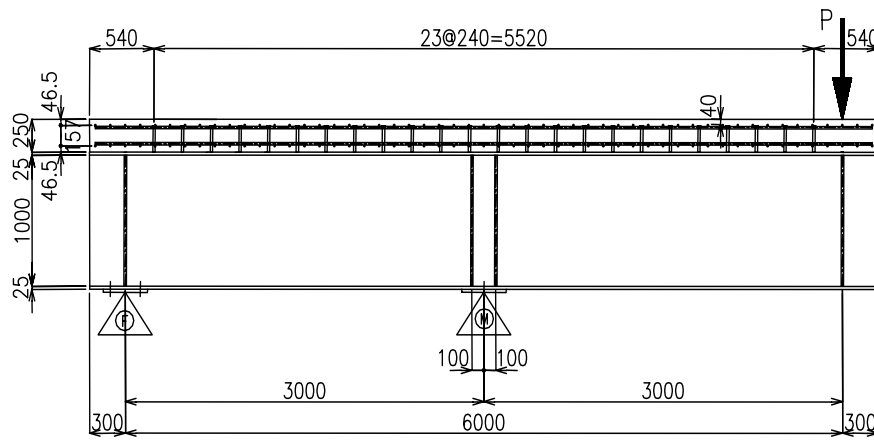
図-2 RC ループ継手部とスタッド箱抜き孔

表-2 コンクリート圧縮強度（設計強度：50N/mm²）

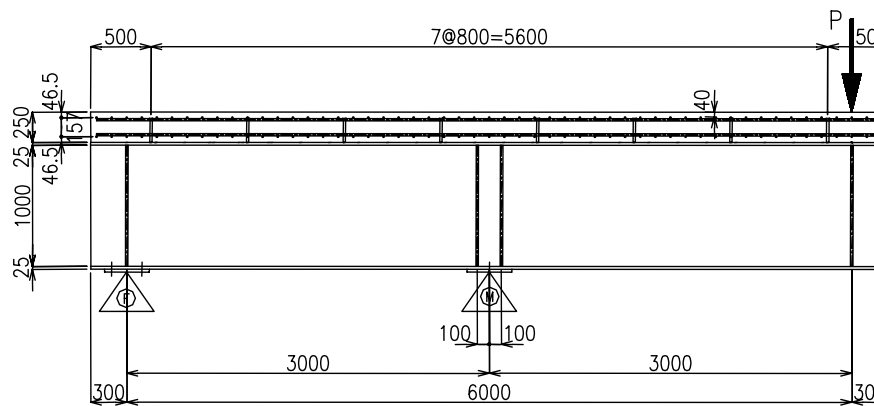
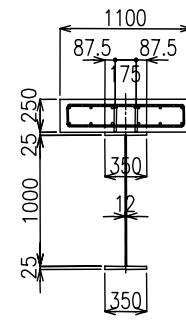
ケース	種別	f_c (N/mm ²)
A-2, B-2	場所打ち	54.7
C-2, C-3	プレキャスト	52.4
	場所打ち	53.7

表-3 スタッドの引張試験結果

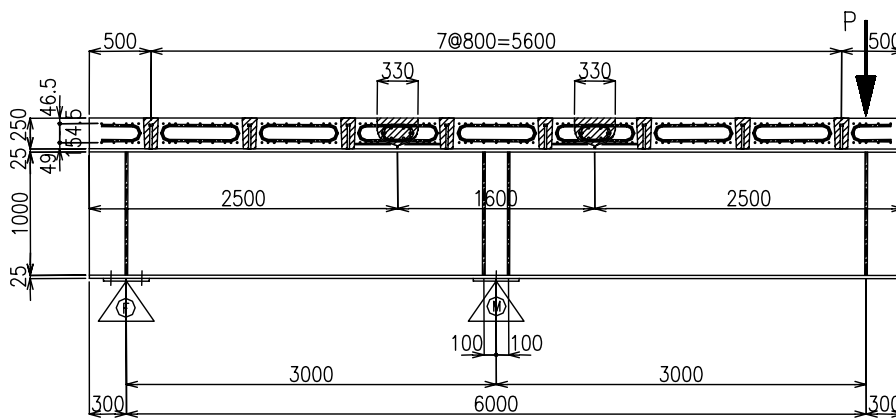
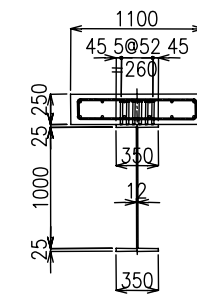
ケース	f_y (N/mm ²)	f_b (N/mm ²)
A-2, B-2 C-2, C-3	341	438



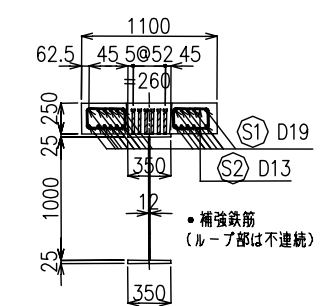
(a) A-2 供試体



(b) B-2 供試体



(c) C-2, C-3 供試体



※斜線部は膨張コンクリート
を後打ち

C-3供試体配筋

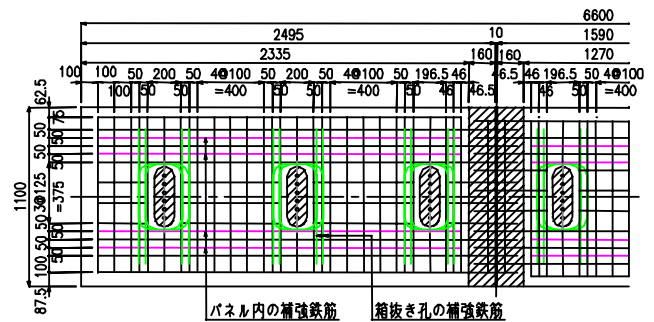
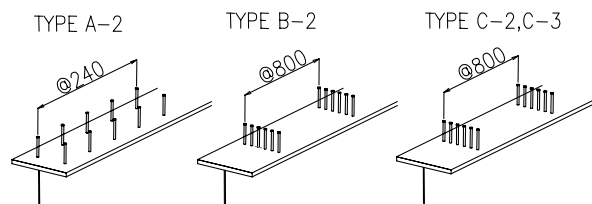


図-3 供試体形状

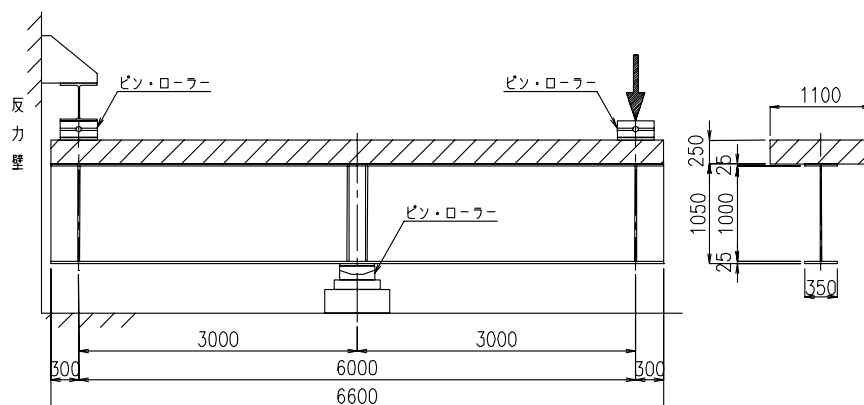


図4 載荷セットアップ

PCa 床版の間詰め部では隣接するパネルのループ鉄筋が交互に配置されるため、継手部で鉄筋のあきを確保するために、配力鉄筋（橋軸方向鉄筋）の最小配置間隔は125mm程度に制限される。また、ループ鉄筋の最小曲げ半径の制約から太径鉄筋の適用は困難で、配力鉄筋径はD19程度が上限となる。本実験ではこれらの制約を考慮して鉄筋配置を決定した。なお、PCa 床版では箱抜き孔で配力鉄筋が分断されるため、表-1では、この分断された鉄筋を控除して鉄筋比を算出している。同表から明らかのように、本実験の供試体は道路橋示方書²⁾の最小鉄筋比（2.0%）に満たないので、実験では主にひび割れ幅やひび割れ間隔に着目し、ひび割れ幅はパイ型変位計で測定した。

なお、本研究が対象とする PCa 床版連続合成桁では、箱抜き孔内にスタッドを配置する構造上の特徴から、スタッド本数も合理化する必要がある。道路橋示方書²⁾は合成桁の負曲げ域においてスタッドの水平せん断力を算出する前提として床版コンクリートを全断面有効として計算することとしているが、この仮定は安全側であるもののスタッド本数を増加させる要因となる。そこで、本実験の供試体では「鋼桁+鉄筋」断面で求めた床版配力鉄筋の応力度が許容応力度(140N/mm²)となる荷重（P=465kN）よりも、スタッドの許容せん断力に到達する荷重（P=939kN）が高くなるようにスタッド本数を設定したが、床版はコンクリートを全断面有効とせず計算した。具体的には、テンションスティフニングの効果を考慮して床版の分担軸力を算出し、この分担軸力をせん断スパン内に配置したスタッド本数で除することでスタッドの水平せん断力を算出した。

供試体形状を図-3に、載荷セットアップを図-4に、床版コンクリートの強度を表-2に、スタッドの引張試験結果を表-3に示す。

4. ひび割れ幅の算定法

4.1 初期ひび割れ状態を考慮したひび割れ幅の算定

現行の連続合成桁中間支点部のひび割れ幅制御設計

法¹⁾は、コンクリート標準示方書⁴⁾に規定されるひび割れ幅算定法を基に提案されているため、安定ひび割れ状態（新たなひび割れが発生しない程度にひび割れが生じ、ひび割れ幅が広がっていく状態）にあることが前提となっており、初期ひび割れ状態（最初のひび割れが発生し、その後新たなひび割れが次々に発生する状態）においてその適用に矛盾が指摘されている⁵⁾。文献5)では、初期ひび割れ状態と安定ひび割れ状態におけるひび割れ幅算定について下式が提案されている。

- ・ 初期ひび割れ時

$$w_M = L \left(\frac{N_{CR}}{E_s A_s} - \frac{\beta_m N_{CR}}{E_s A_s} - \varepsilon_{csd} \right) \quad (\beta_m = 0.6) \quad (1)$$

$$L = \frac{\sigma_{sr2} \phi}{2.7 f_{ctm} (1 + n \rho_s)} \quad (2)$$

$$\sigma_{sr2} = N_{CR} / A_s \quad (3)$$

- ・ 安定ひび割れ状態

$$w_M = \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \times \left(\frac{M_d}{E_s I_{st}} y_{sr} + \frac{\beta f_{ctm}}{E_s \alpha_{st} \rho_s} - \frac{\beta f_{ctm}}{E_s \rho_s} - \varepsilon_{csd} \right) \quad (\beta = 0.2) \quad (4)$$

ここに、

σ_{sr2} : ひび割れ軸力を鉄筋のみで受け持った場合の鉄筋応力 (N/mm²)

N_{CR} : 床版の初期ひび割れ軸力 (N)

A_s : 鉄筋断面積 (mm²)

E_s : 鉄筋のヤング係数 (N/mm²)

ε_{csd} : ひび割れた後のひび割れ幅の広がりを考慮する係数

β : 平均ひずみを考慮するための係数 (β_m は初期ひび割れ時の係数)

f_{ctm} : コンクリートの平均引張強度 (N/mm²)

ϕ : 鉄筋径 (mm)

n : ヤング係数比

ρ_s : 鉄筋比
 c : 配力筋の純かぶり (mm)
 c_s : 鉄筋ピッチ (mm)
 M_d : 設計曲げモーメント (N・mm)
 y_{sr} : 「鋼桁+鉄筋」断面の図心から、上側鉄筋までの距離 (mm)
 $\alpha_{st} : (=A_{st}I_{st}/(A_gI_g))$
 A_{st} : 「鋼桁+鉄筋」断面の断面積 (mm²)
 I_{st} : 「鋼桁+鉄筋」断面の断面 2 次モーメント (mm⁴)
 A_g : 鋼桁の断面積 (mm²)
 I_g : 鋼桁の断面 2 次モーメント (mm⁴)

式(4)の右辺 () 内は現行の設計式¹⁾を E_s で除したものの (ε_{csd} を除く)と同じであり、すなわちコンクリート標準示方書⁴⁾のひび割れ幅算定式に鉄筋の引張剛性(テンションスティフニング)を考慮した式が基になっている。よって、コンクリート標準示方書の改定⁶⁾に伴い式(4)は式(4')に変換できる。また、文献5)では安定ひび割れ状態でひび割れ幅を算出する際は $\beta=0.2$ としており、同様に現行設計法¹⁾も $\beta=0.2$ を採用している。これは繰返し載荷の影響で鉄筋とコンクリートとの付着の劣化が起こることを考慮したものであるが、本実験では繰返し載荷を行わずに単調載荷を採用したので、安定ひび割れ状態の β としてはHanswilleが推奨する値⁷⁾0.4を用い、式(1)および式(4')によりひび割れ幅を算出し実験結果と比較した。

$$w_M = 1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \times \left(\frac{M_d}{E_s I_{st}} y_{sr} + \frac{\beta f_{ctm}}{E_s \alpha_{st} \rho_s} - \frac{\beta f_{ctm}}{E_s \rho_s} - \varepsilon_{csd} \right) \quad (\beta = 0.4) \quad (4')$$

ここに、

k_1 : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数

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で、式(5)による

$$k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7 \quad (5)$$

f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数で、式(6)による

$$k_3 = \frac{5(n+2)}{7n+8} \quad (6)$$

n : 引張鋼材の段数

4.2 FEAによるひび割れ幅の分析

ひび割れ幅を本実験だけで論じるにはデータが少ないことから、ひび割れ挙動を解析でも検討し考察した。解析には材料レベルの構成則に基づきコンクリートのひび割れや圧壊、鉄筋の降伏を考慮した詳細なシミュレートが可能な有限要素解析ソフトウェア「FINAL」を使用した。曲げ実験では床版上面に多数のひび割れが生じるため、コンクリート要素は分散ひび割れモデルとしたが、このモデルではひび割れの効果を要素内に分散させる取扱いとなるため、解析結果から直接にひび割れ幅を得ることはできない。そこで、ここでは文献8), 9), 10)で提案されている方法に倣いひび割れ幅を求めた。すなわち、分散ひび割れモデルに用いるひび割れ後のコンクリートの応力-ひずみ関係はテンションスティフニング効果を考慮して決定した。具体的には1次元RC部材の付着の微分方程式を解いて得られるひび割れ幅とひび割れ間隔を考慮し、ひび割れたRC部材としての平均応力-平均ひずみ関係を求め、これをFEAにおけるコンクリートの材料特性とした。解析に用いた要素を表4に、解析モデル概要を図5に示す。RC部材としての床版の平均応力-平均ひずみ関係を図6に、解析に用いたコンクリートの一軸応力-ひずみ関係を引張側について図-7(a)に、圧縮側を同図(b)に示す。鋼材の一軸応力-ひずみ関係は、鋼板について図-8(a)を、頭付きスタッド($\phi 22$)について同図(b)を、鉄筋について同図(c)を用いた。

A-2 供試体	C-2 供試体
節点数 : 19470	節点数 : 18795
要素数 : 18141	要素数 : 17411
B-2 供試体	C-3 供試体
節点数 : 19086	節点数 : 18795
要素数 : 17909	要素数 : 18179

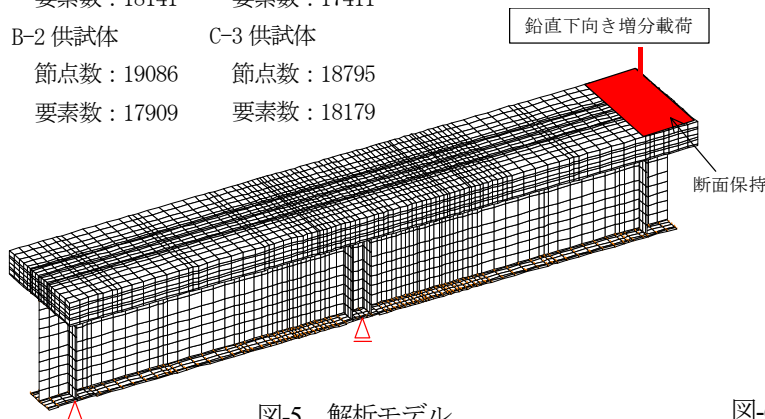


図-5 解析モデル

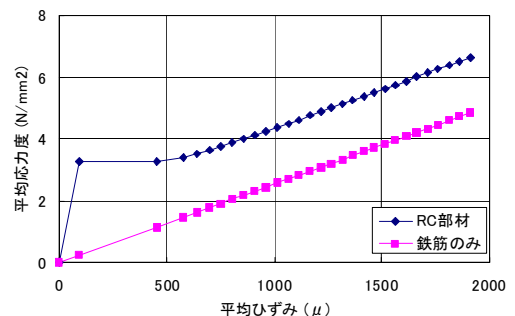


図-6 RC部材としての平均応力-平均ひずみ関係

表-4 使用要素

部位	要素種類	備考
床版	ソリッド要素	・応力-ひずみによる材料非線形特性を設定 ・ひび割れ考慮
鋼桁	シェル要素	・応力-ひずみによる材料非線形特性を設定
スタッド	ビーム要素	・主桁と床版の力の伝達はスタッドのみで行う ・応力-ひずみによる材料非線形特性を設定
鉄筋	分布鉄筋	・応力-ひずみによる材料非線形特性を設定
箱抜き孔補強鉄筋	ロッド要素	・応力-ひずみによる材料非線形特性を設定
床版-鋼桁間の接触	接触要素	・床版-鋼桁間の接触／離間を考慮する

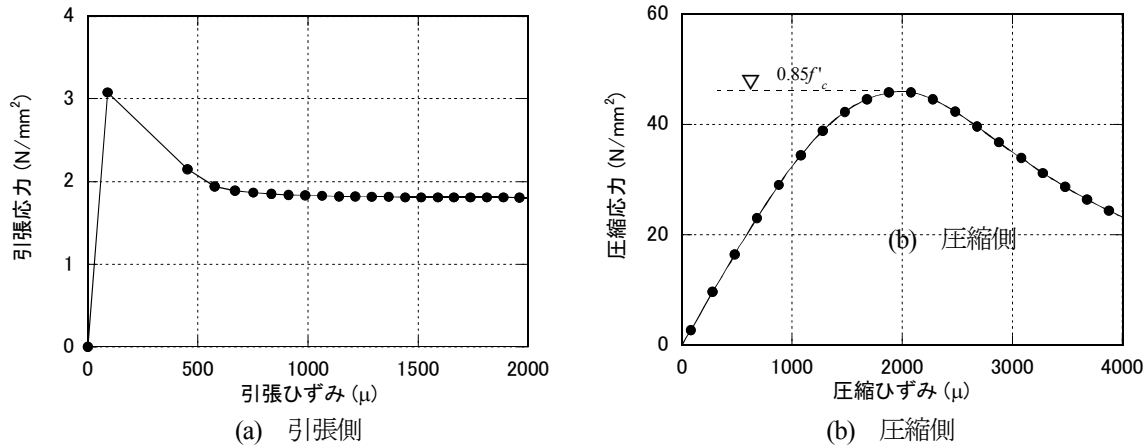


図-7 コンクリートの応力-ひずみ関係

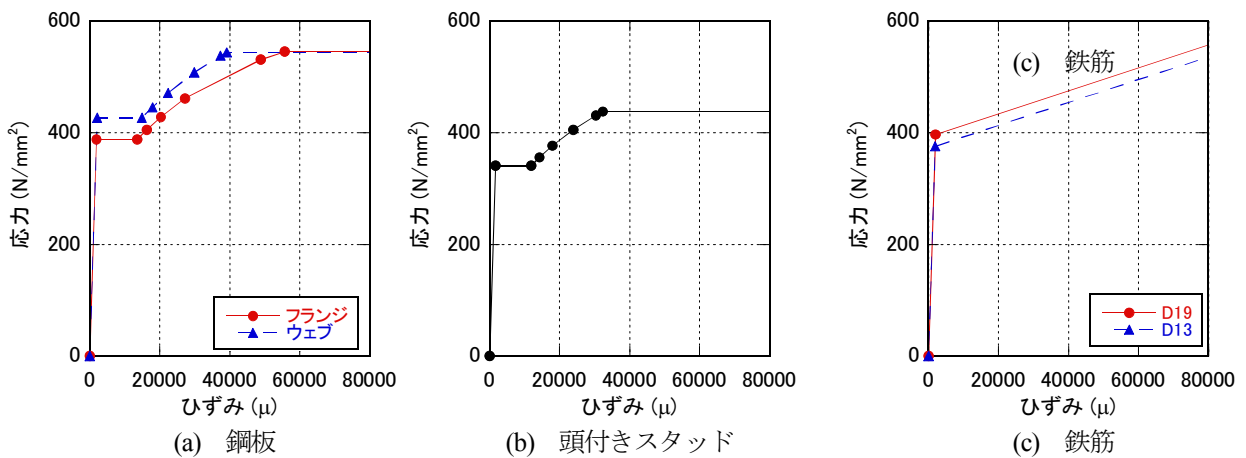


図-8 鋼材の応力-ひずみ関係

本解析は床版のひび割れ挙動の再現を主眼としたので鋼材とコンクリートの材料非線形性は考慮したが、解の収束性の問題から幾何学的非線形性は考慮せずに計算した。実験ではコンクリートがひび割れた後、鉄筋と鋼桁が降伏し、最終的に鋼桁が塑性域で座屈して耐力低下を生じたが（後述，5.），幾何学的非線形性を無視したことで解析では実験の最大荷重近傍の挙動は再現できていない。このため、解析では鉄筋が降伏する荷重を若干上回る荷重レベルまでで計算を打ち切った。また、文献8), 9), 10)では、この方法で床版のひび割れ幅を評価する場合、式(7)で表されるテンションスティフニングの

効果を表す係数 β が、CEB/FIP-90に規定される値¹¹⁾に比べて大きくなり、テンションスティフニングの効果をやや高めに評価する傾向があると述べている。

$$\beta = \frac{\varepsilon_{sII} - \varepsilon_{sm}}{\varepsilon_{sII} - \varepsilon_{sI}} \quad (0 \leq \beta \leq 1) \quad (7)$$

ここで、 ε_{sII} , ε_{sI} , ε_{sII} , ε_{sm} は図-9による。

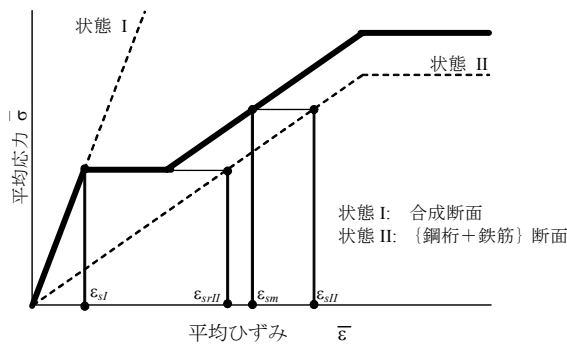


図-9 平均応力-平均ひずみ関係 (βの算出)

5. 実験・解析結果

5.1 荷重-変位関係とひび割れ性状

実験で得られた荷重-変位関係と FEA の結果を図-10,11 に示す。供試体 4 体の挙動はすべて同様であり、載荷荷重 200kN 前後で最初のひび割れが確認され、荷重増加に伴ってひび割れ本数が増加し、1900kN 付近でウェブの座屈とともに荷重は低下した。なお、最大荷重時における床版と鋼桁とのずれ（桁端部で測定）は、A-2 供試体で 0.16mm、B-2 供試体で 0.62mm、C-2 供試体で 0.89mm および C-3 供試体で 0.89mm であり、最終載荷時まで床版と桁とのずれは比較的小さく、床版と鋼桁は一体として挙動していた。FEA の結果は、いずれの供試体に対しても良く一致した。

図-12 は、「鋼桁+鉄筋」断面で計算した床版配力鉄筋応力度が許容応力度 140N/mm²に達する荷重レベル（載荷荷重 P=465kN、曲げモーメント M=1485kN・m）でのひび割れ発生状況である。

場所打ち床版でスタッド間隔のみ異なる A-2 供試体と B-2 供試体とを比較すると、ひび割れ間隔では、A-2 供試体の中間支点付近に発生した 2 本のひび割れの間隔が約 250mm であるのに対し、B-2 供試体の中間支点付近に発生したひび割れの間隔は約 350mm でやや広がっているものの、両者のひび割れ発生荷重やひび割れ本数に大きな違いは見受けられなかった。PCa 床版の場合には桁の曲げモーメントが最大となる中間支点上の断面ではなく、中間支点到近いコンクリート打継目が最初のひび割れの発生位置になっていた。また、ひび割れ発生荷重はわずかに高かったが、これは、PCa 床版では箱抜き孔の位置で配力鉄筋が分断されるため欠損した配力鉄筋を補うための補強鉄筋が配置されていること（図-3 参照）と、実験では PCa 床版を打設してから 13 日後に桁と合成しており、このためコンクリートの乾燥収縮の影響が低減されたことが考えられる。

ループ継手とスタッド箱抜き孔に関しては、打継目にひび割れが生じてから後打ちコンクリート内に新たに発生するひび割れは少なく、ループ継手と箱抜き孔におけるひび割れ間隔は打継目の間隔を考慮することが適

当と考えられる。また、C-2 供試体と C-3 供試体のひび割れパターンは同様であり、C-3 供試体のスタッド箱抜き孔の周りに設置した補強鉄筋は箱抜き孔を起点とするひび割れの発生を遅らせるのには効果があったが、ひび割れの発生を防ぐほどの効果は認められなかった。

5.2 鉄筋ひずみ

床版の上側配力鉄筋に貼付けたひずみゲージにより測定した C シリーズの鉄筋ひずみを図-13 に示す。Bxx はひずみゲージの番号を示し、縦軸は着目する断面の曲げモーメントである。図中には文献 5) で提案されている鉄筋応力の算定法（初期ひび割れ状態では式(3)、安定ひび割れ状態では式(8)）から求めた計算値と鉄筋の降伏ひずみ（ $\epsilon_y=1985\mu$ ）を示す。

$$\sigma_M = \frac{M_d}{I_{st}} y_{sr} + \frac{\beta f_{ctm}}{\alpha_{st} \rho_s} \quad (\beta = 0.4) \quad (8)$$

プレキャスト床版の C-2, C-3 供試体については、どちらの供試体でもプレキャスト床版パネル部（d,f 断面）の鉄筋ひずみは計算値より小さくなる傾向があり、間詰め部（a,g 断面）の鉄筋ひずみは、降伏ひずみに到達する直前までは平均ひずみ計算値と最大ひずみ計算値の範囲内にほぼ収まっていた。d,f 断面において鉄筋ひずみが計算値よりも小さくなる理由は 5.1 で述べたように、計算では考慮していない補強鉄筋の影響によるものと考えられる。また、いずれの供試体も間詰め部（a,g 断面）において、ひずみゲージを貼り付けた 6 本の鉄筋のうち 2 本が他よりもひずみが小さくなる傾向が認められる。これらの鉄筋はスタッド箱抜き孔間に配筋されており、箱抜き孔の位置で分断されていることから引張応力の分担が低下したものと考えられる。図-13 に示す計算値ではこれらの鉄筋を無視して計算したものであり、この取り扱いが妥当なものであると考えられる。

5.3 ひび割れ幅

ひび割れ幅の計算値は、現行設計法 1) と文献 5) に基づく式(1)および(4')で算出した。式(1)、式(4')では鉄筋の平均ひずみを用いてひび割れ幅を計算している。しかし、実験では同一のひび割れに取り付けた π ゲージであっても位置によって異なったひび割れ幅が測定されるなど結果には多少のばらつきが認められた。そこで、最大ひずみを用いて計算したひび割れ幅と実験の最大ひび割れ幅は良く対応したとの報告¹²⁾もあることから、鉄筋の最大ひずみを用いたひび割れ幅も算出した。代表的なひび割れについては解析結果を付している。解析結果の凡例で、「FINAL (W 最大)」は「FINAL (W 平均)」を 1.3 倍したもので、最大ひび割れ幅を示すものである。ここで、最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の比 1.3 は、Leonhart が実験結果に基づき報告している値¹³⁾を参考にしたものである。

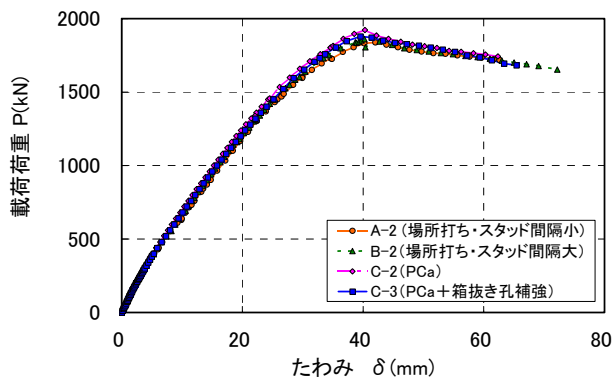
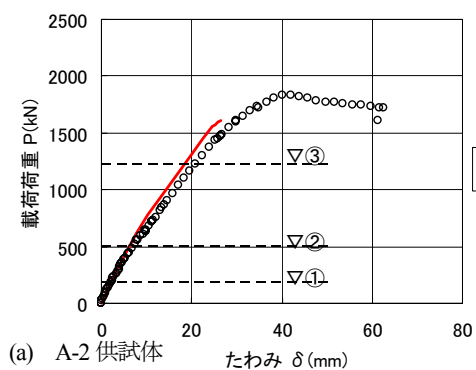


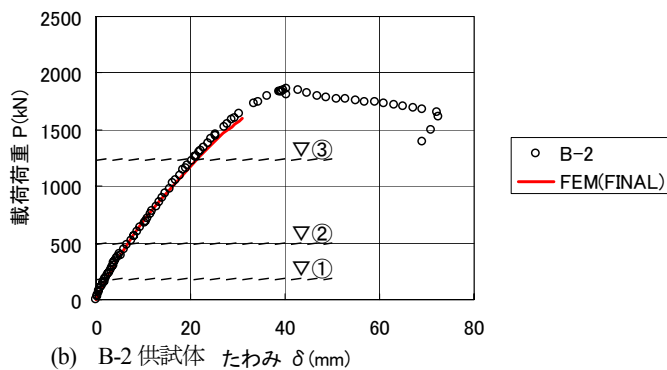
図-10 荷重-たわみ関係

【荷重レベル計算値 (図-11)】

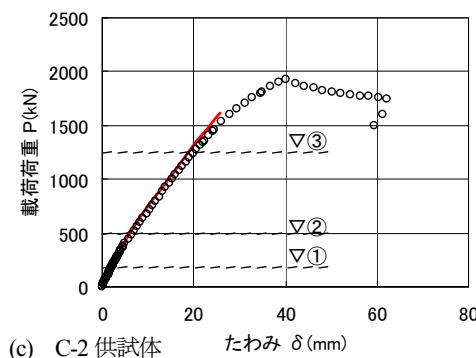
- ① コンクリートの初期ひび割れ発生
(床版の乾燥収縮を材例に応じて文献4) に従い考慮)
- ② 鉄筋の許容応力レベル
(「鋼桁+鉄筋」断面で求めた鉄筋応力が 140N/mm^2)
- ③ 鉄筋の降伏レベル
(テンションステイフニング考慮の鉄筋最大応力が降伏応力度)



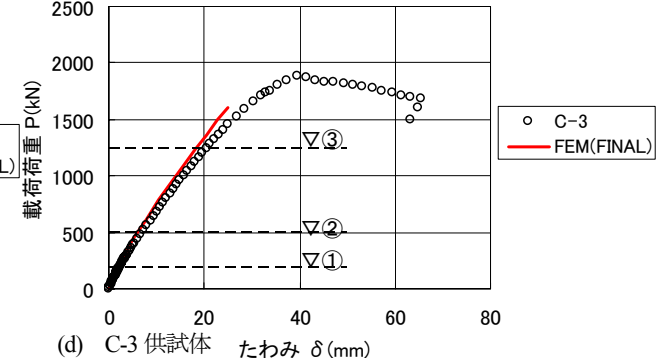
(a) A-2 供試体



(b) B-2 供試体



(c) C-2 供試体



(d) C-3 供試体

図-11 荷重-たわみ関係 (解析との比較)

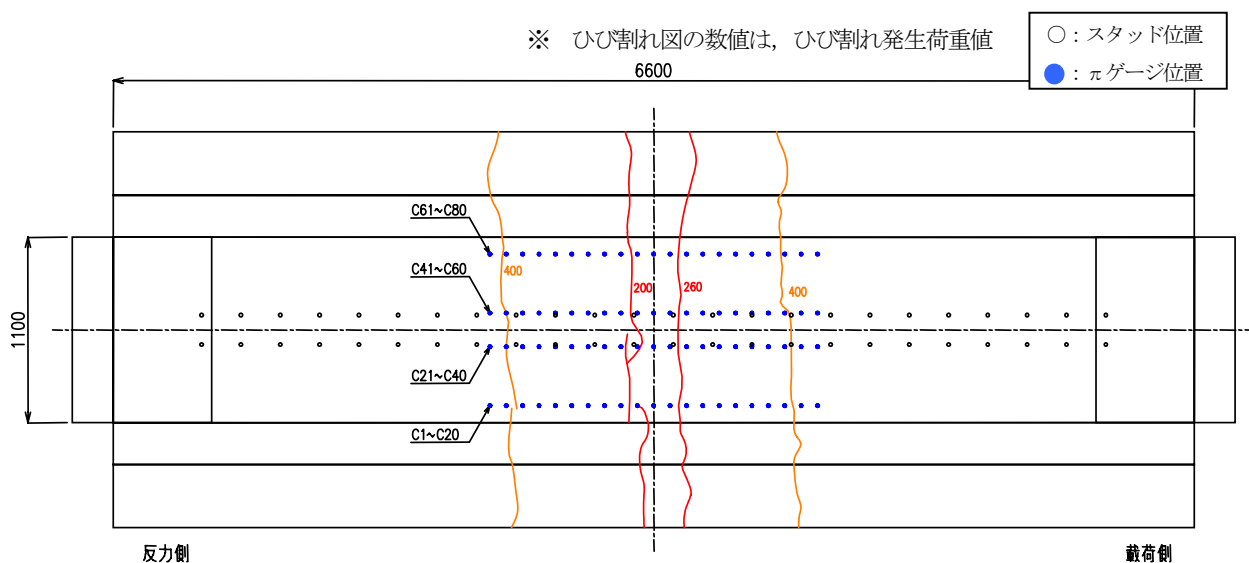
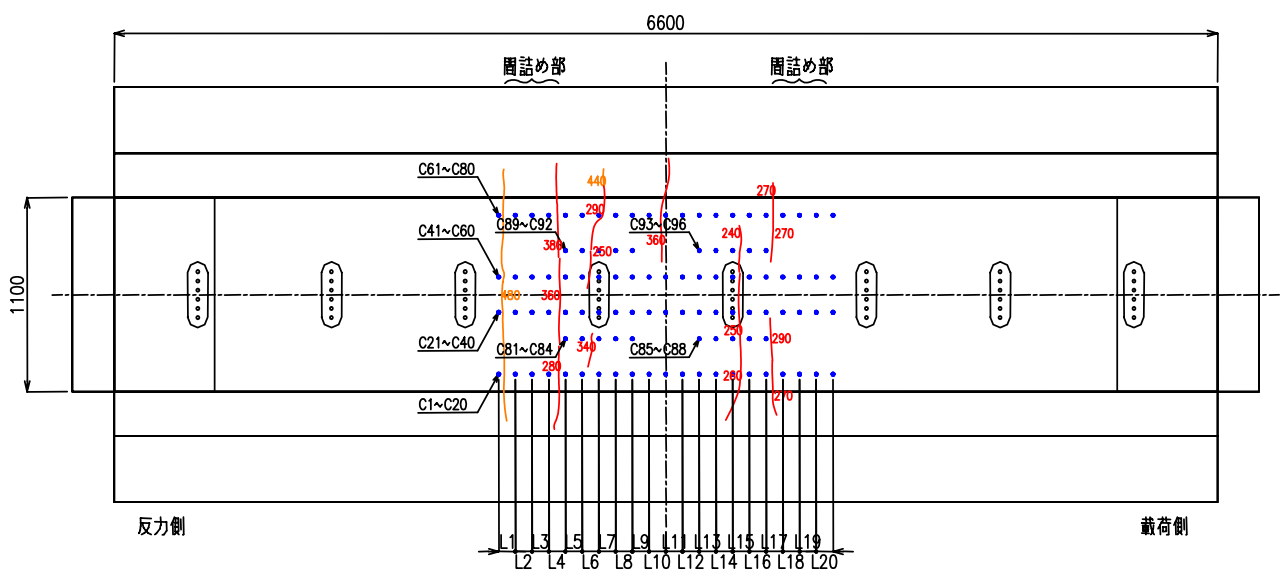
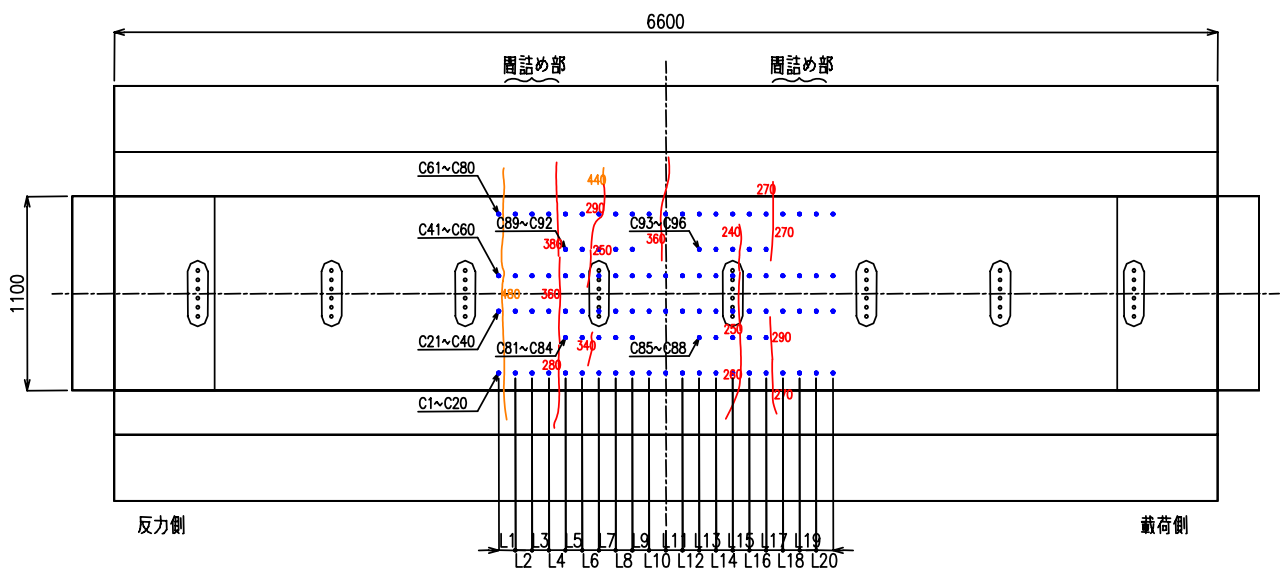
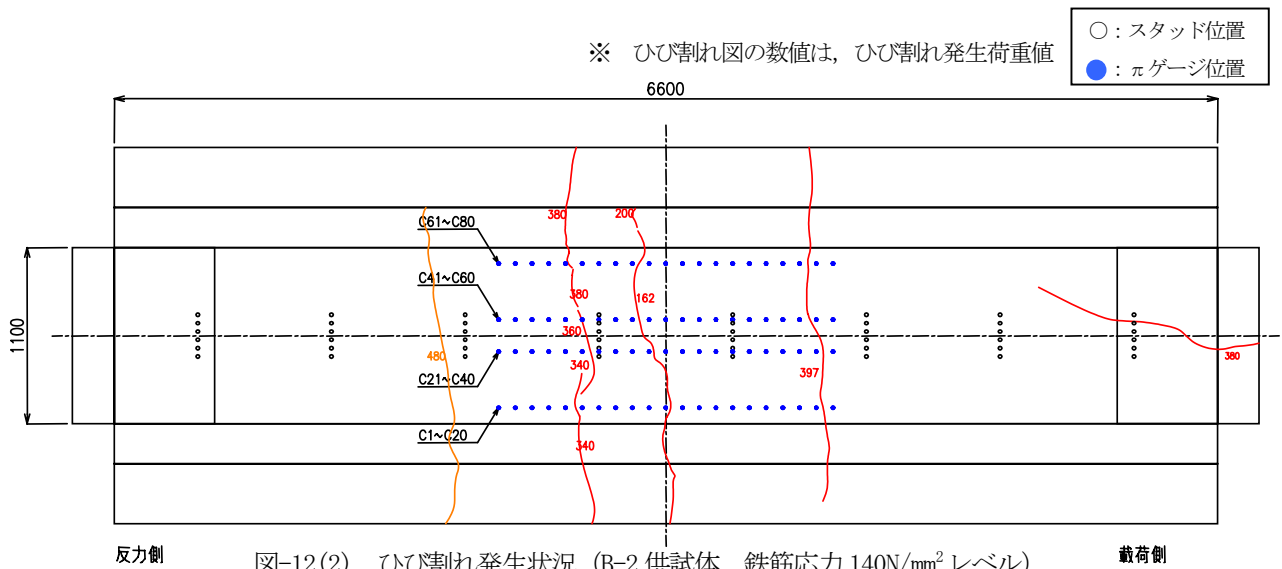


図-12(1) ひび割れ発生状況 (A-2 供試体, 鉄筋応力 140N/mm^2 レベル)



1485kNm) と考えると、A-2 供試体では M_d までに CR①, ②, ④, ⑤, ⑧の 5 本のひび割れが発生しており、これらのひび割れ幅は M_d 時点でいずれも計算値の範囲内にあった。

(2) B-2 供試体 (場所打ち床版, スタッド間隔 800mm)

B-2 供試体の床版上面のひび割れ幅と曲げモーメントの関係を図-15 に示す。ひび割れ幅は概ね A-2 供試体に類似した傾向であるが、最も早く生じた CR⑦のひび割れ幅は最大ひずみから求めたひび割れ幅よりも大きくなっていた。この理由は明確でないが、CR⑦の次に発生した CR④とのひび割れ間隔が約 350mm であり、初期段階で発生したひび割れの間隔が A-2 供試体よりも広がっていたこと、また、A-2 供試体では中間支付近に 2 本のひび割れがほぼ同じ荷重レベルで発生しているのに対して、B-2 供試体では CR⑦の発生から CR④の発生までに荷重が増加していることなどが CR⑦のひび割れ幅が大きくなった要因と考えられる。さらに、CR⑦の進展方向は床版主鉄筋に対して傾斜しているため、 π ゲージの測定方向とひび割れ開口方向とが完全に一致しなかったことでひび割れ幅が大きく測定された可能性も考えられる。CR⑦の解析結果では、実験結果や文献 5) に基づく算定結果に対し、ひび割れ幅を全体的に小さく評価している。解析では乾燥収縮の影響を実際の材齢に基づき考慮しているが、文献 5) の算定結果のほうが実験結果と概ね一致していることから、文献 8), 9), 10) が指摘するように FEA ではテンションスティフニングの効果を過大に評価していることが推測される。

(3) C-2 供試体 (PCa 床版, スタッド箱抜き無補強)

C-2 供試体の床版上面のひび割れ幅と曲げモーメントの関係を図-16 に示す。PCa 床版を有する供試体では、ひび割れの枝分かれや蛇行の傾向が強く、A-2, B-2 供試体のように個々のひび割れに着目してひび割れ幅のデータを整理するのが困難なため、 π ゲージ設置ライン (L1~L20) を基準に曲げモーメントとひび割れ幅の関係を作図した。

PCa 床版パネルに生じたひび割れ幅は計算値よりも小さくなる傾向であった。これは、前述した補強鉄筋について、ループ継手で不連続となる鉄筋であるため文献 5) に基づく計算では無効な鉄筋としたが、実際には PCa 床版の中央付近ではこれらの鉄筋もある程度の応力を分担しているためと考えられる。ループ継手 (間詰め部) の打継目やスタッド箱抜き孔の打継目ではひび割れ幅は計算値よりも大きくなる結果となった。5.1 で考察したように、打継目にひび割れが生じるとその付近に新たなひび割れは発生しておらず、ひび割れ間隔は間詰め幅 (330mm) より小さくならないという条件で解析した結果 (図中右下グラフ) も精度よく一致していることから、PCa 床版ではひび割れ間隔について間詰め幅以下とならないように制限を設ける必要があると思われる。

(4) C-3 供試体 (PCa 床版, スタッド箱抜き補強)

C-3 供試体の床版上面のひび割れ幅と曲げモーメントの関係を図-17 に示す。ループ継手 (間詰め部) の打継目 (L4) では、C-2 供試体と同様に床版端部でひび割れ幅が大きくなっていたが、設計荷重レベル (M_d) では平均ひずみによる計算値と最大ひずみによる計算値の間にあり、これも C-2 供試体と同様の傾向であった。

(5) 平均ひび割れ幅の比較

供試体の相対比較を行うために、橋軸方向に並ぶ π ゲージを 4 本の測線 (測線 1: C1~C20, 測線 2: C21~C40, 測線 3: C41~C60, 測線 4: C61~C80) に分け、各測線について次式のように平均ひび割れ幅 $\overline{w(P)}$ を算出した。

$$\text{測線 1 の場合: } \overline{w(P)} = \frac{\sum_{i=1}^{20} C_i(P)}{n_c(P)} \quad (9)$$

ここに、

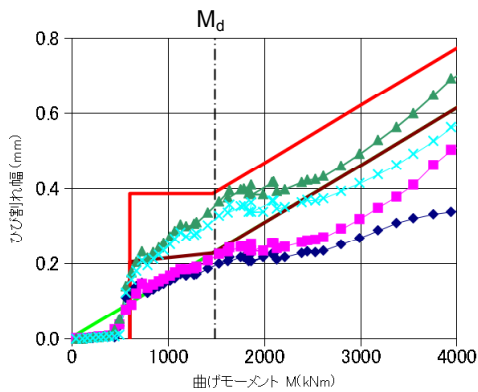
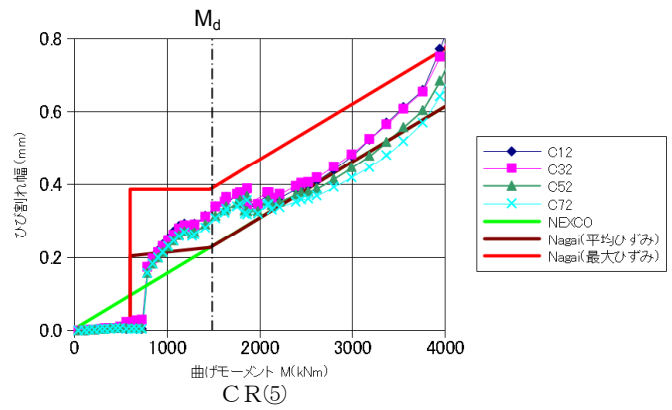
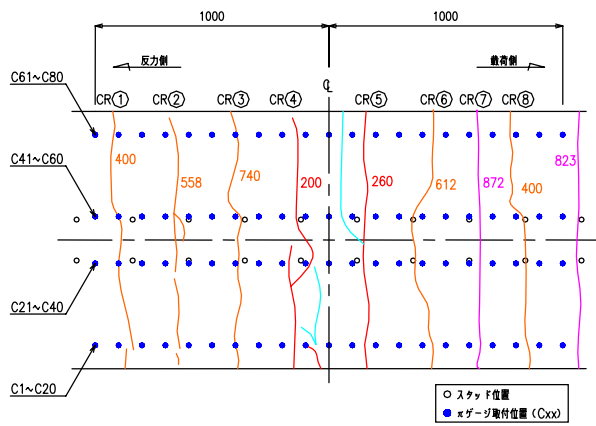
$C_i(P)$: 荷重 P における π ゲージ C_i の測定結果

$n_c(P)$: 荷重 P において着目する測線を横切るひび割れの本数

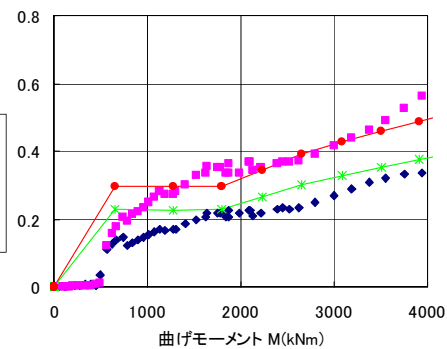
なお、プレキャスト床版では間詰め部でひび割れ幅が大きくなる傾向があったため、プレキャスト床版を有する供試体 (C-2, C-3) については、平均ひび割れ幅はパネル部と間詰め部に分けて整理した。平均ひび割れ幅の結果を表-5 に示す。プレキャスト床版のひび割れ幅はループ継手部 (間詰め部) で大きくなる傾向があるが、そのひび割れ幅は、場所打ち床版のひび割れ幅と同程度であり、ひび割れ分散性は遜色ないことがわかる。

表-5 各供試体の平均ひび割れ幅

	鉄筋応力 140N/mm ² 時			最大荷重時		
	ΣC_i	nc	w	ΣC_i	nc	w
	(mm)	(本)	(mm)	(mm)	(本)	(mm)
A-2	1.146	4.5	0.255	6.31	9.0	0.701
B-2	1.034	3.0	0.345	6.20	9.3	0.670
C-2 一般部	0.355	1.5	0.223	2.96	7.5	0.395
C-2 間詰め	0.604	2.5	0.242	3.25	4.0	0.813
C-3 一般部	0.231	1.8	0.132	2.28	7.5	0.304
C-3 間詰め	0.629	4.3	0.148	3.64	6.0	0.607

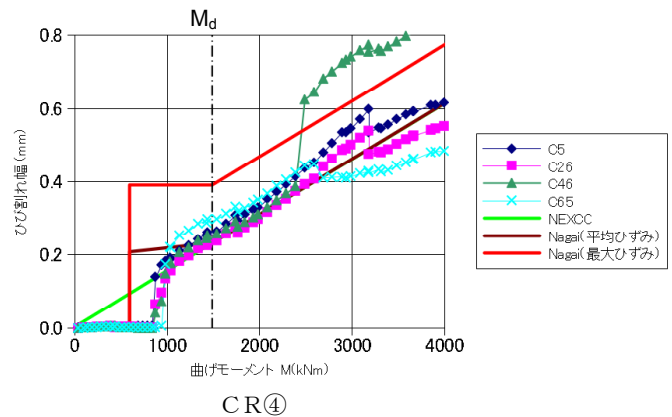
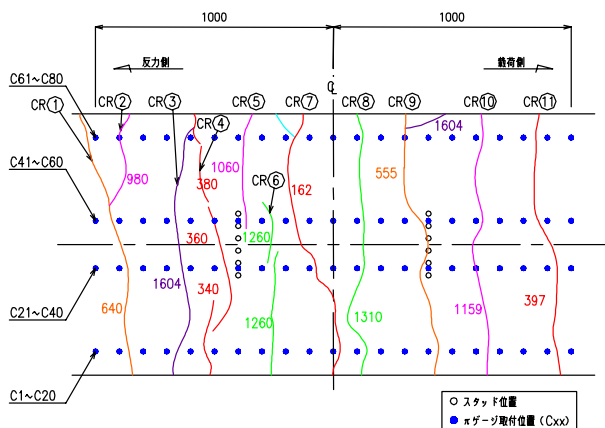


CR④

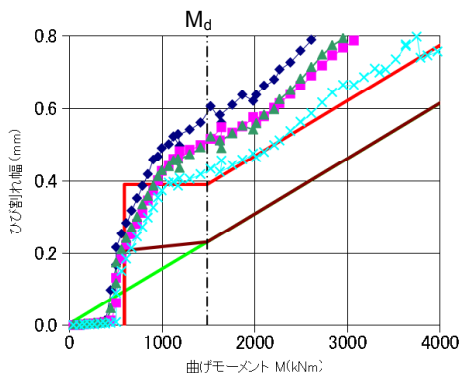


CR④の解析結果

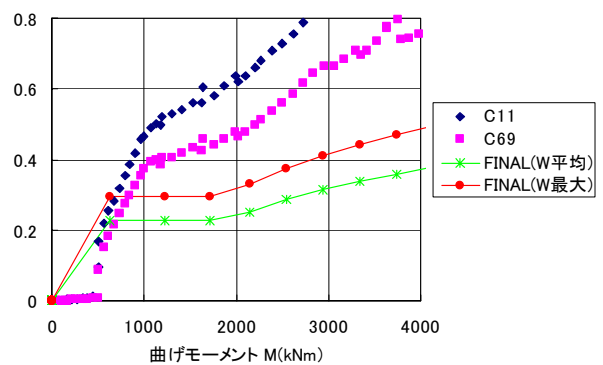
図-14 A-2 供試体ひび割れ幅



CR④



CR⑦



CR⑦の解析結果

図-15 B-2 供試体ひび割れ幅

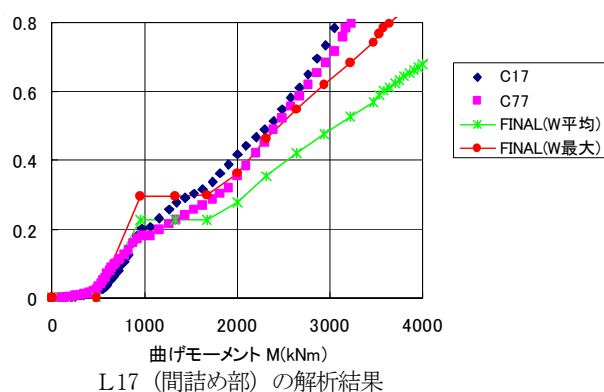
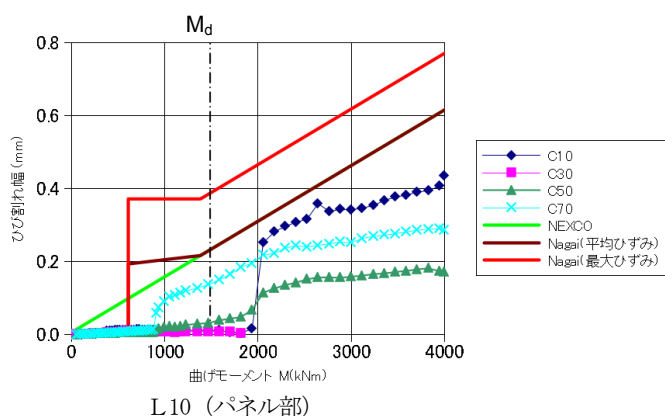
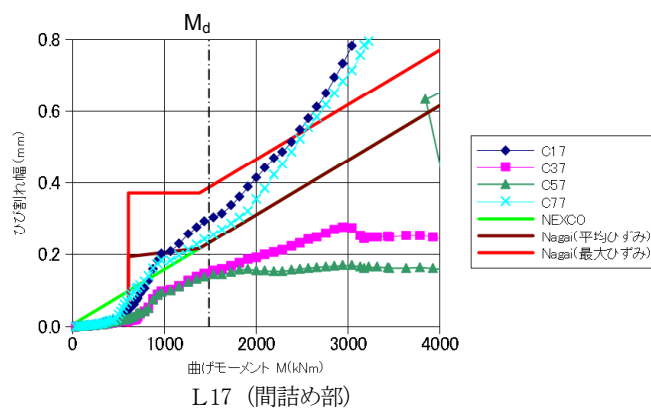
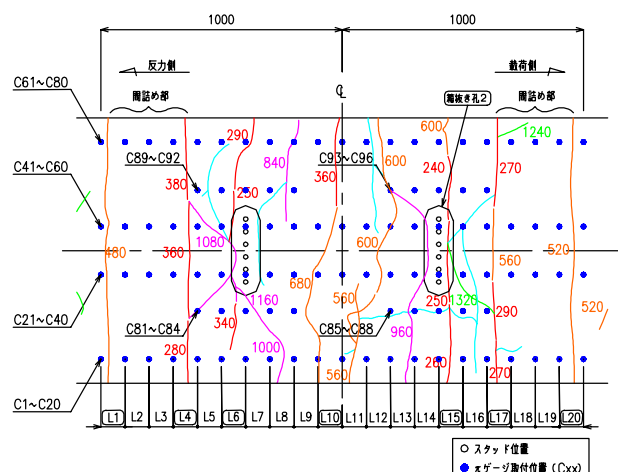


図-16 C-2 供試体ひび割れ幅

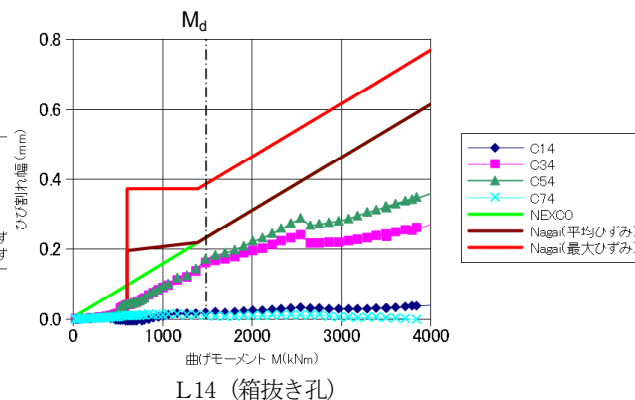
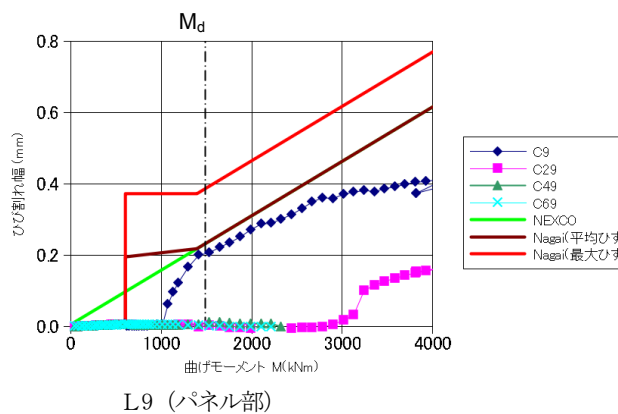
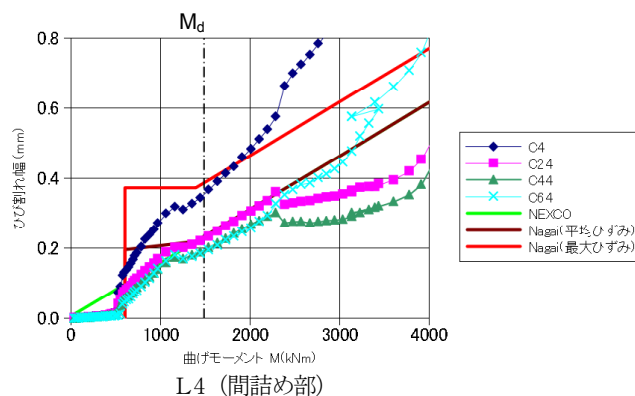
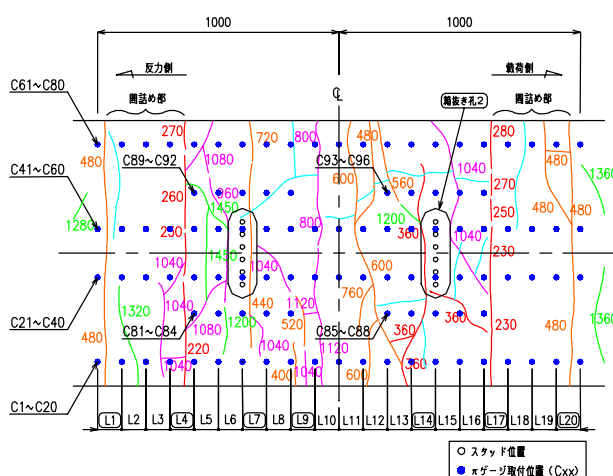


図-17 C-3 供試体ひび割れ幅

6. まとめ

PCa 床版を鋼連続合成桁に適用する場合に課題となるひび割れ特性について、合成桁負曲げ実験を実施し以下の知見を得た。

- (1) 合成桁としての全体的な挙動は、スタッドを近接配置し橋軸方向のスタッド間隔を 800mm まで広げた場合と、橋軸方向のスタッド間隔を密にした場合とで変わらない。
- (2) 場所打ち床版と PCa 床版のどちらの場合も鉄筋応力度とひび割れ幅は文献 5)による計算とほぼ一致しており、この方法で設計が可能と考えられる。
- (3) プレキャスト床版の場合、ループ継手（間詰め部）やスタッド箱抜き孔の打継目においてひび割れ幅が大きくなる傾向があり、これらの部位をひび割れ幅照査の重点にする必要がある。また、間詰め部においてひび割れ間隔は打継目間隔（間詰め幅）以下とならないように制限を設けることにより、文献 5)の方法で評価が可能である。
- (4) スタッド箱抜き孔の周囲への補強鉄筋の配置は、箱抜き孔のひび割れ発生を遅らせ、ひび割れ幅を低減することができる。しかし、設計荷重レベルでは、補強鉄筋がない場合でも間詰め部打継目のひび割れ幅と同程度であったことから、過密配筋を避ける観点から孔周囲の補強鉄筋は不要と考える。

なお、鋼連続合成桁橋の床版の許容ひび割れ幅を $w_a=0.0035c$ (c :床版配力鉄筋のかぶり)とした場合、供試体では $w_a=0.186\text{mm}$ となる。本論文では、一般的な連続合成桁橋よりも鉄筋比を小さくした供試体（鉄筋比 $\rho_s=1.36\%$ ）で実験を行っていることから、ひび割れが生じてすぐにこの許容値を超える結果となっている。この傾向はすべての供試体で同様であり、許容ひび割れ幅を満足させる観点からは供試体の鉄筋比は全体に小さすぎたが、図-12 に示すように、許容応力度レベルにおけるひび割れは分散して発生する傾向が確認された。

PCa 床版連続合成桁橋の採用にあたって現状ではループ継手鉄筋は D19 が適用の上限となっているが、D22,D25 などのより太径の鉄筋が要求されるケースも考えられるため、太径ループ継手の性能検証が望まれる。

参考文献

- 1) (財)高速道路技術センター：PC 床版鋼連続合成 2 主鈑桁橋の設計・施工マニュアル，2002.3
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2002
- 3) 井ヶ瀬良則，山浦明洋，上條崇，奥井義昭，長井正嗣：プレキャスト床版連続合成桁のスタッドに関する実験，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，CS2-013，pp.65-66，2009
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書「設計編」，1996
- 5) 長井正嗣，奥井義昭，岩崎英治：連続合成桁の初期ひび割れ状態を考慮したひび割れ幅，鉄筋応力算定法の

一提案，土木学会論文集，No.759/ I -67，pp.283-292，2004.4

- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書「構造性能照査編」，2002
- 7) Hanswille G，長井正嗣，家村剛：Hanswill 教授に聞く，橋梁と基礎，2000-11
- 8) Qaiser-uz-Zaman KHAN，Takuji HONDA，Yoshiaki OKUI，Masatsugu NAGAI：A Method for Crack Width Evaluation of Continuous Composite Girder Bridges Accounting for Shear-lag Effect，Structural Eng. / Earthquake Eng.，JSCE，Vol.20，No.2，131s-141s，2003 July
- 9) 本田卓士：FEM 解析による連続合成 2 主桁橋におけるひび割れ幅算出時の床版有効幅に関する研究，埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程 建設工学専攻修士論文，2003.2
- 10) Qaiser-uz-Zaman KHAN：Effective Width for Crack Width Evaluation in Negative Bending Moment Regions of Continuous Composite Girder Bridges，埼玉大学大学院理工学研究科博士後期課程 博士論文，2003.9
- 11) Comité Euro-International du Béton：CEB-FEP Model Code 1990，Thomas Telford，1993
- 12) 中川治士，長井正嗣，岩崎英治，奥井義昭，細見，中本：連続合成桁の初期ひび割れ性状の解明に関する実験的研究，土木学会第 60 回年次学術講演会，I -488，2005
- 13) F・レオンハルト：レオンハルトのコンクリート講座④ コンクリート構造の限界状態と変形，鹿島出版，1985

(2009 年 9 月 24 日受付)