

(4) プレストレスしない連続合成桁橋の中間支点部の設計法

Design method for intermediate supporting area in for steel-concrete continuous composite girder bridges
without longitudinal prestressing

坂本純男*, 橋本果耶**, 大山 理***, 栗田章光****
Sumio Sakamoto, Kaya Hashimoto, Osamu Ohyama, Akimitsu Kurita

*片山ストラテック(株)技術本部橋梁設計部(〒551-0021 大阪府大阪市大正区南恩加島 6-2-21)

**大阪工業大学大学院工学部都市デザイン工学科(〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮 5-16-1)

***工博, 片山ストラテック(株)技術本部橋梁設計部(〒551-0021 大阪府大阪市大正区南恩加島 6-2-21)

****工博, 大阪工業大学教授, 工学部都市デザイン工学科(〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮 5-16-1)

Recently, in Japan, the steel-concrete composite girder bridges aiming the cost reducing and improvement of durability are adopting widely and its number is increasing remarkably. However, the design method in the region of the intermediate support for steel-concrete continuous composite girder bridges, where tension stiffening of concrete is taken into account, is not yet clarified perfectly. This paper, therefore, deals with the relationship between crack space and ratio of the reinforcement and the comparison between analytical and test results by using a comparative large-scale girder.

Key words: continuous composite girder bridge, crack, reinforcement ratio
negative bending moment, tension stiffening

1. はじめに

近年, わが国においては, 公共事業全般に対する徹底したコスト削減政策に応じて, 建設頻度の高い中小規模の橋梁として鋼・コンクリート連続合成桁橋の復権が叫ばれ, 積極的な見直しおよび採用が図られつつある。

プレストレスしない連続合成桁橋の中間支点部には負の曲げモーメントによりコンクリート床版にひび割れが発生することから, 抵抗断面としては, 鋼桁+床版橋軸方向鉄筋のみを考慮するのが一般的である¹⁾。しかし, ひび割れ間のコンクリートのテンションスティフニング効果を考慮することにより, より経済的な断面決定を行うことが可能である。このような考え方は, ヨーロッパでは定着しているが²⁾, テンションスティフニングにおける鉄筋とコンクリートの付着の程度を表す係数 β の設定や, 主鉄筋の径や間隔など, 未解明な点が数多く含まれている。

そこで, 本研究では, 上記の設計法が, 今後わが国でも採用される気運にあるため, 表-1 に示す一連の実験を行うことにより, 連続合成桁橋の中間支点領域の挙動をより正確に把握することを目的とする。本文では, その一連の研究の内, まず, 種々の鉄筋比における一軸引張実験, つぎに, 比較的大型の桁供試体を製作して行った負曲げ実験について, それぞれの概要ならびに測定値と解析値の比較・検討結果について報告する。

表-1 実験項目

① 角柱の軸引張実験
・ 基礎実験: 種々の鉄筋比におけるひび割れ間隔の把握
・ 引張実験: ひび割れ間隔内の鉄筋の応力分布の把握 主鉄筋がひび割れ間隔に及ぼす影響
② 合成桁の負曲げ実験
2 径間モデル(桁長 6m)での載荷実験

2. ひび割れ制御設計法

2.1 概要

一軸引張状態でひび割れた鉄筋コンクリート部材の鉄筋応力度とコンクリート応力度の関係は, 図-1 のように表される。荷重を作用させて最初のひび割れが発生したとき, ひび割れ位置でのコンクリート応力度は 0 であり鉄筋のみで引張力を負担する。一方, ひび割れ間の鉄筋とコンクリートの付着が良好な場所では, コンクリートと鉄筋は同じひずみになり, コンクリート応力度は引張強度に達する。このとき, 新たなひび割れが発生して, 剛性は急激に低下するが, ひび割れ幅はほとんど増加しない。

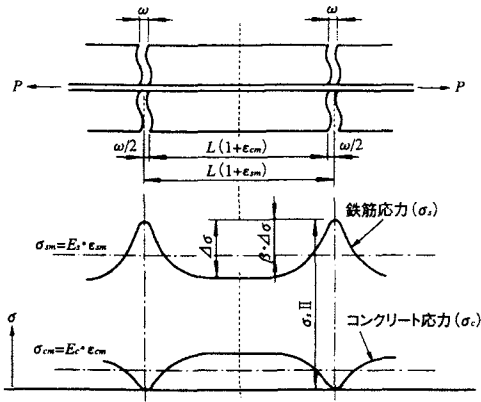


図-1 ひび割れと鉄筋およびコンクリート応力

ここで、コンクリートが鉄筋と一体となって挙動するには定着長が必要であり、ひび割れ位置から定着長までは鉄筋とコンクリート間に滑りを生じる。ひび割れ位置からコンクリートと鉄筋が一体となって働くまでの定着長を付着劣化区間長(l_s)と呼ぶと、付着劣化区間長から付着劣化区間長の2倍($l_s \sim 2l_s$)の範囲にひび割れ間隔Lがおさまった場合に、新たなひび割れの発生は止まり、ひび割れが飽和状態になる。その後、荷重を増加させるとひび割れ位置の鉄筋ひずみが増加してひび割れ幅が大きくなる。

鉄筋とコンクリートの間に付着があるとコンクリートは引張力を負担することができ、この効果をテンションスティフニング(コンクリート引張域剛性)と呼ぶ。付着が強いと付着劣化区間は小さくなり、ひび割れ間隔は小さくなる。

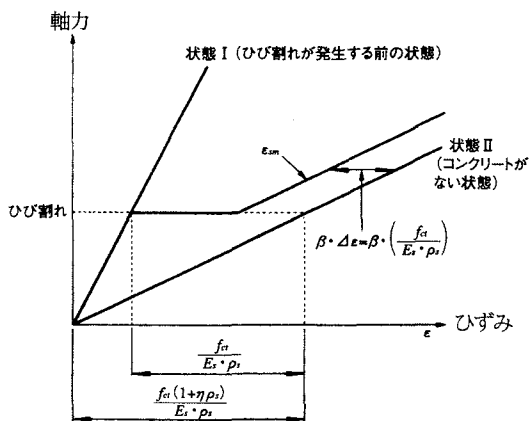


図-2 一軸引張状態における軸力-ひずみ関係

図-2に、一軸状態における軸力-ひずみ関係を示す。

最初にひび割れが発生した後、新たなひび割れが次々に発生して剛性が急激に低下する挙動を、Hanswille 式³⁾、⁴⁾では、付着パラメータ β を用いて理論展開されている。つまり、鉄筋とコンクリートの付着が強いと付着パラメータ β の値は大きくなり、ヨーロッパの設計規準である

ユーロコードでは、0.4 としている。一方、フランスの SETRA⁵⁾における規準では活荷重の繰返しによる付着劣化を考慮して0.2としている。

2.2 合成桁における曲げモーメント・分担断面力の関係

テンションスティフニング効果を考慮した場合のコンクリート床版の分担断面力(軸方向力)を式(1)に示す。ここで、分担断面力とは、合成断面に作用している断面力をコンクリート床版および鋼桁とのそれぞれ個別に作用する軸方向力と曲げモーメントに分けたものである。一般にコンクリート床版に作用する曲げモーメント成分については、その値が小さいことから無視される。

$$N_c = N_s + \Delta N_{st} \\ = \frac{M}{I_{st}} \cdot Z_{st} \cdot A_s + \beta \cdot \frac{f_{ct} \cdot A_s}{\rho_s \cdot \alpha_{st}} \quad (1)$$

ここに、

- M : 作用モーメント
- I_{st} : 鋼桁と鉄筋よりなる断面2次モーメント
- Z_{st} : 鋼桁と鉄筋よりなる断面の図心と鉄筋までの距離
- A_s : 鉄筋断面積
- ρ_s : 鉄筋比
- α_{st} : $\alpha_{st} = (I_{st} \cdot A_{st}) / (I_g \cdot A_g)$
- A_{st} : 鋼桁+鉄筋の断面積
- I_g : 鋼桁断面の断面2次モーメント
- A_g : 鋼桁断面積
- f_{ct} : コンクリートの有効引張応力度
(ユーロコード²⁾に準じ、コンクリート床版の設計基準強度 40N/mm^2 に対しては 2.5N/mm^2 とする)

ここで、第1項目は完全ひび割れ状態における鋼桁と鉄筋断面が受け持つ分担軸方向力(状態Ⅱ)、第2項がテンションスティフニングの効果を考慮した分担軸方向力である。

2.3 合成桁における分担断面力・鉄筋ひずみ関係

図-3に、曲げモーメント、分担断面力および鉄筋ひずみの関係を示す。テンションスティフニング効果を考慮すると、コンクリート床版の軸引張剛性は鉄筋のみの場合に比べて大きく見積もることになる。そのため、コンクリート床版の分担軸方向力は鋼桁+鉄筋断面で算定される場合に比べて大きくなる。この軸力の増分が図-3における ΔN_{st} である。

あり、今回は、桁実験の床版を想定して 120mm である。

つぎに、実験より得られた各鉄筋比におけるひび割れ発生の有無および間隔の測定値と解析値を表-3 にまとめ示す。なお、ひび割れ間隔の測定値は、各鉄筋比における最小値を示している。

表-3 各鉄筋比におけるひび割れ間隔の
解析値と測定値の比較

供試体寸法	$\rho = 1.4\%$	$\rho = 2.0\%$	$\rho = 2.7\%$
200mm	—	—	×
250mm	×	×	×
300mm	○	×	○
350mm	×	○	○
400mm	○	○	—
測定値(cm)	14.0	13.3	12.0
解析値(cm)	14.7	13.7	12.8

(○：ひび割れ発生，×：ひび割れ発生せず)

表-3 より、鉄筋比の値が大きくなるほど、ひび割れ間隔は小さくなることがわかった。また、測定値と解析値は、比較的良く一致しているといえる。

以上の結果に基づき、桁の負曲げ載荷実験を行う際に、安定ひび割れ状態を想定し、ひび割れ間隔内の鉄筋およびコンクリートのひずみ分布を精度よく計測するために、予め人工ひび割れプレート(写真-2 参照)をコンクリート床版内に設置した。その人工ひび割れプレートの設置間隔を表-4 に示す。

表-4 人工ひび割れ設置間隔[寸法単位：mm]

引張強度	$\rho = 1.4\%$	$\rho = 2.0\%$	$\rho = 2.7\%$
2.6N/mm ²		240	
3.2N/mm ²	240	220	200
3.8N/mm ²		220	

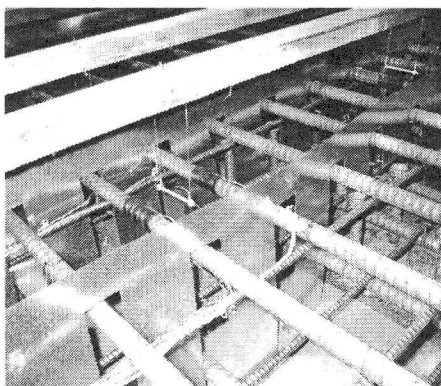


写真-2 人工ひび割れプレート

3.2 引張実験

(1) 実験概要

本実験は、コンクリート中に埋め込まれた異形鉄筋のひずみ分布性状の把握と主鉄筋間隔がひび割れ間隔によぼす影響を確認するために、コンクリート中に鉄筋を埋め込んだ供試体を製作し、鉄筋にのみ引張力を作用させた。供試体の種類を表-5 に示し、実験状況を写真-3 にそれぞれ示す。実験に用いた供試体のコンクリート強度は、圧縮で 36.54N/mm²、引張で 2.83N/mm²であった。なお、コンクリート打設は実橋における床版打設時と同様に鉄筋軸を水平にした状態で行った。

表-5 鉄筋比と供試体寸法[寸法単位：mm]

	$\rho = 1.4\%$	$\rho = 2.0\%$
主鉄筋なし	250	250
主鉄筋あり	500	500

(横断面寸法は、全供試体共通で 120mm×120mm)

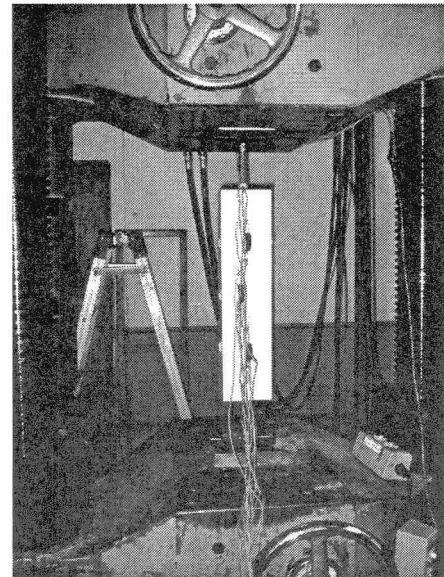


写真-3 一軸実験状況(主鉄筋あり供試体)

鉄筋のひずみは、図-4 に示す箇所のゲージで測定した。ひずみゲージは、付着特性に及ぼす影響が最小限になるように山尾ら⁹⁾の研究を参考にし、載荷中の鉄筋による偏心モーメントが作用しないことを確認するため表裏交互に貼付した。なお、鉄筋張り出し部にもひずみゲージを貼付した。最大引張荷重は鉄筋降伏時とし、載荷の速度は、およそ 20kN/min とし、5kN 毎に計測を行った¹⁰⁾。

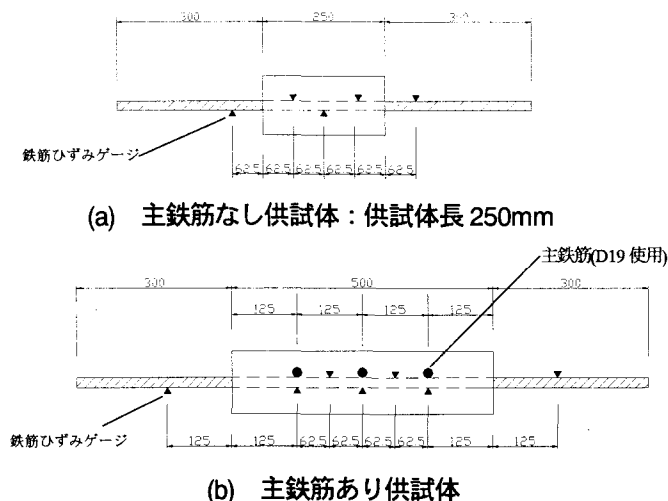


図-4 供試体の形状・寸法[寸法単位：mm]

(2) 測定値と解析値の比較・検討

図-5 および図-6 は、引張力を受けたコンクリート中の異形鉄筋のひずみ分布を把握するために製作した(主鉄筋なし供試体：供試体長 250mm)，理論上ひび割れが発生しない供試体の鉄筋ひずみ分布図である。ひずみ分布は、供試体中央位置でひずみが一番小さい値となり、左右対称のほぼ放物線に近い形状を示した。また、コンクリート中に埋め込まれていない部分に貼付したひずみゲージの測定値と解析値を荷重載荷時に一致していることを確認した。したがって、図-5 および図-6 より載荷中の鉄筋に偏心によるモーメントが作用していないことがわかる。

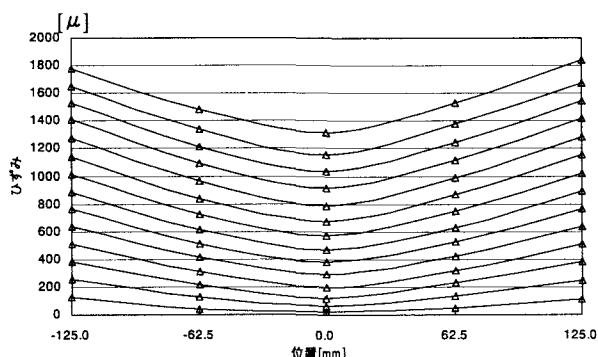


図-5 主鉄筋なし供試体(鉄筋比 1.4%)

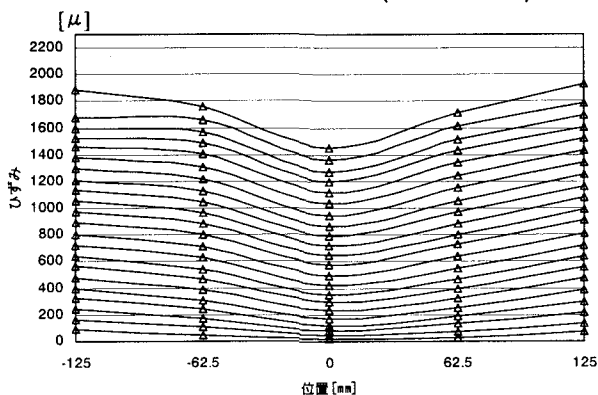


図-6 主鉄筋なし供試体(鉄筋比 2.0%)

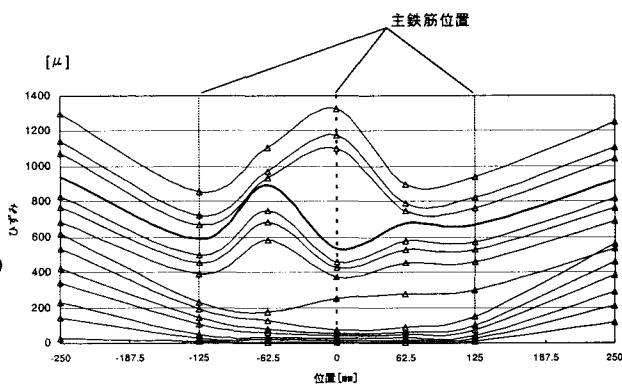


図-7 主鉄筋あり供試体(鉄筋比 2.0%)

図-7 のひずみ分布図は、コンクリート中に配力鉄筋のみではなく主鉄筋も埋め込んだ供試体のひずみ分布図である。ひび割れは、全ての供試体において主鉄筋位置で発生した。これにおいて、主鉄筋間隔がひび割れ間隔に影響を及ぼすということが十分に考えられる。Hanswille の論文においても、実橋では、100mm～150mm というひび割れ間隔が多いと報告¹¹⁾されており、これは、もちろん主鉄筋間隔に依存していると考えられる。

4. 負曲げ載荷実験

4.1 実験概要

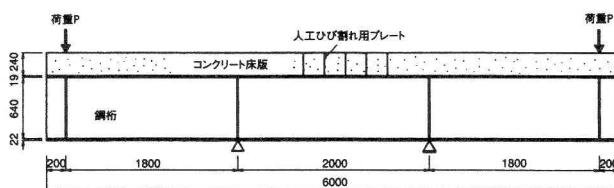
本実験に用いた桁供試体の一般図を図-8 に、供試体の種類を表-6 に示す。供試体は全長 6m、桁高は 68.1cm コンクリート床版厚と幅は、それぞれ 240mm と 1300mm である。この供試体の断面決定は、実際に連続合成桁橋で設計された橋梁の断面構成比の値を参考に行った。

供試体の種類は、一般的に、テンションスティフニングの影響¹⁾を評価するために用いられるコンクリートの引張強度(f_t)および鉄筋比(ρ)をパラメータとした。また、ひび割れ間の鉄筋ひずみを精度良く計測するために、3.での実験結果に基づき、予め人工ひび割れ用のプレートをコンクリート床版内に挿入した。

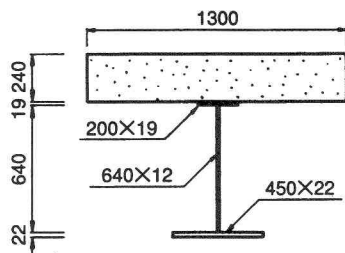
表-6 供試体の種類

f_t	ρ	1.4%	2.0%	2.7%
2.6N/mm ²			○	
3.2N/mm ²		○	○	○
3.8N/mm ²			○	

(f_t ：コンクリート引張強度の目標値， ρ ：鉄筋比)



(a) 側面図



(b) 断面図

図-8 実験供試体一般図[寸法単位：mm]

4.2 測定値と解析値の比較・検討結果

(1) 上鉄筋－荷重ひずみ関係

まず、コンクリート強度試験結果を表-7 に、载荷状況を写真-4 にそれぞれ示す。

表-7 コンクリート強度試験結果

目標引張強度 [N/mm ²]	2.6	3.2	3.8
圧縮強度[N/mm ²]	28.8	45.3	43.7
引張強度[N/mm ²]	2.08	2.74	2.63
弾性係数[N/mm ²]	2.59×10^4	2.60×10^4	2.62×10^4

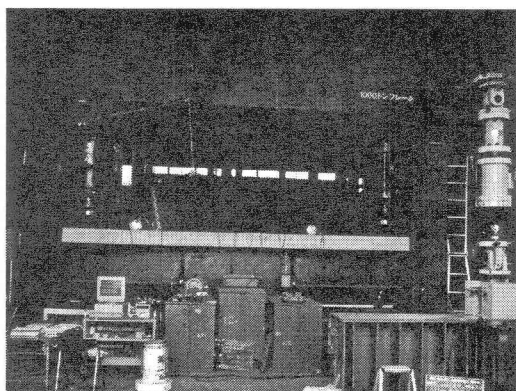


写真-4 载荷実験状況

つぎに、測定結果の一例として、鉄筋比2.0%、コンクリートの引張強度 2.74N/mm² の場合の上鉄筋ひずみ－荷重関係を図-10 に示す。平均ひずみ ε_{sm} は、ひび割れ間の鉄筋ひずみ(測定値)と状態Ⅱ(解析値)の平均値とした。なお、実験においては、人工ひび割れ間に新たなひび割れは発生しなかった。さらに、式(2)を用いて、 β 値を算出するために回帰分析を行い、その結果を図-10 中に併記し

た。図-9 より、本実験より得られた $\beta=0.267$ は、ユーロコードに規定されている $\beta=0.4$ よりも 30%程度小さくなることがわかった。これは、他の供試体においても同様の結果が得られている。

しかし、すべての供試体において、人工ひび割れ用のプレートの影響により、ひび割れ発生荷重までは、状態Ⅰのひずみであるにも拘らず、ひび割れ発生荷重の半分程度で上鉄筋のひずみの値に変化が見られた。そこで、ひび割れ発生荷重までは、状態Ⅰのひずみを追従すると仮定して測定値の補正を行い、再度、回帰解析を実施して β 値の算出を行った。その結果を図-10 に示す。図-10 より、 $\beta=0.367$ という値が得られ、他の供試体から得られた β 値も含めて平均すると $\beta=0.398$ となり、ユーロコードに規定されている値とほぼ同じになった。

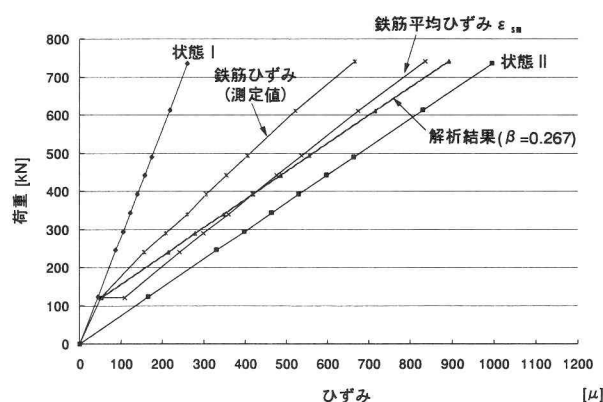


図-9 上鉄筋ひずみ－荷重関係

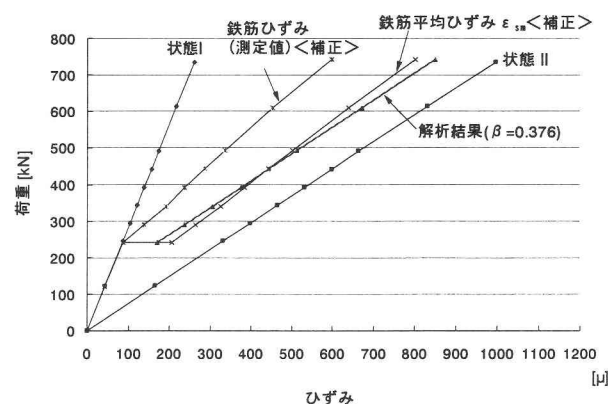


図-10 上鉄筋ひずみ－荷重関係《補正後》

(2) 中立軸位置－荷重関係

人工ひび割れプレート間中央位置の上および下鉄筋に貼付したひずみゲージより、各荷重レベルにおける中立軸位置の推定を行った。その結果の一例を図-11 に示す。また、設計荷重レベル(状態Ⅱにおいて上鉄筋作用応力度の値が 100N/mm²)における下フランジ下縁から中立軸位置までの距離をまとめて表-8 に示す。ここで、コンクリ

ートのテンションスティフニング(TS)効果を考慮して求めた結果は、Bode 理論より理想鉄筋断面積を求め、その増分をも含めて得られたものである。

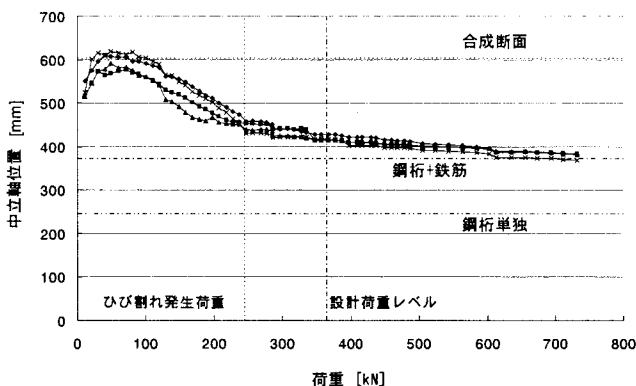


図-11 中立軸位置－荷重関係

表-8 設計荷重レベルにおける中立軸位置[寸法単位:cm]

	測定値 (平均)	計算値			
		合成断面	TS 効果 を考慮	鋼桁+鉄筋	鋼桁のみ
25D19	43.1	58.6	44.3	37.3	24.7
35D16	37.4	60.4	39.7	34.1	24.7
35D19	42.5	60.4	42.3	37.3	24.7
35D22	43.4	60.4	44.3	40.5	24.7
45D19	40.8	60.5	42.8	37.3	24.7

(例えば、35D16 : 35=コンクリート圧縮強度 D16=配力鉄筋径)

前述の上鉄筋ひずみ関係と同様、人工ひび割れプレートの影響により、中立軸は、ひび割れ発生荷重の半分程度の値から合成断面における中立軸位置より変化する傾向にあった。

表-8 より、設計荷重レベルにおける中立軸の位置は、Bode 理論より、テンションスティフニング効果を考慮して求めた中立軸の位置とほぼ同じになることがわかった。

そこで、設計荷重レベルにおいて、鋼桁+鉄筋を抵抗断面とした場合の断面二次モーメントをまとめて表-9 に示す。

表-9 設計荷重レベルにおける断面二次モーメント
[単位: cm⁴]

	テンションスティフニング 効果考慮(=①)	鋼桁+鉄筋(=②)	①/②
25D19	3.93×10^5	3.09×10^5	1.27
35D16	3.37×10^5	2.70×10^5	1.25
35D19	3.69×10^5	3.09×10^5	1.20
35D22	3.94×10^5	3.47×10^5	1.13
45D19	3.75×10^5	3.09×10^5	1.22

表-9 より、設計荷重レベルにおいて、テンションスティフニング効果を考慮した場合の剛度は、鋼桁+鉄筋を抵抗断面とした場合の剛度より平均で 1.2 倍程度大きくなることがわかった。

(3) ひび割れ幅－荷重関係

上記の実験供試体において、人工ひび割れ位置 5 箇所にπゲージを設置して、ひび割れ幅の測定を行った。その結果の一例を図-12 に示す。

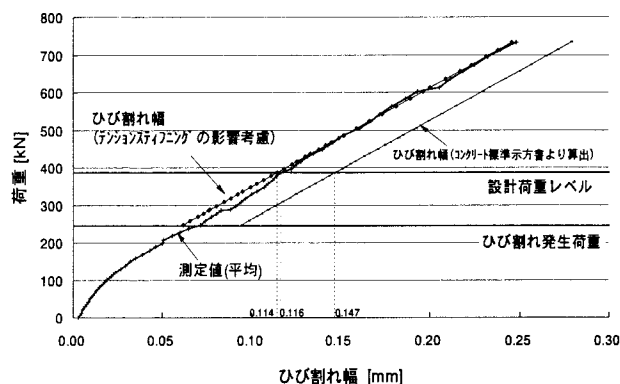


図-12 ひび割れ幅－荷重関係

図-12 より、例えば、上側配力鉄筋応力が設計荷重レベル 100N/mm² となる場合のひび割れ幅測定箇所の平均値は、0.116mm であった。これに対して、式(5)に示すコンクリート標準示方書¹²⁾のひび割れ幅算定式を適用し、テンションスティフニングの効果を考慮した鉄筋平均応力度(式(2)参照)を用いて算出されたひび割れ幅は 0.114mm となり、測定値と解析値は一致することがわかった。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \{4C + 0.7(C_s - \phi)\} (\sigma_{se}/E + \epsilon_{csd}) \quad (5)$$

ここに、

- w : ひび割れ幅
- k_1 : 鉄筋の付着による係数で、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で、次式で表される。

$$k_2 = \frac{1.5}{f'_c + 20} + 0.7$$

- k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数で、次式で表される。

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

- n : 引張鋼材の段数
- C : 鉄筋のかぶり
- C_s : 鉄筋の中心間隔
- ϕ : 鉄筋径

E : 鉄筋のヤング係数
 ϵ_{csd} : コンクリートの乾燥収縮, クリープ, 付着などの不確定要素を考慮したもの
 ($\epsilon_{csd} = 150 \times 10^{-6}$)

5. まとめ

本文は, プレストレスしない連続合成桁橋の中間支点領域においてコンクリートのテンションスティフニングの効果を考慮した設計法を構築するという観点からとりまとめたものである. 実験および数値解析結果より, 以下の知見が得られた.

- 1) 3 種類の鉄筋比のもとでひび割れ間隔を把握するために行った実験の結果, 鉄筋比の値が大きくなるほど, ひび割れ間隔は小さくなることがわかった. また, 測定値と解析値は, 比較的よく一致した.
- 2) ひび割れ間隔内の鉄筋の応力分布を把握するために行った実験の結果, 鉄筋ひずみ分布は, 供試体中央位置でのひずみが一番小さな値となり, 左右対称のほぼ放物線に近い形状を示すことがわかった.
- 3) 主鉄筋がひび割れ間隔に及ぼす影響を把握するために行った実験の結果, ひび割れは, 全ての供試体において主鉄筋位置で発生した. したがって, 主鉄筋間隔がひび割れ間隔に影響を及ぼすということがわかった.
- 4) 比較的大型の実験供試体を用いて行った負曲げ載荷実験の結果, 人工ひび割れプレートの影響により, ひび割れ発生荷重に達しないうちに上鉄筋ひずみに変化が見られた. そこで, ひび割れ発生荷重までは状態Ⅰのひずみを追従すると仮定して測定値の補正を行い, β 値を算定した結果, ユーロコードにおいて規定されている鉄筋とコンクリートの付着の程度を表す係数 $\beta = 0.4$ とほぼ同じ値が得られた.
- 5) 鉄筋比 2.0%, コンクリートの引張強度が 2.74 N/mm^2 の供試体において設計荷重レベルで中立軸を比較した結果, 測定値とテンションスティフニングを考慮した場合の解析値は比較的一致し, また, 設計荷重レベルにおいて, テンションスティフニング効果を考慮した場合の剛度は, 鋼桁+鉄筋を抵抗断面とした場合の剛度より, 平均で 1.2 倍程度大きくなることがわかった.
- 6) 鉄筋比 2.0%, コンクリートの引張強度が 2.74 N/mm^2 の供試体において設計荷重レベルでひび割れ幅を比較した結果, 測定箇所の平均 0.116 mm に対し, コンクリート標準示方書のひび割れ幅算定式を適用し, テンションスティフニングの効果を考慮した鉄筋応力度を用いて算出されたひび割れ幅は, 0.114 mm となり, よく一致することがわかった.

現在, さらに, 引張応力下における経時挙動¹³⁾の測定実験もおこなっており, 最終的には, 連続合成桁橋の中間支点部における合理的な設計法を構築する予定である.

参考文献

- 1) 社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅰ: 共通編, Ⅱ: 鋼橋編, 丸善(株), 2002 年 3 月.
- 2) CEN: Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 2: Composite Bridges, ENV1994-2, 1997.12.
- 3) G. Hanswille: Zur Rissbreitenbeschränkung bei Verbundträgern, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1986.
- 4) (著)K..Roik, G. Hanswille, (訳)伊藤鉦一, 平城弘一: 合成桁におけるひび割れ幅の制限, 橋梁と基礎, pp.33~40, (株)建設図書, 1993 年 2 月.
- 5) STERA: Ponts Mixtes(Recommendations pour maîtriser la fissuration des dalles), 1995.
- 6) 中園明広, 安川義行, 稲葉尚文, 橋 吉宏, 秋山洋, 佐々木保隆: PC 床版を有する鋼連続合成 2 主桁橋の設計法(上)―連続合成桁における中間支点部の設計法―, 橋梁と基礎, pp.27~35, (株)建設図書, 2002 年 2 月.
- 7) H.Bode: Euro-Verbundbau, Konstruktion und Berechnung, 2. Auflage, Werner Verlag, 1998.
- 8) F.Leonhardt: Vorlesungen über Massivbau, Vierter Teil, Springer Verlag, Berlin, 1978.
- 9) 山尾芳秀, 周 礼良, 岡村 甫: 付着応力―すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.343, pp.219~228, 1984.3.
- 10) 壹岐直之, 清宮 理: コンクリート埋め込まれた異形鉄筋の応力分布に関する一考察, 土木学会第 55 回年次学術講演会, 平成 12 年 9 月
- 11) 長井正嗣, 家村 剛: Hanswille 教授に聞く, 橋梁と基礎, pp.33~39, (株)建設図書, 2000 年 11 月.
- 12) 土木学会: 2002 年制定 コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002 年 3 月.
- 13) A.Kurita, M.Rutner and O.Ohyama: Consideration about Creep under Tension in Composite Sections, Festschrift Albrecht, TU-München, 2001.5.