

(2) テンションスティフニングを考慮した 合成アーチ橋の設計

坂本純男¹・中村健志²・大山 理³・栗田章光⁴

¹正会員 片山ストラテック(株) 技術本部設計部技術課 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島6-2-21)
E-mail:sakamoto@katayama-st.co.jp

²学生会員 大阪工業大学大学院工学部都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)
E-mail:takeshi@civil.oit.ac.jp

³正会員 工博 大阪工業大学工学部都市デザイン工学科 講師 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)
E-mail:ohyama@civil.oit.ac.jp

⁴正会員 工博 大阪工業大学工学部都市デザイン工学科 教授 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)
E-mail:kurita@civil.oit.ac.jp

近年、道路橋や鉄道橋において鋼とコンクリートとを組み合わせた複合構造物が、数多く施工されるようになってきた。コンクリート床版と鋼桁との組み合わせである合成構造物も、コスト縮減政策と相まって復活している。一方、下路式アーチ橋においては、その構造上、常に引張力がコンクリート床版に作用するため、従来通りの非合成設計が行われているが、実際には合成挙動していると考えられる。合成タイドアーチ橋は、その挙動を考慮した設計を行うとともに、縦桁省略など床組構造の簡略化を行い、さらにテンションスティフニング効果を考慮することにより、経済的な設計が可能になる。ここでは、合成タイドアーチ橋の設計法および従来の非合成アーチ橋との比較・検討結果について報告する。

Key Words : arch bridge, composite tied arch, tension stiffening

1. はじめに

近年、道路橋や鉄道橋において鋼とコンクリートとを組み合わせた複合構造物が、数多く施工されるようになってきた。鋼あるいはコンクリートそれぞれのメリットを生かし、デメリットを補い、経済的にも優れた構造形式となっている。その中で、合成構造としての代表的な組み合わせは、コンクリート床版と鋼桁とである。特に、コスト縮減政策と相まって、単純桁橋だけでなく連続桁橋についても合成構造が復活している。

一方、下路式アーチ橋においては、図-1に示すとおり、構造上、常に引張力がコンクリート床版に作用するため、従来通りの非合成構造として設計が行われている。しかしながら、非合成設計を行っても実際には合成挙動をしていると考えられ、また、乾燥収縮やクリープなどの影響もあるため、コンクリート床版にひび割れが発生するといった問題が生じることがある。その一例を写真-1に示す。ここで、ヨーロッパに目を向けると、連続桁橋だけではなく下路式タイドアーチ橋も合成設計が行われている^{1)~3)}。合成タイドアーチ橋の特徴としては、実際に生じる合成挙動を正確に評価できるとともに、合成構造

として床版内の鉄筋を考慮することにより、経済的な断面設計が可能になる。その際、ひび割れ発生後におけるコンクリートの引張剛性を考慮するテンションスティフニング効果も取り入れると、より経済的な設計が可能になる。しかしながら、その場合、コンクリート床版に引張力が作用するため、ひび割れに対する検討が重要となる。ひび割れ制御に関する研究では、Hanswilleらのひび割れ計算手法⁴⁾が有名である。ここでは、その計算手法に基づいてコンクリート床版と鋼桁(補剛桁)とを分離した分担断面力法を用い、それぞれに作用する軸力を算出する。

ここで、一般的な下路式アーチ橋の部材構成を図-2に示す⁵⁾。従来のアーチ橋では、図-3(a)に示すとおり、縦桁や床桁(横桁)などの床組上にRC床版を設け、スラブアンカーなどで連結していたが、本数値計算例では図-3(b)に示すとおり、RC床版と横桁とをスタッドを設けて一体化し、縦桁を省略する。また、横力に対しては、近年の合成桁橋と同様に、床版に分担させることによって、下横構の省略化を図る。このように床組構造の簡略化を行えば、さらにアーチ橋も経済的になると考えられる。

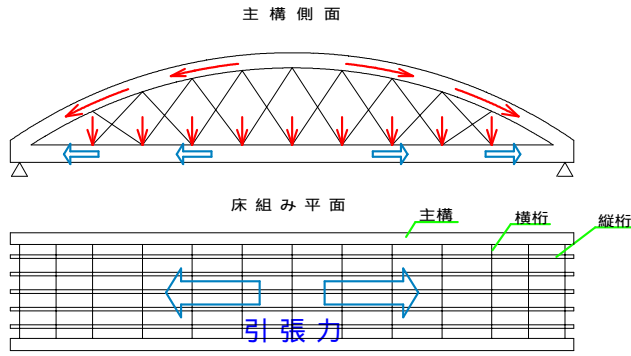


図-1 下路式アーチ橋の床版への影響



写真-1 下路式アーチ橋の床版下面ひび割れ状況の例

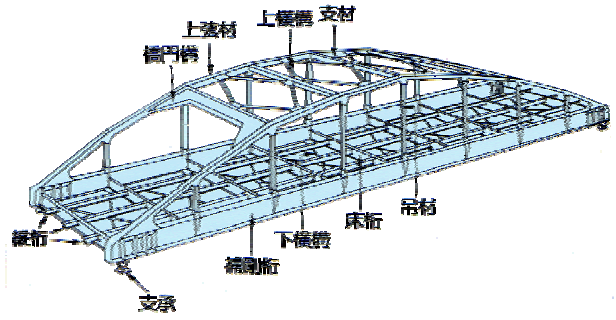
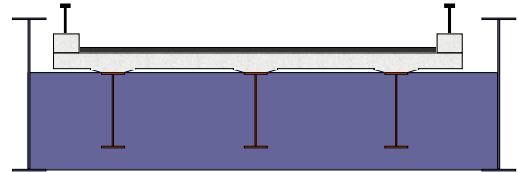
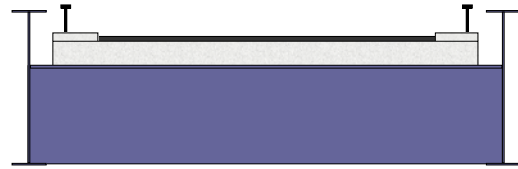


図-2 下路式アーチ橋の部材構成



(a) 非合成アーチ橋（従来形式）



(b) 合成タイドアーチ橋

図-3 アーチ橋の横断面

本論文では、従来の非合成アーチ橋と、床組を簡略化し、テンションスティフニング効果を考慮した合成タイドアーチ橋と断面設計を行い、その比較・検討結果について報告する。

2. 合成タイドアーチ橋の計算手法

(1) 引張を受ける部材の応力 - ひずみ関係

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との関係は、図-4のように表される。ひび割れ間でのコンクリートの引張剛性（テンションスティフニング効果）を考慮すると、応力とひずみの関係は図-5のようになる。領域A、領域Bおよび領域Cは、それぞれ合成断面、初期ひび割れ状態、安定ひび割れ状態を示している。各領域における平均ひずみと最大ひずみには、以下のような関係がある⁶⁾。

領域A：合成断面 ($0 < \sigma_s \leq \sigma_{sr1}$)

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s1} \quad (1)$$

領域B：初期ひび割れ状態 ($\sigma_{sr1} < \sigma_s < 1.3 \cdot \sigma_{sr1}$)

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - \left[\frac{\beta_m \cdot (\sigma_s - \sigma_{sr1}) + (1.3\sigma_{sr1} - \sigma_s)}{0.3 \cdot \sigma_{sr1}} \right] \cdot (\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sr1}) \quad (2)$$

領域C：安定ひび割れ状態 ($1.3 \cdot \sigma_{sr1} < \sigma_s < f_{sk}$)

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - \beta_m \cdot (\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sr1}) \quad (3)$$

ここに、

ε_{s1} ：ひび割れていない状態（状態 ）での鉄筋ひずみ

ε_{s2} ：ひび割れ状態（状態 ）での鉄筋ひずみ

ε_{sr1} ：ひび割れ荷重がコンクリートの引張平均強度 (f_{ctm}) に達した状態での状態 の鉄筋ひずみ

ε_{sr2} ：ひび割れ荷重がコンクリートの引張平均強度 (f_{ctm}) に達した状態での状態 の鉄筋ひずみ

σ_{sr1} ：最初のひび割れが形成されたときの鉄筋応力

f_{sk} ：鉄筋の降伏強度

β_m ：安定ひび割れ状態で鉄筋の引張剛性の効果を現す係数で、短期間の荷重では0.4、死荷重では0.25となる。

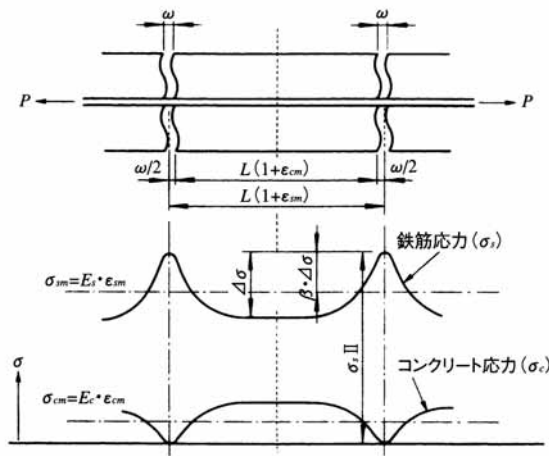


図4 ひび割れおよび鉄筋とコンクリートの応力

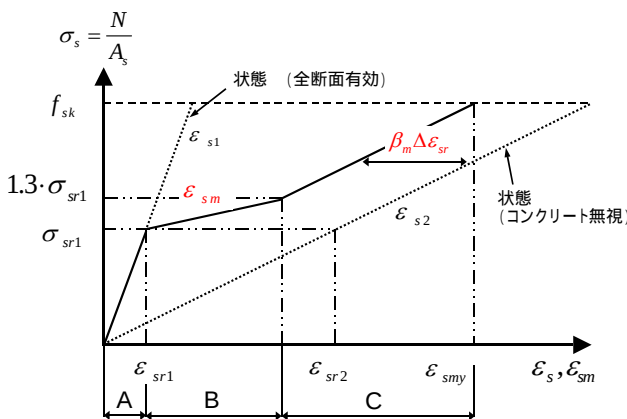


図5 引張を受ける鉄筋コンクリートの応力 - ひずみ関係

一般的には領域A～Cまでの状態を考慮しておけば良いが、鉄筋が降伏した状態においては、次式が示されている。

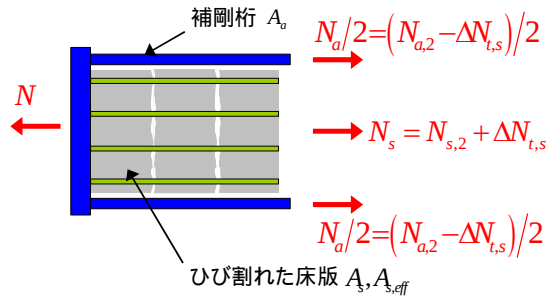
$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - \beta_m \cdot (\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sr1}) + \delta \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{sr1}}{f_{sk}}\right) (\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{su}) \quad (4)$$

ここに、

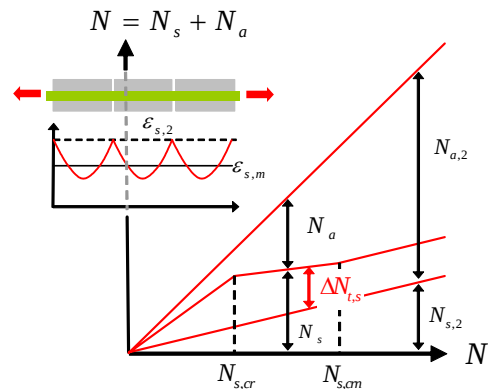
δ : 鉄筋の延性を考慮した係数で、高延性鋼では0.8、普通延性鋼では0.6となる。

(2) 合成タイドアーチ橋の分担軸力

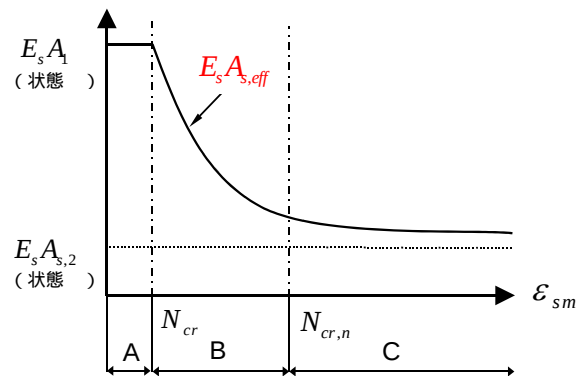
合成タイドアーチ橋の補剛桁とRC床版との分担軸力を求めるためのモデルを図-6に示す。状態に基づき設計では、作用力 N に対して、補剛桁 N_a とRC床版内の鉄筋 N_s とで分担する。ここで、コンクリートのテンションステイフィング効果($\Delta N_{t,s}$)を考慮すると、補剛桁は $N_{a,2} - \Delta N_{t,s}$ となり、一方、RC床版は $N_{s,2} + \Delta N_{t,s}$ となる。それぞれが、どのように分担するかは、両者の剛性に依存する。また、そのRC床版はひび割れの進展によって剛性が変化するが、それは荷重状態に依存する。



(a) 分担軸力算出のためのモデル



(b) 補剛桁とRC床版との分担軸力



(c) 荷重に依存する有効伸び剛性

図-6 RC床版のひび割れの影響

この効果を有効伸び剛性 $E_s A_{s,eff}$ を用いて考慮する。

まず、ひび割れたコンクリート床版の分担軸力は、次式ようになる。

$$N_s = \frac{A_{s,eff}}{A_{s,eff} + A_a} N \quad (5)$$

つぎに有効伸び剛性は、下式のように表される。

$$E_s A_{s,eff} = \frac{E_s A_s}{1 - \frac{\Delta \varepsilon_s E_s A_s}{N_s}} \quad (6)$$

ここで、 $\Delta\epsilon_s$ は式(2)および式(3)に示す引張剛性に起因するひずみの低下である。したがって、荷重状態によってひずみが増加するにともない、コンクリート床版の有効伸び剛性も変化するため、その床版に作用する分担軸力を求めるには、非常に煩雑な計算を行う必要がある。

そこで、DIN FB 104では、その煩雑な計算手法に代わり、コンクリート床版の有効伸び剛性を求める簡易な計算式を提案している⁷⁾。

$$(EA)_{eff} = \frac{E_s A_s}{1 - \frac{0.35}{(1 + \rho_s n)}} \quad (7)$$

ここに、

ρ_s : 鉄筋比

n : ヤング係数比

式(7)より、荷重状態やひずみの変化にかかわらず、RC床版の緒元から、有効伸び剛性が決定される。

3. 比較検討

(1) 比較検討モデル橋梁

ここでは、合成ならびに非合成タイドアーチ橋を対象に、試設計を行った。本検討に用いた橋梁の側面を図-7、横断面を図-8 にそれぞれ示す。形式は橋長 100m、アーチライズ 16m の下路式タイドアーチ橋である。

つぎに、対象橋梁のコンクリート床版厚は 330mm とした。それは、本橋梁には縦桁を設けず、横桁を吊り材間の 3 等分である 3.33m 間隔で配置し、その間隔を床版支間として道路橋示方書⁸⁾に基づき、床版厚を決定したためである。なお、この床版厚は、ドイツにおいて施工された合成タイドアーチ橋の床版厚とほぼ同等となっている。橋軸方向の主鉄筋は、D22 を上下に 100mm ピッチで配置しており、鉄筋比は 2.3% である。

一方、非合成タイドアーチ橋の場合は、図-9に示すとおり、縦桁を3本配置し、その間隔が床版支間となるため、床版厚は210mmとした。また、横力に対するために下横構も設けられる。

両橋梁とも、アーチリブは箱断面形状、補剛桁および吊り材はI断面形状とした。断面緒元を表-1に示す。ここでは、補剛桁の板厚 t と断面積 A をパラメータとした。

(2) 比較検討結果

本検討では、繰り返し計算を必要としない簡易な計算方法である式(5)および式(7)を用いて、分担断面力を算出した。床版（鉄筋）および補剛桁の分担軸力の比較結果を表-2に示す。RC床版厚が異なるため、合成タイド

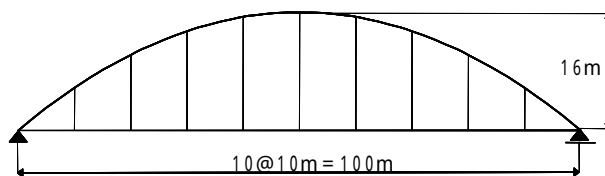


図-7 側面

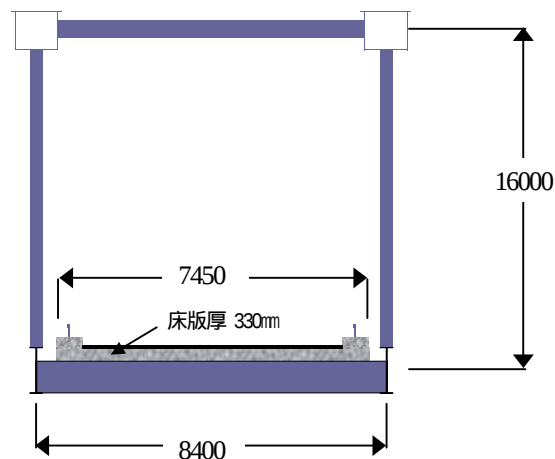


図-8 横断面 (合成タイドアーチ橋)

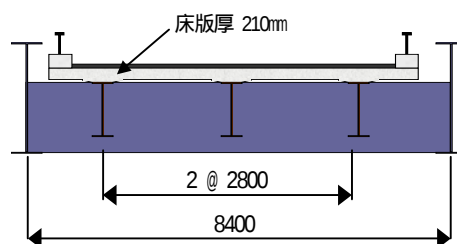


図-9 横断面 (非合成タイドアーチ橋)

表-1 断面緒元

	補剛桁	アーチリブ	吊り材
上フランジ (mm)	300 × t_1	1200 × 27	300 × 16
腹板 (mm)	1100 × t_2	2 × 950 × 20	330 × 10
下フランジ (mm)	300 × t_3	1000 × 22	300 × 16
断面積 (mm ²)	A	92400	12900

表-2 分担軸力の比較

	非合成	合成	合成 (TS)
RC床版厚 (mm)	210	330	330
全軸力 (kN)	10040	11729	11726
床版（鉄筋）の分担軸力 (kN)	-	2046	2596
補剛桁の分担軸力 (kN)	10040	9683	9130
分担比（床版：補剛桁）	0.00 : 1.00	0.17 : 0.83	0.22 : 0.78
軸力比（補剛桁）	1.00	0.96	0.91

アーチ橋の方が全軸力としては大きくなっている．しかしながら，床版（鉄筋）との合成作用を考慮し，床版（鉄筋）にも軸力を分担させると，補剛桁の軸力は4%程度少なくなる．また，テンションスティフニング(TS)効果を考慮した場合，非合成タイドアーチ橋と比べると軸力は約9%減少することがわかった．

一方，RC床版には，合成タイドアーチ橋の場合，全軸力の約17%を分担し，またテンションスティフニング効果を考慮すると，約22%を分担することになる．したがって，鉋桁だけでなくアーチ橋においても，床版に対して合成作用を考慮する必要がある．その際，床版の引張剛性であるテンションスティフニング効果を考慮しないと，床版の軸力を過小評価することになる．

つぎに，この分担軸力を用いて補剛桁断面の設計を行った．その結果を表-3に示す．表-3より，非合成タイドアーチ橋と比べると，合成タイドアーチ橋の場合，補剛桁の断面積を約5%減少させることができる．さらに，テンションスティフニング効果を考慮すると約10%少なくすることができ，経済性を図ることができる．なお，アーチリブおよび吊り材については，断面力および断面はほとんど変わらなかった．また，本検討では，ひび割れ幅発生以降は乾燥収縮の影響はないとし，補剛桁の断面設計には考慮していない．

(3) 床版のひび割れ照査

床版に作用する引張軸力を用いて，ひび割れ幅の照査を行った．算定にはコンクリート標準示方書⁹⁾に基づいて行い，その結果を表-4に示す．

また，DIN FB 104では，使用限界状態および終局限界状態において，床版に作用する最小引張軸力を設定している．

使用限界状態：

$$N_{Ed,SLS} = 1.15 \cdot A_c \cdot f_{ct,eff} \cdot (1 + \rho_s n) \quad (8)$$

終局限界状態：

$$N_{Ed,ULS} = 1.45 \cdot A_c \cdot f_{ct,eff} \cdot (1 + \rho_s n) \quad (9)$$

ここに，

$$f_{ct,eff} = 0.7 \cdot f_{ctm}$$

ここで算出した引張軸力を用いて，先と同様にひび割れ幅を求めた．床版のひび割れは，せん断強度を大幅に低下させるので，使用限界状態において $w_k < 0.15\text{mm}$ となるように制限している．また，床版支間と床版厚との比が10を超える場合，スターラップ筋を入れるようにしている．

表-4より，終局限界状態におけるひび割れ幅も，許容

表-3 補剛桁断面の比較

	非合成	合成	合成 (TS)
上フランジ (mm)	300 × 13	300 × 13	300 × 12
腹板 (mm)	1100 × 15	1100 × 14	1100 × 13
下フランジ (mm)	300 × 13	300 × 13	300 × 13
断面積 (mm ²)	24300	23200	21800
断面積比	1.00	0.95	0.90

表-4 ひび割れ幅の比較

	ひび割れ幅 (mm)
合成	0.091
合成 (TS)	0.077
使用限界状態	0.122
終局限界状態	0.143

ひび割れ幅である 0.15mm 以下となった．

(4) 床組構造の合理化

従来の非合成アーチ橋では，図-2に示すように横桁，縦桁，および下横構が設けられているが，合成タイドアーチ橋では横桁のみとしている．RC床版は横桁で支持され，横力に対しては今日の鉋桁と同じように，床版で受け持たせる．また，その横桁自身も合成桁断面として設計されるため経済性が図れる．以上より，従来の非合成アーチ橋に比べて，全体鋼重が約10～15%低減可能と考えられる¹⁰⁾．

しかしながら，RC床版と横桁とはスタッドを設けて一体化する必要がある．特に，端横桁には大きなせん断力が作用するため，多くのスタッドを配置する必要がある．

4. おわりに

本論文では，下路式合成タイドアーチ橋の設計法について述べるとともに，非合成タイドアーチ橋との比較検討を行った．本研究より得られた結論を以下に示す．

- 1) 非合成に対して，合成（状態）およびテンションスティフニング効果考慮時の補剛桁への分担軸力を比較すると，RC床版厚が厚くなることを考慮しても，それぞれ約4%，約9%減少する．逆に，RC床版へは全軸力に対して，それぞれ約17%，約22%分担することになる．同様に，補剛桁断面積を比較すると，それぞれ約5%，約10%減少する．
- 2) 床版に生じるひび割れ幅は，終局限界状態においても許容ひび割れ幅（ $w_k < 0.15\text{mm}$ ）を満足する．

- 3) 縦桁および下横構の省略，横桁の合成桁設計などによって，従来の非合成アーチ橋に比べて，全体鋼重の約 10～15%が低減可能と考えられる．

これらのことから，下路式合成タイドアーチ橋は，現在施工されているアーチ橋よりも，経済性が図れることがわかった．しかしながら，床版にも軸力を分担させ，ひび割れを許容しているので，防水に対しては特に留意する必要がある．

また，本論文では考慮していないが，以下について今後検討を進め，さらなる合理化を目指した合成タイドアーチ橋の設計法を確立する必要があると考える．

床版には常に引張力が作用するため，長期挙動を考慮する上ではコンクリートの引張クリープの影響を検討する．

本検討では幅員も狭いため全幅有効としたが，床版の有効幅について検討する．

一例として写真-2 に示したが，ずれ止め（スタッド）の設計法について，特に桁端部の配置について検討する．



写真-2 桁端部のスタッド配置例

参考文献

- 1) Hanswille, G. and Piel, W. : Composite bowstring arches with reinforced concrete decks acting as tension members in the main system, Proc.of Composite Construction in Steel and Concrete , ASCE, pp.349-358,1997.
- 2) 長井正嗣，奥井義昭：鉄筋コンクリート床版が引張り材として主構作用に寄与する合成タイドアーチ，橋梁と基礎，pp.44-47,2003.9.
- 3) 中井博，栗田章光：ドイツにおける最近の鋼・コンクリート合成橋梁，森北出版(株)，2003.12.
- 4) Hanswille, G. : Cracking of concrete - Mechanical models of the design rules in Eurocode 4, Engineering Foundation Conference Composite Construction , Irsee,1996.
- 5) (社)日本橋梁建設協会，鋼橋へのアプローチ，1998.1.
- 6) Hebestreit, K. and Ibach H. D. : Design of Composite tied arch bridges, Proceedings of 6th Japanese-German Joint Symposium on Steel and Composite Bridges, 2005.9.
- 7) DIN Fachbericht 104 – Verbundbrücken, Beuch Verlag GmbH2.Auflage 2003.
- 8) (社)日本道路協会，道路橋示方書・同解説 共通編，鋼橋編（平成 14 年 3 月），2002.3.
- 9) (社)土木学会，コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，2002.3.
- 10) (社)日本橋梁建設協会，デザインデータブック，2001.3.

DESIGN OF COMPOSITE ARCH BRIDGES TAKING INTO ACCOUNT OF TENSION STIFFENING

Sumio SAKAMOTO, Takeshi NAKAMURA, Osamu OHYAMA
and Akimitsu KURITA

The steel-concrete hybrid bridges have been remarkably developed in the last decade in Japan due to the technological and economical advantages throughout the design and construction process and service life. This paper is focusing on the composite tied arch bridges. First of all, the design method of the tied arch bridge is presented. In this method, the effect of the tension stiffening is taken into account. Next, as the numerical example, tied arch bridge with the span length of 100m and arch rise of 16m is selected and carried out its calculation. As the results of the calculation, we compare the cross sectional area of the stiffening girder of the composite tied arch bridge and non-composite one.