

DIN - 技術報告104(合成橋梁)に見られる種々の特徴

Special Features Shown at DIN-Technical Report 104 (Composite Bridges)
in Germany

大阪工業大学教授

Professor, Osaka Institute of Technology

栗田 章光

Akimitsu KURITA



1. まえがき

欧州連合（EU）に加盟する12ヶ国間での統一通貨であるユーロ（Euro）の一般社会での使用が、2002年1月1日から開始された。市場でのユーロによる取引は、すでに1999年1月1日から始まっていた。このユーロは、いうまでもなく、アメリカのドルに対抗するものであって経済戦略の主要部となるものであり、そのレートもドルと同じ水準にある。

一方、構造物の設計に関わる欧州規準（EC: Eurocodes）¹⁾も、約30年にわたる作成作業期間を経て、ほぼ最終段階にきており、その完成版の大半がここ数年内に公布されることになっている。このECもユーロと同様に、EU加盟国間で共通の設計規準をもつことによって、諸外国との構造物建設における競争的地位を高める目的がある。

しかし、技術レベルの違う多国間で共通の設計規準を適用するには、多くの障害が生じることになる。そこで、加盟各国は、ECをベースに国内適用文書（NAD: National Application Documents）²⁾を作成し、その対応にあたってきた。ここで紹介するドイツの例の場合、ECよりも技術レベルの高いNADを作成し、それとECとを合わせて運用することにより、高い技術レベルを確保するとともに、今後の技術発展にも繋げたい、というねらいがある。

橋梁設計に関し、ECのドイツ語版とドイツNADとを合わせた実用的な設計規準であるDIN-技術報告（DIN-Fachbericht）4冊が、最近相継いで発刊された（**図1**）。すなわち、

DIN-技術報告101：橋梁への荷重作用（2001年）

DIN-技術報告102：コンクリート橋（2001年）

DIN-技術報告103：鋼橋（2001年）

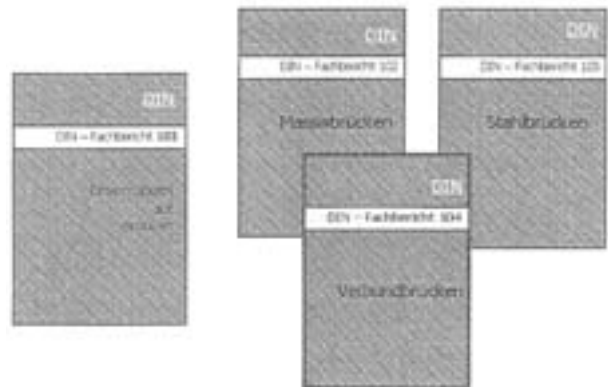


図1 DIN-技術報告

DIN-技術報告104：合成橋梁（2002年）

である。これらは、設計対象を橋梁に限ってECの最新版とドイツNADを合体させたもので、大変興味深い内容となっている。中でも、DIN-技術報告104（以下、DIN-FB104と記す）：合成橋梁に関してのみ、条文の解説と設計例（Erläuterungen und Anwendungsbeispiele）³⁾が刊行されており、理解しやすいものとなっている。

本文では、DIN-FB104：合成橋梁にみられるドイツNADの主な特徴を、文献3）より紹介したい。DIN-FB104の基本をなすEC4やユーロコード全体の概要については文献1）を参照されたい。

DIN-FB101～104は、ミュンヘン工科大学のG.Albrecht教授より筆者宛に送られてきたもので、同教授の厚意に感謝したい。また、DIN-FB104の解説の日本での紹介に関しては、著者であるブッパータル大学のG.Hanswille教授の承諾を得ており、同教授にも感謝の意を表す次第である。

2. 基本事項

2.1 ユーロコード4(EC4): 合成橋梁の適用にあたって

DIN-FB104の中核をなすのは、もちろんEC4である。EC4を実際の橋梁設計へ適用するにあたっては、EC1~EC3と、それらに関するNADを参照する必要がある。図2は、EC4の位置づけを示したもので、EC1: 荷重作用、EC2: コンクリート橋、およびEC3: 鋼橋、ならびにEC4の第1編(設計一般および建築物)の全てを理解した上で、EC4、つまりDIN-FB104を適用しなければならない。

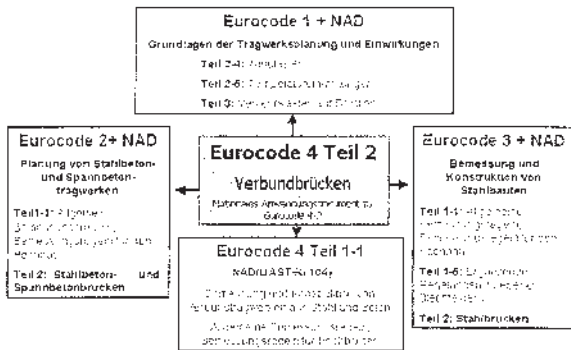


図2 EC4第2編: 合成橋梁の位置づけ

2.2 合成桁の耐荷性状に関して

合成桁の代表的な製作方法とその耐荷性状を図3に示す。方法Aは活荷重合成桁で、方法Bは死荷重合成桁である。方法Cはプレストレスト合成桁であり、多少手間は

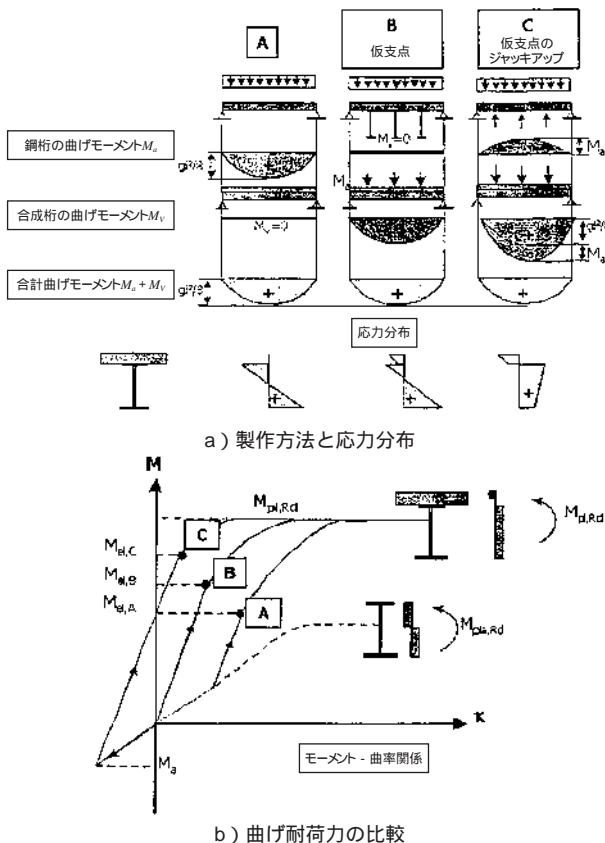


図3 合成桁の3つの製作方法と曲げ耐荷性状の比較

要するが、図3b)に示すように弾性限界モーメント(M_{el})を他の2つの方法よりも上昇させることができる。もちろん、桁の終局モーメント(M_{pl})は、全て同じである。この図3は、非常に教育的であり、ドイツの合成橋梁に関する教科書でもよく見られるものである。この図より非合成桁で設計するよりも、合成桁で設計した方が高い曲げ耐荷力が得られ、経済的であることも明白である。

2.3 照査項目と照査位置について

いうまでもなくDIN-FB104では、限界状態設計法(以下、LSD法と記す)が用いられている。合成桁橋のLSD法による設計において、照査項目と照査位置を簡潔に示したのが図4である。図4では安全性の照査のみが示されているが、この他に疲労や使用性(たわみ、ひび割れ幅など)の照査も当然のことながら必要である。

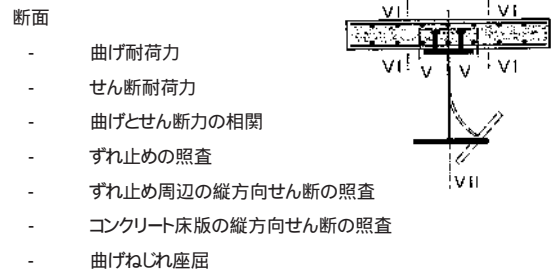
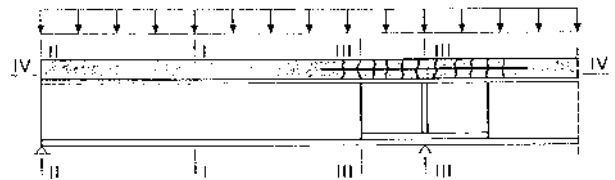


図4 照査項目と照査位置

2.4 横断面の分類と限界耐荷力および断面力の算定法

合成桁の横断面は4つのクラスに分類され、それらの定義は次のとおりである。

- ・クラス1: 塑性解析に必要な回転能をもつ塑性ヒンジを構成できる断面
- ・クラス2: 塑性抵抗モーメントまで耐えうることができるが、回転能には限界のある断面
- ・クラス3: 鋼部材の最大圧縮応力が降伏強度に達することができるが、局部座屈によって塑性抵抗モーメントまで達しえない断面
- ・クラス4: 抵抗モーメントあるいは圧縮耐力を決定する際、局部座屈に対して余裕をみておく必要のある断面

鋼圧縮フランジに適切なずれ止めをもってコンクリート床版がつく合成桁、つまり、正の曲げモーメントを受ける合成桁はクラス1に分類される。一方、負の曲げモーメントを受ける合成桁については、圧縮フランジおよ

びウェブの局部座屈に関する幅厚比を用いてクラス2か、もしくはクラス3に分類されるかを判定する必要がある。一般にクラス3となる。クラス1~4の耐荷性状の比較を示したのが、図5である。さらに、図6には圧縮鋼板の幅厚比 (b/t) と耐荷力の関係が、横断面クラスおよび断面力算定法と関連させて示されている。この図により、合成桁の耐荷力、板の幅厚比、および作用力の計算方法などの相互関係がよく理解される。

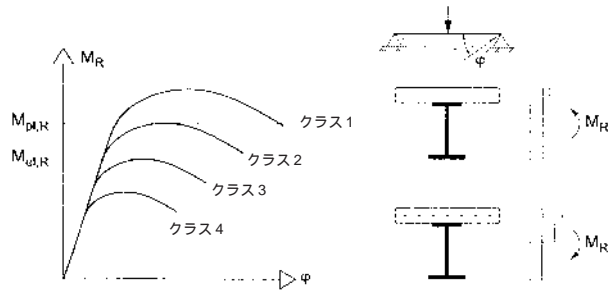


図5 合成桁横断面クラスと耐荷性状の相違⁴⁾

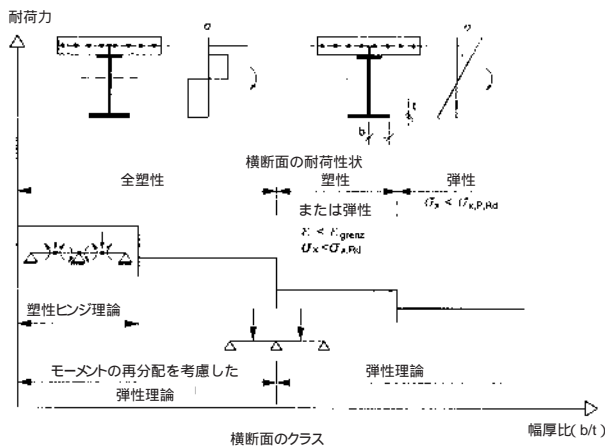


図6 横断面クラスと耐荷力および断面算定法の関係⁴⁾

図6に加え、横断面クラス毎の作用力（断面力）および耐荷力（抵抗力）の算定法、ならびに作用力としてクリープ・乾燥収縮の影響を考慮するか、しないかの区別を、表1に示す。

以上のユーロコード（EC）およびLSD法の基礎知識のもとづいて、DIN-FB104での注目すべき内容を、8項目に分けて紹介することにする。

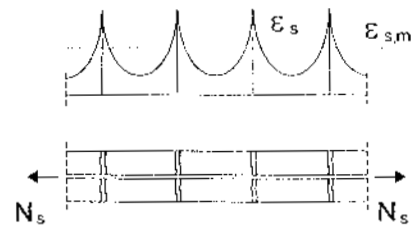
表1 作用力および耐荷力の算定法、ならびにクリープ・乾燥収縮の影響の考慮の有無

横断面のクラス	作用力 S_d	耐荷力 R_d	クリープと乾燥収縮の考慮の有無
1	塑性ヒンジ理論	全塑性	無
2	モーメントの再分配を考慮した弾性理論	全塑性	無
3	弾性理論	塑性または弾性	有
4	弾性理論	弾性	有

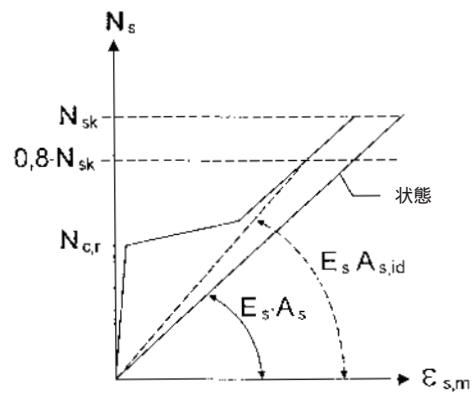
3. DIN-FB104にみられる特徴

3.1 コンクリートのテンションスティフニング効果（TS効果）の設計法への導入法

例えば、プレストレスしない連続合成桁の中間支点域のコンクリート床版には、負曲げモーメントによりひび割れが生じる。したがって、その断面定数を算定する際には、鋼桁と床版軸方向鉄筋のみを考慮するのが一般的であった。ところが、ひび割れ間のコンクリートは健全であるため、床版に作用する引張力の一部をコンクリートが分担できることが明らかになってきた。



a) ひび割れと鉄筋ひずみの分布状況



b) 軸力と鉄筋ひずみの関係

図7 ひび割れ間のコンクリートのTS効果

この力学性状を示したのが、図7a)である。鉄筋ひずみは、ひび割れ位置でピーク値を示すが、ひび割れ間のコンクリートが健全である（よい付着性状をもつ）ならば、その値は急減する。鉄筋をピーク値である ϵ_s で設計せずに、コンクリートの引張抵抗を考慮した平均ひずみ $\epsilon_{s,m}$ を用いるのが、コンクリートのTS効果を考慮した設計法である。その具体的な取り扱いは次のようになされる。

鉄筋の降伏軸力 (N_{sk}) は、次式で与えられる。

$$N_{sk} = A_s \cdot f_{sk}$$

ここに、 A_s : 鉄筋の横断面積
 f_{sk} : 鉄筋の降伏応力

鉄筋の平均ひずみ ($\epsilon_{s,m}$) は、コンクリートのTS効果を考慮すると次のようになる。

$$\epsilon_{s,m} = \frac{N_s}{E_s \cdot A_s} - \beta \frac{f_{cm}}{E_s \cdot \rho_s} = \frac{N_s}{E_s \cdot A_{s,id}}$$

ここに、 N_s : 鉄筋に作用する軸力
 E_s : 鉄筋のヤング係数
 β : 鉄筋とコンクリートとの付着性状を表す係数で、EC4では $\beta = 0.4$ が用いられる。
 f_{cm} : コンクリートの引張強度
 ρ_s : コンクリート床版の鉄筋比 ($= A_s/A_c$)
 $A_{s,id}$: コンクリートのTS効果を考慮した鉄筋の横断面積 ($> A_s$)

いま、鉄筋の設計軸力を降伏軸力の80%で制限すると、すなわち、

$$N_s = 0.8N_{sk}$$

とおけば、コンクリートのTS効果を考慮した鉄筋の横断面積が次のように得られる。

$$A_{s,id} = \frac{A_s}{1 - \frac{0.5 \cdot f_{cm}}{\rho_s \cdot f_{sk}}}$$

ここで、例として、 $f_{cm} = 2.5\text{N/mm}^2$ 、 $f_{sk} = 295\text{N/mm}^2$ 、および $\rho_s = 2\%$ の場合を考えると、

$$A_{s,id} = 1.27A_s$$

となり、TS効果を考えることで、鉄筋の横断面積を27%増大して取り扱ってよいことになる。

このTS効果は曲げ剛性の増大につながり、疲労照査や使用限界状態 (SLS) の照査 (たわみ、ひび割れ幅など) にも設計上有利な結果を与えることになる。

3.2 コンクリートのひび割れ幅の制限値

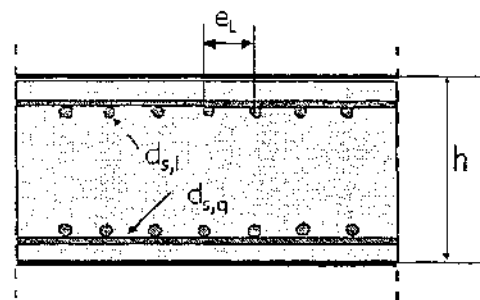
DIN-FB104とEC4とのひび割れ幅の制限値の比較を表2に示す。床版の耐久性向上を図るため、DIN-FB104では、EC4よりも厳しい制限を設けていることがわかる。もちろん、この制限値に加え高品質の床版防水層の設置が義務づけられる。

表2 ひび割れ幅の制限値

	EC4-2	DIN-FB104
プレストレスしない橋梁	$w_k = 0.3 \text{ mm}$	$w_k = 0.2 \text{ mm}$
プレストレスを導入する橋梁	$w_k = 0.2 \text{ mm}$	道路橋: 許容しない 鉄道橋: $w_k = 0.2 \text{ mm}$

3.3 床版の耐久性確保のための配筋規定

上記のひび割れ幅制限とともに、床版の耐久性確保のための配筋規定がある。それらを図8に示す。



- ・ h 40 cm以下の床版で橋軸方向に一層もしくは二層の配筋
- ・ 橋軸方向 $d_{s,L}$ 20 mm
- ・ 幅員方向 $d_{s,q}$ 16 mm
- ・ 鉄筋間隔 10 cm e 15 cm
- ・ 橋軸方向の各層における鉄筋比 ρ_s 0.7%
- ・ h 40 cmの床版の場合、3層目の鉄筋は $d_{s,L}$ 25 mmが許容される。

図8 コンクリート床版の配筋上の原則

図8より、細径の鉄筋を使用することによるひび割れの分散化を図っていることがわかる。床版厚が大きい場合、橋軸方向に5段にわたって細径の鉄筋が配置される場合もある。

3.4 施工時におけるコンクリート床版のひび割れ防止策

2主桁橋や開断面箱桁で、ウェブ間隔が8 m程度になると、コンクリート床版厚は50 cm程度必要となる。このような厚いコンクリート床版を施工する際、注意すべきことは、セメント水和熱の降下と乾燥収縮現象が同時に作用することによる、コンクリートのひび割れ発生である。このひび割れを防止するには、以下の対策が考えられる⁵⁾。

- 1) 硬化熱の低いセメントを使用する。
- 2) 水セメント比をできるだけ小さくする。
- 3) 膨張材を使用する。
- 4) 床版の1回の打設長を大きくして、養生期間を長くする。
- 5) 床版の配筋を工夫する、など。

上記2)に関しては文献6)で、水セメント比は42%まで押さえることとなっている。4)に関しては、移動型枠による1回の床版打設長さは20~25 m程度である。5)に関しては3.3で述べたとおりである。すなわち、細径の鉄筋を分散配置して、コンクリートの乾燥収縮に対する鉄筋の拘束効果を平均化するとともに、ひび割れた場合でも、その集中化を避けるねらいがある。

DIN-FB104の解説では、セメントの水和作用に基づく

ひずみに関する次の重要な5つのパラメータを示すとともに、R.Pampの研究成果⁷⁾を引用して設計時にひび割れ防止のための照査を行うことを推奨している。

- 1) コンクリート体積に依存するセメントの水和熱
- 2) コンクリートの有効部材厚
- 3) コンクリートの打設時期
- 4) 合成桁の横断面構成
- 5) 養生マットの種類

これら5つのパラメータを用いて、コンクリート打設後、5日目におけるコンクリートの収縮ひずみを推定するノモグラフが、Pampによって作成された。それを図9に示す。

図9に示されているように、このノモグラフは4つの区画からなっており、右上の区画から左回りに進んで最終的に $t = 5$ 日時点でのコンクリートの収縮 ε_H が決定される。例として、

5月中旬に有効部材厚 $d_{id} = 0.35$ mの床版を打設、養生マットとして、 $\frac{1}{\Lambda} = 0.20 \left[m^2 \cdot \frac{K}{W} \right]$ を使用、体積温度係数を $q_v = 65 \left[(kJ/m^3) \times 10^3 \right]$ とし、合成桁の横断面定数が $S = 3.0$ (m)とする(～の具体的算定法は省略)、

場合では、 $\varepsilon_H \approx 40 \times 10^{-5}$ を得る。この ε_H を用いて図10に示す方法(わが国の道示での方法と同じ)でもってコンク

リートの引張応力 σ_c を算定し、ひび割れ発生の有無を照査する。

この方法は、気温の月別変化、養生マットの種類、およびセメントの種類が異なるわが国において、直接用いることができないが、5つのパラメータの影響度を把握するのに役立つと言えよう。Pampの研究成果ができた背景には、1980年代にドイツでも厚いコンクリート床版打設後に、ひび割れが多数発生したという事実が容易に推察される。

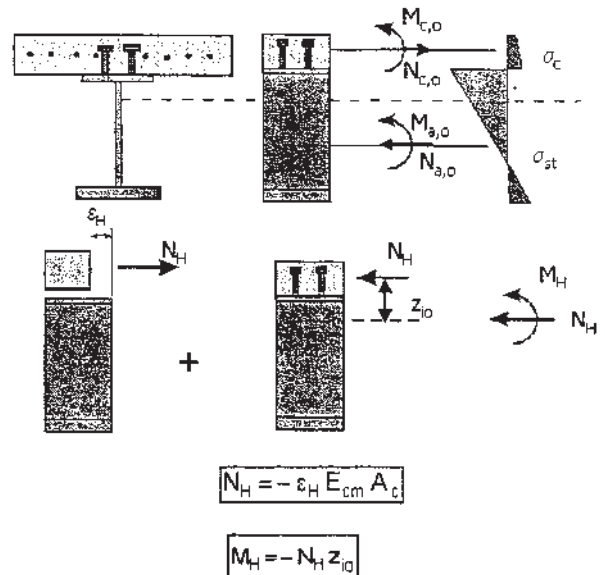


図10 ε_H によるコンクリートの引張応力算定法

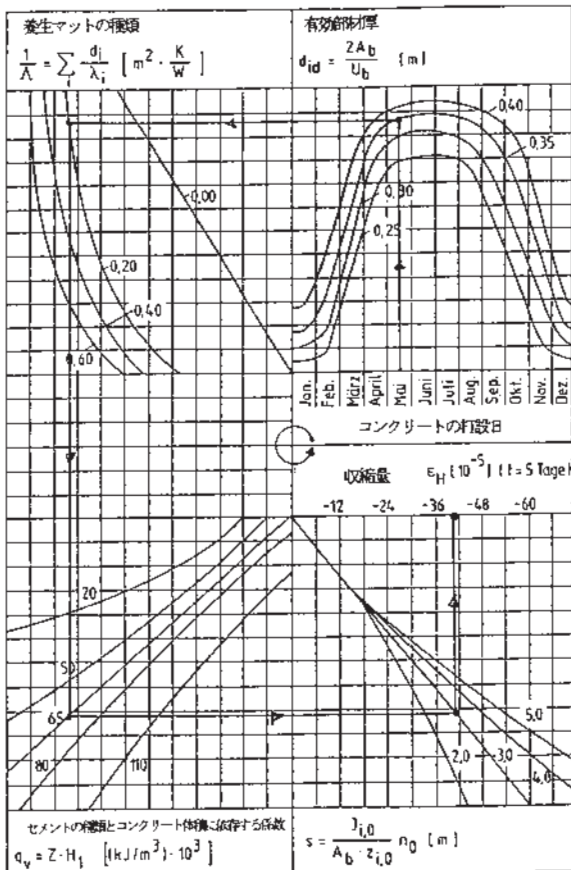


図9 水和作用による収縮量 ε_H の簡易算定法

3.5 二重合成箱桁におけるクリープ乗数

EC4では、コンクリートのクリープ・乾燥収縮の影響を評価する方法として、次式で示される換算ヤング係数(n_L)法が用いられている。

$$n_L = n_0 (1 + \psi_L \cdot \phi_t) \quad , \quad n_0 = E_a / E_{cm}$$

- ここに、 n_0 : 鋼とコンクリートとのヤング係数比
 ψ_L : クリープ乗数(収縮作用: $\psi_s = 0.55$, 持続荷重作用 $\psi_p = 1.10$)
 ϕ_t : クリープ係数

もちろん、この方法は通常の合成I桁および箱桁の場合に用いられるものであって、近年においてドイツで施工事例が増えてきた二重合成(連続桁の中間支点域のみ下コンクリート床版も配置する構造)箱桁には適用できない。そこで、DIN-FB104では、EC4の規定を補うため、図11に示すように二重合成箱桁の場合のクリープ乗数 ψ_L の決定法が示されている。

この方法では、まず、断面構成に関する係数 α_L が鋼断面積(A_s)、下コンクリート床版断面積(A_c)および下コンクリート床版内の鉄筋の断面積($A_{s'}$)を用いて算定される。ついで、下コンクリート床版の応力状態に応じ

で ψ_L が求められるようになっている。

著者らの研究⁸⁾でも明らかにされたように、上および下コンクリート床版のクリープ・乾燥収縮の影響を評価する場合、上下のコンクリート床版を、それぞれ別個に分けて計算し、その結果を合計すればよいことを示した。すなわち、著者らは、上下床版について、それぞれの断面構成比 $\alpha_U = (A_U I_U) / (A_{UV} I_{UV})$ 、 $\alpha_L = (A_L I_L) / (A_{LV} I_{LV})$ を定義した。つまり、上コンクリート床版のクリープ・乾燥収縮は、下コンクリート床版にほとんど影響を及ぼさないし、その逆も言えることが明らかにされた。

作用力または係数	ψ_L または α_L
クリープ	$\psi_L = \frac{1}{1 - 0.5\alpha_L \phi_t + 0.08(\alpha_L \phi_t)^2}$
乾燥収縮	$\psi_L = 0.5 + 0.08\alpha_L \phi_t$
係数	$\alpha_L = \frac{A_U + A_S}{A_U + A_S + A_C / n_0}$

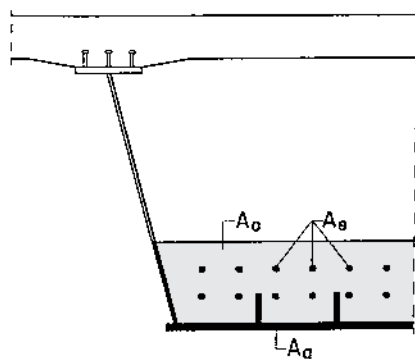


図11 二重合成箱桁の場合の α_L および ψ_L の算定法

3.6 二重合成箱桁における下コンクリート床版内のスタッド配置法

DIN-FB104は、3.5での取り扱いに加えて、下コンクリート床版内のスタッド配置についても規定している。その規定は、図12に示すとおりであり、参考になる。

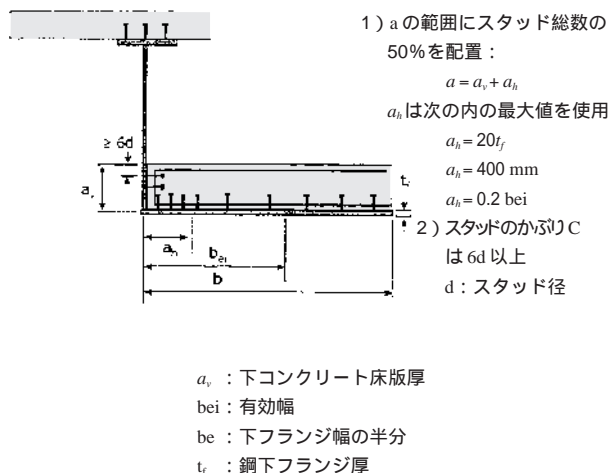
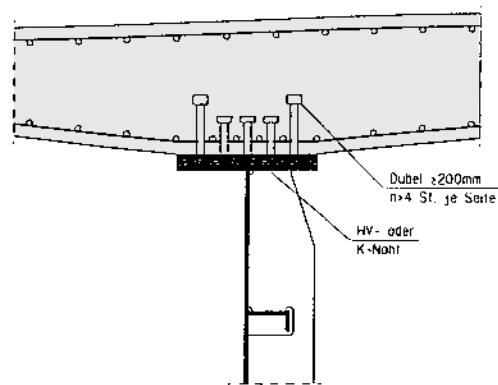


図12 下コンクリート床版でのスタッド配置法

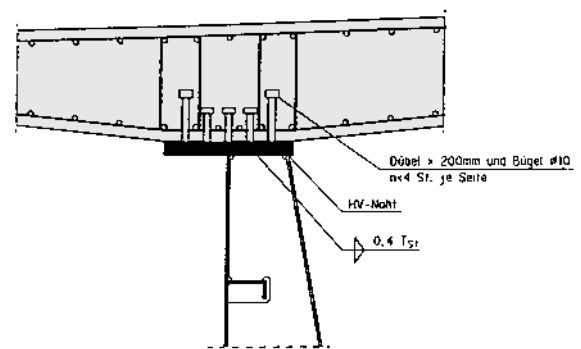
3.7 鉛直補剛材および横桁位置でのスタッドの配置

周知のように2主桁橋で、鉛直補剛材取付部や横桁位置に配置されるスタッドにおいては、両端のスタッドに大きな引張力が作用し、構造上の不具合が生じることがある。その対策として図13に示すような規定がDIN-FB104に示されている。

図13a), b) に示されるように、鋼桁上フランジの横方向回転が拘束される位置では、両端のスタッドとして高さ200 mm以上のものを使用する。さらに横桁位置では図13b) で見られるように、両端のスタッドの周囲に補強筋を配置することになっている。



a) 鉛直補剛材の位置



b) 横桁位置

図13 鉛直補剛材および横桁位置でのスタッド

3.8 小スパン橋梁への合成桁の適用

スパン長が25 m程度までの小スパン橋梁へは、主に経済性の面から多主桁のプレテンPC桁が使用される。このプレテンPC桁に対抗する合成桁として図14に示す多主桁の合成桁がドイツで推奨されている。一般に鋼主桁としてロール材が用いられるが、溶接I桁や箱桁であってもよい。

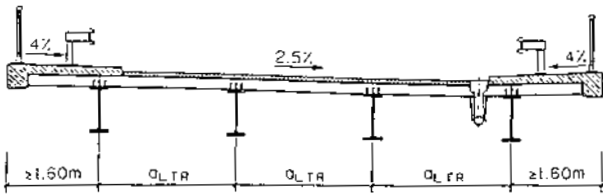


図14 小スパン橋梁への合成桁の適用例

図14に示される合成桁の適用範囲は、次のとおりである。

- 1) 主桁間隔 (a_{LTR}) は、2.4 m a_{LTR} 3 mとする。
- 2) 床版の張り出し長は、1.60 m以上とする。
- 3) 橋台部には、図15に例示するコンクリート横桁を配置する。
- 4) 多スパンにわたる場合は、図15に例示するような中間支点上にコンクリート横桁を設け、連続化をはかる。

また、コンクリート横桁に関する規定として、次のようなものがある。

- 1) 端横桁の幅は80 cm以上とする。
- 2) 中間支点上の横桁幅は、90 cm以上とする。

目下、わが国では建設工事全般にわたり建設費ならびに維持管理費の縮減が求められている。小スパン橋に、このようなロール材を基本にし、かつ、コンクリート横桁を配置して連続化する形式を適用することは、わが国でも意義のあることと思われる。

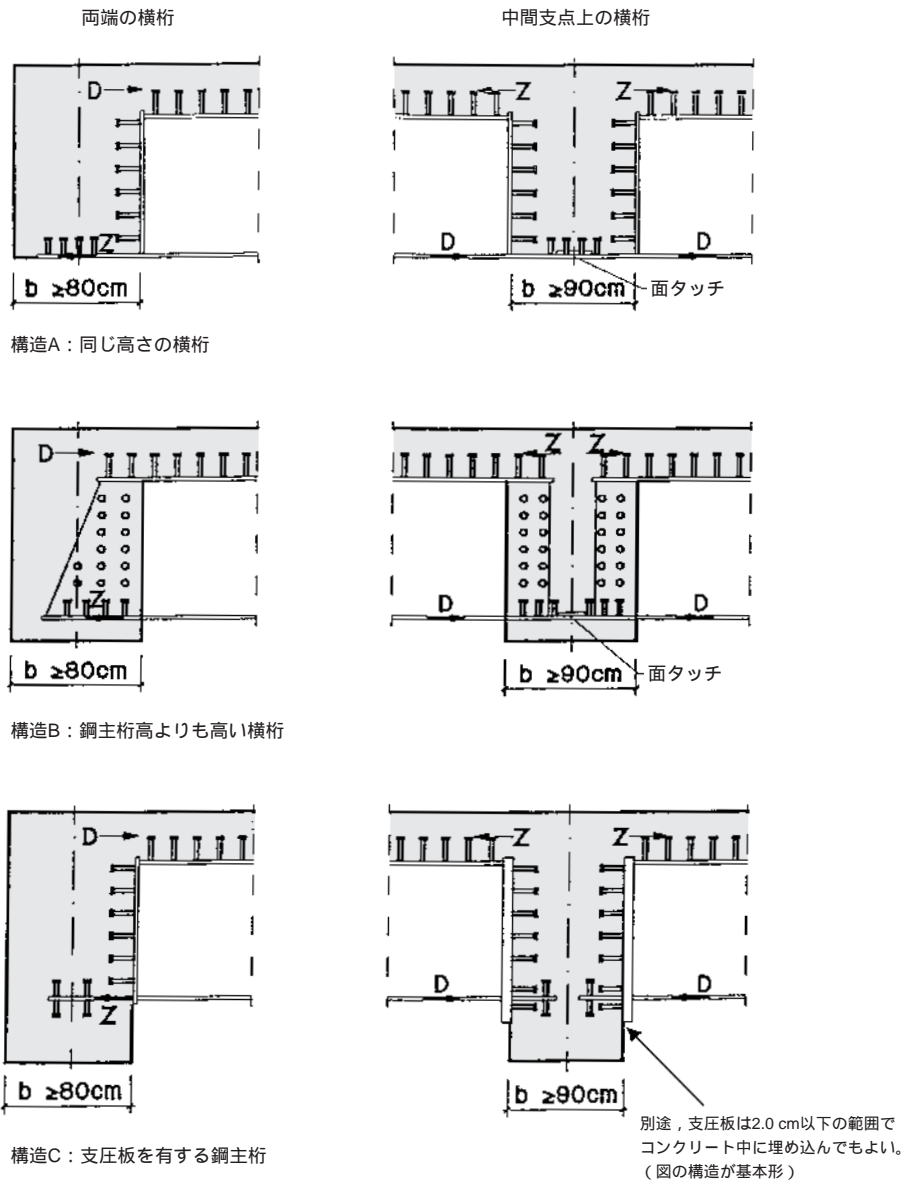


図15 コンクリート横桁の3つの例

4. あとがき

ここで紹介したDIN-FB104は、道路橋、鉄道橋、および歩道橋の設計に適用することができる。さらに、橋梁形式は、プレストレスを導入する、あるいはプレストレスしない通常の合成I桁や箱桁、二重合成箱桁、合成トラス、合成タイドアーチ、およびH鋼埋込み桁であり、その範囲は広い。斜張橋も含め外ケーブルを使用する合成橋梁は対象外である。

わが国では、性能照査型設計法に基づく道路橋示方書が、2002年3月に公布されたが、その安全性の照査法は耐震設計編を除いて、いまだに許容応力度設計法(以下、ASD法と記す)である。安全性の概念がASD法より明確になるLSD法(あるいは部分安全係数法)への移行は数年先になると言われている⁹⁾。Hanswilleらが行った比較設計の結果によると、合成橋梁の設計にLSD法を適用するとASD法による場合よりも経済性が向上する¹⁰⁾。しかし、その一方で照査項目が増え、設計が煩雑になるのも事実である。

数年先に本文での内容が活用されれば幸いである。

参考文献

1) 例えば、栗田章光、長井義則、江頭慶三、恩知俊一：ヨーロッパ規準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),(下), pp.32-40, pp.33-39, Vol.34, No.5, No.6, 橋梁と基礎, 2000.
G.Albrecht, 栗田章光：ユーロコード(EC)の共通規定およびEC3(鋼構造)の現状, pp.89-91, Vol.34, No.8, 橋梁と基礎, 2000.

2) 例えば, Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1994-2:Nationales Anwendungsdokument (NAD) zu Eurocode 4-2, Verbundbrücken, 2.Entwurf, August 1999.
3) G.Hanswille, J.Kina und N.Stranghöner : DINFachbericht 104 : Verbundbrücken, Erläuterungen und Anwendungsbeispiele, Februar 2002.
4) DSTV : Stahlbau Kalender 2000, Ernst & Sohn, 2000.
5) 栗田章光, 大山 理, マーカス・ルートナー : 二重合成連続箱桁橋の現状と課題, 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集Vol.4, pp.45-58, 土木学会, 2001.8.
6) Bundesministerium für Verkehr, Bau-und Wohnungswesen : Ergänzende Bestimmungen (BMVBW), Fassung April 1999, Verkehrsblatt-Dokument Nr.B5723 Verkehrsblatt-Verlag, 1999.
7) R.Pamp : Zur Auswirkung der Hydratation bei Verbundbrücken, Technisch-Wissenschaftliche Mitteilungen, Ruhr-Universität Bochum 1991.
8) 大山 理, 栗田章光, 渡辺 滉 : 鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋の断面構成比がクリープおよび乾燥収縮挙動に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1685-1692, 2002.3.
9) 橋梁委員会 : 道路橋示方書の改訂について, 道路, Vol.734, pp.23-32, 日本道路協会, 2002.4.
10) G.Hanswille : Design of Composite Bridges According to Eurocode 4 Part 2, 4th Japanese-German Colloquium for Steel and Composite Bridges, TU-Munich, April 2001.