

連続鋼合成桁における鉄筋コンクリート床版の設計上の課題

Problems for the design of reinforced concrete deck in continuous composite girder

高橋眞太郎*、倉方慶夫**、松田浩***

Shintaroh TAKAHASHI, Yoshio KURAKATA and Hiroshi MATSUDA

*新日本技研株式会社 設計部次長 (〒983-0852 仙台市宮城野区榴岡 3-7-35)

**工博 新日本技研株式会社 技術本部長 (〒983-0852 仙台市宮城野区榴岡 3-7-35)

***工博 長崎大学工学部構造工学科 助教授 (〒852-8131 長崎市文教町 1-14)

Composite girders were constructed wide spread until the first half of 1970's in Japan, but the decks at the time were designed too thin, so that many decks were unable to stand up to heavy traffic and were damaged seriously. Because it was not easy to repair the decks of composite girders, this type of girders were reduced to construct for a long time.

Since the design of a reinforced concrete deck has been improved, the accident due to damage of a deck does not occur at present time. For the reason of demand to reduce constructional costs, it is valuable to design the continuous composite girder supported by 2 main girders. But there are many inconvenient problems, because the design criteria have not been revised since 1973. The problems are caused by what the present design techniques of concrete construction are not incorporated into the design criteria. And the problems develop from the way to treat creep and shrinkage, the way to thinking of crack control design, and the insufficient to understand properties of reinforced concrete after cracking.

In this paper, we offer data on the table, about the design criteria of continuous composite girder, the problems in actual design and the results of comparative calculation.

key words : continuous composite girder, concrete deck, creep, shrinkage, crack control design

1. まえがき

建設工事コスト削減の要求が高まる中、予備検討において大幅な工費削減が可能なことを確認し、発注者のご協力を得て 10 径間連続鋼合成 2 主桁桁橋(図-1)の実施設計を行った。従来形式の非合成多主桁桁橋(合理化桁)と比較し、鋼重は 40%以上減少し、床版工事費の増加を加味してもおよそ 30%の工費削減を達成できた。

しかし、我国では連続鋼合成桁橋の建設は絶えて久しく、昭和 48 年の道示²⁾の改定においてプレストレスをしない連続鋼合成桁の規定が盛り込まれたものの、それを適用した例はほとんど無い。そのため設計基準の更新はその後行われてなく、今回の実施設計で床版の扱いに関する幾つかの問題に突き当たった。本報告はそれらを解決するものではないが、今後の検討における資料にすべく具体的な設計例をもって問題を報告する。

2. 実施設計の内容

連続鋼合成桁の設計上の問題点を記す前に、今回の実施設計の内容について紹介する。

2.1 基本計画

コスト削減には少数主桁の連続鋼合成桁が有効であることから、下記のような経緯で形式を選定したものである。

- 1) 製作工数と使用材料の削減のために主桁数を可能な限り減らした連続鋼合成桁とする。
⇒主桁と横桁の結合を単純化するため 2 主桁とする。
- 2) 2 主桁とすると図-1 のように横断方向には床版の支間が非常に長くなるので、比較的細かく横桁を配置して床版を支持する(横桁間隔 3.65~3.80 m)。すなわち、
 - 主桁間を床版支間とすると PC 床版でも床版厚が厚くなり前死荷重が重くなるので、とくに合成桁には好ましくない。
 - PC 床版を用いた少数主桁橋梁は、第二東名高速道路を中心に実施に移されているが、設計・施工上のノウハウの蓄積が無い発注者や設計者にとっては時期尚早と考え、実績のある RC 形式の床版を選定する。
 - 比較的密に横桁を配置することによって、万が一床版に損傷が生じて、横桁間に縦桁を渡すなどの補修は容易である。
- 3) これにより床版の主鋼材は橋軸方向に向き、床版に主桁作用の一部を期待する合成桁、とくに中間支点上で床版に引張力が発生する連続鋼合成桁の床版として有効に機能する。
- 4) 横桁をあまり細かく配置すると工費削減に繋がらないこ

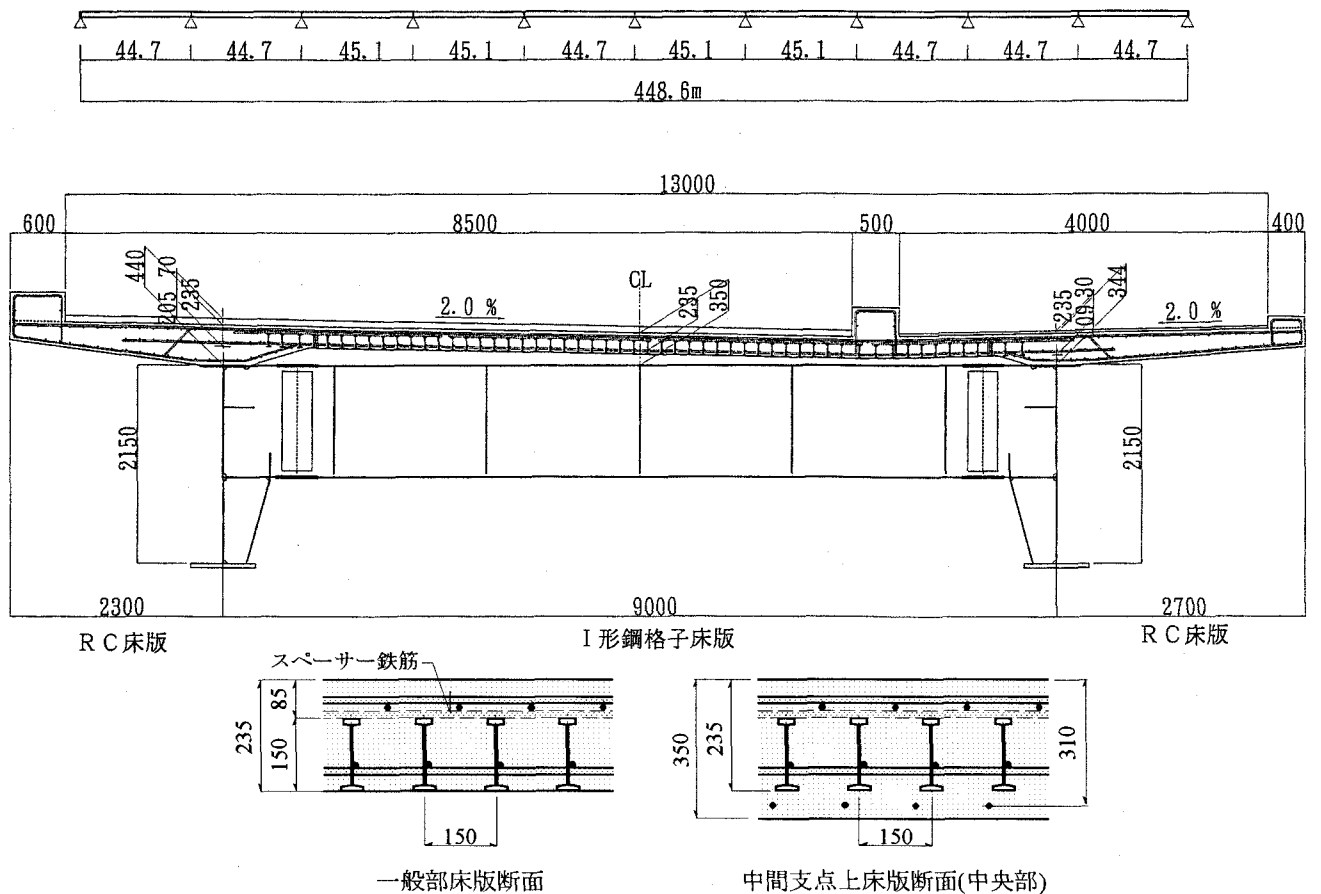


図-1 連続合成2主桁桁橋

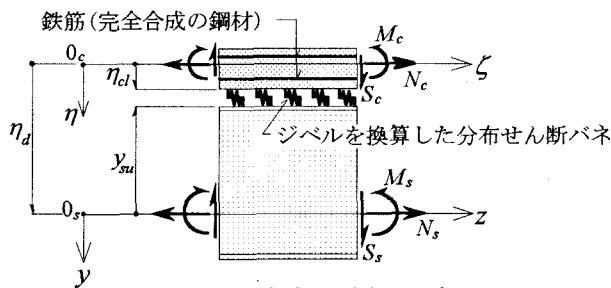


図-2 不完全合成桁モデル

と、および現場作業を削減することを目的としてI型鋼格子床版を用いて横桁間隔をできるだけ広げ、かつ横桁も合成桁とする。

ただし、構造上から床版張出部へのI型鋼格子床版の適用はできないので、この部分は鉄筋コンクリート床版とし、支保工施工とする。

- 5) 床版上面のひび割れ制御を確実にするため、I型鋼格子床版部においても異形鉄筋を床版上面に縦、横に配筋する計画とする。
- 6) 中間支点部では上フランジ上面まで床版を打ち下ろして主桁作用の引張力に対して補強する。

2.2 計算モデル

ねじり剛性の小さい2主桁構造では1-0分配で十分であるので、活荷重以外の荷重状態に対しては次の1本梁モデルの計算プログラムを作成して計算を行った。

- 1) 床版と鋼桁はジベルを換算した分布せん断バネで弾性的に結合される(図-2の不完全合成桁)。ただし、今回の設計では十分剛な値として分布せん断バネは5.9kN/mmを全長一様に用いた。

- 2) 床版にはコンクリートと完全合成された鋼材(鉄筋とI型鋼)が存在する。

2.3 主桁の計算条件

後に述べるように現行の道示³⁾には未だ検討を要すると思える規定もあるが、それに抵触しないように下記の条件のもとで設計計算を行った。

- 1) 床版コンクリートは支間部を先行し、1.6ヶ月後に中間支点部を施工する。施工段階を追った計算ステップを図-3に示す。

- 2) 中間支点を挟んで両側0.15ℓ(ℓは支間長)の区間はひび割れを生ずるものとし(図-4)、この間の床版コンクリートのクリープ・乾燥収縮は無視する。

(*)この点は道示には明記されていないが、ドイツの例⁴⁾を参考とした。

- 3) ただし、道示IIに従い、

- ・構造解析においてはひび割れ区間の床版コンクリートは剛性は100%有効として断面力を算出し、
- ・合成断面の応力度の計算においては、引張応力を受けるコンクリートは無効とする。

- 4) クリープ係数や乾燥収縮度も道示IIの規定値を用いる。



図-3 施工手順と計算ステップ

5) 活荷重応力は完全合成桁として、格子計算で算出する(完全合成桁としたのは影響線解析プログラムの作成が未完であったための便宜的な処置)。

2.4 床版の計算条件

1) 張出部の床版は無視して、横桁で弾性支持された2辺単純支持の両無限の直交異方性版とした(図-5)。

2) 異方性の度合いはコンクリートの引張部を無視した断面2次モーメントで算定した。

その際、主桁支間部の床版(主桁作用により軸圧縮力を受ける)では軸力を無視し、中間支点部では主桁作用による引張力を考慮した。

3) 床版の応力度は引張コンクリートを無視した通常のRC計算で求めた。その際、中間支点部では主桁作用による引張軸力を版作用の曲げモーメントと同時に作用させた。主桁作用と組合せた場合の鉄筋許容応力度は1.2倍の割増しを行った。

4) 設計曲げモーメントは、図-5に示すように2台のトラック荷重で算定した(曲げモーメントは主桁支間部のもの)。多主桁橋梁では1輪の後輪荷重で設計が決まるが、図-5のように2台の後輪軸重が同時に床版の支間中央に位置する機会はありません。ちなみに1台のトラック荷重で

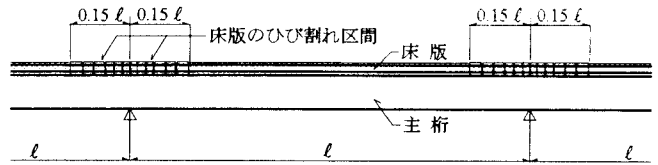


図-4 床版のひび割れ区間

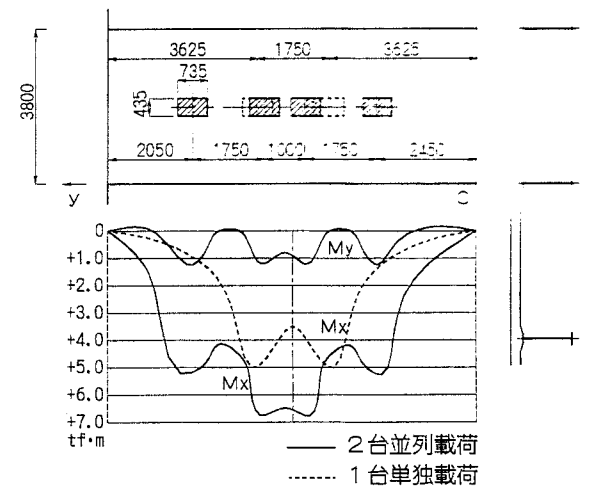
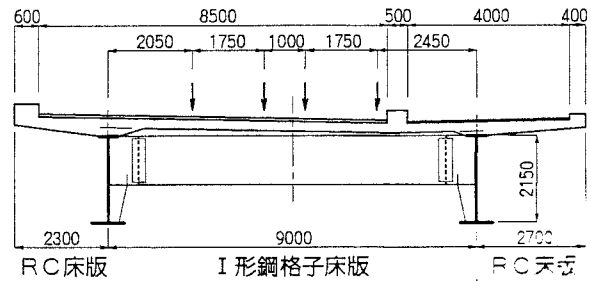


図-5 床版の曲げモーメント

あると曲げモーメントは75%程度に減少する。

3. 設計基準の課題

この設計で感じた道示Ⅱに対する疑問や問題点を記す。

(1) クリープと乾燥収縮

a. 道示Ⅱの合成桁の規定は昭和48年度の改定以来更新されていないが、この間に道示Ⅲではクリープと乾燥収縮の規定が変更されており、それに合わせて合成桁の規定も修正する必要があると思われる。

b. クリープ係数と乾燥収縮度は床版中の鉄筋を考慮した値と定義されていると思われる。しかし当時に比べると鉄筋量が増加していること(図-1の構造では鋼材比は $p \approx 0.03$ になる)、およびI型鋼格子床版では下面に鋼板があるのでコンクリートの暴露面積が小さいことなどで一律に規定できないことから、プレーンコンクリートの値として規定すべきと考える。

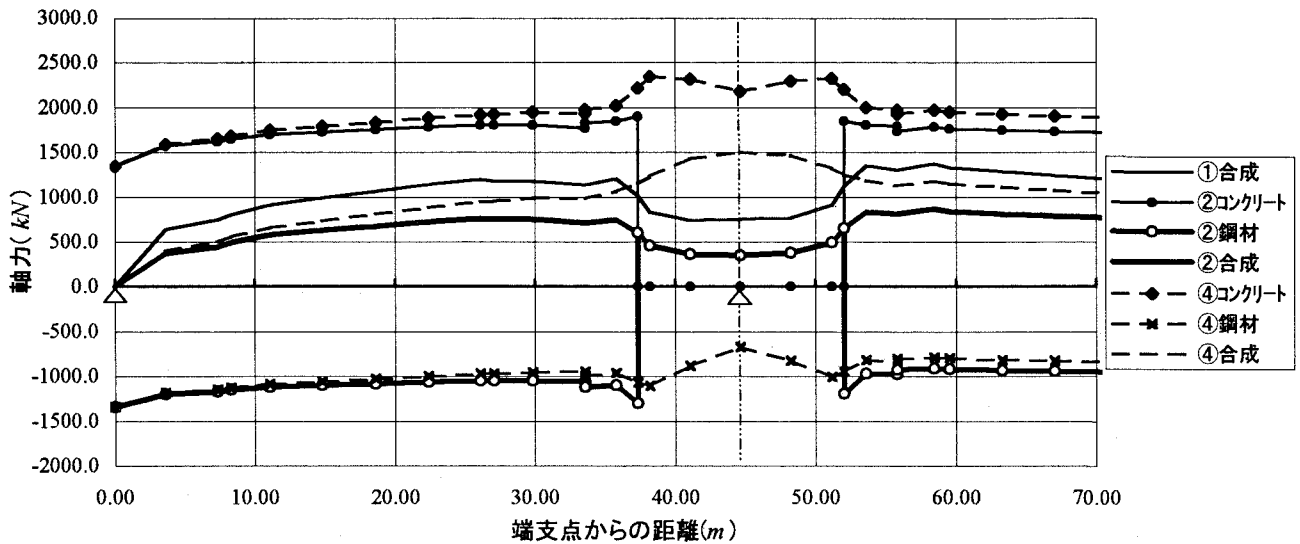


図-6 乾燥収縮による床版の軸力

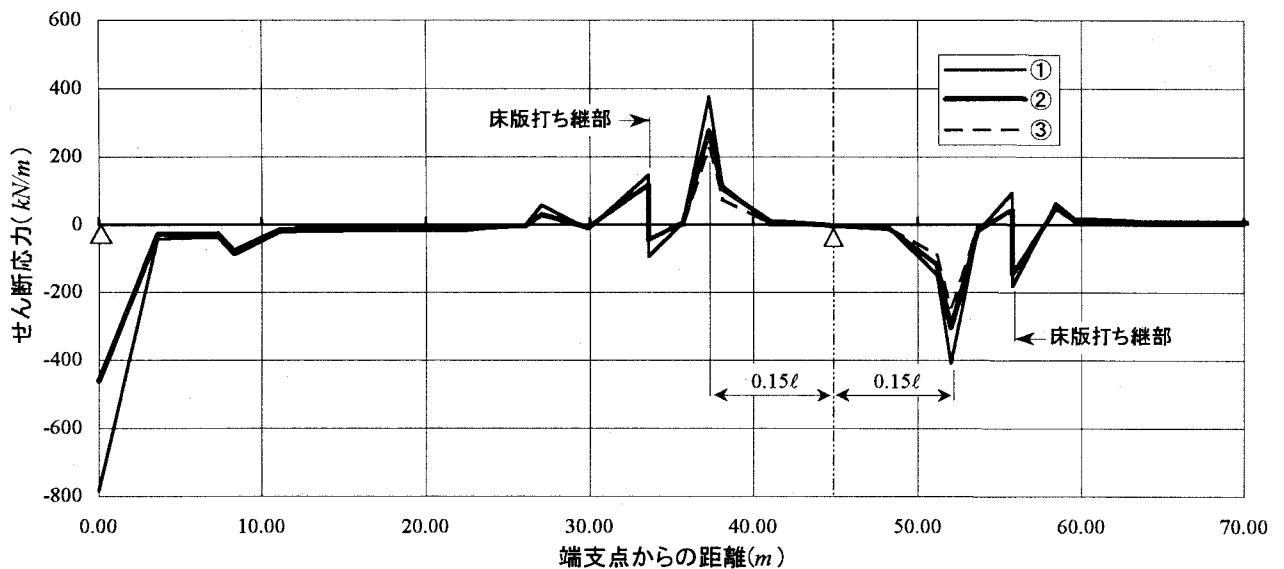


図-7 乾燥収縮によるジベルのせん断応力

表-1 主桁断面力の算出条件の組合せ

		コンクリートの剛性	クリープ・乾燥収縮	鋼材の拘束
計算 ケー ス	①	全長有効	中間支点部は無視	無視
	②	中間支点部は無視	中間支点部は無視	考慮
	③	全長有効	中間支点部は無視	考慮
	④	全長有効	全長有効	考慮

c. クリープ計算において *Trost* のレラクセーション係数に相当する値が $1/2$ となっているが、このような小さな値は現在ではあまり使用されないのではないかと。

(2) 中間支点上の床版の扱い

中間支点上の床版コンクリートは活荷重を含む荷重状態で引張強度以上の応力度を受ける。したがって、コンクリートはひび割れが発生する。このとき、

a. 道示Ⅱでは床版剛性の算定でコンクリートを有効としているが、ドイツでは鉄筋のみ有効として床版の剛性を算定している⁴⁾。ひび割れが発生すると剛性は急激に低下するので、剛性の低下を考慮すべきではないかと。

b. 中間支点上の床版の応力照査に関して道示Ⅱの規定では主桁作用を考慮しないで算出した版作用による鋼材応力度と主桁作用による鋼材応力度を単純に加算する方式となっている。この方式によると、鉄筋コンクリート計算で主桁作用による引張軸力を加えたものより応力度が小さく算定されるので問題がある。

4. 計算条件の数値比較

上記の疑問や問題点の幾つかに対して表-1に示す条件で4ケースの比較計算を行ってみた。表中で“中間支点部は無視”と記した中間支点部の範囲は図-4の $0.15l$ の範囲である。

ケース①は今回の実施設計で行った計算であり、現行の道示Ⅱに沿うものである。この場合、クリープ係数や乾燥

表-2 床版のコンクリート応力度 (主桁作用, MPa)

	計算ケース①				計算ケース④					
	側径間中央		第2径間中央		側径間中央		第1中間支点		第2径間中央	
	上縁	版中央	上縁	版中央	上縁	版中央	上縁	版中央	上縁	版中央
1 死荷重	-0.62	-0.49	-0.53	-0.37	-0.62	-0.49	0.99	0.59	-0.53	-0.37
2 乾燥収縮	0.21	0.38	0.41	0.48	0.99	1.03	1.21	1.25	1.14	1.13
3 クリーブ	0.03	0.06	0.07	0.07	0.31	0.21	-0.60	-0.23	0.31	0.20
4 雪荷重	-0.26	-0.21	-0.14	-0.10	-0.26	-0.21	0.40	0.24	-0.14	-0.10
5 温度差	-0.26	-0.21	-0.62	-0.56	-0.24	-0.29	-0.50	-0.33	-0.45	-0.42
6 活荷重	0.77	0.61	1.08	0.77	0.74	0.58	2.60	1.75	1.03	0.74
	-2.74	-2.18	-2.58	-1.84	-2.56	-2.07	-0.62	-0.41	-2.45	1.76
1+2+3	-0.38	-0.05	-0.05	0.18	0.69	0.75	1.60	1.61	0.92	0.95
1+2+3+(4)+6	0.39	0.56	0.89	0.85	1.42	1.32	4.60	3.59	1.95	1.69
	-3.38	-2.43	-2.63	-1.67	-2.14	-1.53	0.98	1.20	-1.67	2.61

(*)温度差応力度は床版が鋼桁よりも10℃温度が高い場合の値である。

表-3 第1中間支点上の床版鋼材応力度 (主桁作用, MPa)

	計算ケース①		計算ケース②		計算ケース③	
	上縁	版中央	上縁	版中央	上縁	版中央
1 死荷重	38.5	24.4	19.9	15.9	38.5	24.4
2 乾燥収縮	17.8	10.4	8.3	6.7	11.9	9.8
3 クリーブ	3.1	2.2	2.5	1.8	2.8	1.8
4 雪荷重	15.6	9.9	8.1	6.4	15.5	9.9
5 温度差	-26.2	-18.7	-9.7	-8.1	-19.1	-13.7
6 活荷重	61.2	50.8	55.4	46.0	61.2	50.8
	-14.5	-12.0	-14.5	-12.0	-14.5	-12.0
1+2+3	59.4	37.0	30.6	24.4	53.2	36.0
1+2+3+(4)+6	136.3	97.7	94.2	76.8	129.9	96.7
	44.9	25.0	16.1	12.4	38.7	24.0

(*)活荷重以外の鉄筋応力度算定ではコンクリート断面の断面力を全て鋼材で負担するとしたが、ケース①と③の活荷重による鋼材応力度は完全合成(コンクリート剛性を含む)として求めた全体合成断面の断面力を用いて床版鋼材と主桁から成る合成断面の応力度として算定した。

ス②と④のコンクリート断面の軸力は支間部で約1.5~2倍になる。したがって、従来通りのケース①の計算ではクリープや乾燥収縮によるコンクリート応力度を過小に見積もる結果になる。表-2にケース①と④の各荷重状態における床版コンクリート応力度を示すが、ケース①と④で支間部の乾燥収縮による床版コンクリートの引張応力度に2倍以上の開きがある。

図-7には床版コンクリートの乾燥収縮によるジベルのせん断応力分布を示す。床版中の鋼材の拘束を考慮することによってジベルの応力は桁端部で60%弱に減少する。なおジベルのせん断応力は床版打ち継ぎ部などに集中するが、その他でも鋼桁や床版の断面変化点で多少の乱れが発生する。

表-4 中間支点部床版の応力度 (MPa)

主桁作用と床版作用の組合せ		計算ケース	主桁作用 (上縁~下縁)	床版作用 (下縁)	合計 (下縁)
a	主桁作用と床版作用を個別に計算	①	136.3~59.1	56.1	115.2
b	主桁作用をRC計算に組入れ	①	136.3~59.1	154.6	
		②	94.2~59.5	145.1	

収縮度は床版中の鋼材の存在を考えた値と解釈してクリープ・乾燥収縮に対する床版中の鋼材による拘束は考慮せず、鋼桁による拘束のみを考慮した。したがって、床版コンクリート応力度は、床版合成断面の断面力をコンクリート・鋼材の合成断面定数で除した値とした。

これに対し、ケース②~④ではクリープ係数や乾燥収縮度はプレーンコンクリートの値とし床版中の鋼材による拘束も考慮し、床版の断面力をコンクリートと鋼材に分離してそれぞれの断面定数で応力度を算定した。

4.1 床版中の鋼材の拘束効果

床版中の鋼材の拘束効果、および中間支点部の床版剛性と乾燥収縮の有無の影響を見るために、ケース①、②、④の床版の軸力分布(端支点から第2径間中央まで)を図-6に示す。

ケース①の場合は、先に述べたように鋼桁の拘束のみを考慮しているので床版合成断面の軸力のみを示す。ケース②と④ではコンクリート断面と鋼材断面のそれぞれの軸力とそれらを合せた合成断面の軸力を示す。

床版中の鋼材量は主桁断面積の60%程度以上で上フランジ断面積の3倍前後になり、それによる乾燥収縮度の拘束効果は大きく、ケース①の床版合成断面の軸力に比べケー

4.2 中間支点上のコンクリートの引張応力度床版剛性低下の影響

全長に亘り床版コンクリートが健全であるとしたケース④のコンクリートの応力度を表-2に示す。中間支点部の床版厚を厚くしていることも多少影響しているが、床版コンクリートの引張応力度は死荷重状態で1.6MPaであり、雪荷重応力を加えてもコンクリートの引張強度($\sigma_{ck}=30\text{MPa}$ で $\sigma_{tr}\approx 2.2\text{MPa}$)に対し多少の余裕がある。ただし、活荷重応力を加えると引張強度を大きく超えるので、ひび割れが発生することになる。

一旦ひび割れが生ずると床版の剛性は低下し、クリープ・乾燥収縮の影響もその部分では緩和され、活荷重が除荷されても可逆性はないのであるから、現実に近い状態で設計計算を行うべきと考える。今回設計した橋梁でケース①で算定した断面に対しケース②の断面力を当てはめると、

- ・支間中央部では、圧縮フランジの応力度はほとんど変化しないが、引張フランジの応力度は約2.2MPaほど大きくなる。
- ・第1中間支点では、圧縮フランジの応力度は10MPaほ

ど減少し、逆に引張フランジの応力度は 10MPa ほど増加する。

という結果になる。応力度の変動は小さいが、引張応力度が増加する観点からいえば、ケース②の方が安全側である。

4.3 床版の設計における主桁作用の組合せ

主桁作用と床版作用の組合せにおいて、道示Ⅱはそれぞれ個別に算出した応力度を加算する方式を採っており、その計算結果を表-4a に示す。これに対して、主桁作用による床版断面力を鉄筋コンクリート計算に組入れて計算した値を表-4b, c に示す。後者の方が 30~40MPa も大きく、床版の鋼材応力度としては無視し得ない差がある。

5. まとめ

欧州を中心として、クリープ・乾燥収縮および鋼材で補強されたコンクリートのひび割れ後の性状に関する基本的な設計値が整備されてきている⁹⁾。これに合せて我国においても研究は急速に進められ、クリープ・乾燥収縮に関する規定の改定が行われ、またひび割れ制御設計や PRC 構造の設計規準が取込まれている^{6),7)}。しかし、我国における研究の主体は PC 構造を対象としており、合成桁には昭和 48 年以來その後の研究成果は全く反映されていない。

昭和 48 年に鋼道路橋示方書に他に先駆けてプレストレスをしない連続合成桁の規定が盛り込まれたが、前後して床版の損傷事例が多く発生し、床版に依存する度合いの高い合成桁の建設が抑制された。このため我国ではそれ以來設計基準の改定は行われていないが、この間にドイツでは中間支点部のひび割れを許した連続合成桁の研究が進められ、設計基準が整備されている。

ただし、我国でもその間 RC 床版の設計法の改良が検討され、床版の損傷事例は今では皆無といってよい。供用荷重下では非合成桁であっても床版は十分主桁に合成されており、過去の損傷事例においても合成桁であるために床版に無理な応力が加わり損傷を招いた訳ではなく、合成、非合成とも等しく床版は損傷したようである。

コスト縮減が叫ばれる折、床版の設計法が改良されたことから連続合成桁の実設計を行ったが、道示Ⅱの合成桁の基準はその後の検討結果が盛込まれてなく、また実践の洗礼を受けてないため幾つかの問題があると感じた。すなわち、

(1) クリープや乾燥収縮に関する規定の道示Ⅲと整合性

以前は道示Ⅰのクリープ係数や乾燥収縮度は鉄筋を考慮した値と定義されていたが、今回の道示の改定ではその語句が削除されている。ひび割れ制御設計を導入するについて差し障りがあったためと想像するが、道示Ⅱの合成桁編でも次に述べる理由で道示Ⅰに合せるべきと思える。また、むやみにクリープ計算を難しくするつもりはないが、ク

リープ計算での経時係数 (*Trost* のレラクセーション係数) に一考を要する。

(2) 鉄筋によるクリープ・乾燥収縮の拘束の考慮

先に図-6 と 7 で比較したように、クリープや乾燥収縮に対する床版中の鋼材の拘束効果は大きい。コンクリートのひび割れ制御設計ではその効果は無視できず、クリープ係数や乾燥収縮度はプレーンコンクリートに対する値を導入する必要があり、床版合成断面の断面力から床版コンクリートの断面力を分離して検討する必要がある。

(3) ひび割れ後の性状の導入

主桁作用における床版の応力状態はほぼ軸方向力のみを受ける状態にあり、この状態におけるひび割れ後の変形性状はかなり解明されている。ひび割れ後は床版の剛性は急激に低下し、またクリープ・乾燥収縮の効果もかなり緩和されることは明らかであるから、この効果を導入すべきである。そうしないと主桁作用を考慮した場合に中間支点部の床版設計が過大設計になると考えられる。

(4) 床版の設計における床版作用と主桁作用の組合せ

中間支点部では主桁作用により床版に引張軸力が発生する。これは非合成桁でも避けられない現象であるが、現行のほとんどの設計では考慮されていない。少数主桁化に移るに従って、なお更その設計方法の検討が必要と思える。

以上、現行の設計基準における合成桁の床版の扱いに関する問題点を記してきたが、我国においては長い空白期間があったためやむを得なかった問題である。これから設計基準の改定を精力的に行って頂くことを願うものである。それについて、設計計算を必要以上に難しくすることは避けるべきであるが、しかし一方現実の状態に近づけることも大切である。そうしないと、想定していなかった問題への対処が難しくなる。

最後になったが、本実施設計と検討に多大のご協力を下さった岩手県・道路建設課ならびに同・一関地方振興局の関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 菅原豊、千葉一之、倉方慶夫：10 径間連続活荷重合成 2 主桁橋の設計、日本道路会議論文集、1997.12
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅰ 共通編、Ⅱ 鋼橋編、昭和 48 年 2 月
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅰ 共通編、Ⅱ 鋼橋編、Ⅲ コンクリート橋編、平成 8 年 12 月
- 4) K.Roik, G.Hanswille 著、伊藤敏一、平城弘一 訳：合成桁におけるひび割れ幅の制限、橋梁と基礎、93-2
- 5) Comite Euro-international du Beton : CEB-FIP MODEL CODE 1990 Design Code, Thomas Telford
- 6) 日本道路公団：設計要領 第二集、平成 9 年 11 月
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・コンクリート構造物、平成 4 年 10 月