

RC床版の設計法の変遷と今後の課題

Change in RC Slab Design Method and Future Tasks

河西龍彦*, 小林 朗**

Tatsuhiko KASAI and Akira KOBAYASHI

* (株)宮地鐵工所 設計部 (〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通り3番地)

** 工修 東燃(株) トウシート事業室 (〒150-8411 東京都渋谷区広尾1-1-39)

With the recognition that it is problem that there is only prestressed concrete slab in the menu of high durable slabs. We attended to RC slab which has been utilized for slab with steel girder most commonly, and studied the change in RC slab design method, or design standard in order to clarify the subjects to realize more durable RC slabs in the future. With respect to design load, design bending moment, allowable stress, reinforcement ratio, and minimum slab thickness, appropriate values of them were studied. On the basis of the study results and latest knowledge, we proposed that the advantages and scope of use of RC slabs be clearly defined and that a new design method appropriate to the RC slab fracture mode, including the method of bearing a live load, be established.

key words : RC slab, design standard, durability, slab fracture mode, live load

1. まえがき

鋼橋のRC床版の設計法, すなわち設計基準の変遷は, RC床版の損傷機構解明の歴史であると言ってもよい。しかし, これまでの設計基準の改定時点と現時点においては鋼橋設計者の床版に対する認識は大きく変わりつつあると思われる。

第1は, 松井らによる輪荷重移動載荷疲労試験等を用いた研究^{1)~5)}により, RC床版の損傷機構の解明が進み, そしてそれが広く一般的に認識されるようになったことである。

第2は, プレストレストコンクリート床版に鋼桁を組み合わせた少数主桁橋⁶⁾の登場等により, 鋼桁が主で床版は従となりがちであった設計思想が180度転換され, 床版は橋梁の最重要部材であると改めて認識するようになってきたことである。最重要部材であれば当然のことながら高い耐久性が求められることになるし, 西川が提言⁷⁾しているミニマムメンテナンス橋を実現するためにも, 床版には高い耐久性が求められている。

損傷機構が解明されれば, 耐久性の高い床版は設計可能となってくる。しかしながら現時点において, 耐久性の高い床版=プレストレストコンクリート床版という固定観念が一般的になりすぎているような気がする。高い耐久性を有する床版というメニューには, プレストレストコンクリート床版のみならず, RC床版, 現在開発が盛んな合成床版, そして鋼床版といった様々な形式の床版があることが望ましい。

このようなことから本論文では, 鋼橋の床版としてこれまで最も一般的に用いられてきたRC床版に着目し, その設計法すなわち設計基準の変遷を振り返りながら, より耐久性の高いRC床版を実現するための課題を明らかにしていきたい。

2. RC床版の設計法の変遷

(1) 技術基準

RC床版に関する諸基準は, 明治19年に国県道の築造基準(内務省訓令)が定められたのを初めとして, 最新の平成9年の道路橋示方書に至るまで改訂が繰り返され, 強化, 整備されてきた。表-1に道路橋の床版に関する示方書, 基準, 通達の変遷を示す。

道路法に基づいて道路の構造規格が定められたのは大正8年であり, 道路構造令および街路構造令が内務省令として公布された。昭和27年に道路法が改正されて道路の構造に関する技術的基準は政令で定めることとなり, 昭和33年に道路構造令として制定公布された。その後昭和45年に現行の道路構造令が制定され, 昭和57年, 平成5年に一部改正されて今日に至っている。

RC床版の設計基準は, 昭和31年の鋼道路橋示方書から本格的な整備が始められ, 材料, 設計, 製作技術の進歩と高度成長期における多数の橋梁建設という経済的要請から許容応力度の引き上げ等が行われた(S39鋼道示)。

ところがこの当時建設されたRC床版にひび割れ損傷事例などが見受けられたことから, RC床版の疲労損傷機

表-1 道路橋の床版に関する示方書，基準，通達の変遷

No	略称	年度	名称
1	M19 訓令	明治 19 年 8 月	国県道の築造基準 (内務省訓令第 13 号)
2	T8 政令	大正 8 年 12 月	道路構造令および街路構造令 (内務省令)
3	T15 細則	大正 15 年 6 月	道路構造に関する細則案 (内務省土木局)
4	S14 鋼道示	昭和 14 年 2 月	鋼道路橋設計示方書案 (内務省土木局)
5	S31 鋼道示	昭和 31 年 5 月	鋼道路橋設計示方書 (日本道路協会)
6	S39 鋼道示	昭和 39 年 6 月	鋼道路橋設計示方書 (日本道路協会)
7	S42 通達	昭和 42 年 9 月	鋼道路一方方向RC床版の配力鉄筋量設計要領 (建設省道路局長通達)
8	S43 基準	昭和 43 年 5 月	鋼道路橋の床版設計に関する暫定基準案 (日本道路協会)
9	S46 通達	昭和 46 年 3 月	鋼道路橋のRC床版の設計について (建設省道路局長通達)
10	S48 道示	昭和 48 年 2 月	道路橋示方書 (日本道路協会)
11	S48 通達	昭和 48 年 4 月	特定路線にかかる橋高架の道路等の技術基準 (建設省都市局長道路局長通達)
12	S53 通達	昭和 53 年 4 月	道路橋RC床版の設計、施工について (道路局企画課長)
13	S55 道示	昭和 55 年 2 月	道路橋示方書 (日本道路協会)
14	H2 道示	平成 2 年 2 月	道路橋示方書 (日本道路協会)
15	H5 通達	平成 5 年 3 月	橋、高架の道路等の技術基準における活荷重の取扱いについて (建設省都市局街路課長・道路局企画課長)
16	H6 道示	平成 6 年 2 月	道路橋示方書 (日本道路協会)
17	H8 道示	平成 8 年 2 月	道路橋示方書 (日本道路協会)

構の解明に関する研究が始められた。研究の進展に合わせて設計基準も見直され、設計曲げモーメントの増強、床版厚の増厚、鉄筋の許容応力度の引き下げ、配力鉄筋量の増加、等の設計基準の強化がなされた。

また近年の交通量の増大、車両の大型化に対応するため、H6 道示では設計荷重の引き上げが行われた。

これらの改訂の結果、現行の示方書で設計したRC床版は、旧基準 (S39 鋼道示等) で設計されたRC床版に比べて疲労耐久性が大幅に改善されていることが輪荷重移動載荷疲労試験等で確認されている^{1) ~ 5)}。

以下に主要な項目の変遷を整理する。

(2) 設計荷重および設計曲げモーメント

RC床版の設計荷重は、S14 鋼道示で設計自動車荷重が1等橋 13tf、2等橋 9tfと規定され、昭和 33 年制定の道路

構造令から 20tf、14tf と大幅に増加し、平成 5 年の道路構造令の改正で 25tf まで引き上げられた。S14 鋼道示までは自動車荷重のほかに転圧機荷重が用いられていたが、S31 鋼道示から橋梁の等級を1等橋と2等橋とに分け、さらにTL荷重 (1等橋 T-20、2等橋 T-14) が導入されて、ほぼ現行の荷重体系が整った。H6 道示では道路構造令の設計自動車荷重の変更を受けて活荷重の改訂が行われ、A活荷重、B活荷重が定められた。このことにより、これまでのTT43 荷重、TL-20 荷重、TL-14 荷重は廃止された。

次にRC床版の設計曲げモーメントの変遷について述べる (表-2)。T15 細則、S14 鋼道示では版の有効幅を考慮した梁としてモーメントを算定している。S31 道示では一方版として設計曲げモーメントを規定し、支間長に応じて算定する衝撃係数を乗じている。S46 通達以降は2方向の曲げモーメントすなわち主筋方向および配力筋方

表-2 設計曲げモーメントの変遷

技術基準	曲げモーメント		備考
	主筋方向	配力筋方向	
T15 細則	$M=P (l-b/2) / 4 \times (1+i)$ $i=20 / (60+L) \leq 0.3$		T荷重において分布幅を考慮して算出
S14 鋼道示	$M=P (l-b/2) / 4 \times (1+i)$ $i=20 / (50+L)$		同上
S31 鋼道示	$M= (0.4P (L-l)) / (L+0.4) \times (1+i)$ $i=20 / (50+L)$		$2 < L < 4$
S46 通達	$M=0.8 (0.12L+0.07) P$	$M=0.8 (0.10L+0.04) P$	衝撃を含む $P=8\text{tf}$ $0 < L \leq 4$
S55 道示			計画交通量大型車1日1方向1000台以上は1.2倍
H2 道示			TT-43が導入される
H5 通達			衝撃を含む $P=10\text{tf}$ $0 < L \leq 4$
H6 道示			計画交通量大型車1日1方向1000台未満は20%減ずる
H8 道示			衝撃を含む $P=10\text{tf}$ (B活荷重) $0 < L \leq 4$ (A活荷重の場合は20%低減した値を用いてよい) 主筋方向は増乗係数 $= 1 + (L-2.5) / 12$ を乗ずる (B活荷重, $2.5 < L \leq 4.0$ の場合)

注記) 1. M ; 床版の設計曲げモーメント, i ; 衝撃係数, P ; 活荷重, L ; 床版の支間長

2. なお上表は床版支間が車両進行方向に直角な場合の連続版について記した。

向の曲げモーメントを各々規定し、衝撃荷重も曲げモーメント式の中に含まれる形となった。S55 道示では特定路線の橋梁に対して TT43 荷重が導入され、また計画交通量のうち大型車が 1 日 1 方向 1000 台を超える場合に T 荷重による設計曲げモーメントに 1.2 倍の割増係数を乗ずることとなった。H6 道示では橋の等級が廃止され A 活荷重、B 活荷重が導入された。B 活荷重の輪荷重は車両の大型化を反映して 10tf に引き上げられ、さらに主鉄筋方向の床版の設計曲げモーメントには床版支間に応じた割増係数を乗ずるようになった。

(3) 許容応力度

鉄筋とコンクリートの許容応力度の変遷を表-3 に示す。鉄筋の許容応力度はまず T15 細則、S14 鋼道示で規定された。S39 鋼道示では当時の土木学会コンクリート標準示方書に準拠する形で鉄筋の材質に応じた許容応力度が定められ、結果として鉄筋の許容応力度は以前より引き上げられた。しかしその後床版の損傷が顕著に見られるようになったため、床版の破損の原因となるコンクリートのひび割れの発生を防止することを目的として、S43 基準以降はその材質を問わず鉄筋の許容引張応力度は 1400kgf/cm^2 に引き下げられた。また H2 道示からは不等沈下の影響を考慮してさらに 200kgf/cm^2 程度余裕を持たせるのが望ましいとされた。

コンクリートの許容応力度は、T15 細則では 45kgf/cm^2 と現在より相当に低い値であったが、その後、コンクリートの品質および強度の向上に伴い引き上げられた。設計基準強度の最低値も S31 鋼道示の 160kgf/cm^2 から H2 道示の 240kgf/cm^2 まで段階的に引き上げられている。

表-3 許容応力度の変遷 (kgf/cm^2)

技術基準	鉄筋	コンクリート
T15 細則	1200	45
S14 鋼道示	1300	45 ($\sigma_{28}/3 < 65$)
S31 鋼道示	1300	$\sigma_{28}/3 < 70$ ($\sigma_{28} > 160$)
S39 鋼道示	1400 (SR24, SD24) 1600 (SR30) 1800 (SC30)	$\sigma_{28}/3 < 80$ ($\sigma_{28} > 180$)
S43 基準	1400	
S48 道示	1400	$\sigma_{28}/3 < 100$ ($\sigma_{28} > 210$)
S53 通達	1400 に対して 200 程度余裕を持たせる	$\sigma_{28}/3 < 100$ ($\sigma_{28} > 210$)
S55 道示	1400	$\sigma_{28}/3 < 100$ ($\sigma_{28} > 210$)
H2 道示	1400 付加曲げモーメントを加えない場合 1400 に対して 200 程度余裕を持たせる	$\sigma_{28}/3 < 100$ ($\sigma_{28} > 240$)

(4) 鉄筋量および床版の最小厚

当初の設計基準では、床版は一方向版として主筋方向の曲げモーメントに対してのみ鉄筋の応力度照査を行っていたため、配力鉄筋量は構造細目中の主鉄筋に対する比率として規定されていた。その後、S31 鋼道示では主鉄筋量の 25% 以上であったものが、S46 通達により主鉄筋量の 70% 以上に引き上げられた。これは配力鉄筋量の不足により主鉄筋に平行な方向にひび割れが生じたことに対する対策と考えられる。S46 通達以降は配力鉄筋方向の曲げモーメントに対しても応力度照査を行ない配力鉄筋量を決定するように設計基準が改訂されたため、支間長にもよるが配力鉄筋方向の床版の設計曲げモーメントは主鉄筋方向の 80% 程度以上であるから、配力鉄筋量も主鉄筋の 80% 程度以上となるようになった。

床版の最小厚の変遷を表-4 に示す。床版の最小厚は S31 鋼道示で 14cm 以上と規定されたのが最初であり、その後 S43 通達により引き上げられて 16cm 以上（支間長による）となった。H5 通達以降はこれに交通量と付加曲げモーメントの係数を乗ずることとなり、当該橋梁の設計条件に応じて床版の最小厚をさらに厚くするように改訂された。

表-4 床版の最小厚の変遷

技術基準	床版の最小厚
T15 細則	規定なし
S31 鋼道示	14cm (有効厚 11cm、かぶり 3cm)
S43 基準	$d_0 = 3L + 9 \geq 16\text{ cm}$
S46 通達	$d_0 = 3L + 11 \geq 16\text{ cm}$
S53 通達	$d_0 = 3L + 11 \geq 16\text{ cm}$ $d = K_1 \cdot K_2 \cdot d_0$ K_1 : 交通量の係数 K_2 : 付加モーメントの係数
S55 道示	$d_0 = 3L + 11 \geq 16\text{ cm}$
H2 道示	$d_0 = 3L + 11 \geq 16\text{ cm}$ $d = K_1 \cdot K_2 \cdot d_0$ K_1 : 交通量の係数 K_2 : 付加モーメントの係数
H5 通達	$d_0 = 3L + 11 \geq 16\text{ cm}$ $d = K_1 \cdot K_2 \cdot d_0$ k_1 : 交通量の係数 k_2 : 付加モーメントの係数

3. RC床版の今後の課題

これまで述べてきた RC 床版の設計法の変遷に関する調査結果から、今後、より耐久性の高い RC 床版を実現するための課題について考えてみる。

(1) RC床版のメリット

高い耐久性を有する床版というメニューに RC 床版を加えようとする場合、RC 床版が他の構造形式の床版に勝る点を整理しておく必要がある。

現時点で考えられるのは、現場施工の容易さと普遍性、

そして経済性である。プレストレストコンクリート床版の場合、PC鋼材の緊張管理には専門業者が必要であるし、定着具の購入には協会等への加入が必要である。これまで最も一般的に使用されてきたRC床版は、誰でも簡単に施工ができるというメリットがあるし、このことは経済性にも寄与するものと考えられる。

RC床版の適用範囲を明らかにしておく必要もあろう。あまり長大な床版支間にRC床版を採用することは難しいだろうし、一般的な床版支間の場合でも合成床版等に比べればRC床版の方が厚くなることは否めないと思われる。どんな場合においても全てRC床版を適合させようと考えるのではなく、適材適所で様々な構造形式の床版を使い分けられるようになることが望ましい。

(2) RC床版の破壊形態と設計法

現行のRC床版の設計法は、床版の最小厚規定で押抜きせん断耐力を確保しているという前提で、主に曲げ破壊に対する安全性を照査している。そしてコンクリートのひび割れ防止を目的に鉄筋量をさらに増加させている。これはどちらかという経験的に生み出されてきたものと考えられるが、床版支間長4m以下のRC床版の耐久性向上に寄与してきたことは評価できる。しかし今後より耐久性の高いRC床版を実現するためには、最新の知見を取り入れていくことも肝要であろう。

そこで危惧されるのは、RC床版の破壊形態と設計法である。RC床版の破壊形態としては、押抜きせん断破壊、曲げ破壊、鋼材の疲労破壊の3タイプがあると考えられる。しかし現行の設計法は、結果としてある範囲内（例えば床版支間2～4m）においては一定の耐久性を確保したRC床版を設計できるのかもしれないが、その範囲を外れた場合には保証の限りでない。

また最終的に押抜きせん断破壊でRC床版が壊れたとしても、その原因は床版厚の不足ばかりではなさそうである。主に床版コンクリートの橋軸方向の乾燥収縮を鋼桁（主桁）が拘束することが原因で発生する橋軸直角方向のひび割れにより、設計上は等方性と考えていた床版が、橋軸直角方向が強く橋軸方向が弱い異方性の状態になってしまうことが、床版が破壊に至る第1ステップであると言われており^{1), 7)}、この異方性の影響を考慮した設計法の確立が望まれるところである。

活荷重の載荷方法についても課題が多い。曲げ破壊と疲労破壊では破壊を照査する活荷重の載荷状態は異なってくるはずで、例えば25トン車をB活荷重のT荷重(10tf×2輪)にモデル化し、これを橋軸方向には1組、橋軸直角方向には組数に制限なく載荷するという現行の活荷重の載荷方法は、曲げ破壊を想定したものである。しかしこのような活荷重の載荷状態は非常にまれなケースであり、疲労破壊を照査する際に使用することは適当でないと考えられる。また過積載車両の取り扱いも難しい問題である。

今後は、想定する破壊形態に応じた照査方法と、各々の

ケースにおける活荷重のモデル化や載荷方法の使い分けを明確にしていくべきであろうし、その際には設計作業の煩雑さを避けるための工夫も必要となつてこよう。

(3) その他の課題

この他にも、適用支間長の見直し、梁モデルと版モデルの使い分け、許容応力度の見直し、ひび割れ幅の制御と鉄筋量の関係、異方性度の定義、割増係数の見直し、設計法の妥当性の検証確認方法、連続合成桁への対応等、設計法に関する課題は多いと考える。

また、例えば防水層の完全な施工といった設計法以外でのアプローチも耐久性の高いRC床版を実現していく上では非常に重要な要素である。

新設のRC床版のみならず、既存のRC床版についてもその損傷度の判定と損傷度に応じた補修方法の選定の仕方を確立、普及していく必要があると思われる。そして補修的なアプローチから新設のRC床版にフィードバックすべき課題が明らかになってくる可能性も高いと考える。

4. まとめ

鋼橋の床版としてこれまで最も一般的に用いられてきたRC床版について、その設計法すなわち設計基準の変遷について調査した。そしてその調査結果と最新の知見から今後より耐久性の高いRC床版を実現するための課題について考察した。本研究は、土木学会鋼構造委員会「鋼橋床版の調査研究小委員会」の活動として行われているもので、本論文で考察した課題については引き続き研究を進め、何らかの具体的な形にまとめて報告したいと考えている。

〔参考文献〕

- 1) 松井繁之：床版の技術開発－耐久性の向上，施工合理化－，橋梁と基礎（1997.8）
- 2) 前田，松井：輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究，第6回コンクリート工学年次講演会論文集（1984）
- 3) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集，9-2（1987）
- 4) 松井ほか：RC床版の耐荷力と耐久性，土木学会関西支部昭和60年度講習会テキスト－既存橋梁の耐荷力と耐久性－，pp.25～116（1985.7）
- 5) 岡村，園田：ひび割れ床版の力学的特性，鉄筋コンクリート床版の損傷と疲労設計へのアプローチ，土木学会関西支部鉄筋コンクリート床版疲労設計委員会報告（1977.7）
- 6) 高橋昭一：鋼桁橋における場所打ちPC床版の設計と施工－PC床版2主桁橋床版の設計施工－，プレストレストコンクリート，Vol.40，No.2（Mar，1998）
- 7) 西川和廣：ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案，橋梁と基礎（1997.8）