

長支間 RC 床版の疲労設計法に関する一考察

A Design Method Considering Fatigue for Long Span Reinforced Concrete Slabs

松井 繁之*, 江頭 慶三**, 桐川 潔***

Shigeyuki MATSUI, Keizo EGASHIRA and Kiyoshi KIRIKAWA

*工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

** (株)春本鐵工 技術本部本店設計部 (〒551 大阪市大正区南恩加島 6-20-34)

***大阪大学工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

The design of slab for the steel bridge which is supported by 2 or 3 main girders whose spacing is over the limit of current specification is not yet to be established. Bridges in Japan have experienced damages on the R.C. slab due to fatigue shear failure caused by repeated loading of moving vehicles. In general, investigations of fatigue failure is not performed. Instead, the design of slab is based on the control of stress due to the bending moment, resulting in a thicker slab. However, the maximum span length of slab is restricted up to 4m using this method; it is better not to be employed for the design of over 4m slab span because of uncertainty. Due to the use of thicker slab to count-measure the longer slab spans, the fatigue mechanism of shear failure altered to that of reinforcement bar fatigue failure. In this paper, minimum slab thickness of long slab span is examined by focusing on the fatigue failure mechanisms of slab concrete as well as reinforcement bar.

Key Words : R.C. slab, fatigue, slab thickness

1. はじめに

少数主桁橋の鉄筋コンクリート床版 (以下, RC 床版とする) の支間は, 道路橋示方書 (以下, 道示とする) の規定範囲(4m)を超えるため, その設計法の確立が求められている。そこで, 文献 1)~3)にて, 長支間床版に対応した活荷重設計曲げモーメント式を提案してきたが, これらの式は, 道示の設計思想を改良・拡張してきたものである。ただし, 整数台の自動車載荷・ひび割れによる直交異方性を考慮し, 許容応力度法を適用して最小床版厚を決定したものであった。しかし, 疲労については考慮しておらず, 本論文はこれまでの提案にさらに疲労を考慮し, 拡張するものである。

さて, 従来の道示で規定される床版支間の範囲内では, 床版の疲労破壊はコンクリートのせん断疲労破壊が先行すると考えられるが, 支間長が増大すると床版厚が増加し, 床版のせん断耐力が向上するので, 疲労破壊はコンクリートのせん断疲労破壊から曲げモーメントによる鉄筋の疲労破壊に移行すると考えられる。よって, 正確にはこれら 2 種類の疲労現象を考慮した疲労照査から最小床版厚を決定すべきだと考え, 床版支間 2m~6m の範囲内で試設計を行い, 疲労設計法について検討した。

なお, ここで床版の疲労破壊について定義すると, 移

動輪荷重の繰返しせん断力によって床版コンクリートが押抜き形態により抜け落ちる破壊を床版コンクリートのせん断疲労破壊と呼ぶ。次に, 鉄筋がコンクリート中で繰返し曲げ応力によって疲労破断するものを鉄筋の疲労破壊と呼ぶことにする。

2. 床版の初期設計断面

先に提案した曲げモーメント式^{2,3)}により, 支間 2m~6m の単純版について, 初期設計断面を決定した。提案式では活荷重による床版コンクリートのひび割れに伴う直交異方性が考慮された合理的なものである。一方, 等分布死荷重による床版の曲げモーメント(単位幅 1m あたり)は, 道示の単純版の支間曲げモーメント式を用いた。そして, 死荷重曲げモーメントは従来通り主鉄筋方向のみで受け持つものとした。使用する鉄筋は D16, D19, D22 (材質は SD295 を想定) とし, 配力鉄筋径が主鉄筋径を上回らないようにした。さらに主鉄筋の中心からコンクリート下面まで (本論文ではこれをかぶりという) を 4cm とし, 引張側鉄筋の中心間隔は 10cm 以上 15cm 以下とし, 圧縮側鉄筋の量は引張側鉄筋の 1/2 とした。鉄筋の許容応力度は 1400kgf/cm^2 とした。コンクリートの設計基準強度は鋼桁との合成作用を考え

ない床版の断面設計を行うので、道示の規定により、下限値である $\sigma_{sk}=240\text{kgf/cm}^2$ とした。コンクリートのヤング係数比 $n(=E_s/E_c)$ は断面計算では $n=15$ を用い、FEM解析においては、コンクリート設計基準強度に対する値を用いて $n=8.4$ とした。床版断面の計算結果を表-1に示す。

表-1 床版の初期設計断面(単純版)

		()道示規定による床版厚				
支間長 b : (m)		2	3	4	5	6
床版厚 t : (cm)		21 (24)	23 (29)	25 (34)	28 (39)	34 (44)
主鉄筋	pitch (mm)	D19@115	D22@130	D22@110	D22@100	D22@100
	σ_s	1353	1373	1366	1374	1385
	σ_c	72	75	76	74	65
	M_y	4.79×10^5	6.50×10^5	8.47×10^5	1.08×10^6	1.39×10^6
配力鉄筋	pitch (mm)	D16@135	D16@115	D16@105	D16@100	D16@115
	σ_s	1368	1369	1381	1340	1367
	σ_c	63	64	62	56	46
	M_x	2.63×10^5	3.44×10^5	4.25×10^5	5.05×10^5	5.84×10^5

σ_s :鉄筋の曲げ引張応力度 (kgf/cm^2) . σ_c :コンクリートの曲げ圧縮応力度
 M_y :主鉄筋断面の曲げモーメント ($\text{kgf}\cdot\text{cm/m}$) . M_x :配力鉄筋断面の曲げモーメント
 M_{y1} : $(0.09b+0.14) \times 10(1+i)$. M_{x1} : $(0.06b+0.07) \times 10(1+i)$

3. 鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性の照査方法

3.1 照査の手順

所要の期間内で、考えられる最大荷重状態下での応力範囲で疲労破壊を起こさない最小床版厚を求めることが命題となる。その手順は以下の①～②に示される。

① 2 で決定した床版断面の耐久性を議論するために後述する荷重載荷モデルでの最大曲げモーメントと最大せん断力の値を解析によって求める。解析値を用いて断面計算を行い、所要の応力範囲と、鉄筋の疲労破壊の S-N 曲線⁹⁾、床版コンクリートのせん断疲労破壊の S-N 曲線⁹⁾を用いて疲労破壊に至る回数を求めることが基本となる。
 ②床版の耐用年数は 50 年程度と考えると、安全性を考慮して鉄筋の疲労破壊に対する所要寿命は、5%破壊確率の S-N 曲線を用いるため 2 倍の 100 年、コンクリート床版のせん断疲労破壊では疲労データの不足とばらつきや水の影響を考慮に入れて 10 倍の 500 年を所要寿命と想定した。実験によれば、常に湿潤状態にある床版は乾燥したものと比較して 1/40～1/80 程度まで低下することが確かめられているが⁹⁾、実橋では湿潤状態が断続的になるものと考え、耐用年数の 10 倍とした。

次に、実橋での軸重実測データから B 活荷重(10tf)に相当する設計軸重に対する等価繰返し回数を求め、上記の耐久年度での総等価繰返し回数を求めた⁷⁾。

上記の①、②の計算を繰返し、②の所要寿命年数内に作用する総等価繰返し回数が①の疲労破壊回数を下回る場合、設定した輪荷重状態下での発生応力範囲では疲労破壊しないことになり、その時の最小床版厚が疲労から決定される最適厚となる。以下に具体的に説明する。

3.2 S-N 曲線について

(1) 鉄筋の S-N 曲線

床版中の鉄筋の疲労破壊に対する照査は参考文献 4)の S-N 曲線が信頼できるものとして採用した。鉄筋の疲労破壊データは多く、5%破壊確率(95%信頼性)の S-N 曲線

も求められているので、これを使用できる。その式を以下に示す。

$$\log fa = 2.037 - 0.145 \cdot \log N \quad (3.1)$$

ここに、 fa :活荷重応力度(kgf/cm^2)

(2) 床版コンクリートのせん断疲労破壊に対する S-N 曲線

移動輪荷重の繰返しによって RC 床版のひび割れが進展し、最終的に押抜き型のせん断疲労破壊を呈し、その疲労破壊寿命は実験により、下記の式のように求められている⁹⁾。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.520 \quad (3.2)$$

ここに、 P :作用荷重

P_{sx} :移動輪荷重の繰返しにより、コンクリートのひび割れが進展し、主鉄筋方向にはり状化した時のはり幅のせん断耐荷力で、以下の式で算出できる。

$$P_{sx} = 2 \tau_{smax} \cdot X_m \cdot B + 2 \sigma_{tmax} \cdot C_m \cdot B \quad (3.3)$$

$$B = b + 2d_d \quad (3.4)$$

ここに、 τ_{smax} :コンクリートの最大せん断応力度(kgf/cm^2)、
 $(=0.252 \sigma_{sk} - 0.000246 \sigma_{sk}^2)$,

σ_{tmax} :コンクリートの最大引張応力度(kgf/cm^2)、
 $(=0.538 \sigma_{sk}^{2/3})$,

σ_{sk} :コンクリートの圧縮強度(kgf/cm^2)、

X_m :引張側コンクリート無視の状態での主鉄筋断面の中立軸(cm)、

C_m :主鉄筋のかぶり厚(cm)

d_d :配力鉄筋の有効高(cm)

この式は、作用荷重をはり状化した主鉄筋断面のせん断耐荷力で除して無次元化し、移動輪荷重試験での疲労破壊回数をプロットして求められた式である。床版支間や配力鉄筋量がパラメーターとして含まれないものであるが、コンクリート強度、床版厚に応じて P_{sx} が算定され、疲労破壊回数が求められる。ところで、実橋床版の床版支間長は実験床版と異なることや、載荷輪荷重数、さらに載荷面積も異なる。よって式(3.2)を直接的に実橋床版に適用できない。これを可能にするためには式(3.2)における荷重を発生せん断力で表現すればよい。そこで実験床版について解析を行い、荷重 P のもとで載荷版端で発生する単位長さ当たりのせん断力をはり状化する幅 B の範囲内で積分し、 P_{sx} もその幅のせん断耐荷力とすると、全く等価なものとなる。全ての実験床版について載荷荷

重 P によって発生するせん断力を算出し、それらに対する疲労破壊回数 N で $S-N$ 図を再作成し、最小自乗法によって $S-N$ 曲線を求めた。結果は式(3.5)となった⁸⁾。

$$\log(Q/P_{xy}) = -0.07835 \log N + \log 0.4554 \quad (3.5)$$

3.3 床版の断面力解析

(1) 最大曲げモーメントの算出方法

まず、支間 $2m \sim 6m$ の各床版に対して、鉄筋の疲労破壊照査用の最大曲げモーメントを求める。その手順は以下のとおりである。

①活荷重は道示 I 共通編 2.1.3 によれば、橋軸方向には一台とし、橋軸直角方向には最も大きな曲げモーメントが生じるよう可能な限りの後輪荷重を載荷することになるが、疲労を考える場合、このような載荷確率はほとんど無いと考えられる。そこで、大胆な仮定であるが、横方向に 2 台の大型車が並列し、最大 4 輪が載荷されると仮定した。さらに荷重の大きさについて、1 台分の車両は正規の設計 B 活荷重 ($10t \times 2$ 輪) で、他の車両はその $1/2$ の設計荷重 ($5t \times 2$ 輪) と仮定した。これは、着目する横断面上に 2 台以上の大型車が同時に載ることが、確率的にほとんど無いと考えられるからであり、橋軸方向に輪荷重のずれが $3m$ 程度あると、最大曲げモーメントは上記の値に近づくためである。

②車両の後輪の数は支間 $2m$ では 1 輪、 $3m$ では 2 輪、 $4m$ 、 $5m$ では 3 輪、 $6m$ では 4 輪となる。 $6m$ の載荷状態を図-3.1 に示す。

床版支間が長くなると前輪の影響が無視できなくなるため、現行の自動車諸元の中で最も軸距の短いダンプトラックの前輪の軸重を想定し、設計前輪荷重 ($2.5t \times 2$ 輪) 荷重を考慮した。また、隣接する車両の前輪も上記と同様に $1/2$ を載荷した。

③輪荷重の分布としては、道示では $20cm \times 50cm$ の載荷面からアスファルト舗装厚を含めコンクリート床版中心まで 45° で拡大分布するとあるが、アスファルト舗装は剛性が小さいため荷重分配作用が無いとして床版上面より厚さの $1/2$ の高さまで 45° で拡大分布させた。

④衝撃としては支間長に関係なく衝撃係数 $i=0.4$ を用いた。これは、道示での衝撃係数 $i=20/(50+b)$ の上限値であるため安全側となる。

(2) 最大せん断力の算出方法

床版コンクリートのせん断疲労破壊照査用のせん断力の算出は曲げモーメントの時と同様に疲労照査用の荷重を仮定し、着目点で最大となるような輪荷重の位置を決定し、せん断力を求めた。手順を以下に述べる。

①輪荷重載荷の中心位置は支間長 $2m$ で主桁から $84cm$ 、 $3m$ で $86cm$ 、 $4m$ で $88cm$ 、 $5m$ で $91cm$ 、 $6m$ で $97cm$ とした。

この値は主鉄筋断面のせん断疲労破壊位置を想定して

決定したものである。つまり、せん断力に対する着目点は支点から近ければ近いほど大きくなるがハンチ部では床版厚が厚くなり、せん断耐力は十分あると考えられるので、ハンチ部をはずれた位置を想定した。その位置はフランジ突出幅 $15cm$ 、ハンチ幅 $15cm$ 、を仮定し、主鉄筋のかぶり破壊に対して $1:3$ の破壊面を想定して $12cm$ 、さらにせん断破壊角度を 45° とすると $t-4cm$ (t :床版厚)内側が輪荷重載荷縁となる。これに輪荷重幅の $1/2$ である $25cm$ を足しあわせた合計距離が上記の最も不利な載荷位置となる。この載荷状態を図-3.2 に示す。

②荷重載荷面積は道示の規定に従い、 $20cm \times 50cm$ とした。

③衝撃係数は 3.3 (1) の④と同様に $i=0.4$ を用いた。

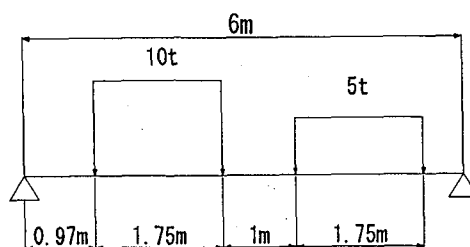


図-3.1 最大曲げモーメント算出用載荷位置

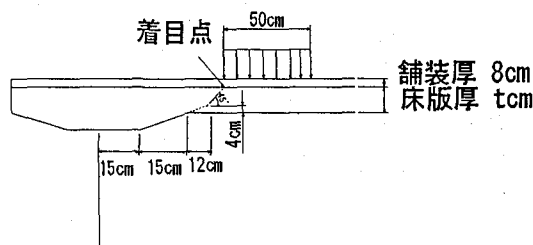


図-3.2 最大せん断力算出用載荷位置

3.4 解析結果

(1) 鉄筋の応力度と疲労破壊回数

まず、FEM 解析で求めた疲労照査用曲げモーメントより、鉄筋のひずみを以下の式で求める。

$$\varepsilon_y = \frac{Z_y}{D_y (1 - \nu_c^2)} \left(M_y - \frac{\nu_c}{\sqrt{\alpha}} M_x \right) \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_x = \frac{Z_x}{D_x (1 - \nu_c^2)} \left(M_x - \frac{\nu_c}{\sqrt{\alpha}} M_y \right) \quad (3.7)$$

ただし、 Z_x, Z_y : 中立軸からの距離

D_x, D_y : それぞれ橋軸、直角方向の版剛性

ν_c : コンクリートのポアソン比

この式は、鉄筋のひずみは直角方向の曲率の影響がないと考えた簡易式である。

よって、下面引張側鉄筋の応力は

$$\alpha_x = E_s \varepsilon_x, \quad \alpha_y = E_s \varepsilon_y \quad (3.8)$$

となる。この値と S-N 曲線により鉄筋の疲労破壊回数 N が求まる。

(2) 床版コンクリートのせん断疲労破壊回数

先述したように、S-N 曲線で床版の疲労破壊回数 N を求める際、パラメータとして複数の輪荷重によるせん断力分布が必要となる。はり状化すると考えられる幅 B に分布する橋軸直角方向せん断力分布 Q_y を積分して Q としているため、各スパン毎に輪荷重個数を変えて FEM 解析で求めた値を積分してこの値とした。図-3.3 に床版支間 2m の主鉄筋断面に作用するせん断力分布の 1 例を示す。

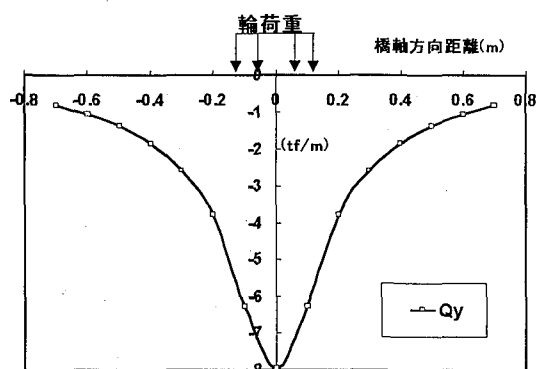


図-3.3 Q_y 橋軸直角方向せん断力の分布

3.5 実橋での等価繰り返し回数

(1) 等価繰り返し回数の算定式

RC 床版が受ける活荷重は、不規則に変動するランダム荷重である。交通荷重による RC 床版の損傷をランダム疲労問題として取り扱う場合、マイナー則の適用⁹⁾が可能であると仮定することによって、ランダムな輪荷重作用をある基本の荷重に換算し、その場合の等価回数を求めることが可能となる。すなわち、供用年数内に、任意の大きさの輪荷重 $P_1, P_2, \dots, P_n$ がそれぞれ $n_1, n_2, \dots, n_n$ 回作用する場合、これらすべての輪荷重の載荷繰り返し回数を、基本となる輪荷重 P_0 に変換した等価繰り返し回数は次式で表現できる。

$$N_{eq} = \sum \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^m n_i \quad (\text{ただし, } m=1/k) \quad (3.9)$$

ここで、 m の値は鉄筋の曲げ疲労破壊に対しては(3.1)式の傾きより算出し、 $m=6.9$ を用いる。また、床版コンクリートのせん断疲労に対しては、(3.5)式から同様に算出し、 $m=12.76$ を用いればよい。

(2) 測定結果

基本となる輪荷重 $P=10t$ として等価繰り返し回数を求めた。データは過去に床版クラック法⁷⁾で測定された一般国道である近畿県内 11 橋+名古屋地区北頭高架橋と、臨

海工業地帯である石津大橋での測定データを用いた。実際に走行している大型トラック類は JIS 規格⁹⁾によるが、多種多様である。しかし、大分類すると図-3.4 のようにほぼ 7 種に分類できる。TYPE4 までがいわゆる大型トラックで、TYPE5~TYPE7 がトレーラートラックである。等価繰り返し回数を求める際は、これらの TYPE 別に求められた混入率と軸重の確立密度曲線を用いて算定した。トラックの各軸重の頻度分布を図-3.5 に示す。

車種	車両形式	
TYPE1	2 軸車	
TYPE2	後タンデム 3 軸車	
TYPE3	前タンデム 3 軸車	
TYPE4	セミトレー型 4 軸車	
TYPE5	タンクロー型 4 軸車	
TYPE6	セミトレー型 5 軸車	
TYPE7	セミトレー型 6 軸車	

図-3.4 トラックの種類

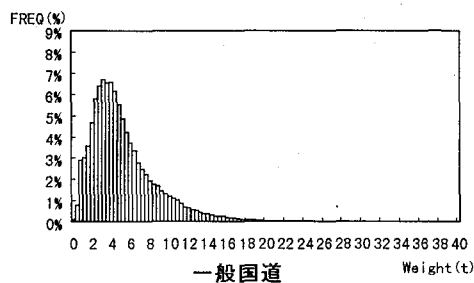
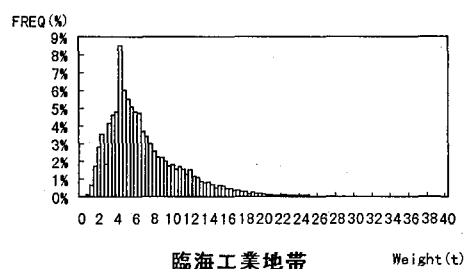


図-3.5 軸重の頻度分布

3.6 解析結果と測定値の比較による疲労耐久性の照査

各支間ごとの疲労照査荷重に対する疲労破壊回数の計算結果を表-3.1に、実測値を10tfの設計輪荷重に換算し、路線の交通特性別に計算した結果（等価繰り返し回数）を表-3.2に示す。

表-3.1 支間長別の等価荷重による疲労破壊回数

支間長	提案式での 床版厚	Nr:鉄筋 疲労破壊回数	No:コンクリートの 疲労破壊回数
2m	21cm	4.51×10^7	4.24×10^8
3m	23cm	9.38×10^7	5.77×10^8
4m	25cm	5.88×10^7	6.29×10^8
5m	28cm	9.17×10^7	1.54×10^9
6m	34cm	1.61×10^8	8.57×10^9

表-3.2 交通特性別の等価繰り返し回数

自動車の交通特性	等価繰り返し回数:No	
	鉄筋 100 年間	コンクリート500 年間
一般国道	4.29×10^6	5.31×10^7
臨海工業地帯	3.32×10^7	4.74×10^8

これらの結果に対して、次のようなことが考察できる。
 まず支間長 2m, 3m においては、一般国道のデータでは、鉄筋の疲労破壊回数も床版コンクリートのせん断疲労破壊回数も共に 100 年, 500 年の等価繰り返し回数を超えているため安全といえる。しかし重交通路線である臨海工業地帯では、コンクリートの疲労破壊寿命を超えているため床版厚が不足している。しかし回数に余り差はないため、1cm 程増厚すれば安全側になると思われる。

次に支間長 4m~6m においては、両者の疲労破壊寿命が、一般国道、臨海工業地帯のデータによる等価繰り返し回数を越えているため、安全側であると言える。

以上より 2m, 3m 程の短支間長では、提案厚および道示の床版厚決定式(4b+11)に 1 方向当たりの大型車の日計画交通量が 2000 台以上と考え 1.25 倍した床版厚で、ほぼ安全であると言える。一方、支間長 4m~6m ではまだ余裕量があるため、疲労を考えると提案式よりさらに数 cm は床版厚を低減させることが可能と考えられる。

4. 長支間床版での床版厚

4.1 床版厚の低減

3.6 で得られた結果に対し、2m~6m の各支間のケースにおいて、鉄筋量をそのまま、床版厚のみ 1cm ずつ変化させ、コンクリート 500 年と鉄筋 100 年の等価繰り返し回数を満たす最小床版厚を求めた。図4.1にこれを示す。また、このときの疲労破壊回数の検討結果を表4.1、表4.2に示す。なお、床版厚を決定する際、等価繰り返し回数の方に着目し、鉄筋の許容応力度は 1400kgf/cm²を用いている。

4.2 最小床版厚の照査

4.1 の結果から疲労照査を満足する、すなわち等価繰り返し回数を超える最小の床版厚と床版支間長の関係が求まった。しかし、この床版厚は当初より薄くなってい

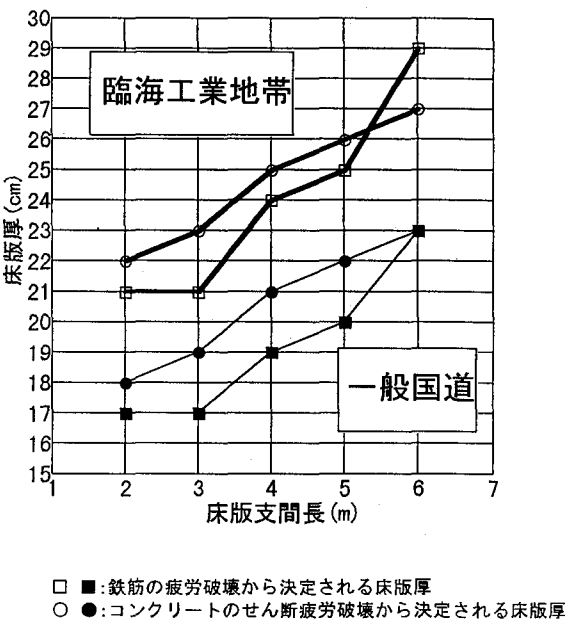


図-4.1 床版厚検討結果

表-4.1 せん断疲労破壊の検討結果

交通特性	支間長 (m)	2	3	4	5	6
一般国道	床版厚 (cm)	18	19	21	22	23
	疲労破壊回数 (×10 ⁷)	5.91	6.47	8.30	8.92	8.20
	Q (tf)	3.50	4.29	4.57	4.97	5.34
臨海工業地帯	床版厚 (cm)	22	23	25	26	27
	疲労破壊回数 (×10 ⁸)	7.51	5.77	6.29	6.30	5.48
	Q (tf)	3.79	3.88	5.01	5.44	5.81

Q: 輪荷重載荷線におけるせん断力

表-4.2 鉄筋の疲労破壊の検討結果

交通特性	支間長 (m)	2	3	4	5	6
一般国道	床版厚 (cm)	17	17	19	20	23
	疲労破壊回数 (×10 ⁶)	5.95	5.99	4.68	5.00	5.32
	σs (kgf/cm ²)	846	855	859	871	862
臨海工業地帯	床版厚 (cm)	21	21	24	25	29
	疲労破壊回数 (×10 ⁷)	4.51	4.19	4.06	3.67	3.94
	σs (kgf/cm ²)	1134	1133	1174	1163	1153

σs: 鉄筋の曲げ引張応力度

ることから、設計曲げモーメントに対する鉄筋の応力度が許容値を満足しなくなることが予想される。

道示では、床版の鉄筋の許容応力度は、コンクリートのせん断に対する照査を省略し、疲労耐久性に対し安全側になるよう、所定の値より低く抑えられている。しかし、疲労照査を前提とするならば、鉄筋の許容応力度は所定の値 (SD295 では 1800kgf/cm²) を用いて、床版厚を決定しても問題ないと考えられる。

上記の条件を考慮して再度、最小床版厚を照査し、最終的な結果を図4.2に示す。また、床版断面を決定する場合、コンクリートの許容圧縮応力度が支配的になる場合があるので、コンクリートの圧縮強度を 240kgf/cm² と 300 kgf/cm² の 2 つのケースを考えた。

次に、これまでの計算フローをまとめ、図4.3に示す。

4.3 仮定条件の検討

なお、今回の検討を行うにあたり、仮定した荷重条件

コンクリートの設計基準強度
 $\sigma_{ck}=240\text{kgf/cm}^2$

コンクリートの設計基準強度
 $\sigma_{ck}=300\text{kgf/cm}^2$

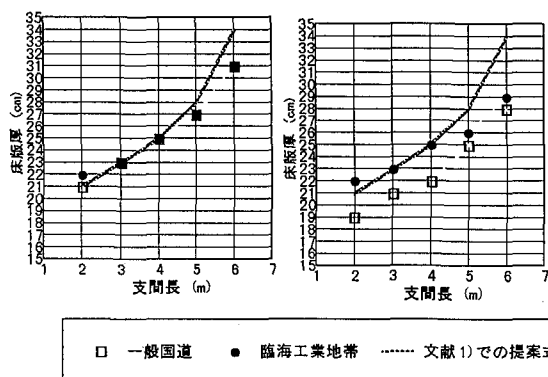


図-4.2 最小床版厚検討結果

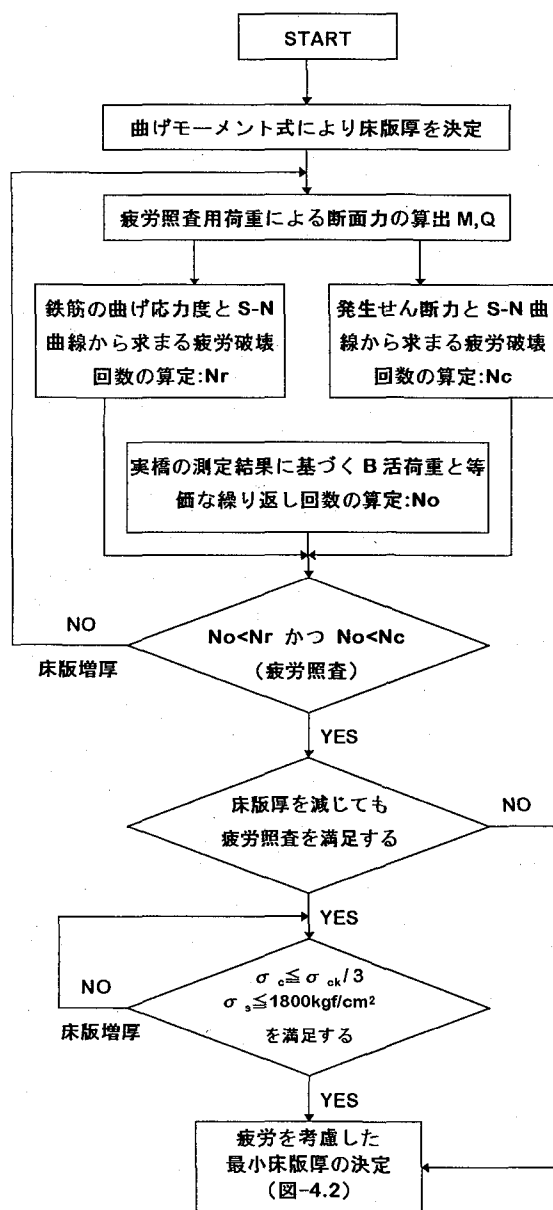


図-4.3 疲労を考慮した最小床版厚の計算フロー

について、もう少し詳しく調査してみる。断面力算出時に隣に並べた活荷重は設計荷重 0.5 倍としているが、この

根拠のために、2, 4, 6m の床版支間について、主鉄筋断面に作用する曲げモーメントとせん断力の影響線解析を行い、その差異を調査した。図4.4にこれを示す。縦軸は着目点（支間中央）から離れた点の影響線縦距に着目点の影響線縦距で除して無次元化したものである。これらの図から、主鉄筋断面曲げモーメントは、床版支間が長くなるにつれ、よりなだらかに影響することが分かる。したがって隣に載荷される荷重の影響は床版支間が長くなるほど大きくなることを示す。逆にせん断力については床版支間に関わらず、急激に影響が低下するので隣の荷重の影響はほとんど無いと考えることができる。

つぎに、橋軸方向に分布する主鉄筋断面曲げモーメントは床版支間が長くなるにつれ、より橋軸方向の遠くへ影響することになる。床版支間 6m ではトラック前輪を考慮すべきと考えるのはこの理由による。また、せん断については前後 1m 程度影響するのみで、橋軸直角方向の時と同様、床版支間長に関わらず、影響はほとんど無視できると考えられる。以下に結果を整理する。

①せん断の疲労照査を照査する場合は隣接する輪荷重の影響を受けないので B 活荷重 1 台で照査しておけば十分と考えられる。

②曲げモーメントによる鉄筋の疲労照査を行う場合は床版支間に応じて 2 台目として隣りに適切な活荷重を載荷する必要がある。この 2 台目の活荷重とは着目点に影響を与える範囲に存在する活荷重をモデル化して配置するものである。そこで、隣りに載荷すべき活荷重の大きさについて検討するには活荷重が同じ着目点上で並列する確率をこれまでの荷重実測データを用い、シミュレーションを行うことで求められる。しかし、B 活荷重に相当する車両が並列する確率は極めて低く、疲労照査には影響しないと考えられるので、合理的な方法としては、着目点から前後左右に、ある距離の範囲で活荷重が存在することによって得られる影響値をモデル化すれば良いことになる。また、その距離によっては、荷重値が左右されるので、先述のシミュレーションを行うことで確率的に処理ができる。しかしながら今回は確率的な手法は行わず、着目点の前後 5, 10m に B 活荷重を載荷し、その影響を調べることで簡易的にモデル荷重を算出することにした。

表4.3に支間 6m と 4m に関して、先の疲労照査用の断面力算出時に想定した 1 台+0.5 台並列の B 活荷重載荷時の曲げモーメント、およびせん断力に対して、橋軸方向に着目点付近とその点より 5m, 10m, 離れた点に合計 2 台の B 活荷重が載荷されたときに算出される曲げモーメント、せん断力の比を示す。この結果より、曲げモーメントに関して、隣に 0.5 台載荷されることは、橋軸方向 5m 以内に B 活荷重が存在していることになり、かなり安全側の載荷条件になっていると考えられる。

表4.4に橋軸直角方向について B 活荷重が 1 台の場合とさらに 0.5 倍のものが同時載荷された場合、および B

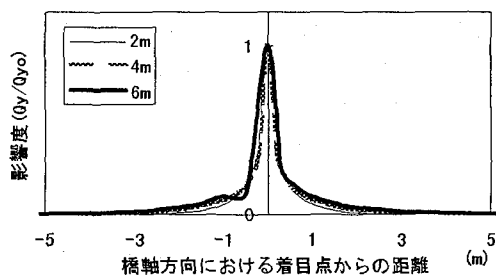
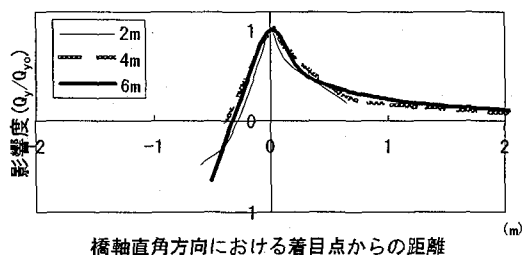
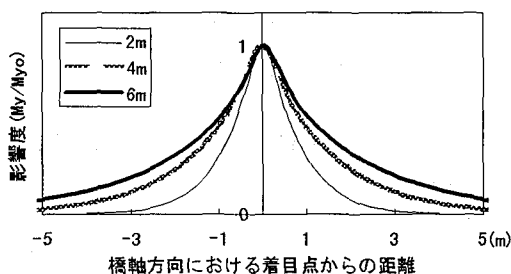
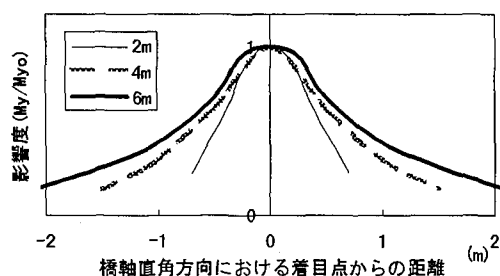


図-4.4 曲げモーメントとせん断力の影響度

活荷重が2台載荷された場合について活荷重1台の場合を1として比較した結果を示す。この表からも、曲げモーメントに対しては隣接する活荷重の影響が大きいことが読みとられる。

以上より、表4.3,4.4のどちらの場合も曲げモーメントに関しては、床版支間の増大に伴い、影響が大きくなるので、支間に応じた荷重モデルを設定する方が望ましいと考えられる。今回、照査を簡易的に行う意味から、隣に0.5倍の荷重の自動車を同時載荷し、結果的に安全側の計算になると考えられるが、ここで注意しなければならないのは、コンクリート中の鉄筋の疲労に関するS-N曲線の傾きが $k1=0.145$ であるのに対し、コンクリートの

表-4.3 疲労照査荷重作用時の断面力に対する比率

支間	橋軸方向での車両間距離 (m)	解析値との比較	
		My	Sy
6m	10m離れた位置	86%	92%
	5m離れた位置	92%	93%
	0m(解析に使用)	100%	100%
4m	5m離れた位置	89%	91%
	0m(解析に使用)	100%	100%

表-4.4 橋軸直角方向に複数台の活荷重を並列させたときの影響

支間	橋軸直角方向での載荷状態	車輪数による影響	
		My	Sy
6m	1両	100%	100%
	2両	140%	109%
	2両目は1/2	120%	104%
4m	1両	100%	100%
	2両	125%	103%
	2両目は1/2	112%	101%

せん断疲労のS-N曲線の傾きは $k2=0.07835$ と大きく異なり、疲労の回数を算定する際には鉄筋は応力の増加に対しては緩やかな増加であり、せん断力は、かなり急激な増加を示すことにある。したがって、曲げモーメントに対しては多少の安全側の計算を行っていても疲労に関しては大きく影響してこないことになる。逆にせん断に関しては安全側の値をとりすぎるとせん断疲労がどのような床版支間にあっても先行してしまうような結果につながりかねない。このように、同じS-N曲線を用いていないことおよび、荷重が複数になった場合の影響度が異なることを十分に考慮してモデル化する必要があると考えられる。

表-5 各コンクリート強度における床版厚

σ_{ok}	支間長 (m)	疲労を考慮した床版厚 (cm)		曲げモーメントのみで設計した床版厚 (cm)
		一般国道	臨海工業地域	
240 kgf/cm^2	2	21	22	21
	3	23	23	23
	4	25	25	25
	5	27	27	27
	6	31	31	31
300 kgf/cm^2	2	19	22	19
	3	21	23	21
	4	22	25	22
	5	25	26	25
	6	28	29	28

$$\sigma_{ck} = \sigma_{ok}/3, \quad \sigma_{sa} = 1800 \text{ kgf/cm}^2$$

5. 結論

表-5に疲労照査を行った最小床版厚と、疲労を考慮せずに、曲げモーメント式による応力のみで床版の断面決定を行った場合（鉄筋の許容応力度を 1800 kgf/cm^2 まで許容する）の最小床版厚を比較した。曲げモーメント式は直交異方性を考慮した活荷重曲げモーメントから誘導されたものであり、道示の式より大きく、鉄筋の許容応力

度を大きくとつてもそれほど薄くはなっていない。

この表から判断できることは、臨海工業地帯の床版厚は、曲げモーメントのみで決定された床版厚より、厚くなっており、疲労照査により床版厚が決定されているケースが存在するという点である。また、今回の荷重条件において、表4.1,4.2とあわせて比較してみると、短支間では床版コンクリートせん断疲労破壊で床版厚が決定されるケースがあり、長支間では鉄筋の曲げ疲労破壊で断面が決定されるケースがあることから、予想していた疲労破壊の形態の推定が適当なものと言える。

さらに、床版厚が薄くなると鉄筋量よりもコンクリートの圧縮応力度が断面決定に支配的となるので、コンクリートの設計基準強度を上げると床版厚が薄くなること、図4.2および、表5から明らかである。

しかしながら、疲労を考慮した最小床版厚と曲げモーメントで決定された最小床版厚には大きな差はなく、曲げモーメントを用い、許容応力度法で曲げ設計したものは、ほぼ疲労耐久性を満足していると考えられる。したがって、曲げ設計された床版厚に2~3cmの余裕を与えることで、臨海工業地帯のような重交通路線でも疲労耐久性が確保されると考えられる。

6. あとがき

今回 RC 床版の疲労耐久性に関して検討を行ったが、長支間床版は一般に橋軸直角方向にプレストレスが導入されるのでせん断疲労に対しても、曲げ疲労に対しても十分な疲労耐久性を持っているので、照査は省かれることが多いと考えられる。しかし、現場打ち RC 床版をボストンションで橋軸直角方向にプレストレスを導入する際には鋼桁の抵抗が存在したり、導入量そのものを経済性・施工性を含めて減少させることも考えられ、場合によっては、RC 構造となるケースも考えられる。そこで、本論文で行った照査方法がこのような床版の疲労耐久性の検討に活用できると考えられる。

また、疲労照査用の活荷重で隣接する車を設計荷重の0.5倍としたが、仮に0.3倍とした計算を行ったところ、

1.2cm程度、床版厚が減少した。したがって、隣接する車の影響は数cm程度の床版厚の増減につながるため、今後は、疲労照査用の活荷重配置に関して、より精密な荷重モデルの作成や、連続版のモデルによる検討を行っていきたいと考えている。

また、床版厚は疲労、応力等から決定される以外に剛性（たわみ、振動）の照査も必要となる。文献2)においてたわみの照査もあわせて行っているが、振動問題等については明確でない点も多く、今後の課題と考えている。

参考文献

- 1) S.Matsui, K.Egashira: Study on Design Bending Moments for Various Concrete Floor Slabs on Highway Bridges, Osaka University Technical Report Vol.47, No.2277, pp.89~101, April, 1997.
- 2) 松井, 江頭, 石崎: 長支間床版の設計曲げモーメント式に関する2,3の考察, 鋼構造年次論文報告集第3巻, pp.215-220, 1995
- 3) 江頭, 松井, 坂: 長支間床版の設計曲げモーメント式について, 土木学会第51回年次学術講演会概要集I-A, pp.1016-1017, 1996
- 4) 藤岡・平城・大谷・鬼頭: 異形鉄筋の疲労試験データの統計的处理, 土木学会第48回年次学術講演会概要集I部, pp.730-731, 1993.
- 5) 松井繁之: 橋梁の寿命予測, 安全工学 Vol.30, No.6, 1991.
- 6) 松井, 園田ら: 道路橋RC床版のひび割れ損傷と耐久性 (阪神高速道路公団・阪神高速道路管理技術センター), 1991
- 7) 谷垣博司: 近畿管内の道路橋における交通荷重の実態から見た路線別交通特性と橋梁部材の確率論的安全性評価に関する基礎的研究, 大阪大学修士論文, 1996
- 8) 江頭・松井・桐川: 鉄筋コンクリート床版のせん断疲労に関する一試案, 土木学会第52回年次学術講演会概要集第I-A部, pp.354-355, 1997.
- 9) JIS 規格: 自動車の種類に関する用語 D0101, 1982
(1998年1月22日受付)