

長支間 P C 床版の疲労耐久性に関する一考察

An Evaluation for Fatigue Durability of Long Span Prestressed Concrete Slab

松井繁之*、嶽下裕一**

Shigeyuki MATSUI and Yuichi DAKESHITA

*工博 大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2 - 1)

**工修 日立造船(株) 橋梁設計部 (〒559-8559 大阪市住之江区南港北 1 丁目 7 番 89 号)

Recently , highway bridges having long span PC slabs have been increasing to be constructed . This tendency due to confirmation of high fatigue durability through fatigue tests using wheel running machine . But it is not clarified the relation between fatigue durability of PC slabs and actual running vehicle loads .

Here , the authors carried out some calculations to make clear the fatigue durability of actual bridge slabs . The target slab is 6 meters' long span PC slab supported by 2 main girders.

key words : long span PC slab, failure for fatigue, S-N curve, actual vehicle load, equivalent loading cycles

1. はじめに

近年、鋼橋の合理化の1手法として、長支間 PC 床版を採用した橋梁が増えている。PC 床版は輪荷重走行試験により疲労耐久性に優れていることが確認されている。しかし、実交通荷重を用いた疲労耐久性については研究が少ない。

そこで、本研究では図-1に示す床版支間6mのPC床版2主桁橋を対象として、実測の活荷重を用いたPC床版の疲労耐久性を検討する。短支間床版の場合、疲労破壊はコンクリートのせん断疲労破壊が先行するが、長支間床版の場合、疲労破壊は曲げモーメントによる鉄筋やPC鋼材の引張り疲労破壊に移行する可能性がある。したがって、本研究ではせん断疲労、引張り疲労の関連について検討し、広幅員床版の疲労設計法について検討を加えたものである。

2. 床版断面

上記床版支間に対して種々のものが設計できるが、本研究で選定した PC 床版の諸元は表-1に示すようなものになった。Type-1は道路橋示方書(以下、道示)Ⅲ コンクリート橋編における単純版の床版厚で設計した床版断面、Type-2は道示における連続版の床版厚で設計した床版断面である。

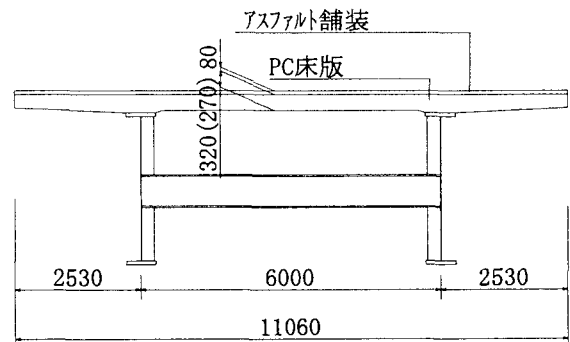


図-1 橋梁断面

表-1 床版諸元

床版タイプ		Type-1	Type-2	
床版厚	c m	32cm	27cm	
設計基準強度	N/mm ²	40	40	
PC鋼材 (主鉄筋断面)	記号	SWPR19	SWPR19	
	径	1t 21.8	1t 21.8	
主鉄筋	圧縮	径	D13	D13
		ピッチ(mm)	100	100
	引張	径	D13	D13
		ピッチ(mm)	100	100
配力鉄筋	圧縮	径	D19	D19
		ピッチ(mm)	125	100
配力鉄筋	引張	径	D19	D19
		ピッチ(mm)	125	100
プレストレス量	N/mm ²	2.5	4.0	

3. 疲労検討方法

PC床版のせん断疲労、配力鉄筋およびPC鋼材の引張り疲労について、S-N曲線から求まる疲労寿命と実交通荷重から求まる等価繰返し回数を比較し、照査する。以下に詳述する。

3. 1 S-N曲線

(1) せん断疲労に対するS-N曲線

RC床版のせん断疲労に対するS-N曲線として式(1)が提案されている²⁾。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log(N) + \log(1.520) \quad \dots \text{式(1)}$$

ここに、 P (kN) : 作用荷重

P_{sx} (kN) : 梁状化したRC床版の押抜きせん断耐力で、図-2のような破壊モデルを考えると、式(2)で算出できる。

N (回) : 走行回数

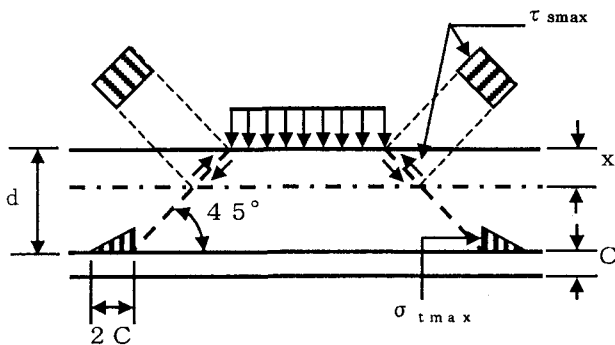


図-2 押抜きせん断の破壊モデル

$$P_{sx} = 2 \cdot \tau_{smax} \cdot x_m \cdot B + 2 \cdot \sigma_{tmax} \cdot C_m \cdot B \quad \dots \text{式(2)}$$

ここに、 τ_{smax} (N/mm²) : コンクリートの最大せん断応力度

σ_{tmax} (N/mm²) : コンクリートの最大引張応力度

x_m (cm) : 引張り側コンクリート無視の状態での主鉄筋断面の中立軸

C_m (cm) : 主鉄筋のかぶり厚

B (cm) : 梁状化の幅

式(1)は輪荷重走行試験機におけるRC床版の終局限界状態に関するS-N曲線である。実橋のPC床版に適用できるように、次の3点の修正を行った。

a. 梁状化したRC床版の押抜きせん断耐力にプレストレスの効果を導入する³⁾。変更した押抜きせん

断耐力式を式(3)に示す。

$$P_{sx} = 2 \cdot \tau_{smax} \cdot x_m \cdot B \cdot \alpha + 2 \cdot \sigma_{tmax} \cdot C_m \cdot B \quad \dots \text{式(3)}$$

ここに、 α : 橋軸直角方向プレストレスによるせん断破壊面の傾きの逆数

- b. 使用限界状態に関するS-N曲線とする。このとき、使用限界寿命は破壊寿命の半分⁴⁾と仮定する。
- c. 輪荷重走行試験機と実橋では走行位置、載荷面、床版支間が異なり、式(1)を直接適用できない。そこで、式中の作用荷重を作用せん断力に変換することで実橋に適用できる式とする。変換式には解析で得られた実験のRC床版における輪荷重とせん断力の関係式(式(4))を用いる。

$$P = 10/14.11 \cdot Q \quad \dots \text{式(4)}$$

式(1)について上記3点の変更を行うと、式(5)が得られる。

$$\log(Q/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \log(N) + \log(2.032) \quad \dots \text{式(5)}$$

(2) 鉄筋の曲げ疲労に対するS-N曲線

鉄筋の曲げ疲労に対する照査には文献5)のS-N曲線を使用することが妥当と考えられる。これは式(6)で表現される。

$$\log(f_a) = 1.60 - 0.06 \cdot (1.80 - R1 \cdot R2) \cdot \log(N) \quad \dots \text{式(6)}$$

ここに、 f_a (kgf/mm²) : 応力範囲

$R1$: 上限応力比

(= 上限応力度/鉄筋の引張強度)

$R2$: 平均応力に対する振幅比

(= 上限応力度/平均応力度)

式(6)は、実験データより求まる50%破壊確率の疲労強度式からデータのバラツキを考慮して、標準偏差の2倍だけシフトし、設計のための疲労強度式となっている。

(3) PC鋼材のS-N曲線

本研究ではPC鋼材にPC鋼より線を採用している。PC鋼より線の曲げ疲労に対する照査には文献6)のS-N曲線を使用することが妥当と考えられる。これは式(7)で表現される。

$$\log(fa) = 3.35 - 0.075 \cdot (3.30 - R1 \cdot R2) \cdot \log(N) \quad \dots \text{式(7)}$$

ここに、 fa (kgf/mm²): 応力範囲

$R1$: 上限応力比

(= 上限応力度/PC 鋼より線の引張強度)

$R2$: 振幅比の逆数

(= 上限応力度/下限応力度)

式(7)は式(6)と同様に、実験データより求まる 50% 破壊確率の疲労強度式からデータのバラツキを考慮して、標準偏差の 2 倍だけソフトし、設計のための疲労強度式となっている。

3. 2 等価繰返し回数の算出

(1) 等価繰返し回数について

実交通荷重は様々なトラックタイプ、荷重の大きさがあり、PC 床版のせん断力や鉄筋・PC 鋼材の応力は変動している。これについて、マイナー則が適用できるとして一定の作用力による等価繰返し回数に変換して照査する。すなわち、耐用期間中に、任意の活荷重による PC 床版のせん断力や鉄筋・PC 鋼材の応力を P_1, P_2, \dots, P_n とし、それぞれ n_1, n_2, \dots, n_n 回作用する場合、一定の作用力 P_0 に変換した等価繰返し回数は式(8)で求められる。

$$N_{eq} = \sum (P_i / P_0)^m n_i \quad \dots \text{式(8)}$$

ここに、 $m = 1/k$

k : S-N 曲線の傾きの絶対値

m はせん断疲労に対して 12.76、鉄筋の疲労に対して 10~12 程度、PC 鋼材の疲労に対して 5 程度となる。鉄筋および PC 鋼材は作用応力の条件によって m の値が変化する。

また、PC 床版の耐用期間は 100 年と考え、PC 床版のせん断疲労に対する所要寿命は疲労データの不足とバラツキや水の影響を考慮に入れて 10 倍の 1000 年、鉄筋および PC 鋼材の曲げ疲労に対する所要寿命は 2 倍の安全を見て 200 年と考えた。

(2) 実交通荷重

実交通荷重は過去に大阪大学で調査された実測データを用いた⁷⁾。実交通のトラックタイプは多種多様であるが、大分類すると図-3 のようである。実測データはトラックタイプごとに軸重および走行回数で整理されている。軸重分布の一部を図-4 に示す。

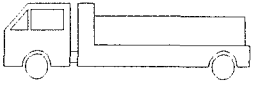
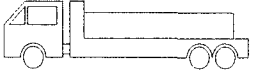

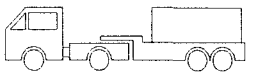
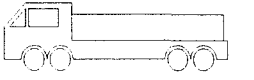
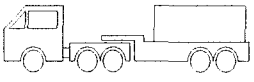
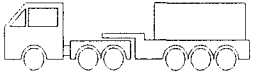
車種	車両形式	
TYPE1	2 軸車	
TYPE2	後タンデム 3 軸車	
TYPE3	前タンデム 3 軸車	
TYPE4	セミトレーラー型 4 軸車	
TYPE5	タンクローリー型 4 軸車	
TYPE6	セミトレーラー型 5 軸車	
TYPE7	セミトレーラー型 6 軸車	

図-3 トラックタイプ

(3) 断面力解析

1) せん断疲労検討時

全ての実交通荷重による着目点のせん断力を解析し、式(8)を用いて基本せん断力に変換した等価繰返し回数を求める。着目点は図-5 に示すように最もせん断疲労の起こりやすい位置を考えた。主桁に近づく程せん断力は大きくなるがハンチ部分は十分疲労耐久性を有していると考えた。荷重走行位置はある確率に従って分布するが、ここでは安全側を考えて、全ての荷重が着目点のせん断力が最大となる位置を走行するものとした。また、活荷重の同時載荷は考慮せず、1 台のみの載荷とした。1 台のみとする理由は次の 2 点である。

- a. 予備検討として、1 台のみ載荷するケースと 2 台目を道示に記されている間隔で載荷するケースの 2 ケースを解析し、せん断力を比較した。1 台目および 2 台目載荷による橋軸直角方向のせん断力分布を図-6 に示す。解析の結果、2 台目載荷によるせん断

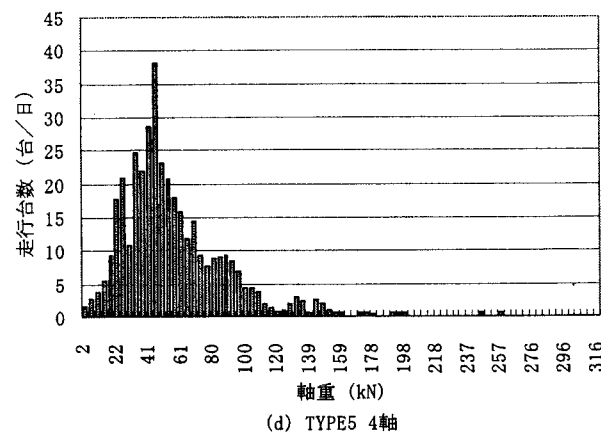
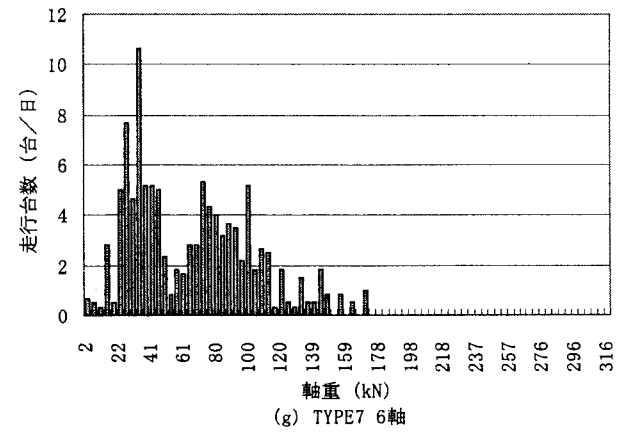
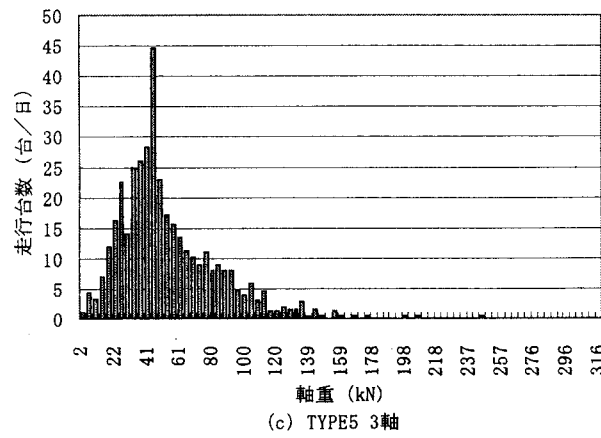
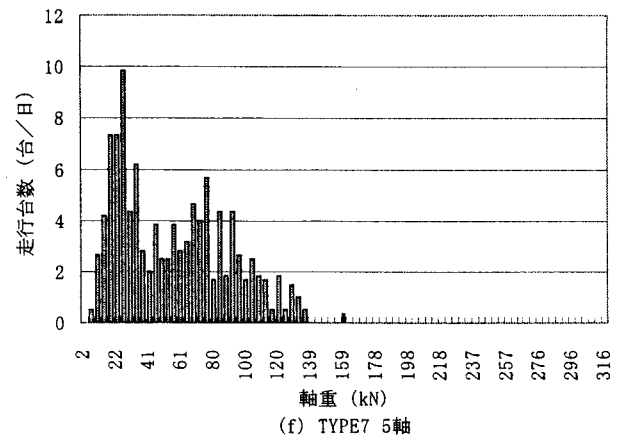
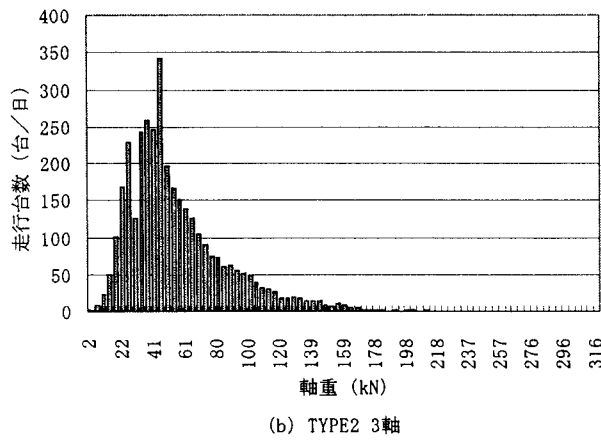
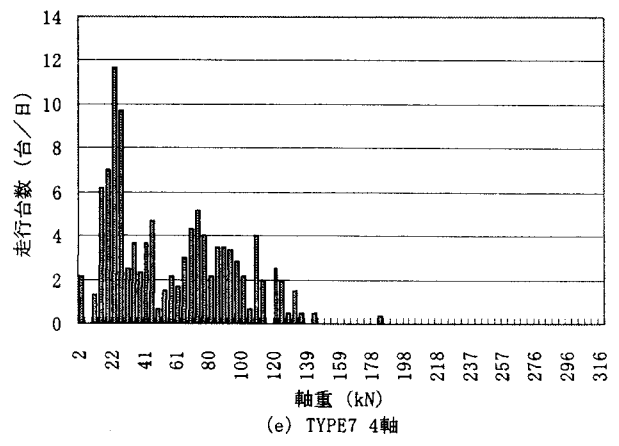
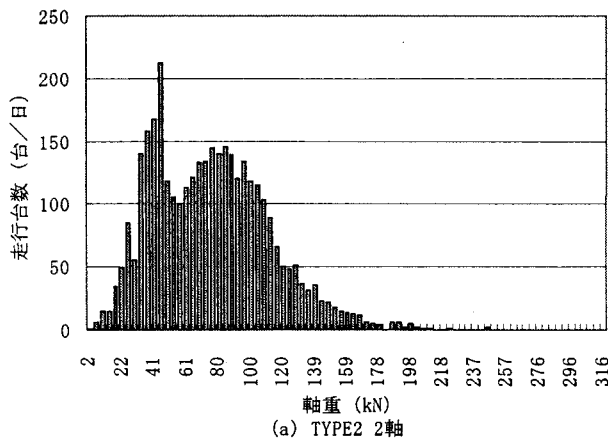


図-4 軸重分布

力の増加は8%であり、 $m=12.76$ としてマイナー則を適用し等価繰返し回数に換算しても2.79倍にしかならないことが分かった。レーンを守る走行状態では、この比は無視できるようになる。

b. 文献 1)によると、東名高速で同時載荷の頻度を測定した結果、同時載荷の確率は1mのはなれでほぼ1%未満であった。

一方、タンデム軸およびトリデム軸は隣接する車軸の相互間で影響し合い、せん断力が大きくなるため、この影響度は考慮した。また、衝撃係数は道示の式とし、載荷面は20cm×50cmとした。

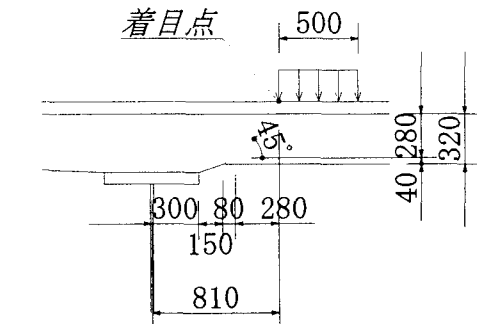
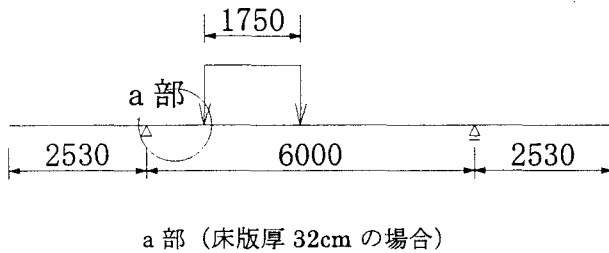


図-5 せん断疲労検討時の荷重走行位置

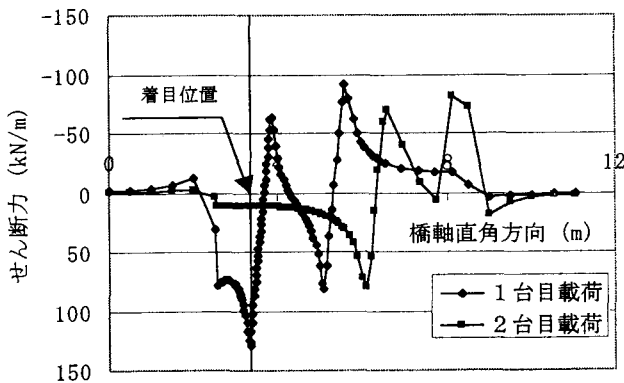


図-6 1台目および2台目によるせん断力の比較

2) 引張り疲労検討時

全ての実交通荷重による着目点の曲げモーメントを解析し、配力鉄筋およびPC鋼材の応力を算出した。

さらに式(8)を用いて基本応力に変換した等価繰返し回数を求めた。荷重走行位置はせん断疲労検討時と同様に、全ての荷重が着目点の曲げモーメントを最大とする位置を走行するものとした。鉄筋疲労の場合には、活荷重の同時載荷を考慮し、図-7に示すように橋軸直角方向に2台載荷した。ここで、1台目は実測の活荷重、2台目はB活荷重の1/2とした。同時載荷の影響により曲げモーメントは大きくなるが、前述のように同じトラック2台の同時載荷の可能性が少ないので、上記の活荷重配置で十分と考えた。また、せん断疲労検討時と同様、タンデム軸およびトリデム軸は隣接する車軸の影響が大きいので、解析の際に考慮した。衝撃係数は道示の式とし、載荷面は20cm×50cmに床版上面から1/2の厚さまで45度で拡大分布させた。

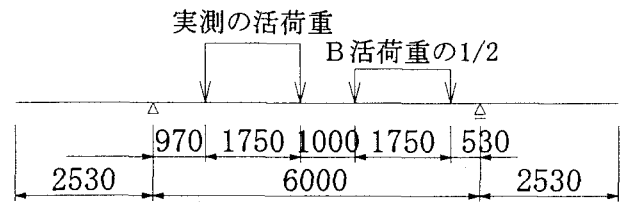


図-7 曲げ疲労検討時の荷重走行位置

4. 照査結果

4.1 せん断疲労

梁の押抜きせん断耐力、使用限界状態に対する疲労寿命、および等価繰返し回数を算出した結果を表-2に、また、疲労寿命および等価繰返し回数の関係をS-N曲線とともに図-8に示す。ここで、基本となるせん断力はB活荷重載荷によるせん断力とした。照査結果よりType-1、Type-2とも使用限界状態に対する疲労寿命に達していません安全といえる。床版厚の薄いType-2の使用限界状態に対する疲労寿命はType-1の1/6~1/7程度となった。床版厚の5cmの差に対して疲労寿命の差は少ないようであるが、これは活荷重満載に対してPC断面がひび割れないように設計した結果、Type-2のプレストレス量が増えたためである。

表-2 せん断疲労の照査結果

床版タイプ	押抜きせん断耐力	疲労寿命 (Nf)	等価繰返し回数 (Neq)	Nf/Neq
Type-1(床版厚32cm)	956 kN	9.99×10^{14}	2.31×10^{10}	43300
Type-2(床版厚27cm)	828 kN	1.60×10^{14}	2.31×10^{10}	6900

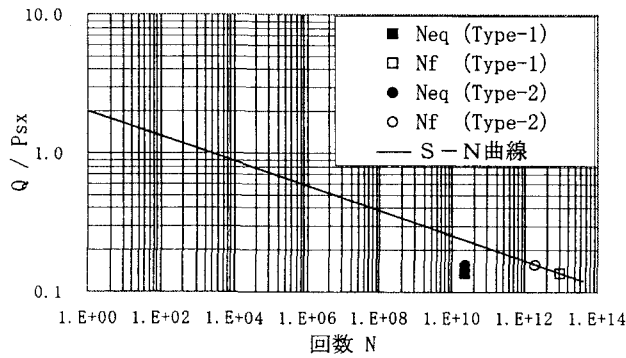


図-8 せん断疲労の疲労寿命と等価繰返し回数

4. 2 鋼材の引張り疲労

曲げモーメントによる鉄筋およびPC鋼材の疲労寿命と等価繰返し回数の算出結果を表-3に、また、S-N曲線とともに図-9に示す。ここで、基本となる鉄筋およびPC鋼材の応力は、1台目をB活荷重、2台目をB活荷重の半分載荷した時の応力とした。照査結果よりType-1、Type-2とも設計のための疲労寿命に達していません安全といえる。また、床版厚の薄いType-2の方が疲労耐久性が高くなった。これは前述のようにtype-2のプレストレス量が増えたためである。

5. まとめ

床版支間6mのPC床版2主桁橋を対象として、実測の活荷重を用いた検討を行い、以下のことが判った。

- 道示Ⅲにおける単純版の床版厚で設計した床版(Type-1)の疲労寿命は想定した耐用期間に対して、せん断疲労で43000倍、PC鋼材の引張り疲労で4600倍の安全性を有している。
- 道示Ⅲにおける連続版の床版厚に低減して設計した床版(Type-2)の疲労寿命は想定した耐用期間に対して、せん断疲労で6900倍、PC鋼材の引張り疲労で5600倍の安全性を有している。

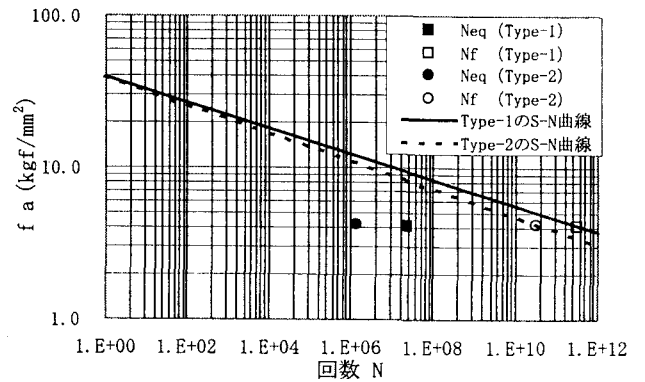
表-3 曲げ疲労の照査結果

(a) 鉄筋の曲げ疲労

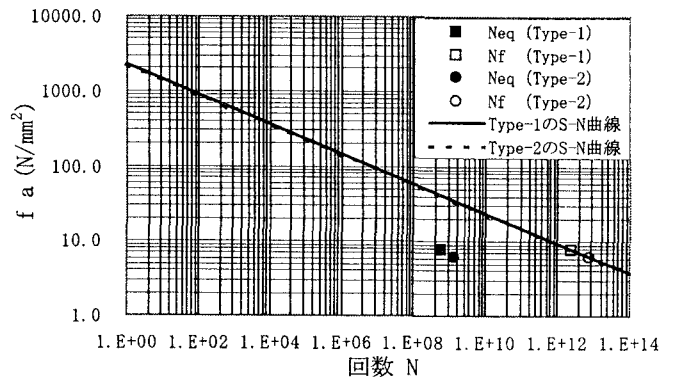
床版タイプ	疲労寿命 (Nf)	等価繰返し回数 (Neq)	Nf/Neq
Type-1 (床版厚32cm)	3.26×10^{11}	2.18×10^7	15000
Type-2 (床版厚27cm)	3.15×10^{10}	1.39×10^6	22600

(b) PC鋼材の曲げ疲労

床版タイプ	疲労寿命 (Nf)	等価繰返し回数 (Neq)	Nf/Neq
Type-1 (床版厚32cm)	2.59×10^{12}	5.66×10^8	4600
Type-2 (床版厚27cm)	7.94×10^{12}	1.41×10^9	5600



(a) 鉄筋の曲げ疲労



(b) PC鋼材の曲げ疲労

図-9 曲げ疲労の疲労寿命と等価繰返し回数

[参考文献]

- 安松, 長谷, 篠原, 長瀬: 交通実態を考慮した鋼橋床版の疲労設計に関する検討, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, 1998.11.
- 松井: 橋梁の寿命予測, 安全工学, Vol30, No.6, 1991.
- 東山, 松井: 橋軸方向プレストレスしたコンクリート床版の走行荷重に対する疲労耐久性に関する研究, 土木学会論文集, No.605, I-45, 1998.10.
- 阪神高速道路公団・阪神高速道路管理技術センター: 道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性, 1991.12.
- 平城, 大谷, 松井: 異形鉄筋の疲労強度評価式の誘導, セメント・コンクリート論文集, No48, 1994.
- 平城, 松井: PC鋼材の疲労強度評価式の誘導, セメント・コンクリート論文集, No49, 1995.
- 谷垣: 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的安全性評価に関する基礎的研究, 大阪大学修士論文, 1996.