

交通荷重実態を考慮した鋼橋床版の疲労設計に関する検討

Study on the Fatigue Design of the slab of steel bridges considered the Traffic Axle Load

井ヶ瀬 良則*, 篠原 修二**, 長瀬 嘉理***
Yoshinori Igaee, Syuuji Shinohara, Yoshinasa Nagase

* 工修 日本道路公団 中部支社 亀山工事事務所 (前試験研究所) (〒519-0153 三重県亀山市西町558)

** 工修 総合技術コンサルタント (〒101-0048 東京都千代田区神田司町 2-7)

***工修 総合技術コンサルタント (同 上)

It analyzed statistics based on the one year axle load data which was measured at the expressway, and it analyzed the characteristic of the traffic load which depends on the floor edition and it proposed the fatigue design method of the slab of steel bridge to have considered the traffic load actual state.

Moreover, it estimated the fatigue lifetime of the slab of some RC, PC using the measured axle load data and the S-N curve which is won in the study in the past and it described the problem to establish a fatigue design.

key words: slab, fatigue, axle load

1. はじめに

近年、交通条件の厳しい鋼道路橋を中心に活荷重に起因する疲労損傷が報告されている。交通量の増加や車両の大型化に伴い鉄筋コンクリート床版の部分的な抜け落ちやひび割れ損傷が問題となっている。

また、鋼道路橋の合理化を図るため、PC床版を有する鋼少本数主桁橋が使用されるようになってきている。長支間のPC床版の設計を行うに当り、現状では道路橋示方書（以下道示と称す）を準用しているが、道示には疲労設計の考え方はほとんど示されていない。したがって、床版の疲労強度の評価法および疲労設計に用いる荷重の考え方を明確にし、疲労限界状態設計法を導入した合理的な設計法の確立が必要である。

日本道路公団では、全国4路線（東名、名神、山陽、京葉）に設置された本線軸重計により実走行車両の軸

重の計測を行っている。これから得られるデータの統計処理を行い、走行車両の荷重特性を明らかにし、交通荷重実態を考慮した床版の疲労照査法を提案した。疲労照査を行う際に、床版の疲労に対する軸重の違いによる影響と同時載荷の影響度についても検討を行った。これらの結果と、実測された軸重の頻度分布を用いていくつかの床版支間、床版厚の異なる床版の疲労寿命推定を行った。

2. 交通実態解析

(1) 本線軸重計の概要

本線軸重計は、昭和59年、東名高速道路の日本平PA付近に設置された。その後、平成2年に現在のシステムに変更され、測定も全国4路線で行われている。軸重計は、高速道路の本線上に設置され、通過車両の台数及び重量、各軸の軸重、軸配置、通過速度、通過位置を常時検出し光磁気ディスクが自動収録する。荷重検出部は、図-1に示すように、幅1800mm×長さ

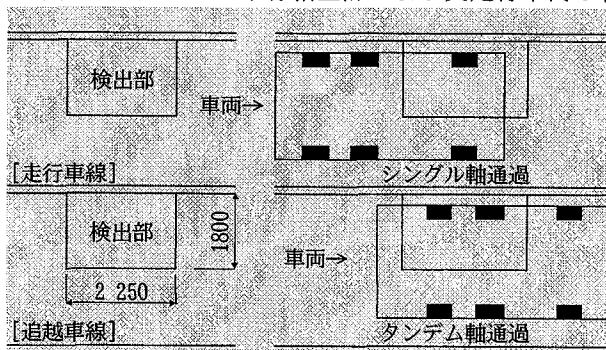


図-1 検出部と通過車両の位置関係

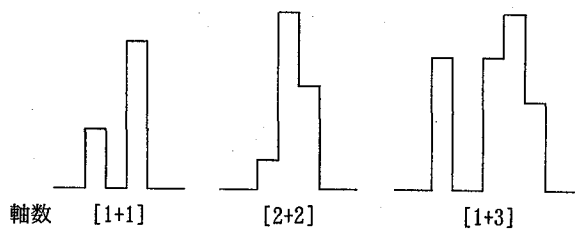


図-2 軸重波形

2250mmで車線幅員の左側半分のみに埋設され、車両の左側車輪が検出部を通過してその輪重を検出し、この値を2倍することにより計測軸重値としている。シングル軸とタンデム軸等の軸種の判別は、荷重の変動状況を示す波形より判別している。(図-2参照)

(2) 交通実態解析概要および解析結果

今回は、平成11年1月～12月(計測日数 上り線:365日 下り線:167日)の名神高速道路(京都南)について述べる。車種分類は、自動車諸元表や交通調査から軸間距離に着目し表-1のように分類した。

軸重計の測定から、1軸通過ごとの時刻、軸種別分類(シングル、タンデム、トリプル)、速度および軸重値、走行位置が計測され、車種分類1台の総重量、軸間距離が得られる。

解析に用いた車両台数を表-2に示す。

図-3、上下線合計の軸種別の頻度分布図を示す。シングル軸、タンデム軸とも良く対数正規分布の形状と一致している。タンデム軸はシングル軸と比べ広範囲に分布している。トリプル軸はばらつきが大きいが台数的には全体に占める割合は小さい。

表-1 車種分類

車種番号	車種	軸数	軸距	輪距	輪形状
1	小型車種 小型車	2	2軸車で軸距3.0m	先頭軸の輪距2.1m	〇—〇
2	中型車種 中型車	2	2軸車で軸距5.0m		〇—〇
3	大型2軸車	2			〇—〇
4	大型3軸車(後タンデム)	3			〇—〇〇
5	大型3軸車(前タンデム)	3			〇〇—〇
6	大型4軸車	4			〇〇—〇〇
7	セミトレーラー(3軸)	3	先頭2軸が2.0m		〇—〇—〇
8	キャビン後輪	4			〇—〇—〇〇
9	セミトレーラー シングル	5			〇—〇—〇〇〇
10	キャビン後輪	4			〇—〇〇—〇
11	トレーラー セミトレーラー	5			〇—〇〇—〇〇
12	タンデム	6			〇—〇〇—〇〇〇
13	トラック部 ボールトレーラー 後タンデム	4			〇—〇〇—〇
14		5			〇—〇〇—〇〇
15	トラック部 ボールトレーラー 前タンデム	4	トラック部後輪から3.0m		〇〇—〇—〇
16		5			〇〇—〇—〇〇
17	フルトレーラー トラック部 後タンデム	5			〇—〇〇—〇—〇
18	フルトレーラー トラック部 前タンデム	5			〇〇—〇—〇—〇
19	上記いずれにも該当しない			先頭軸 後軸	
20	大型1軸のみ計測				

表-2 車両台数 (名神高速道路)

車種および車種番号	上り車線				下り車線				合計
	第一走行	第二走行	第三走行	小計	第一走行	第二走行	第三走行	小計	
小型・中型(1~2)	533928	749851	623070	1906849	499050	355815	110381	965246	2872095
大型2軸(3~6)	1656549	1574685	452885	3684119	462958	769832	125937	1358727	5042846
セミトレー(7~12)	237250	56949	5734	299933	48495	23424	1762	73681	373614
ボールトレー(13~16)	4847	1540	520	6907	3219	706	64	3989	10896
フルトレー(17~18)	8954	2556	501	12011	1878	1390	91	3359	15370
その他(車種不明等)	204022	263086	109374	576482	327213	207019	45026	579258	1155740
大型車合計(3~18)	1907600	1635730	459640	4002970	516550	795352	127854	1439756	5442726
総合計(1~20)	2645550	2648667	1192084	6486301	1342813	1358186	283261	2984260	9470561

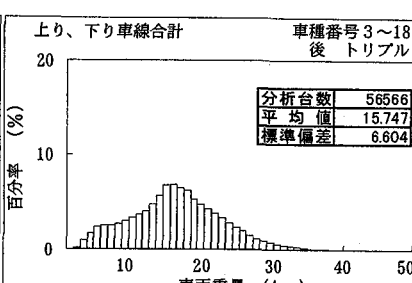
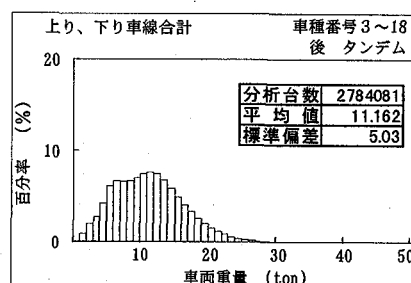
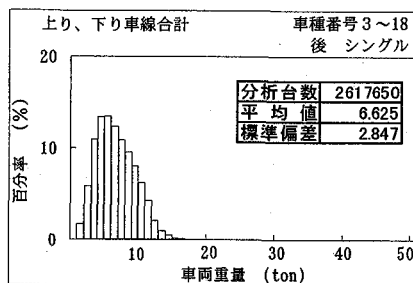


図-3 軸種別軸重分布図

表-3 同時載荷の頻度一覧 (平成13年3月のデータ)

車線		対象軸数			回 数				回数/軸数 (%)			
		第1走行	第2走行	第3走行	0m範囲	1m範囲	2m範囲	3m範囲	0m範囲	1m範囲	2m範囲	3m範囲
上り線	1-2	319,180	222,217	58,562	380	2,487	4,783	7,143	0.12	0.78	1.50	2.24
	1-3				93	739	1,503	2,209	0.03	0.23	0.47	0.69
	2-3				131	786	1,585	2,323	0.06	0.35	0.71	1.05
	1-2-3				-	20	58	177	-	0.01	0.02	0.06
下り線	1-2	158,362	301,354	50,704	228	1,780	3,588	5,456	0.14	1.12	2.27	3.45
	1-3				44	315	640	967	0.03	0.20	0.40	0.61
	2-3				124	921	1,933	2,883	0.04	0.31	0.64	0.96
	1-2-3				-	14	45	109	-	0.01	0.03	0.07

対象軸数は全車軸数の(車種番号1~18)について集計したもの

また、橋梁床版に対する同時載荷の確率（平成13年3月のデータ）を求めた。

解析方法は、ある1車線で車軸が通過した時、同時にその他の車線を走行している車軸をカウントした。

解析結果を表-3に示す。表より、同時載荷の頻度は、1m以内で上り0.78%、下り1.1%程度であった。

3. 交通荷重実態を考慮した床版の疲労照査

現在、床版の疲労設計は、抵抗強度（S-N曲線）と荷重作用（輪荷重頻度特性）を総合してマイナー則を適用した設計法^{1) 2)}が提案されている。

これらの疲労設計、疲労寿命の予測手法や解析を検討する場合の影響要因としては下記の項目がある。

①床版の破壊回数（Nf）に及ぼす要因

- 1) S-N曲線
- 2) 疲労耐力

②輪荷重の等価繰り返し回数（Neq）に及ぼす要因

- 1) 輪荷重換算係数（C1）
- 2) 通行位置補正係数（C2）
- 3) 隣接荷重の影響補正係数（C3）
- 4) 衝撃係数 i

上記の項目のうち、①は疲労実験等から求められ、②は外的荷重である実走行自動車の輪荷重特性把握から求められる。断面から決定される疲労耐力Troと、図-4のフローに従いS-N曲線とNeqから求められる必要な疲労耐荷力Trを比較しTro ≥ Trであれば疲労に対して安全な設計であることがいえる。

また、対象とする床版の疲労寿命は、床版の持つ押し抜きせん断耐力とS-N曲線から、終局破壊時までの輪荷重の通過回数を算出し、本線軸重計の解析結果から基本荷重に換算した1年間の通過輪数（等価繰り返し回数）を求め、疲労寿命を算出する。

4. 軸種の影響解析

実走行荷重より得られる、基本荷重の等価繰り返し回数Neqは以下の式から求める。

$$N_{eq} = (1+i)^m \times C1 \times C2 \times C3 \times Nt \quad (1)$$

ここに、Nt：各レーンごとの1年間の通行輪数

m：Log-Log表示によるS-N曲線の傾きの絶対値の逆数(m=5)

ここで、軸種の影響についてのみ着目するため、C2とC3及び衝撃係数iは考慮しないものとする。

式(1)は以下の式になる。

$$N_{eq} = C1 \cdot Nt \quad (2)$$

$$C1 = \sum (P/P_0)^m f(p) dp \quad (3)$$

$$f(p) = \int_0^{P_{max}} (n_i/N) \cdot dn \quad (4)$$

$$N = \sum_{i=1}^{P_{max}} n_i \quad (5)$$

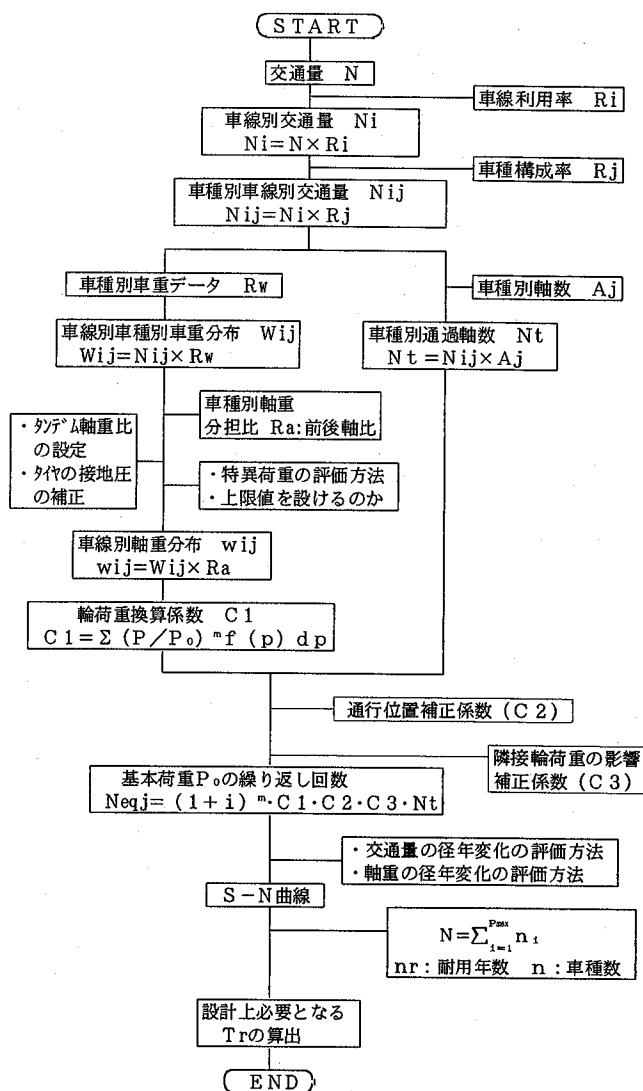


図-4 疲労設計用荷重算出フロー

ここに、
P：任意の輪荷重
P₀：基本荷重
n_i：各輪重のスライスレベルごとの輪数
N：対象年度の輪数の合計
f(p)：輪荷重の確率密度関数

等価繰り返し回数を算出する際に、輪荷重としてはシングル、タンデム、トリプル の3種類があるが、現在までの解析では

タンデム 軸重を1/2とし、回数を2回

トリプル 軸重を1/3とし、回数を3回

と想定している。しかし、床版断面力に対してタンデム、トリプル軸の影響は上記のシングル換算が妥当かどうか確認が取れてなく、図-5のような応力状態になるのではないかと考えられる。

そこで、床版に対する簡易なFEM解析を行い、タンデム、トリプル軸の断面力形状に着目し、シングル軸を想定する軸重値、回数について提案を行う。

図-6に、解析モデルを示す。

自動車諸元表より、軸間距離は、タンデム軸、トリプル軸とも1300mm、輪距は2050mmとした。

解析モデル諸元を示す。

解析モデル：鋼2主鈹桁橋

床版支間：6.0m（2車線）、11.0m（3車線）

床版厚：32cm、50cm 道示より

フランジ幅：950mm

物性値： $E_s = 2.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$

$\rho = 0.3$

$\sigma_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2$

$E_c = 3.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$

支点条件：橋軸、橋軸直角方向固定、
回転固定、鉛直方向固定

荷重載荷位置は、橋軸方向は支間中央に集中荷重（ $P = 100 \text{ K N}$ ）を載荷した。橋軸直角方向は、過去の名神高速道路の走行位置解析結果を用いた。

断面力は、橋軸直角方向に垂直な面の鉛直面方向の曲げ応力とせん断応力に着目した。

2車線モデルのタンデム軸、トリプル軸それぞれの解析結果を、図-7に示す。

解析結果より輪荷重換算係数C1は、せん断応力最大位置で下記のような結果となった。

1) 2車線モデル

タンデム軸：載荷位置

シングル軸（ p' ）の0.6倍の荷重1回＋
0.3倍の荷重1回に相当する。

トリプル軸：ハンチ位置

シングル軸（ p' ）の0.6倍の荷重1回＋
0.1倍の荷重2回に相当する。

2) 3車線モデル

タンデム軸：ハンチ位置

シングル軸（ p' ）の0.85倍の荷重1回に
相当する。

トリプル軸：ハンチ位置

シングル軸（ p' ）の0.65倍の荷重1回に
相当する。

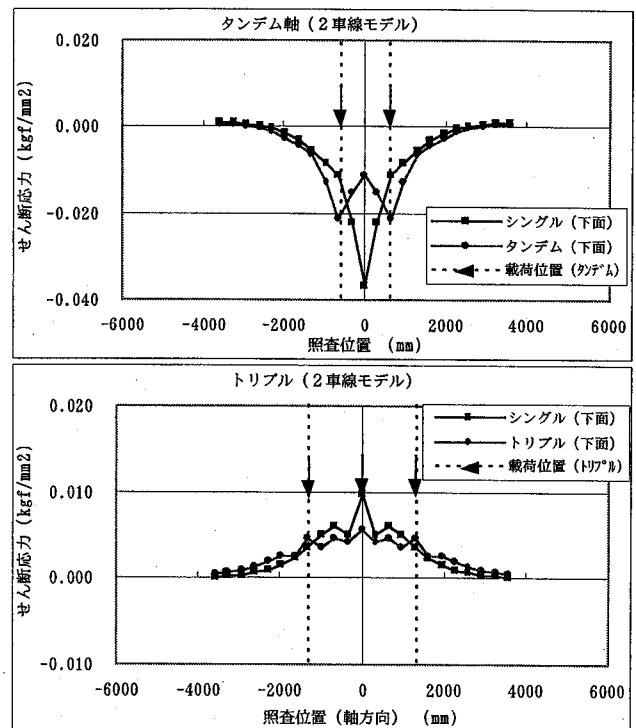
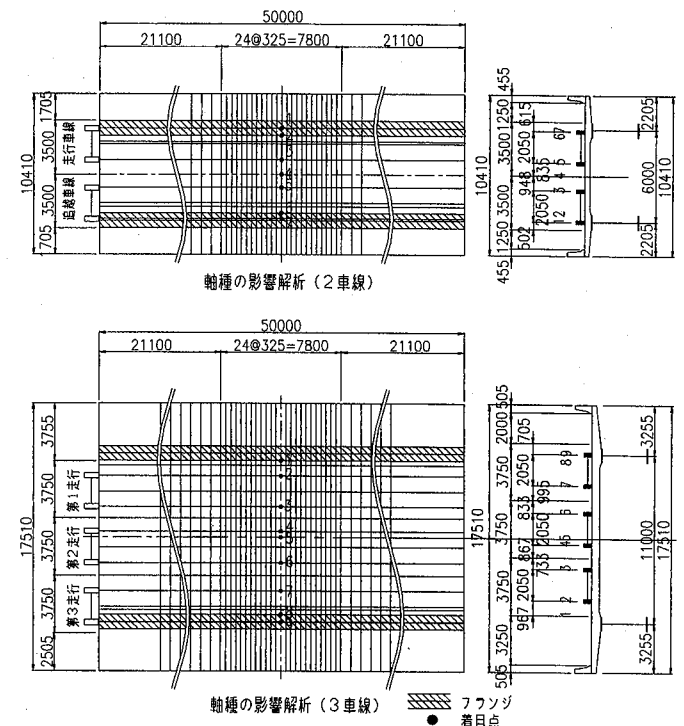
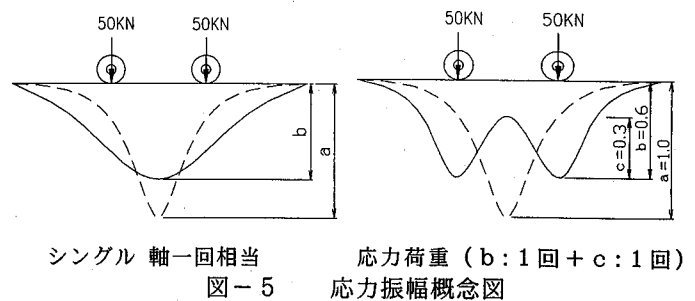
また、2車線モデルの解析結果を用いて、3つのモデル橋梁と昭和39年6月の道示に基づいて設計された実橋の疲労寿命を算出し、軸種の影響を考慮したものとししないものとの疲労寿命の比較を行う。

3車線モデルは、床版支間が長い床版厚が厚くせん断よりも曲げの方が支配的となる。したがって疲労寿命の算出は2車線モデルのみとした。

R C床版、P C床版ともS-N曲線は下記に示す式（6）³⁾によるものとした。

$$\log(P_o/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.520 \quad (6)$$

基本荷重 P_o は150 K N（300 K N/2輪数）とする。それぞれの対象床版の押し抜きせん断耐力は「はりの有効幅を考慮した押し抜きせん断耐力の算定式」³⁾



を採用する。

ひび割れが発生し、梁状化したR C床版の押し抜きせん断耐力 P_{sxo} は式(7)³⁾を用いる。

$$P_{sxo} = 2B(\tau_{\max} \cdot X_m + \sigma_{t\max} \cdot C_m) \quad (7)$$

$$B = b + 2d_a$$

ここで、 $B = b + 2d_a$: 梁状化した梁幅

b : 載荷版の配力筋方向の辺長(cm)

d_a : 配力鉄筋の有効高さ(cm)

m : 主鉄筋断面の中立軸深さ(cm)

C_m : 主鉄筋のかぶり厚さ(cm)

$\tau_{\max}$: コンクリートの最大せん断応力度(kgf/cm²)

なお、 $\tau_{\max} = 2.214 \sigma_{ck}^{0.553}$

$\sigma_{t\max}$: コンクリートの最大引張応力度(kgf/cm²)

なお、 $\sigma_{t\max} = 0.583(\sigma_{ck})^{2/3}$

式(7)は、プレストレスの影響は考慮されていないが、プレストレスによる押し抜きせん断角度の広がりを考慮して押し抜きせん断耐力を評価するものとする。文献4)を参考に(7)式を(8)式に修正する。

$$P_{sxo} = (2\tau_{\max} \cdot X_m \cdot \alpha_m + 2\sigma_{t\max} \cdot C_m)B \quad (8)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\tau_{cr}}{\sigma_{pe}} \quad (9)$$

ここで、 $\alpha_m = 1/\tan\theta$

$$\tau_{cr} = 1.005 \sqrt{\sigma_{t\max}^2 + \sigma_{t\max} \sigma_{pe}}$$

τ_{cr} : せん断ひび割れ発生応力度(kgf/cm²)

σ_{pe} : 有効プレストレス(kgf/cm²)

上記の式を用いて算出した、実橋及びモデル床版の諸元及び押し抜きせん断耐力(P_{sxo})を表-4に示す。対象路線は、東名高速道路平成9年の上り線走行車線とする。(Nt=8130502回)

モデル床版の疲労寿命を表-5に示す。

表の①、②はシングル換算の際に軸種による荷重の影響を考慮した場合としない場合である。

①タンデム軸 1/2、トリプル軸 1/3

②タンデム軸 0.6p+0.3p、トリプル軸 0.6p+0.1p

表-5より、軸種の影響を考慮した場合、床版の疲労寿命は、軸種の影響を考慮しないときより4割程度寿命が短くなる。したがって、大型のタンデム、トリプル軸車両は、同等のシングル軸に比べて床版に与える疲労の影響度は大きいと言える。

5. 同時載荷の影響解析(C3)

実交通荷重解析での同時載荷確率の結果を用いて、同時載荷の影響が床版の疲労に与える影響について簡略なFEM解析を行い検討した。

解析モデル、着目断面力は軸種解析と同様である。但し、照査位置の違いによりメッシュ分割は異なる。

図-8に同時載荷(0-0m)の結果を示す。

解析結果より、せん断応力最大位置でのC3は下記

表-4 モデル橋梁諸元

試験供試体	モデル橋			実橋
	RC1	PC1	PC2	
床版支間(m)	2.25	4.00	6.00	3.40
主鉄筋配置	D19@ 125mm	D13@ 250mm	D10@ 100mm	D16@ 100
配力筋位置	D16@ 125mm	D19@ 125mm	D19@ 100mm	D13@ 125mm
P C鋼材配置 (床版支間方向)	—	1s21.8@ 500mm	1s21.8@ 500mm	—
床版厚(cm)	25.00	25.00	30.00	17.00
保有せん断耐力 $P_{sx}(tf)$	50.10	57.70	87.30	39.10
基本荷重 $P_o(tf)$	15.00			
モデル供試体の 等価繰返し 回数計算値(回)	1.01E+09	6.14E+09	1.21E+12	4.28E+07

表-5 シングル換算係数及び疲労寿命(軸種解析)

	C1	補正回数 Neqj(回/年)	疲労寿命(年)			
			RC1	PC1	PC2	RC2
①	3.14E-02	255,215	3968	24069	4750615	168
②	7.63E-02	620,590	1632	9898	1953671	69

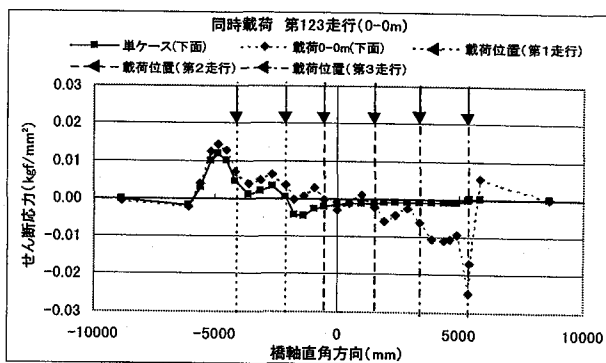
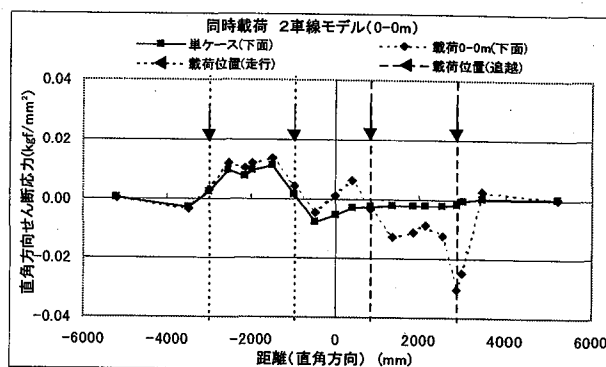


図-8 同時載荷解析結果

表-6 シングル換算係数及び疲労寿命(2車線)

	C3	補正回数 Neqj(回/年)	疲労寿命(年)			
			RC1	PC1	PC2	RC2
①	3.15E-02	256,287	3952	23968	4730747	167
②	3.22E-02	261,627	3871	23479	4634186	164

同時載荷確率: 1.4% せん断応力の比: 1.2

表-7 シングル換算係数及び疲労寿命(1,2,3車線)

	C3	補正回数 Neqj(回/年)	疲労寿命(年)			
			RC1	PC1	PC2	RC2
①	3.61E-02	144,352	7016	42554	8399129	296
②	3.61E-02	144,391	7014	42543	8396851	296

同時載荷確率: 0.01% せん断応力の比: 1.3

のようになった。

1) 2車線モデル $C_3 = 1.2$

2) 3車線モデル (1,2,3車線) $C_3 = 1.3$

軸種解析と同様に、実橋及びモデル床版の疲労寿命予測を行った。表-6、表-7に疲労寿命を示す。

表の①、②は、同時載荷を考慮した場合と、しない場合である。

解析結果より、同時載荷の確率が小さいこと及び最大せん断応力位置での同時載荷による応力の増加はほとんどみられないことから、床版に与える疲労の影響はほとんど無いものと考えられる。

6. 輪荷重の走行位置と分布 (C2)

輪荷重の走行位置と分布の係数C2について、大型車の走行位置解析結果を用いて、せん断力に対する走行位置の補正係数の概略計算検討を行った。

走行位置については、平成9年度の走行位置解析結果を用いて検討を行う。対象データは、東名高速道路の1997年1月～1997年12月とする。

一般的な単純梁のせん断力の影響線を準用して、走行位置の影響値を計算すると以下のとおりである。

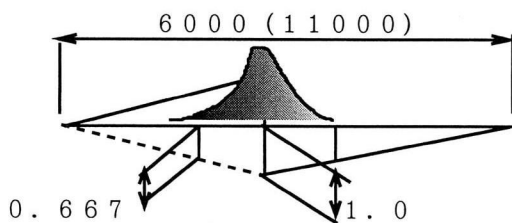


図-9 単純梁の影響線図 (せん断力)

照査位置に全ての車両が通過した場合影響値は1.0であり、走行位置解析の結果左右1.0m以内に大部分の車両が通過しているため、実際の走行位置分布を用いて計算の結果、

床版支間 6.0m 0.92

床版支間 11.0m 0.95

となる。これは、単純梁の曲げせん断の影響線の形を準用した結果である。

7. まとめ

1) 交通荷重実態解析

シングル軸、タンデム軸とも良く対数正規分布の形状と一致している。タンデム軸はシングル軸と比べ広範囲に分布している。トリプル軸はばらつきが大きい、台数的には全体に占める割合は小さい。

2) 軸種の影響解析

概略のFEM解析から、以下の結果を得た。

・2車線モデル

タンデム軸：シングル軸 (p') の0.6倍の荷重
1回+0.3倍の荷重1回に相当する。

トリプル軸：シングル軸 (p') の0.6倍の荷重
1回+0.1倍の荷重2回に相当する。

・3車線モデル

タンデム軸：シングル軸 (p') の0.85倍の荷重1回に相当する。

トリプル軸：シングル軸 (p') の0.65倍の荷重1回に相当する。

軸種の影響を考慮した場合、床版の疲労寿命は、軸種の影響を考慮しないときより4割程度寿命が短くなった。

3) 同時載荷の影響解析

同時載荷の確率が小さいこと及び最大応力位置での同時載荷による応力の増加はほとんどみられないことから、床版の評価に対する影響はほとんど無い。

4) 輪荷重の走行位置と分布

走行位置の解析結果を用いて、単純梁せん断力の影響線を準用して、走行位置の影響値を算出した。

8. 今後の課題

路線別の交通量及び車重、軸重の傾向を把握するために、さらなるデータの蓄積が必要である。

床版の疲労に関する軸種の違い、近接荷重の影響について床版の応力のみに着目したために、橋軸方向の主桁作用は考慮しなかった。また、床版をモデル化する際に、鉛直方向 (床版厚さ方向) を1層でモデル化したため、橋軸方向、橋軸直角方向の応力分布について傾向はわかったが、床版上下面の応力やせん断力等の応力分布についての解析モデルになっていない。局部応力を検討するには、数層に分割する必要があるものと考えられる。

床版の押し抜きせん断に着目した場合、荷重に対する「押し抜きせん断面」は、固定されることになる。荷重載荷位置が移動した場合の全載荷位置に作用するせん断力の影響度について、走行位置分布などを考慮し、より実走行状態に近い解析が必要だと考えている。

9. 参考文献

- 1) 前田、松井：鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐力の評価式、土木学会論文報告集N0.348/V-1、p133-141
- 2) 松井：橋梁の寿命予測、道路橋RC床版の疲労寿命予測、安全工学、vol.30、N.6、P432-440、1991
- 3) 東山、松井：プレストレスしたコンクリート床版の押し抜きせん断耐力、構造工学論文集vol.44a (1998.3)p.1357

(2002年9月13日受付)