

床版の疲労耐久性に対する車両走行位置の影響について

Effect of passing Position of Wheels on Fatigue Durability of RC Slab on Highway Bridges

古市亨*1, 松井繁之*2, 佐光浩継*3, 小寺徹*4

Toru Furuichi, Shigeyuki Matsui, Hirotsugu Sako, Toru Kotera

*1 大阪工業大学 構造実験センター 国内研究員 (〒614-8289, 京都府八幡市美濃山一ノ谷 4)

*2 大阪工業大学 構造実験センター 教授 (〒614-8289, 京都府八幡市美濃山一ノ谷 4)

*3 第一技研コンサルタント株式会社 研究室 (〒565-0005, 大阪市浪速区日本橋 4-5-21)

*4 第一技研コンサルタント株式会社 技術部 (〒565-0005, 大阪市浪速区日本橋 4-5-21)

For RC-slab that was most weak element for fatigue in the bridge members, fatigue damage mechanism was made clear by wheel running machine. In the part test, the running position of wheel has been fixed as the slab span center at all time, but on actual bridges are subjected to wheel loads random loading various loading condition because of difference in bridge width and/or girder interval, maximum shearing force is not always take place at span center of the slab. Moreover, in case of large girder interval, there is some possibility of take a plural load simultaneously.

Then, We execute FEM analysis with parameters of wheel position and girder interval, and consider effect of wheel position on fatigue life of RC-slab by result of FEM analysis and existing S-N diagram.

Key words: RC-slab, fatigue life, wheel position, FEM analysis

1. はじめに

我が国にも着実に社会資本が蓄積されてきたがストックの増大と共に、老朽化に伴って維持管理費が増大し、今後財政上の負担が増々大きくなることが予想される。橋梁を例にとると我が国の主要な道路橋だけでも約 15 万橋以上あると言われており、そのほとんどが 1975 年を中心とした年代に偏って建設されている。この偏りは将来のある時期に多くの橋梁が一斉に寿命を迎えることを意味している。そこで、構造物の維持管理の現状をみれば、維持管理の基本的な考え方や、その具体的手法論に関しては近年徐々に整備されつつあると言える。しかし、これまでの維持管理は点検で損傷が発見された時点で補修・補強を実施するという対処療法的に行ってきたが、今後多数の既設橋梁の劣化・損傷が同時に顕在化した場合には対応できなくなることも考えられ、予防法的に計画的な維持管理が必要となる。この実施には橋梁の各部材の構造特性、交通特性などを勘案した各部材の劣化メカニズムに立脚した優先順位決定手法が必要

となる。

本論文では、橋梁において最も損傷を起こしやすい部材である RC 床版について、過去の疲労試験による疲労破壊メカニズムを勘案した維持管理の優先順位について考察を加えた。輪荷重走行実験では、載荷位置、載荷方法は一定であるが、実橋では走行位置は一定ではなく、有効幅員と主桁間隔で異なり、最大せん断力が発生する位置は床版支間中央とは限らない。また、床版支間が長くなれば、輪荷重が複数載荷することもある。このため、床版支間と走行位置をパラメータとした FEM 解析を行い、FEM 解析によるせん断力と既存の S-N 曲線を用いて、走行位置による床版の疲労寿命を比較し、維持管理における走行位置の影響を検討することとした。

2. 示方書の変遷

2.1 示方書の変遷

我が国においては「大正 15 年道路構造細則」から「平成 14 年道路橋示方書」に至るまで、表-1 に示すように

表-1 床版に関する示方書の変遷 (一等橋)

適用示方書	略称	西暦	輪荷重 P (tf)	曲げモーメント式		許容応力度 kgf/cm ²	
				主鉄筋	配力筋		
大正 15 年道路構造細則	T15	1926	4.5	M=P・(L-b/2)/4×(1+i)	規定無し	1200	
昭和 14 年鋼道示	S14	1939	5.2				
昭和 31 年鋼道示	S31	1956	8.0	M=0.4・P・(L-1)×(1+i)/(L+0.4)	主鉄筋量の 25%以上	1400	
昭和 39 年鋼道示	S39	1964			主鉄筋量の 70%以上		
昭和 42 年通達 (昭和 43 年暫定基準)	S42	1967			M=(0.12L+0.07)×P×0.8	M=(0.10L+0.04)×P×0.8	(1400-200)
昭和 46 年通達 (昭和 48 年道示)	S46	1971					
昭和 53 年通達 (昭和 55 年道示)	S53	1978					
平成 2 年道示	H2	1990	10.0				
平成 5 年通達 (平成 6 年道示)	H5	1993					
平成 8 年道示	H8	1996					
平成 14 年道示	H14	2002				許容応力度に の余裕を持た せる。	

表中、L: 床版スパン、i: 衝撃係数

多くの道示・基準・通達^{1~9)}が出されており、設計輪荷重、曲げモーメント計算式、最小床版厚などの項目に対して改訂が加えられている。設計輪荷重は年代が新しくなるに従い大きくなり、主筋の曲げモーメント算出法は昭和31年と昭和46年に算出式が改訂されている。また、配筋量に関しては、昭和42年(昭和31年以前は明確な規定無)までは主筋の25%と規定されていたが、以降は主筋の70%以上と増加している。さらに、床版の損傷が顕在化してきた昭和53年以降は許容応力度に対して200kgf/cm²程度余裕を持たせるよう規定されている。

なお、論文はSI単位系によって記述すべきであるが、本論文では旧道示に合わせ、従来単位系での表示としている。

2.2 分析に用いた示方書と基本諸元

表-1に示す年代別の道示・基準・通達に対して、床版諸元を推定し、疲労寿命を試計算した結果、平均的な値を示した昭和42年通達の条件を用いて走行位置による疲労寿命推定を実施することとした。表-1に記した昭和42年通達、および「RC床版維持管理マニュアル」(大阪府土木部道路課)¹⁰⁾を参考に復元設計を行った結果より推定した床版支間毎の床版諸元を表-2に示す。

表-2 床版の復元設計結果 (S42)

諸元 (mm)	床版支間 (m)				
	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
床版厚	160	180	195	210	220
主鉄筋	D16@150	D16@140	D16@130	D16@125	D16@115
配力筋	D16@200	D16@200	D16@150	D16@150	D16@150

3. 疲労寿命推定理論

3.1 疲労寿命推定式と基本的な考え方

松井らは、RC床版の疲労破壊プロセスにおいて、配筋鉄筋断面における貫通ひび割れの摩耗によるはり状化と、その後の主鉄筋断面のせん断強度が床版挙動に対して支配的であるとして、S-N線図を、縦軸に作用荷重Pとはりのせん断耐力P_{sx}との比をとった両対数の式(1)を提案している¹¹⁾。本提案式の特徴として、床版厚、配筋状況等のデータとともに、コンクリートのせん断強度 τ_{smax} 、および引張強度 σ_{tmax} (引張側主鉄筋のダウエル力によるかぶりコンクリートの剥落耐力分)が影響因子となる。

【S-N 曲線】

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \times \log N + \log 1.51965 \quad (1)$$

式中、P: 作用荷重

$$P_{sx} = 2 \tau_{smax} X_m B + 2 \sigma_{tmax} C_m B$$

τ_{smax} : 圧縮側コンクリートの最大せん断応力度

σ_{tmax} : コンクリートの最大引張応力度(N/mm²)

X_m : 主筋断面上縁から中立軸までの距離(mm)

E_c : 中立軸を算出する際の弾性係数(N/mm²)

C_m : 主鉄筋のかぶり深さ(mm)

$$B = b + 2 d_d \text{ (はり状化幅)}$$

B: 配力鉄筋方向の載荷板の辺長(mm)

d_d : 配力鉄筋のかぶり深さ(mm)

N: 輪荷重の走行回数(疲労破壊回数)

今回提案する既設床版の疲労寿命推定の基本的な思想は式(1)のS-N曲線を用いているが、式中の作用荷重P、および走行回数Nについては、BWIM理論を用いた軸重推定^{12,13)}等を実施しない限り、その実態を把握することは難しく、特に過去の交通特性については再現することはできない。しかし、本提案は各橋梁の疲労寿命を求めるのではなく、床版支間、走行位置による疲労寿命の差異(比率)を確認することを主たる目的としているため、荷重の大きさは厳密に考えなくて良い。

3.2 載荷条件、床版支間による補正

(1) 載荷条件の相違

前節で示した式(1)は大阪大学工学部の輪荷重走行試験機(ゴンゴロ号)を用いてRC床版の疲労試験結果を分析して作成したものであるが、この時の試験状況を図-1に示す。主筋方向の端部は縦桁で支持、配力筋方向の端部は横桁により弾性支持した床版支間1.8m(全幅2.0m)、橋軸方向3.0mの支間中央に、300mm×120mmの載荷版を橋軸方向に並べて輪荷重を走行させたものであり、現道示の載荷面の500mm×200mmと異なる。載荷

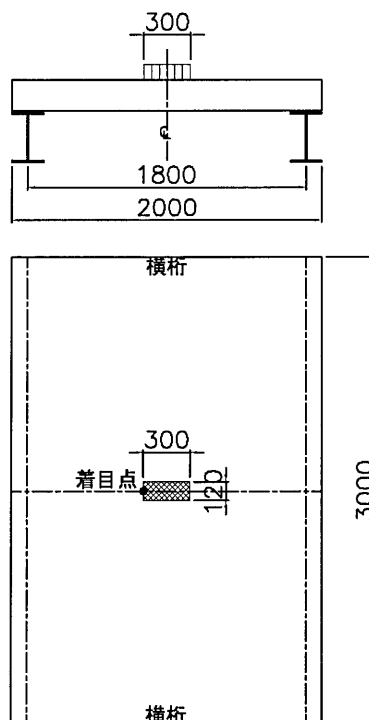


図-1 S-N 曲線提案時の載荷状況

位置についても、床版疲労試験では 1800×3000mm の床版中央に 1 輪の荷重を走行させているが、実橋では走行位置は横方向にばらつき、中心位置も有効幅員と支持桁間隔で異なる。よって、最大せん断力が発生する位置は床版支間中央とは限らない。さらに、床版支間が長くなれば、輪荷重が複数載荷することもある。一般的に輪荷重走行位置が支間中央から主桁側に近づくにつれ、主桁側の載荷面縁で発生するせん断力は大きくなる。すなわち、見かけ上、荷重が増加するような効果があり、疲労寿命が短くなることに注意する必要がある。

(2) 輪荷重の載荷位置と載荷状況

文献 14) に示されている押抜きせん断耐力評価式では、図-2 に示すように、載荷端から中立軸位置までのコンクリートせん断応力に加えて、載荷端から 45° 方向に下側鉄筋まで下降させた有効高分離れた外側に、かぶりの 2 倍分まではく離破壊時に発生する鉛直引張抵抗が同時に発生すると考えている。

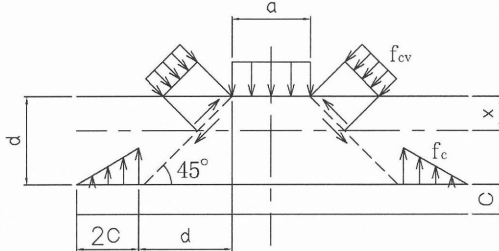


図-2 押抜きせん断耐力評価式のイメージ

このため、図-3 に示すような主桁上フランジ幅 300mm、ハンチ高 50mm (ハンチ幅 3×50=150mm)、床版厚 200mm、かぶり 40mm の RC 床版を有する鋼桁橋を仮定すると、ハンチ上端 (主桁から 150mm+150mm=300mm) から、かぶりの 2 倍 80mm と床版厚 200mm 分離れた位置に 500mm 幅の車輪荷重を載荷させた時 (荷重中心が主桁ウェブから 830mm) を主桁に最も近づいた場合の破壊モデルと考えられる。ただし、実際にはハンチがほとんどない場合や主桁上フランジ幅が小さい等の条件も考えられることから、疲労寿命計算は主桁ウェブから分布荷重中心までの距離が 650mm と仮定した。

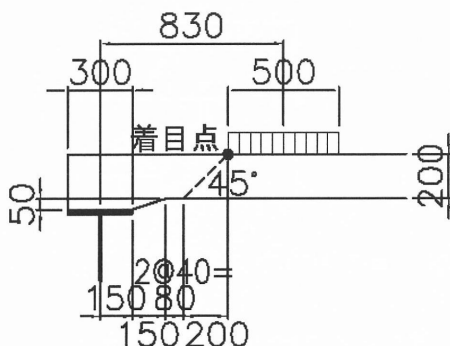


図-3 せん断力着目位置のイメージ

このため、本文では図-4 に示すように、主桁ウェブから 650mm の位置から主鉄筋方向支間中央まで、輪荷重位置を 100mm 単位で変化させ、各載荷位置でのせん断力と床版疲労試験の相関から走行位置による疲労破壊回数を比較することとした。

図に示すように、支間が短い場合には 1 輪しか床版上に載荷されないが、支間が 3m を超えるような場合には、床版上に 2 輪が載荷されることになる。

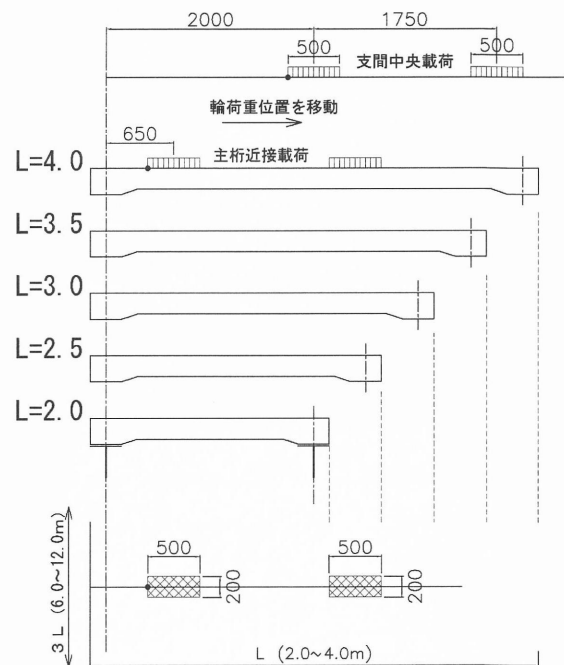


図-4 輪荷重載荷 (走行) 位置のイメージ

(3) FEM 解析結果

前項で示した床版疲労試験、床版支間毎の各走行位置における着目点のせん断力 Q_x の差異を確認するために FEM 解析を実施した。解析には主筋方向、配筋方向の梁理論による剛度の比を考慮した直交異方性シェル要素を用いた。また、配筋方向の長さは各床版支間の 3 倍とし、主桁ウェブ位置で単純支持とした平面モデルとしている。

床版疲労試験の載荷位置における解析結果を図-5 に、支間 3.0m の床版上の輪荷重載荷位置を直角方向に移動させた時の代表的な解析結果を図-6 に、この時の荷重位置とせん断力の相関を図-7 に示す。

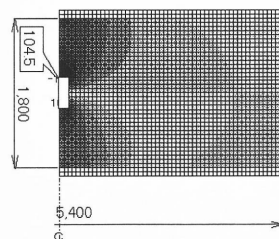


図-5 床版疲労試験の解析

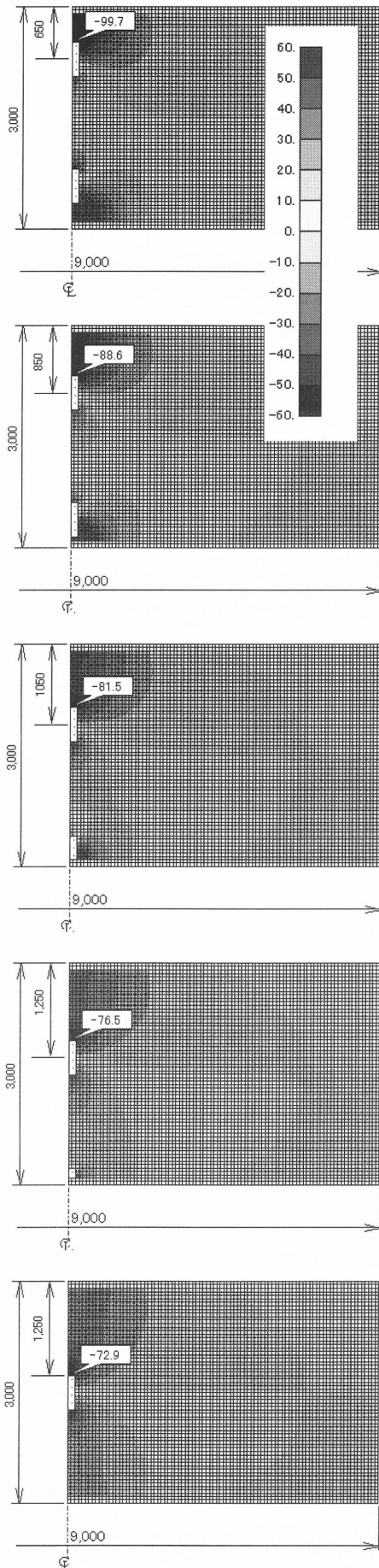


図-6 走行位置によるせん断力の差異

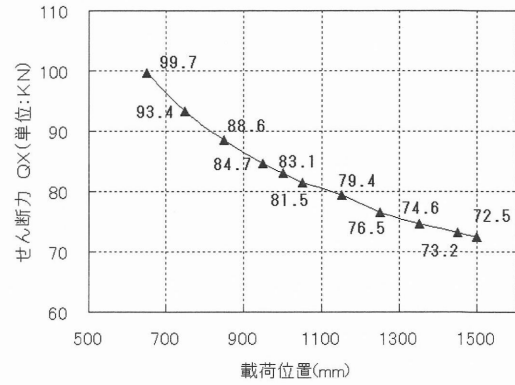


図-7 荷重位置によるせん断力(支間 3.0m)

図-5～図-7より、床版疲労試験は1輪のみの影響であるが、 $L=3.0m$ では、支間中央荷重以外のほとんどの荷重位置で2輪の影響が確認できる。せん断力 Q_x については、床版疲労試験の値 (A) が最も大きく、荷重位置が中央に近づくにつれて、せん断力は小さくなっていくことが解る。床版疲労試験の値が大きいのは、荷重幅が $300mm \times 120mm$ と小さいことの影響であり、荷重位置については、荷重位置に加え、2輪目の影響が大きいためと推測できる。

表-3に支間 2.0m～4.0mの床版について、主桁ウェブから 650mm の位置から主鉄筋方向(走行位置)支間中央まで、輪荷重位置を 100mm 単位で変化させ、荷重位置端部でのせん断力 (B_{ij}) の集計を示すが、3.0m と同様に荷重位置が中央に近づくにつれて、せん断力は小さくなる。

表-3 支間・走行位置によるせん断力の差異

荷重位置 (mm)	疲労試験 (A)	支間 (m)					摘要
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	
650	104.5	91.2	94.7	99.7	104.0	107.0	
750		85.0	88.8	93.4	98.0	102.0	
850		80.1	84.6	88.6	93.1	96.7	
950		75.7	81.0	84.7	89.2	92.9	
1000		74.4	79.5	83.1	87.6	91.4	中央
1050			77.9	81.5	85.9	89.8	
1150			75.1	79.4	83.1	87.0	
1250			72.8	76.5	80.5	84.5	中央
1350				74.6	78.4	82.5	
1450				73.2	76.4	80.6	
1500				72.9	75.6	79.7	中央
1550					74.7	78.7	
1650					73.1	77.0	
1750					71.7	75.5	中央
1850						74.0	
1950						72.6	
2000					71.5	中央	

(4) 床版支間、荷重条件による補正

表-4に床版疲労試験の解析結果 (A) と各支間の輪荷重走車荷重位置を変化させた場合の解析結果 (B_{ij}) を示しているが、この A と B_{ij} との比 α が床版疲労試験と実

橋の床版間における作用荷重の補正值であると考え、式(1)中のPに補正值を乗じることによって床版支間を考慮したS-N曲線 式(2)として修正できる。

【補正を考慮したS-N曲線】

$$\log(P'/P_{sx}) = -0.07835 \times \log N + \log 1.51965 \quad (2)$$

式中、

$$P' = P \cdot \alpha$$

α : 床版疲労試験に対する補正係数

$$\alpha = B_{ij} / A$$

i : 支間長の関数

j : 載荷位置の関数

4. 走行位置による影響

前章までに、各床版支間の走行位置による補正を考慮したS-N曲線を示したが、式(2)に表-3に示す床版支間・走行位置によるせん断力を代入し走行回数Nの計算を行った。なお、式中の作用荷重Pは現道示における輪荷重100kNとしている。

4.1 走行位置による疲労寿命回数Nの傾向

各床版支間の走行位置と疲労寿命回数Nの相関を図-8に、せん断最大位置付近(荷重中心が850mmに載荷)と支間中央載荷時の疲労寿命回数の集計を表-4に示す。

各支間の疲労寿命回数は走行位置が中央の場合が最も長く、走行位置が主桁に近づくに連れて、寿命回数は短くなるのが解る。これは、走行位置が主桁に近づくに連れて影響だけでなく、支間が大きくなると、2輪目の影響も大きくなるためである。

表-3に示す支間中央のせん断力は全支間ともほぼ70.0kN~75.0kNであるのに、疲労寿命回数が大きく変わるのは、支間が長くなれば表-2に示すように床版厚が厚くなり、式(2)中の P_{sx} が大きくなるためである。

表-4より、2.0mの場合には、中央走行と850mm位置走行による疲労寿命回数の比が2.6倍であるのに対し、4.0mでは、43.7倍と、支間が大きくなると走行位置による疲労寿命回数に大きな差がでる。支間が大きな場合には、走行位置により、床版劣化に及ぼす影響が大きいため、走行位置に配慮する必要があることが解る。

表-4 支間・走行位置による疲労寿命回数の差異

支間 L(m)	輪荷重(走行)位置		比率 ②/①
	せん断最大 850mm	支間中央 L/2	
	①	②	
2.0	4.1E+03	1.1E+04	2.6
2.5	4.2E+04	2.9E+05	6.8
3.0	1.8E+05	2.1E+06	12.1
3.5	6.9E+05	1.9E+07	28.1
4.0	1.3E+06	5.7E+07	43.7

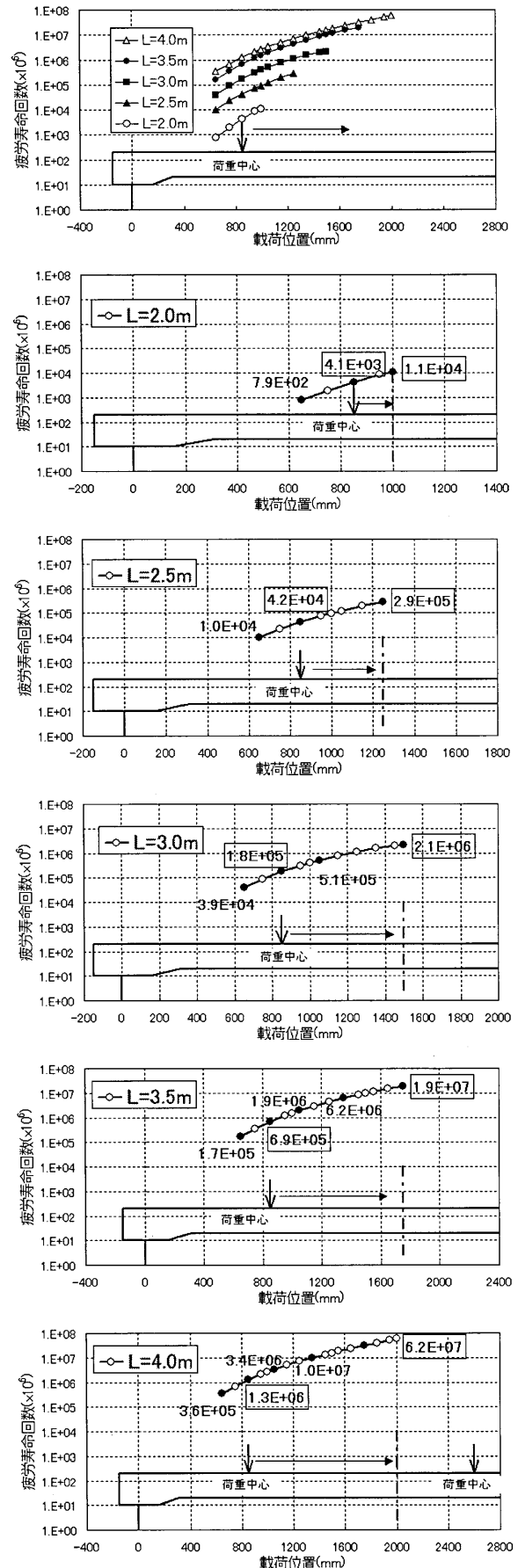


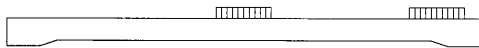
図-8 走行位置による疲労寿命回数

4.2 走行位置に対する配慮

前節で示したように走行位置が床版劣化に及ぼす影響は非常に大きいことが確認できた。支間が長い場合には特に配慮が必要である。図-9に示す支間4mの場合、1輪が支間中央を走行する場合の方が疲労寿命は最大になるが、車軸中心が主桁間中央を走行する場合には、車輪縁に発生するせん断力が大きくなり、計算上、支間中央走行の場合の43.7倍、床版が早く劣化することとなる。

図-10に今回の分析結果から、床版の寿命が長くなる適切な走行位置について提言できる。図に示すように、支間が2.5m以下の場合には主桁近傍載荷、支間が3.0mを超える場合には中央を走行させることが望ましい。前節で示したように、支間が短い場合には影響は少ないが、支間が大きな場合には、特に配慮する必要がある。このような走行位置の配置は全桁とレーンマークの組み合わせによって実現可能となる。

良い例（床版支間中央走行）



悪い例（主桁間中央走行）

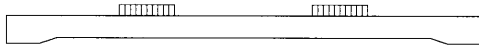


図-9 支間4.0mの場合の走行位置

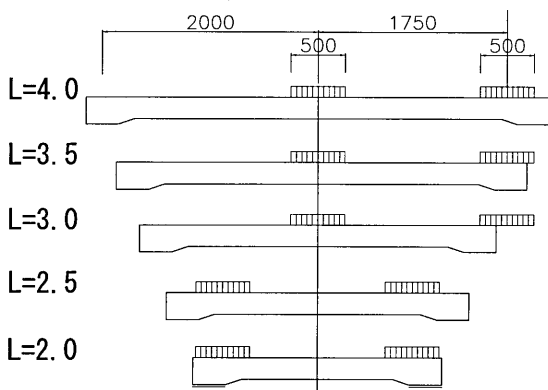


図-10 支間による最適な走行位置

5. おわりに

以上のように床版において車両の走行位置は床版の疲労寿命に大きな影響を与えることが確認できた。既設橋においては、走行位置を数10cm移動させることにより、疲労寿命は数十倍になることもあり、床版に増桁補強を実施する場合にも、主桁間隔から等分割に増桁を配置するのではなく、走行位置に配慮した配置が必要である。

また、新橋の場合にも、走行位置に主眼をおいた桁配置などを行えば、床版の更新時期を大幅に伸ばすことができると思う。

今回は1主桁間の走行位置の影響について述べたが、今後は車線数、主桁配置、交通荷重など、個別橋梁が有している特性に配慮した分析を行くとともに、既存の輪荷重走行試験結果、あるいは実橋における走行位置と損傷状況との比較により、本手法の検証を行っていきたい。

参考文献

- 1) 内務省土木局：道路構造に関する細則案，1926.6
- 2) 日本道路協会：鋼道路橋示方書・同解説，1939.2
- 3) 日本道路協会：鋼道路橋示方書・同解説，1956.5
- 4) 日本道路協会：鋼道路橋示方書・同解説，1964.2
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ，1972.2
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ，1980.2
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ，1990.2
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ，1994.2
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ，2000.2
- 10) 大阪府土木部道路課：RC床版維持管理マニュアル，1996.8
- 11) 松井繁之ほか：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，日本コンクリート工学協会，Vol9，No.2，1987-7，pp.627-632.
- 12) 松井繁之，EL-HARIM：RC床版のひび割れの開閉量による輪荷重の測定に関する研究，構造工学論文集，日本学術会議土木工学・建築学委員会，土木学会，Vol35A，1989-3，pp.407-418.
- 13) 小塩達也，山田健太郎，古市亨：鋼床版部材を用いた走行車両の軸重推定，構造工学論文集，日本学術会議土木工学・建築学委員会，土木学会，Vol.44A，1998-3，pp.1141-1151.
- 14) 前田幸雄，松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式，土木学会論文集，第348号，pp133-141，1984.