

(4) 橋軸直角方向にプレストレスを導入した床版の疲労耐久性に関する研究

大阪大学 工学部 ○大西 弘志
 大阪大学 工学部 松井 繁之
 日本道路公団 北畠 康之
 日本道路公団 試験研究所 長谷 俊彦

1. はじめに

現在建設が進められている第二東名・名神高速道路では少数主桁橋が採用されており、主桁間隔が大きくなり長支間に対応する床版形式が必要となっている。この長支間に対応できる床版形式の一つとして、橋軸直角方向にプレストレスを導入した床版が考えられている。しかし、この形式の床版に対する輪荷重走行疲労試験例は少なく、その疲労耐久性は明確ではない。そこで、本研究ではこの床版の疲労耐久性を調査するために、試験用床版 10 体について小型輪荷重走行試験機を用いた疲労試験を行い、その結果を比較することにより、橋軸直角方向プレストレス導入の効果についての検討を行うことにした。

2. 実験概要

本研究の疲労試験で使用した供試体の種類・載荷条件を表-1に示す。供試体の寸法は1000×1600×60(mm)である。これは実橋の約1/3のモデルであり、長辺を単純支持とした単純支持版と、長辺をH形鋼の支持桁に合成した固定支持版の2種類を用意した。それぞれの種類で、橋軸直角方向のプレストレス量を変化させた。また、短辺(橋軸直角方向)を横桁による弾性支持とした。短辺を弾性支持としたのは、短辺を自由とした場合自由端から床版の破壊が始まるからである。なお、単純支持版は版中央に荷重を載荷した場合、隅の部分が浮き上がるため、四隅に浮き上がり防止装置を設置した。

供試体の鉄筋としては、主鉄筋、配力鉄筋ともにD6鉄筋を使用し、主鉄筋は圧縮側のピッチを9cm、引張側を4.5cm、配力鉄筋は圧縮側のピッチを12.8cm、引張側を6.4cmとして配置した。また橋軸直角方向にプレストレスを導入するために床版厚の中央にPC鋼棒を配置した。使用したPC鋼棒の径は9.2mmであり、中心から15cmピッチで配置した。供試体別に一本あたりのプレストレス導入量を0t、1.2t、2.4tの3種類に変化させプレストレスを床版に導入した。試験時の供試体コンクリートの強度を把握するため、最初の5体の供試体について疲労試験開始時に材料試験を併せて実施した。この材料試験結果を表-2に示す。材令が28日を超過して

表-1 供試体種類

供試体名	プレストレス量	支持形式	載荷荷重
RC00-20T	0t/cable	単純支持	2.0t
PC12-20T	1.2t/cable	単純支持	2.0t
PC24-20T	2.4t/cable	単純支持	2.0t
RC00-15T	0t/cable	単純支持	1.5t
PC12-15T	1.2t/cable	単純支持	1.5t
PC24-15T	2.4t/cable	単純支持	1.5t
GPC12-20T	1.2t/cable	固定支持	2.0t
GPC24-20T	2.4t/cable	固定支持	2.0t
GPC12-15T	1.2t/cable	固定支持	1.5t
GPC24-15T	2.4t/cable	固定支持	1.5t

・プレストレス量1.2t/cable、2.4t/cableはそれぞれ13.75kgf/cm²、27.5kgf/cm²のプレストレスに相当。

いたこともあり、材料の強度は安定していると判断できたので、以後の供試体の材料特性は表-2の値の平均値を用いることとした。

表-2 材料試験結果

供試体名	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性率 (kgf/cm ²)	ポアソン比
PC24-15T	512.3	303500	0.2295
RC00-15T	542.1	311000	0.2027
PC12-15T	504.8	297200	0.2044
RC00-20T	507.7	305600	0.1962
PC12-20T	489.7	317300	0.2176

供試体に載荷した輪荷重

は、2.0t と 1.5t の 2種類とし、図-1 に示す小型輪荷重走行試験機によって幅員中央線上で1mの範囲で移動載荷した。今回使用した小型輪荷重走行試験機は、道路橋RC床版上を走行する輪荷重を再現し、床版の疲労実験を行うものである。小型輪荷重走行試験機の性能¹⁾は以下の通りである。

- 載荷能力 : 0~2t
- 荷重移動範囲 : 床版中央から±50cm
- 移動速度 : 23 往復/分
- 車輪幅 : 10cm
- 車輪の接地面 : 4×10 (cm)

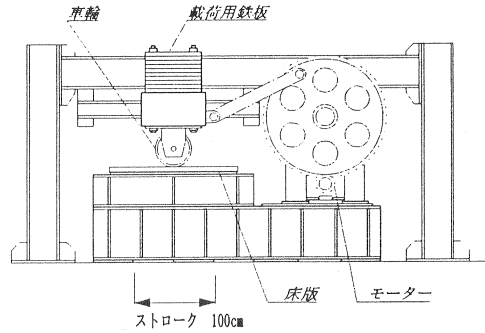


図-1 小型輪荷重走行試験機

輪荷重走行部分には車輪の直接載荷による床版表面の磨耗を防ぐため、床版表面に2mm厚の鉄板を敷いて軌道とした。

今回の一連の実験では、すべての供試体に対して、輪荷重走行開始前に数回床版中央に静的載荷し、測定を行った。その後50万往復を目標走行回数として走行載荷を行った。適宜、走行途中で試験機を停止させ、輪荷重を床版中央に静的に載荷して測定を行った。静的載荷時の測定・観察項目は、床版のたわみ、床版表面、主鉄筋、配力鉄筋、PC鋼棒のひずみ、床版表面に発生したひび割れの発生・進展状況である。たわみの測定では、橋軸方向中心線上に床版中央から前後に20cm間隔に5個のダイヤルゲージを設置し、荷重による版の形状の変化をこの方向のたわみ変位でとらえた。ひび割れ発生・進展状況の調査では、目視によって床版の上面、下面のひび割れ状況を観察し、分布傾向の変化や、ひび割れ発生回数が確認できるようにした。また、単純支持版1体(PC24-20T)と固定支持版4体では床版下面の中央付近で橋軸直角方向に発生したひび割れに、3方向ゲージを貼付してひび割れの動きを測定した、すなわち、ねじりモーメントによるひび割れをはさむコンクリートの水平方向ずれ変位、曲げモーメントによる開き、せん断力による鉛直方向ずれの3つである。

3. 実験結果

3. 1. ひび割れの発生・進展状況

(1) 単純支持版

一般に、床版の疲労実験では橋軸方向中心線付近において橋軸方向、橋軸直角方向に一定の間隔でひび割れが発生し、徐々にひび割れが格子状に進展していく²⁾ことが知られている。同じ傾向がすべての単純支持版供試体で確認された。2ton 載荷時では初期載荷から10000往復まででは、ひび割れの発生密度に大きな差が現れなかったが、走行回数が増加すると、ひび割れ密度に差が生じ、試験終了時にはプレストレス量の大きさの違いが明確に現れた。この傾向は固定支持でも同様であった。1.5ton 載荷では初期載荷から10000往復までの発生ひび割れ密度に反して大きな差が出た。PC24-15Tの大きなプレストレス量を導入した床版では2.0t 載荷で見られた橋軸直角方向のひび割れ発生は非常に少なかった。載荷荷重が小さい反面、異方性が小さくなり、配力鉄筋断面に作用

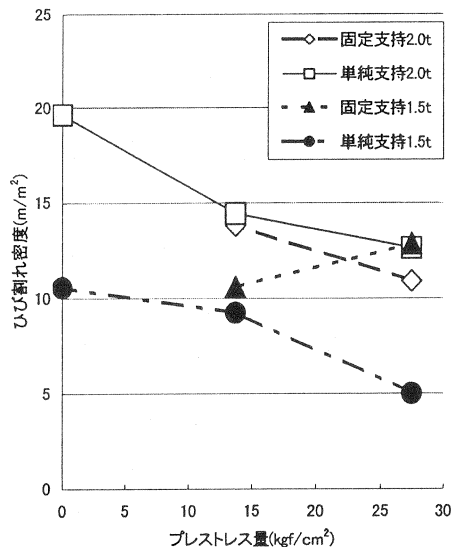


図-2 ひび割れ密度とプレストレス量との関係 (300000往復終了時)

する曲げモーメントが小さくなったためと思われる。その後の走行載荷によってひび割れが進展した。試験終了時には2.0t 載荷の場合と同様にプレストレス量によってひび割れ密度に差が現れた。

(2) 固定支持版

2.0t 載荷時には単純支持版の場合と同様、初期載荷から10000 往復の間に橋軸直角方向、橋軸方向中心線上にひび割れが発生した。これはプレストレスによって2次的に橋軸方向に発生する引張応力と輪荷重との合力によってひび割れが発生したものと考えられる。その後のひび割れの進展状況は、単純支持版に比べて緩やかであり、試験終了時においても明確な格子状のひび割れは確認できなかった。1.5t 載荷時のGPC24-15T では単純支持版とは異なり、初期載荷から10000 往復の間に橋軸直角方向と橋軸方向中心線上に、多数のひび割れが発生した。橋軸直角方向にプレストレスを与えることによって、橋軸方向にもプレストレスが入ることが期待されるが、供試体の誤差によるものと思われる。1万往復後はひび割れの進展はあったものの、試験終了時において明確な格子状のひび割れは発生しなかった。

(3) プレストレス導入量による影響

輪荷重走行載荷30万往復終了時のプレストレスの導入量とひび割れ密度との関係を図-2に、初期の段階である荷重走行10000往復時のプレストレスの導入量とひび割れ密度との関係を図-3に示す。

これらの図から、単純支持版の場合、プレストレス導入量の増加とともにひび割れ密度が減少する傾向が認められる。このことより、単純支持版の場合にはプレストレスを導入することによりひび割れの早期発生と進行の双方を抑制することがわかる。しかしながら、固定支持版の場合にはこれとは異なる傾向を示している。これは固定支持の床版においてひび割れを観察できる面積(0.56m²)が単純支持版(1.28m²)に比べてかなり小さいのにも関わらず、初期において単純支持版と同様に橋軸方向中心線に添ってひび割れが入ってしまうことが原因である。ただ、固定支持版のひび割れ進展状況を見ると、1万往復から30万往復の間に単純支持版のひび割れ密度が5~12m/m²増加するのに対し、固定支持版では2~5m/m²しか増加していない。

3. 2. たわみの発生状況

床版中央のたわみと荷重往復回数との関係の一例を図-4に示す。この図を見ると、初期載荷から1000 往復までの間にひび割れが急速に発生し、これに伴ってたわみが急増する。その後はひび割れの発生速度が緩やかになるためそれに併せてたわみも一定の傾きを保ちつつ漸増していく様子がわかる。今回の実験供試体のほとんどで同様の傾向が見られたが、RC00-20T 供試体では、荷重走行回数が40万往復を超過したところで急激にたわみが増加するという床版の疲労破壊時によく見られる現象が確認され

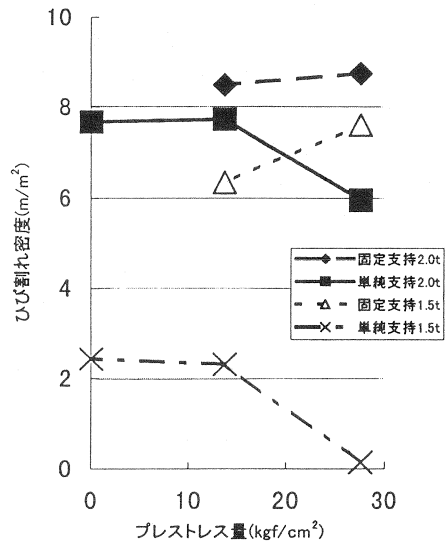


図-3 プレストレス量とひび割れ密度との関係 (10000往復終了時)

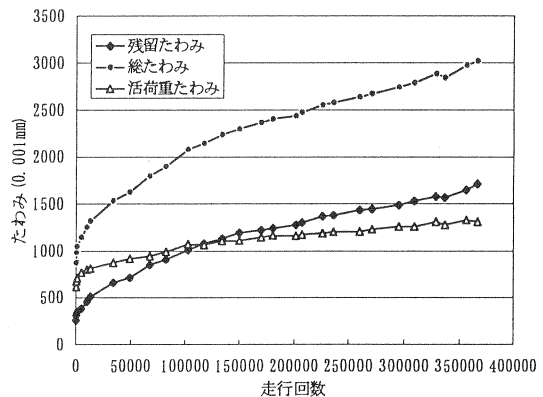


図-4 走行回数とたわみの関係 (PC12-20T)

た。また、各供試体の活荷重たわみに着目した、橋軸方向中心線上におけるたわみ分布曲線の一例を図-5に示す。このたわみ分布曲線は全ての供試体に対し共通して中央がとがった分布を示しており、輪荷重走行によりひび割れが進展するに従い、コンクリート床版の有効断面積が減少し、剛性が低下していくことが確認できる。

図-6に実験終了時におけるたわみとプレストレス量との関係を示す。単純支持版の2.0t 载荷のものでは、RC00-20T 供試体で劣化が激しく試験終了時にはたわみ量が3.5mmにまで達し、他の2体の単純支持版とは大きな差が現れた。またプレストレスを導入した2体について比較すると、PC12-20T では試験終了時の活荷重たわみが1.31mmに達していたのに対し、PC24-20T では1mmに留まっており、PC12-20T の約77%、RC00-20T の約28%にたわみが抑えられていた。1.5t 载荷の単純支持版については試験終了時におけるPC24-15T のたわみ量は0.49mmとなりPC12-15T との比較では差が認められなかったもののRC00-15T の約81%に抑えられており、橋軸直角方向プレストレスがたわみ量の変化に影響を与えていたことがわかった。固定支持版の場合は2.0t 载荷のGPC1220T、GPC2420T ではどちらも試験終了時のたわみ量は0.32mm程度となり、2体間にたわみ量の差は認められなかったが、同量のプレストレスを導入した単純支持版のPC24-20Tと比較するとたわみ量が約32%に抑えられており、支持桁との合成による支間曲げモーメントの減少と、プレストレスによる効果によってたわみが抑えられていたものと考えられる。1.5t 载荷についてもGPC2415T の試験終了時のたわみ量はGPC1215T の約64%、単純支持版のPC24-15T の約27%に抑えられており、2.0t 载荷の場合と同様支持桁との合成およびプレストレスの効果が認められた。

3. 3. ひずみの発生状況

図-7に鉄筋ひずみの測定値と輪荷重走行回数との関係の一例を示す。この図のように、初期载荷から1000往復程度までの間に、ひずみが急増し、その後は漸増するという傾向がほとんどの鉄筋ひずみ測定点で確認できた。このことは荷重走行初期において急速にひび割れが発生し、床版の剛性が低下したことを示している。12万回以降活荷重ひずみは安定した。一方、P C鋼棒のひずみの測定値はいったん増加してから減少するという傾向が認

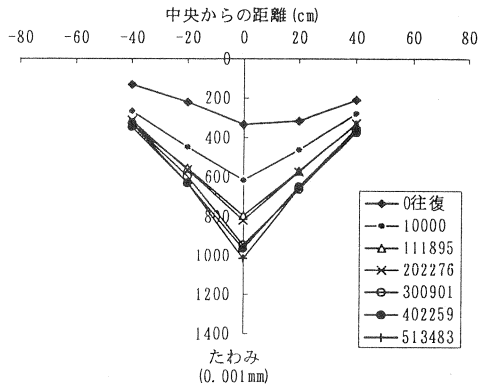


図-5 活荷重たわみ分布 (PC24-20T)

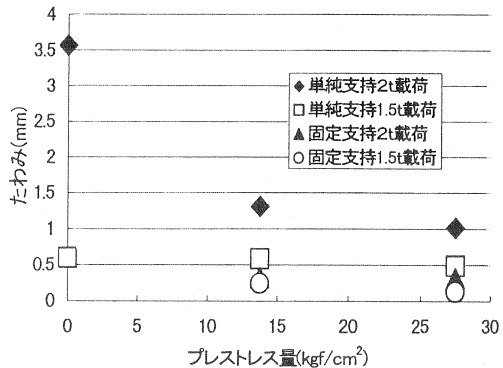


図-6 活荷重たわみとプレストレス量との関係

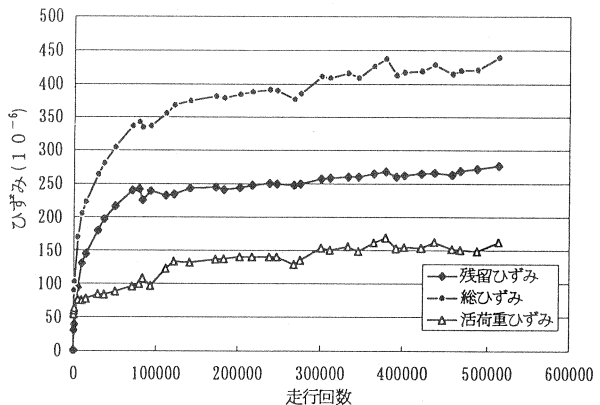


図-7 走行回数とひずみの関係 (PC24-20T:主筋)

められた。

3. 4. ひび割れの動き

2.0t 載荷時における橋軸直角方向ひび割れの開き振幅と荷重走行回数との関係を図-8に示す。測定したひび割れの動きのうち、ひび割れ開きと水平方向ずれの2つに関しては右図の様に支持桁に合成されているか否かで違いがはっきり出たが、鉛直方向ずれに関しては、支持条件による違いが見られなかった。これは、支持桁に合成されることによって支点での回転変位、水平方向変位が拘束されているためである。

ひびわれ動きのうちの2つが拘束されることで、ひび割れ進展が遅く、かつひび割れ面の劣化速度が小さくなり床版の剛性の低下が著しく遅延する。よって、同じプレストレス量であっても支持条件によって耐久性は大幅に向上しているものと考えられる。

4. 床版寿命の推定

今回行った一連の実験では、荷重走行回数 50 万往復時までに RC00-20T 供試体が破壊 (42.45 万往復)、PC12-20T 供試体が版としての性能を著しく失っていた (36.67 万) ので途中終了したが、それ以外の 8 体の供試体では実験終了時点において、まだ版として機能していると確認できた。このことから、本研究では床版の耐久性向上を確認するために、使用限界状態に至るまでの荷重走行回数の測定データからの推定を行った。

床版寿命の推定方法として、床版中央における活荷重たわみ-往復回数曲線に着目した。床版中央の活荷重たわみ-往復回数曲線では、一般に活荷重たわみは輪荷重載荷初期 (0~100,000 往復) において大きく増加した後、緩やかな勾配で増加するという傾向が認められる。そこで、本研究では初期の増加率の大きい部分を取り除いた部分の曲線を劣化曲線と見なし、その劣化曲線を元に求めた回帰直線を用いることで、余寿命を推定できると考えた。今回は床版が寿命に達した時の活荷重たわみの値として、主鉄筋断面・配力鉄筋断面ともにひび割れが中立軸まで到達していると想定したときに発生する活荷重たわみの値を採用した。これらの値を表-3に示す。

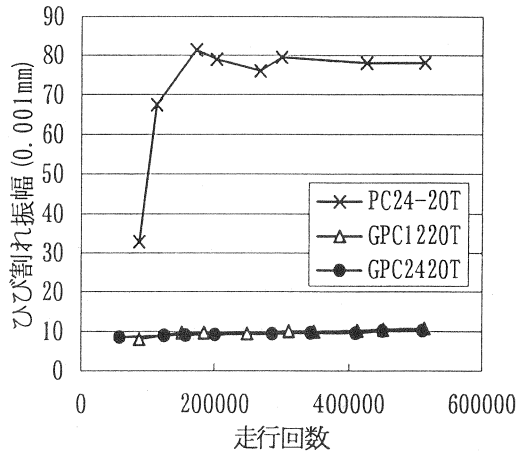


図-8 ひび割れ振幅-サイクル曲線 (ひび割れの開き・2.0t載荷)

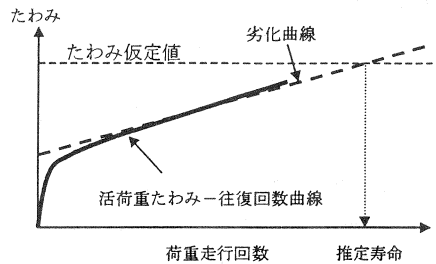


図-9 寿命予測の概要

表-3 床版破壊時の活荷重たわみの仮定値

支持桁との合成の有無	荷重	たわみ値(mm)
無し	1.5t	0.855
無し	2.0t	1.14
有り	1.5t	0.336
有り	2.0t	0.448

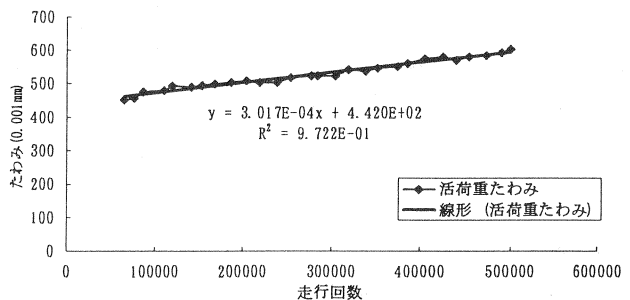


図-10 劣化曲線 (RC00-15T)

上記の方法に基づいて得られた推定寿命の一覧を表-4に示す。また、載荷荷重ごとに推定寿命の比較を行った結果を図-11、12に示す。2t 輪荷重を載荷した場合(図-11)、供試体 RC00-20T、PC12-20T、PC24-20T の順で寿命が増加しており、プレストレス力の大きさが疲労耐久性に影響を与えていることがわかる。

表-4 床版寿命の推定値

供試体名	支持桁との合成	プレストレス量	荷重	使用限界推定寿命(往復)
RC00-20T	無し	0kgf/cm ²	2.0ton	81006
PC12-20T	無し	13.75kgf/cm ²	2.0ton	182955
PC24-20T	無し	27.5kgf/cm ²	2.0ton	534109
RC00-15T	無し	0kgf/cm ²	1.5ton	1375724
PC12-15T	無し	13.75kgf/cm ²	1.5ton	1291190
PC24-15T	無し	27.5kgf/cm ²	1.5ton	2341236
GPC1220T	有り	13.75kgf/cm ²	2.0ton	1008020
GPC2420T	有り	27.5kgf/cm ²	2.0ton	1016820
GPC1215T	有り	13.75kgf/cm ²	1.5ton	1438680
GPC2415T	有り	27.5kgf/cm ²	1.5ton	3081543

また、床版を支持桁と合成している GPC1220T、GPC2420T の供試体の推定寿命間に大きな差は認められないが、この2体の推定寿命は、同じ大きさのプレストレス力を導入した PC12-20T(182955 往復)、PC24-20T(534109 往復)の寿命を大幅に上回っている。このことから、今回の床版では、プレストレス力よりも、床版を支持桁と合成させることの方が床版寿命の延長に大きく寄与していると言える。ところが、1.5ton の輪荷重を床版に載荷した場合には、図-12 にみられるように、支持桁との合成をした供試体の方が、プレストレスの大きさの違いが明らかに現れた。1.5t という荷重では、使用限界に至る寿命が長い場合、床版剛性の低下度は小さく、断面の応力状態はまだ弾性範囲内にあり、固定支持版の場合プレストレスの影響が線形的に現れたものと思われる。2t 載荷の場合には、軌道直下の部分のみが大きな断面力を発生し、急激な断面剛性の低下があり、プレストレス量の差が現れにくいものとなっていたようである。

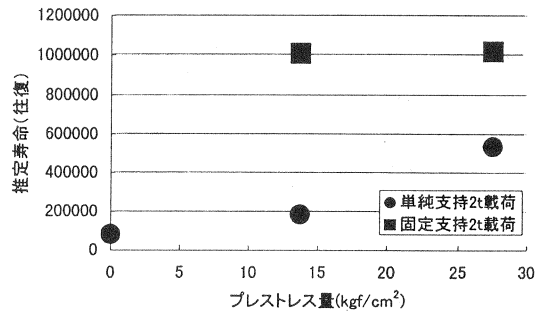


図-11 使用限界推定寿命とプレストレスの関係

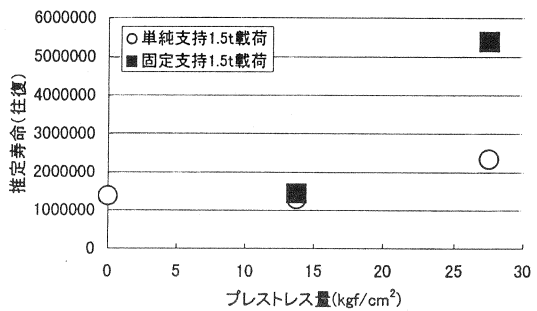


図-12 使用限界推定寿命とプレストレス量の関係

5. 結論

本研究から導かれた結論は以下の通りである。①橋軸直角方向プレストレスを導入することによって床版のたわみは抑制され、試験終了時のひび割れ密度は小さくなり、床版の疲労耐久性が向上する。②単純支持版と固定支持版を比較した結果、支持条件によってたわみ量やひび割れの動きが大きく変わる。このことから支持桁との合成によって床版の断面積の低下速度が抑えられることが確認できた。③使用限界寿命を推定した結果、橋軸直角方向プレストレスを導入することによって大幅に延長していることが明確になった。

参考文献

- 1) 松井繁之：水環境下における道路橋RC床版の耐久力向上のための防水工の研究、平成元年度科学研究費補助金研究成果報告書、1990.3
- 2) 松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究、1984.10