

橋軸直角方向 PC 床版の疲労特性と耐久性

Fatigue Properties and Durability of Reinforced Concrete Slabs Prestressed in Transverse Direction

渡海大輔^{*}、松井繁之^{**}、大西弘志^{***}

Daisuke TOKAI, Shigeyuki MATSUI and Hiroshi ONISHI

^{*}大阪大学大学院 工学部土木工学科 (〒565 大阪府吹田市山田丘 2-1)

^{**}工博 大阪大学大学院教授 工学部土木工学科 (〒565 大阪府吹田市山田丘 2-1)

^{***}工修 大阪大学大学院助手 工学部土木工学科 (〒565 大阪府吹田市山田丘 2-1)

To give a prestress into the slab is the most favorable method for increasing the fatigue durability of the slabs. There are two cases for the prestressing such as the longitudinal prestressing when the slab is created by precast concrete decks and the transverse prestressing when the slab is cast in situ. The latter is a post-tension method given after concrete hardening and it increases the load carrying capacity in shear of the cross section perpendicular to main bars. This paper reports the fatigue study to verify the transverse prestressing effects on the fatigue durability. The test specimens were small sized slabs and were classified by the prestress level. From the study, a very remarkable increase of fatigue durability was recognized.

Key words: fatigue durability, prestressed concrete slab, transverse prestressing, Wheel running test, serviceability limit state

1. はじめに

昭和40年代初期にRC床版の早期ひび割れ損傷が認められるようになり、大学・公的研究機関での室内実験及び実橋調査により損傷機構の研究が行われてきた。その研究成果により、RC床版の破壊形式は「橋軸直角方向に梁状化し、その梁幅での主鉄筋断面のせん断力による疲労破壊現象が発生し、耐荷力を喪失する」^{1~3)}ためであることが明らかにされている。

このようなRC床版の疲労損傷機構に対し床版の疲労耐久性を向上させる手法の一つとしてプレストレスの導入が考えられる。橋軸直角方向プレストレスの導入では主鉄筋断面のせん断耐荷力を向上させることによって床版の疲労耐久性向上を図ることが出来ると考えられる。

橋軸直角方向にプレストレスを導入すると、床版の橋軸直角方向長さが橋軸方向より短いためPC鋼棒の配置、グラウトの充填が安易になり、橋軸方向のプレストレス導入と比較して施工性が大幅に向上する。⁴⁾

また、PC床版の疲労設計で、供用年数に応じた最適プレストレス導入量を設定することでプレストレスの低減が図れ、より経済性に優れたPC床版の適用が可能となると考えられる。

そこで、本研究では橋軸直角方向にプレストレスの導入した床版の輪荷重走行試験を行い、プレストレスの導入方法と床版の疲労特性の比較を行った。導入プレストレスと疲労寿命との関係を明らかにすることによって、PC床版の疲労耐久性を評価するための基礎資料を示すことを目的とする。

2. 実験概要

表-1 供試体の種類

供試体名	プレストレス力 (tf/cable)	プレストレス量 (kgf/cm ²)	荷重 (tf)
AP0L2	0 (11本)	0	2.0
AP13L2	1.2 (11本)	13.75	2.0
AP27L2	2.4 (11本)	27.5	2.0
AP0L1.5	0 (11本)	0	1.5
AP13L1.5	1.2 (11本)	13.75	1.5
AP27L1.5	2.4 (11本)	27.5	1.5
BP7L2-1	1.2 (6本)	7.5	2.0
BP7L2-2	1.2 (6本)	7.5	2.0
BP15L2-1	2.4 (6本)	15	2.0
BP15L2-2	2.4 (6本)	15	2.0
CL2	-	-	2.0

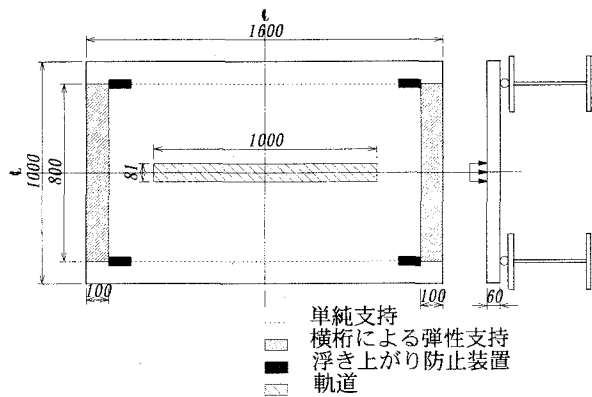


図-1 供試体の支持条件

表-2 材料試験結果

シリーズ	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
A	511	3.07×10^5	0.2101
B・C	465	2.89×10^5	0.1755

本研究の疲労試験で用いた供試体種類を表-1に示す。本実験で使用した供試体は構造の違いからA~Cの3つのシリーズに分かれており、それぞれの供試体が属するシリーズは供試体の最初の文字で示されている。供試体名の2文字以降は、P、Lに続いてプレストレス導入量(kgf/cm²)、輪荷重の大きさ(tf)となっている。また、Cシリーズの供試体は通常のRC床版であるためP以下の部分を省略してある。

供試体の寸法はどのシリーズも1000×1600×60(mm)であり、実橋床版の1/3のモデルである。支持条件は図-1に示すように、長辺を単純支持、短辺は床版の端部からの破壊を防ぐためにL形鋼による弾性支持とした。また、床版四隅には浮き上がり防止装置を取り付けている。

供試体の配筋図を図-2に示す。主鉄筋、配力鉄筋ともにD6を使用した。主鉄筋の配置間隔は圧縮側で9cm、引張側で4.5cmであり、配力鉄筋は圧縮側で12.8cm、引張側で6.4cmとした。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。導入方法はポストテンション方式とした。使用したPC鋼棒の径は9.2mmであり、Aシリーズは中心から15cmピッチで計11本、Bシリーズは30cmピッチで計6本配置した。A,Bシリーズのピッチの違いは、PC鋼棒そのものの剛性による寿命への影響を確認するためである。

A,Bシリーズの各々の供試体に対し、PC鋼材一本あたりの導入プレストレス量を0t、1.2t、2.4tの3種類とした。

試験時の供試体の材料特性を把握するため、疲労試験開始時毎に材料試験を併せて実施した。材料試験結果を表-2に示す。この時点で材齢は28日を超過していたため、以後の供試体の材料特性は表-2の値を用いることとした。

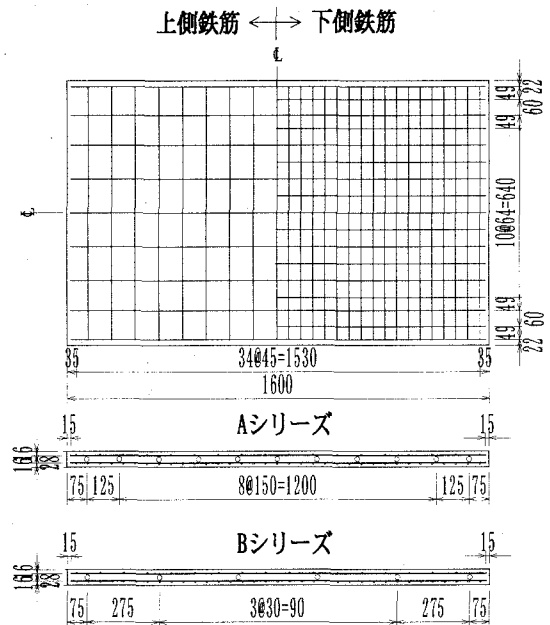


図-2 配筋図

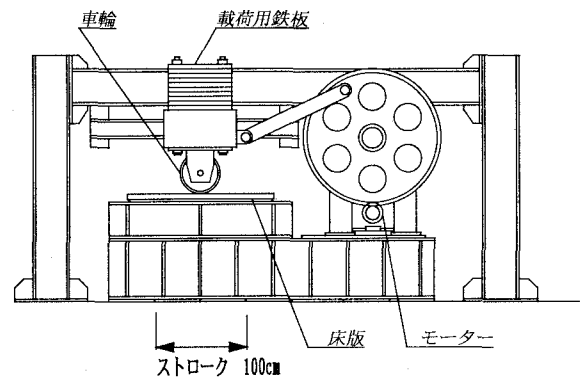


図-3 小型輪荷重走行試験機

供試体に載荷する輪荷重は、2.0tfと1.5tfの2種類とし、図-3に示す小型輪荷重走行試験機によって床版支間中央に移動載荷した。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⁵⁾。小型輪荷重走行試験機の性能は載荷能力：0.3~2tf、荷重移動範囲：床版中央から±50cm、移動速度：23往復/分、車輪の接地面：8.1×5.1cmである。また、車輪の直接載荷による床版表面の摩耗を防ぐため床版表面に2mmの鉄板を敷いて軌道とした。

全供試体に対して、床版の挙動が顕著に変化する初期段階(0~1万往復)は、測定を密に実施した。測定は輪荷重を床版中央に静的載荷して行った。その後、50万往復を目標往復回数として約2万往復毎に測定を行った。静的載荷時の測定および観察項目は、床版のたわみ、床版上下面のひずみ、主鉄筋および配力鉄筋のひずみ、床版上下面のひび割れの発生・進展状況である。たわみの測定では、床版支間中央線上に橋軸方向に中央から

表-3 実験結果一覧

供試体名	荷重 (tf)	終了回数 (往復)	最終状況
AP0L2	2.0	424502	押し抜きせん断破壊
AP13L2	2.0	366655	使用限界超過
AP27L2	2.0	513483	未破壊
AP0L1.5	1.5	500000	未破壊
AP13L1.5	1.5	502271	未破壊
AP27L1.5	1.5	505764	未破壊
BP7L2-1	2.0	437975	押し抜きせん断破壊
BP7L2-2	2.0	164786	押し抜きせん断破壊
BP15L2-1	2.0	89897	押し抜きせん断破壊
BP15L2-2	2.0	95682	押し抜きせん断破壊
CL2	2.0	70392	押し抜きせん断破壊

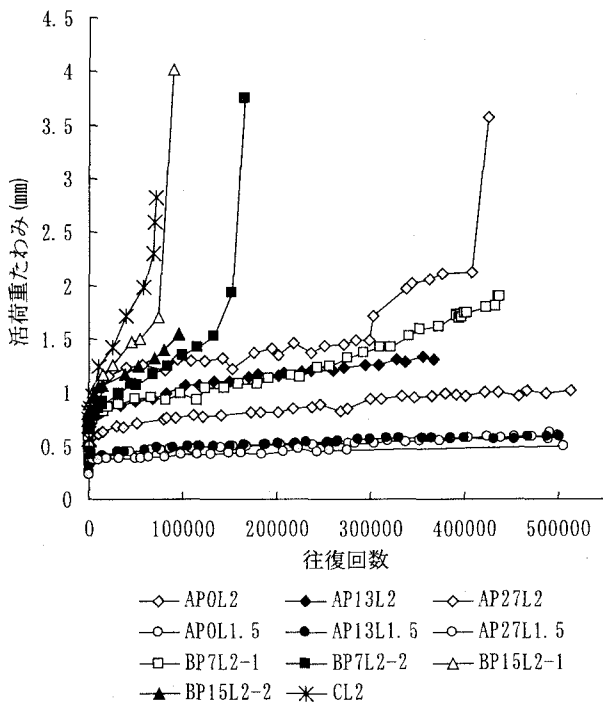


図-4 活荷重たわみと往復回数の関係

20cm 間隔で 5 個のダイヤルゲージを設置し、たわみの分布形状の差異を調査した。ひび割れ発生・進展状況は目視によって床版上下面のひび割れ発生・進展を観察し、ひびわれ分布の変化や、ひび割れ発生回数の差異を調査した。

3. 実験結果

本研究で行われた試験結果の概要を表-3 に示す。この表からも明らかのように、PC 鋼材を密に配置した A シリーズでは 6 体の供試体の内、破壊 1 体、使用限界を超えていると認められたために荷重を中止したもの 1 体であったのに対し、B、C シリーズでは 5 体中 3 体が 10 万往復以下で破壊、最も寿命のあった供試体でも 44 万往復で破壊するという結果になった。以下に床版の劣化度を知る最も有効な手段の一つであるたわみの発生状況に

表-4 解析結果

シリーズ	荷重 (tf)	Wc (mm)
A	1.5	0.918
A	2.0	1.22
B	2.0	1.54
C	2.0	1.52

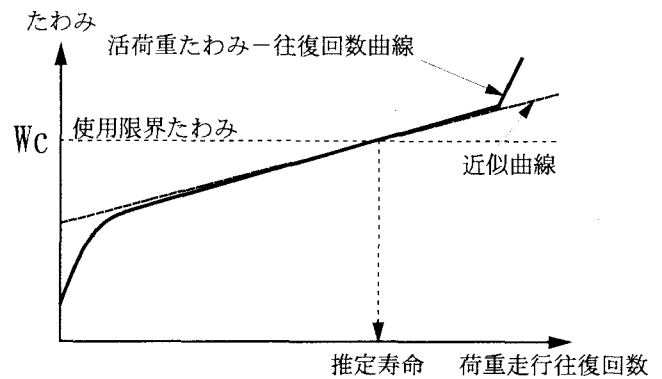


図-5 使用限界寿命推定の概要

ついて述べる。

床版中央の活荷重たわみと往復回数の関係を図-4 に示す。この図をから、全ての供試体において活荷重たわみは荷重を開始してから 1000 往復付近までに急増し、その後ほぼ一定の傾きを保ちつつ、漸増して行く傾向がある。これは、荷重往復回数が少ない段階でひび割れが急速に発生し、その後ひび割れ発生は安定期に入り、ひび割れの増加速度が緩やかになるためである。また、押し抜きせん断破壊した供試体は破壊の直前に活荷重たわみが急増するという共通した特徴を有している。

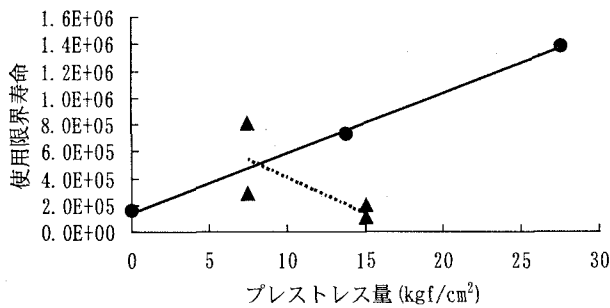
A シリーズ供試体に 2tf の輪荷重を載荷した場合、プレストレス量の増加に伴って活荷重たわみが低減されており、プレストレスによるたわみ抑制効果が確認できる。それに対し、A シリーズ供試体に 1.5tf を載荷した時では、プレストレス量の違いによる差異はほとんど見られない。これは床版に対して荷重が小さいために活荷重たわみそのものが小さいからと考えられる。

B シリーズはプレストレス量が大きい供試体の活荷重たわみのほうがプレストレス量が小さい供試体の活荷重たわみよりも小さくなるという逆転現象が発生している。これは、本実験に用いた床版が実橋を 1/3 にスケールダウンしたものであったため、床版厚に対して PC 鋼棒の径が大きく、PC 鋼棒が配置されている位置でのコンクリートのかぶり薄いことや PC 鋼棒間隔を広く取っていることにより、PC 鋼棒付着部付近で引張応力が発生し、結果的にプレストレス力によって梁状化を促進してしまったからであると言える。

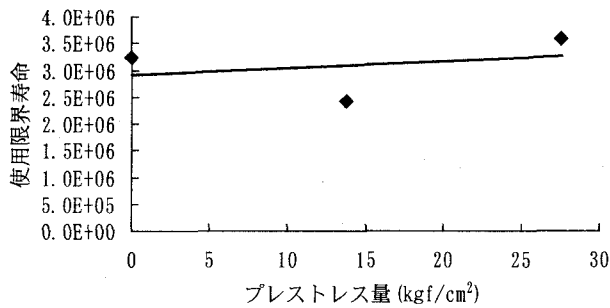
4. 使用限界寿命の推定

表-5 使用限界寿命一覧

供試体名	荷重 (tf)	実験終了回数	使用限界寿命
AP0L2	2.0	849004	153600
AP13L2	2.0	733310	731800
AP27L2	2.0	1026966	1380500
AP0L1.5	1.5	1000000	3238000
AP13L1.5	1.5	1004542	2411000
AP27L1.5	1.5	1011528	3582000
BP7L2-1	2.0	875950	809400
BP7L2-2	2.0	329572	290200
BP15L2-1	2.0	179794	107560
BP15L2-2	2.0	191364	196766
CL2	2.0	140784	56470



(a) 2tf 荷重時



(b) 1.5tf 荷重時

図-6 プレストレス量と使用限界寿命の関係

目標走行回数である 50 万往復に到達しても破壊に至らなかった供試体の破壊時荷重往復回数を推定することは困難であることから、活荷重たわみが引張側コンクリートを無視したときのたわみに達した状態を使用限界状態と仮定し、その状態に至る荷重往復回数を使用限界寿命と定義する。FEM 解析により求めた引張側コンクリートを無視したときのたわみ W_c を表-4 に示す。図-4 に示したように活荷重たわみが微増する区間では、往復回数と活荷重たわみとがほぼ線形関係にあることを利用して、微増区間における荷重往復回数と活荷重たわみの関係を直線近似することにした。この使用限界寿命推定方法の概要を図-5 に示す。すなわち、活荷重たわみの増加率の大きい荷重初期の部分と破壊に至った供試体

については末期の部分を取り除き、残りの部分を直線近似したものと W_c とが交わる点の往復回数を使用限界寿命とした。

上記の方法に基づいて得られた寿命の一覧を表-5 に示す。また、プレストレス量と使用限界寿命の関係を図-6 に示す。

2tf の荷重を載荷した場合 (図-6(a))、A シリーズの供試体ではプレストレス量の増加に伴って使用限界寿命が伸びている。これにより、プレストレスによる疲労耐久性の向上が確認できる。B シリーズにおけるプレストレス量 7.5kgf/cm^2 の供試体では A シリーズに含まれる床版と同程度の寿命を有しているが、プレストレス量 15kgf/cm^2 の供試体はかなり低い耐久性しか有していないことが分かる。

1.5tf の荷重を載荷した場合 (図-6(b))、A シリーズの供試体において、プレストレス量の違いによる差異はほとんどないと言える。これは、1.5tf という荷重では使用限界に至る寿命が長いので、床版の剛性の低下は小さく、差異が現れなかった。

5. S-N 曲線

RC 床版に関する S-N 線図では、縦軸に梁状化した時の床版の主鉄筋断面のせん断耐荷力で載荷荷重を除いて無次元化した値を用いる²⁾。その梁幅は式(5.1)の通りであり、梁状化した RC 床版の主鉄筋断面のせん断耐荷力 P_{sx} は式(5.2)で表される。

$$B = b + 2d_a \quad (5.1)$$

ここで、

B : 梁幅

b : 載荷版の配力鉄筋方向の辺長

d_a : 配力鉄筋の有効高さ

$$P_{sx} = 2B(\tau_{smax}x_m + \sigma_{tmax}C_m) \quad (5.2)$$

ここで、

x_m : 主鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視した時の中立軸深さ

C_m : 引張側主鉄筋のかぶり深さ

τ_{smax} : コンクリートの最大せん断強度⁶⁾(kgf/cm^2)

$$\tau_{smax} = 2.214\sigma_{ck}^{0.553} \quad (5.3)$$

σ_{tmax} : コンクリートの引張強度⁷⁾(kgf/cm^2)

$$\sigma_{tmax} = 0.583\sigma_{ck}^{2/3} \quad (5.4)$$

σ_{ck} : コンクリートの圧縮強度(kgf/cm^2)

式(5.1)より、全ての供試体での梁幅は 13.9cm となる。式(5.2)より、梁状化した床版の押し抜きせん断耐荷力

表-6 梁状化した床版の押し抜きせん断耐荷力

供試体名	使用限界寿命	せん断耐荷力P _{sx} (tf)
AP0L2	153600	4.531
AP13L2	731800	4.531
AP27L2	1380500	4.531
AP0L1.5	3238000	4.531
AP13L1.5	2411000	4.531
AP27L1.5	358200	4.531
BP7L2-1	809400	4.242
BP7L2-2	290200	4.242
BP15L2-1	107560	4.242
BP15L2-2	196766	4.242
CL2	56470	4.086

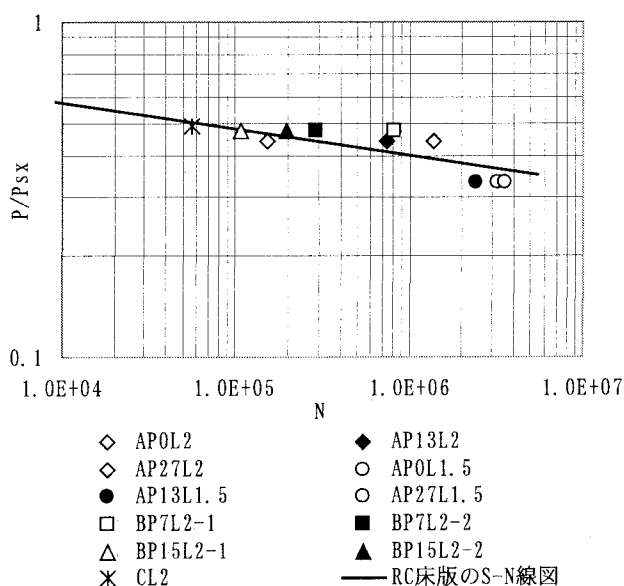


図-7 P_{sx} を用いて表した S-N 線図

を表-6 に示す。表-6 の値を用いて S-N 線図にしたものを図-7 に示す。図中の実線は輪荷重走行試験機による既往の RC 床版についての使用限界寿命についての S-N 曲線である⁸⁾。この S-N 曲線は次式で表される。

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835 \log N + \log 118 \quad (5.5)$$

この図から、RC 床版である CL2 が既往の使用限界寿命を表す S-N 曲線に一致していることが確認できる。また、A シリーズの載荷荷重 2tf の供試体ではプレストレス量の増加に伴って、S-N 曲線より右側へ移動していることが分かる。これによりプレストレスによる疲労耐久性の向上が図れたと言える。A シリーズの載荷荷重 1.5tf の供試体では、プレストレス量の違いはほとんど見られない。これは前述のように載荷荷重が床版の押し抜きせん断耐荷力に対して十分小さく、活荷重たわみそのもの

が小さいことからそれに伴う誤差も大きくなったからということも考えられる。B シリーズのプレストレス量 7.5kgf/cm² の供試体は、RC 床版の S-N 曲線より右側へ移動しているのに対し、プレストレス量 15kgf/cm² の供試体はプレストレスによる耐久性の向上は図られず、プロットした点は RC 床版の S-N 曲線と同程度である。これは PC 鋼棒配置間隔 30cm が梁幅 13.9cm よりも十分に大きいこと、およびプレストレスが比較的大きいことによって、プレストレス導入によって PC 鋼棒の定着部付近において、コンクリートのポアソン効果による引張応力が発生し、それにコンクリートの乾燥収縮等が影響して PC 鋼棒にそってひび割れが発生したためと考えられる。

以上のことからプレストレスが有効に働いていると思われる供試体の結果を、同じ RC 床版の S-N 線図にプロットすると、疲労耐久性の向上からそれぞれの点は RC 床版の S-N 曲線よりも右側へ移動することが分かる。

6. まとめ

本研究は、橋軸直角方向プレ ストレスを導入したコンクリート床版の疲労耐久性を評価するために、小型輪荷重走行試験機による疲労試験を行い、導入プレストレスと使用限界状態に達する寿命との相関関係、ならびに、RC 床版に関する髪-N 曲線との対応について検討を行った。以下に、得られた結論をまとめる。

- (1) 適切に橋軸直角方向プレ ストレスを導入することによって、床版の活荷重たわみは抑制され、床版の疲労耐久性は向上すると言える。
- (2) プレストレスの導入位置間隔と導入量の組み合わせによっては床版に悪影響を及ぼすこともあり、橋軸直角方向 PC 床版の設計には注意を要することが分かった。

7. 今後の課題

図-7 に示す S-N 線図は PC 床版を RC 床版と同様の手法で表現したものであるため、プレストレスによる様々な効果は表現されておらず統一的な S-N 曲線で表すことができていない。よってプレストレス量を取り入れた表現にすることによってプレストレスされた床版特有の S-N 線図を仕上げる必要があるが、今後の課題とする。

参考文献

- 1) 岡村宏一，園田恵一郎：ひび割れ床版の力学的特性，鉄筋コンクリート床版の損傷と疲労設計へのアプローチ，土木学会関西支部鉄筋コンクリート床版疲労設計委員会報告，pp.75-110，1997.7

- 2)前田幸雄, 松井繁之: 輪荷重移動装置による道路橋RC床版の疲労に関する研究, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.221-224, 1984
- 3)松井繁之: 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, 第9回コンクリート工学年次論文報告集, pp.627-632, 1987
- 4)大西弘志, 松井繁之: 橋軸直角方向プレストレスを導入した鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性, 構造工学論文集, vol.44A, 1998.3
- 5)松井繁之: 水環境下における道路橋RC床版の疲労耐久性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
- 6)東山浩士・太田博士・朴 宗珍・松井繁之: PC 床版の押し抜きせん断耐荷力について, 第7回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.13-16, 1997.10
- 7)岡田 清・藤井 学・小林和夫: 圧縮-ねじり荷重下のコンクリート構造学, 国民科学社, pp.114-115, 1990.
- 8)松井繁之・中井博・袴田 雄・竹中裕文: プレストレスを導入するプレキャスト床版の継目部の連続性と耐荷力に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.34A, 土木学会, pp.149-152, 1988.