

論文 PC鋼より線を使用した連続鉄筋コンクリート舗装の疲労特性

武田三弘*¹・大塚浩司*²・福手 勤*³・久野公德*⁴

要旨：本研究は、鉄筋の代わりにPC鋼より線を使用した連続鉄筋コンクリート舗装のひび割れ誘導目地部が、繰り返し载荷を受けた時の力学的挙動を実験的に調べたものである。実験にはスパン4.0mの供試体を用い、34.3kNで 4×10^4 回まで繰り返し载荷を行った。その結果、ひび割れ誘導目地部周辺のPC鋼より線とコンクリートの付着は、繰り返し载荷によって影響を受けるが、ひび割れ幅は逆に減少する傾向がみられた。また、繰り返し载荷後のひび割れ誘導目地部の段差は約0.8mm程度であり、土木学会コンクリート標準示方書（舗装編）に定められている段差量の限界値の約1/2以下の値となった。

キーワード：連続PCケーブル舗装、付着疲労、段差量の限界値

1. まえがき

道路、空港等の舗装には、大別してアスファルト舗装とコンクリート舗装がある。アスファルト舗装は経済性と走行性および補修性に優れた舗装であるが、長期耐久性に問題が残されている。一方、コンクリート舗装は耐久性に優れた舗装であるが、経済性や走行性が問題とされることが多い。この走行性に好ましくない影響を与えているのは、コンクリート舗装に必要な目地である。目地による走行性の影響を改善するため、目地の無い連続鉄筋コンクリート舗装（CRC舗装）や目地間隔の大きいプレストレスコンクリート舗装（PC舗装）が採用されているが、反面、施工性や経済性に問題がある。

このような背景を踏まえて、走行性、耐久性および経済性を同時に満足すると考えられるコンクリート舗装として、既存のコンクリート舗装形式とは異なった新形式のコンクリート舗装である連続PCケーブル舗装（CPC舗装）が考案された。このCPC舗装は、連続鉄筋コンクリート舗装における異形鉄筋の代わりにPC鋼より線を配置し、一定間隔で、ひび割れ誘導目地を設け、ひび割れを制御する形式のコンクリート舗装版である。CPC舗装の特質として、コンクリート舗装版に見られるような目地を無くすることができるので走行性が良くなること、PC鋼より線を使用するので破壊耐力が大きくなること、そして鉄筋継手作業がほとんど不要となるため施工性が良いことが挙げられる。このCPC舗装を実用化するにあたって、ひび割れ誘導目地の構造やその間隔等について研究する必要があるが、これらについては犬飼等 [1] が既に研究発表を行っている。また、PC鋼より線の付着疲労特性については木下等 [2, 3, 4] が研究発表している。しかし、ひび割れ誘導目地を持つCPC舗装の力学的特性についてはまだ余り研究されておらず、不明な点が多い。そこで、本研究は、CPC舗装版を想定した供試体7体を製作し、誘導ひび割れ目地部の繰り返し载荷による荷重伝達性能、PC鋼材とコンクリートの付着疲労特性、誘導ひび割れ目地部の段差量等を実験的に調べたものである。

* 1 東北学院大学助手 工学部土木工学科、工修（正会員）

* 2 東北学院大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

* 3 運輸省港湾技術研究所構造部材料研究室長、工博（正会員）

* 4 株式会社ピー・エス開発技術部次長、工修（正会員）

2. 実験概要

2. 1 供試体の形状寸法および使用材料



図-1 供試体形状寸法

実験には、セメントコンクリート舗装版の一部を想定したスパン4mの梁形供試体を用いた。供試体の形状寸法ならびに配筋状況を図-1に示す。この供試体には

C P C C 舗装特有の人為的にひび割れを発生させるひび割れ誘導目地が供試体片端部から0.5m、2.0m、3.5mの3断面に設けてある。

C P C C 舗装は基本的には緊張力を与えないが、打設後の乾燥収縮により、結果的には緊張力が作用している状態になる。この様な状態を想定して、供試体には緊張力を導入すると同時に、ひび割れの幅も同時に調整した。実験にはひび割れ誘導目地部のひび割れ幅、緊張力等を変化させた7体を用いた。供試体の設置条件の詳細を表-1に示す。また、供試体を使用したコンクリートの配合を表-2に、P C 鋼より線の力学的特性を表-3に示す。

2. 2 載荷条件

(1) 載荷荷重の設定

疲労試験の載荷荷重の設定に当たっては、地盤支持力 $K_{75} = 68.7 \text{ N/cm}^2$ (7.0 Kg/cm^2) の状態下の舗装版の版中央部に、航空機の車輪荷重 (B-747 400) が載荷した場合の舗装版に発生させるたわみ量 (0.1917 mm) と同じたわみを生じさせるのに必要な荷重を、供試体の部材寸法に合わせて換算し、本疲労試験の上限荷重、 34.3 kN (3.5 tf) とした。

(2) 載荷方法

載荷方法は、図-2に示すように、供試体を硬質ゴムで構築した仮想路盤の上に設置し、両端から緊張力をかけてひび割れ誘導目地に目標とする幅のひび割れを入れた。P C 鋼より線をそのまま両端で固定した後、載荷時に供試体両端部が跳ね上がるのを、治具を用いて押さえた。載荷は、アクチュエーターを用いて、供試体中央部のひび割れ誘導目地部の片側に $100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ の載荷版で一点載荷した。本試験の繰り返し載荷回数は 4×10^4 回とした。空港コンクリート舗装版の

表-3 P C 鋼より線の力学的特性

線径 (mm)	17.8
断面積 (mm^2)	208.4
引張荷重 (KN)	414
伸び (%)	7.4
降伏荷重 (KN)	377
弾性係数 (N/mm^2)	190600

表-1 供試体設置条件

供試体名	平均ひび割れ幅 (mm)	緊張力 (KN)	地盤支持力 (N/cm^2)
No.1	0.71	34.72	29.4
No.2	0.53	11.77	68.7
No.3	0.32	10.30	29.4
No.4	0.24	16.87	68.7
No.5	0.27	13.53	29.4
No.6	0.28	13.63	68.7
No.7	1.27	62.57	29.4

表-2 コンクリート配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (Kg/m^3)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
25	8	36.6	37.3	172	470	611	1060	-

設計では設計反復回数は、 2×10^4 回（耐用年数10年）を基本としているが、現実的には、コンクリート舗装版が10年で打ち換えられるものでもなく、更に長期間使用されるものと考えられることなどを踏まえて、設計上2倍の安全率を考慮した。

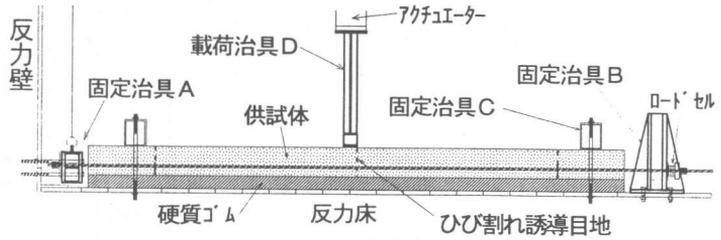


図-2 載荷方法

2. 3 測定項目および測定方法

PC鋼より線の引張力はロードセル（図-2 参照）を用いて、PC鋼より線のひずみはPC鋼より線の表面に貼付したストレインゲージを用いて測定した。各ひび割れ誘導目地部のひび割れ幅および段差はコンタクトゲージおよび亀裂計を用いて、たわみはダイヤルゲージを用いて測定した。測定は、上記の測定項目を、繰り返し回数が1回、 1×10^3 回、 2×10^3 回、 5×10^3 回、 1×10^4 回、 2×10^4 回、 3×10^4 回、 4×10^4 回毎に行った。

3. 実験結果

3. 1 PC鋼より線の付着性状

図-3は静的に34.3kNまで載荷した場合の供試体No.5の誘導目地付近のPC鋼より線のひずみ分布を示している。図からも分かるが、載荷荷重によってひずみが増加する範囲（付着伝達長さ）は、ひび割れ誘導目地部から20cm程度の範囲であった。

図-4は、支持力係数29.4N/cm²の場合の、静的載荷と 4×10^4 回繰り返し荷重を受けた後のPC鋼より線のひずみ分布の比較を示している。また同様に、図-5は支持力係数68.7N/cm²の場合

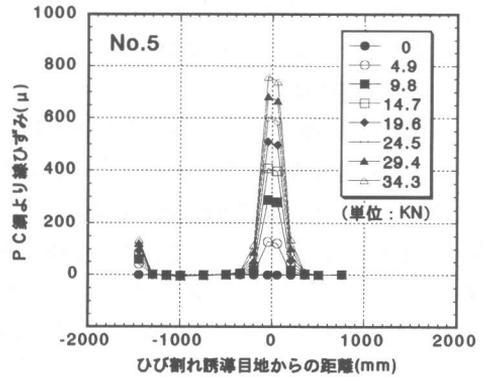


図-3 ひずみ分布（静的）

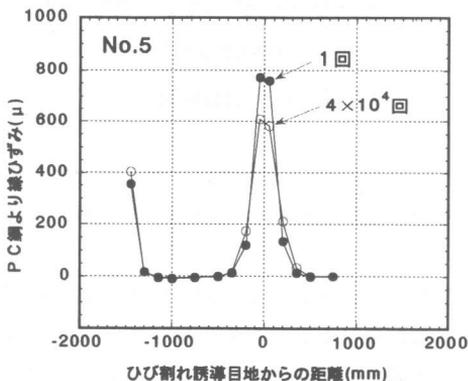


図-4 ひずみ分布（動的：K=29.42KN）

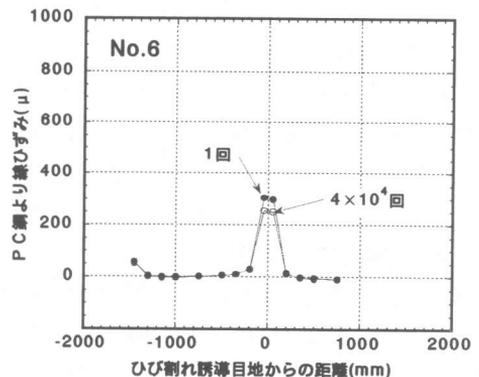


図-5 ひずみ分布（動的：K=68.65KN）

合の、ひずみ分布の比較を示している。いずれの場合においても、供試体中央部のひび割れ誘導目地部においては、 4×10^4 回繰り返し荷重を受けた方が P C 鋼より線のひずみが小さくなっている。一方、ひび割れ誘導目地の周辺においては、ひずみが静的荷重よりも大きくなっている。これはひび割れ誘導目地の周辺の P C 鋼より線とコンクリートとの付着が、繰り返し荷重を受けることによって劣化したためであると考えられる。

図-6 は供試体中央部のひび割れ誘導目地部の P C 鋼より線のひずみが、繰り返し荷重を受けることによって、どの様に推移するか変化量を表したものである。供試体 No. 2 から No. 6 のひび割れ誘導目地部の P C 鋼より線のひずみは、約 1×10^3 回までの繰り返し荷重によって急激に低下し、その後の繰り返し荷重には、なだらかに減少する傾向がみられた。また、繰り返し荷重によってひずみが増加する範囲（付着伝達長さ）は、ひび割れ誘導目地部から約 35cm（静的荷重時の 75% 増）の範囲であり、地盤支持力が小さいもの程この範囲が大きくなる傾向がみられた。一方、供試体 No. 1 および No. 7 には、供試体設置時の緊張力が大きかったため、ひび割れ誘導目地部での付着劣化が既に大きく進んでおり、繰り返し荷重によるひずみの減少はみられなかった。

3. 2 誘導目地部のひび割れ性状

(1) ひび割れ幅

図-7 に、供試体中央部のひび割れ誘導目地部のひび割れ幅の変化量と、繰り返し回数との関係を示す。測定は、供試体側面の 3 箇所（上段、中段、下段）で行った。この図から、上段（荷重側）において、繰り返し回数が 1×10^3 回までは、ひび割れが縮む傾向がみられた。これは図-4 および図-5 で述べたように、繰り返し荷重による付着の劣化により、P C 鋼より線がコンクリートから抜け出したために、ひび割れ部の P C 鋼より線の応力が減少（収縮）し、ひび割れ幅が減少したのと考えられる。中段においてもそのような傾向がわずかにみられたが、下段（路盤側）においては、ひび割れ幅の増減はほとんどなかった。これは、下面の拘束が影響したのではないかと考えられる。またこの傾向は、緊張力が小さい供試体に顕著にみられた。

(2) ひび割れ部の段差

図-8 に、供試体中央部のひび割れ誘導目地部のひび割れの段差量と繰り返し回数との関係を示す。ここで段差量は、供試体中央部のひび割れ誘導目地部に発生したひび割れ断面の鉛直方向のズレと定義することにし、その鉛直方向のズレを測定できる亀裂計とダイヤルゲージによってこれを測定した。図からも分かるように、段差量は $1 \sim 5 \times 10^3$ 回程度までの繰り返し荷重により急速

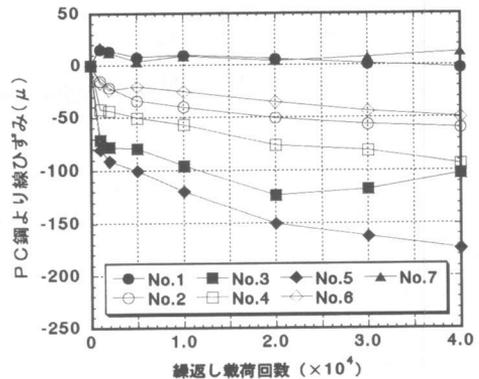


図-6 繰り返し荷重による P C 鋼より線ひずみの変化率

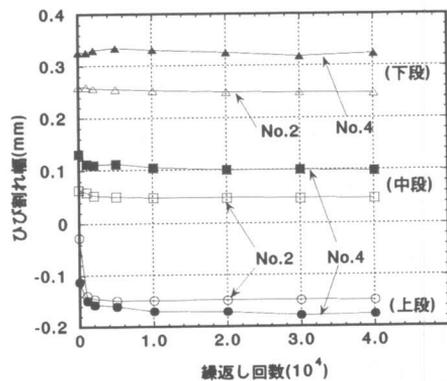


図-7 ひび割れ幅の変化量

表-4 段差量の限界値(mm)

検討する舗装	ヤード、市内道路	一般道路	自動車専用道路	高速自動車道路	空港滑走路
標準速度(km/h)	40	60	80	100	250
サービス性能Ⅰ限界状態	15	12	10	5	2
サービス性能Ⅱ限界状態	20	15	12	10	5

に増加し、その後、ばらつきもみられるが大きな変化はせず、 4×10^4 回に至っている。段差量の最大値は、 4×10^4 回繰り返し荷重を受けた場合でも0.8mm程度であり、土木学会 コンクリート標準示方書(舗装編) [2] に記されている段差量の限界値(空港滑走路のサービス性能Ⅰ限

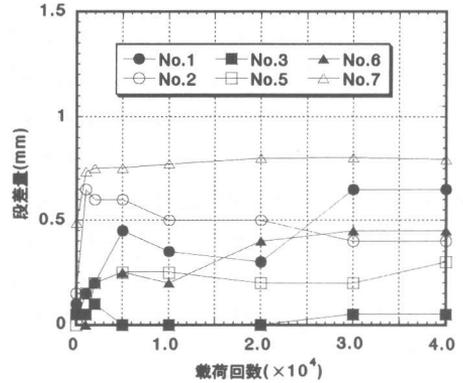


図-8 段差量と载荷回数との関係

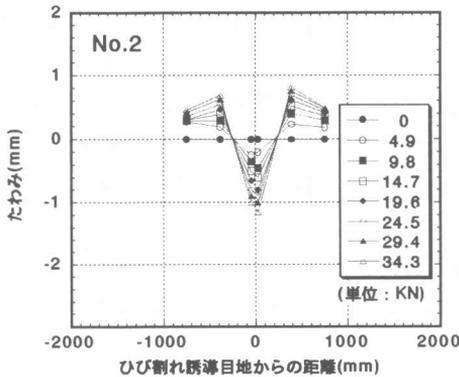


図-9 たわみ分布(静的: K=68.65KN)

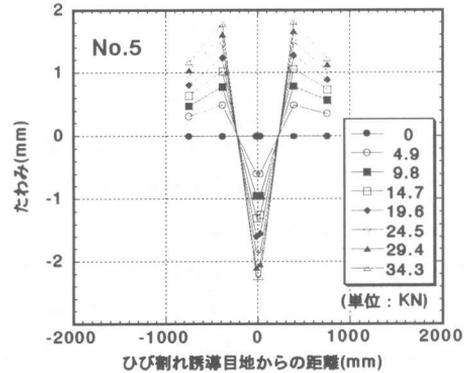


図-10 たわみ分布(静的: K=29.42KN)

界状態)の2mmの1/2以下の値であった(表-4参照)。

3. 3供試体たわみ性状

図-9に、供試体No.2(支持力係数68.7N/cm²)のたわみと静的载荷荷重の関係を示す。また同様に、図-10は供試体No.5(支持力係数29.4N/cm²)のたわみと静的载荷荷重の関係を示す。いずれの場合においても、供試体中央部のひび割れ誘導目地部において、最大のたわみとなり、その周辺が浮き上がる現象がみられた。この傾向は、支持力係数が小さいものほど顕著に現れた。

図-11は、支持力係数29.4(N/cm²)の場合の、静的载荷と 4×10^4 回繰り返し荷重を受けた後のたわみの比較を示している。図からも分かるように、 4×10^4 回繰り返し荷重を受けた後の方が、わずかにたわみが小さくなる傾向がみられた。また、表-5は、34.3kN時の静的载荷と 4×10^4 回繰り返し荷重のひび割れ誘導目地部のたわみの平均値一覧を示している。この表からも 4×10^4 回

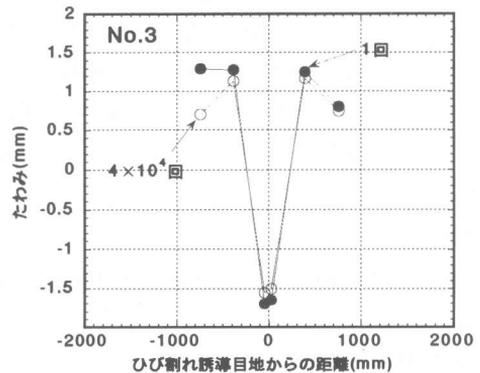


図-11 繰り返し载荷によるたわみの比較

繰り返し荷重を受けた後の方が、たわみが小さくなる傾向があることが分かる。これは、前述のように、繰り返し荷重を受けることによってひび割れの幅が縮み、ひび割れ部のかみ合わせが良くなったために、たわみが小さくなったものと考えられる。繰り返し載荷を受けた後の最大たわみは、地盤支持力68.7N/cm²の場合には、土木学会コンクリート標準示方書（舗装編）〔2〕に記されているたわみ量の限界値（空港：中央部）1.25mmより小さな値となるが、地盤支持力29.4N/cm²の場合には大きな値となった。

表-5 繰り返し載荷によるたわみの比較

供試体	1回 (mm)	4×10 ⁴ 回 (mm)	地盤支持力 (N/cm ²)
NO.1	2.90	2.55	29.4
NO.2	1.08	1.05	68.7
NO.3	1.68	1.55	29.4
NO.4	1.75	0.50	68.7
NO.5	2.25	2.00	29.4
NO.6	0.88	0.30	68.7
NO.7	2.90	2.80	29.4

4. まとめ

連続PCケーブル（CPC）舗装のひび割れ誘導目地部が、繰り返し載荷を受けたときの荷重伝達、たわみ、ひび割れ開口変位、付着疲労、段差等の力学的挙動について調べた結果、実験の範囲内で以下のことが言える。

（1）ひび割れ誘導目地部のPC鋼より線付着伝達長さは、静的に載荷した場合は、約20cm程度であったが、4×10⁴回の繰り返し載荷を受けると付着劣化を生じて、その長さが約35cm（1.75倍）まで増加した。この付着劣化のためPC鋼より線が抜け出し、目地部のPC鋼より線のひずみが減少する傾向がみられた。

（2）誘導目地部のひび割れ幅は、試験体が繰り返し載荷を受けると減少する傾向がみられた。これはPC鋼より線とコンクリートとの付着劣化を起こし、ひび割れ部のPC鋼より線が抜けだし、応力が低下し、収縮したためであると思われる。

（3）ひび割れ誘導目地部の段差は、1～5×10³回程度までの繰り返し載荷により急速に増加し、その後、ばらつきもみられるが大きな変化はせず、4×10⁴回に至っている。段差量の最大値は、4×10⁴回繰り返し載荷を受けた場合でも0.8mm程度であり、土木学会コンクリート標準示方書（舗装編）に記されている段差量の限界値の2mmの1/2以下の値であった。

（4）たわみは、静的載荷を受けた場合よりも、4×10⁴回繰り返し荷重を受けた後の方が、小さくなる傾向がみられた。これは、繰り返し荷重を受けることによって、(2)で述べたように、ひび割れの幅が縮み、ひび割れ部のかみ合わせが良くなったために、たわみが小さくなったものと考えられる。

〔謝辞〕

本実験に際し、東北学院工学部土木工学科大塚研究室生、相沢雅俊、大石宏和、大山 哲、菅野博靖の協力を受けた。ここに謝意を表する。

〔参考文献〕

- 1) 犬飼晴雄、三浦 尚、福手 勤：PC鋼より線を使用した部材の最大ひび割れ間隔に関する 実験的研究、土木学会第51回年次学術講演会概要集、pp.56-57、1996.9
- 2) 木下哲哉、大塚浩司、鈴木 仁：PC鋼より線の付着疲労強度に関する研究、土木学会東北支部技術研究発表会講演概要、pp.522-523、1994.3
- 3) 木下哲哉、大塚浩司、犬飼晴雄：PC鋼より線の付着疲労特性に関する研究、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第5部、pp.1080-1081、1994.9
- 4) 市川政英、大塚浩司、木下哲哉：非緊張状態のPC鋼より線の付着性状に関する実験研究、土木学会東北支部技術研究発表会（平成6年度）講演概要、pp.622-623、1995.3
- 5) 土木学会コンクリート標準示方書〔平成8年制定〕舗装編