

薄肉UFCプレテンション部材の構造性能に関する検討

鹿島建設(株)	正会員	工修	○一宮	利通
阪神高速道路(株)		工博	金治	英貞
阪神高速道路(株)	正会員	工修	小坂	崇
鹿島建設(株)		工修	樽谷	早智子

Abstract : Authors developed the deck slab whose own weight was almost the same as that of orthotropic steel deck slab by using ultra high strength fiber reinforced concrete (UFC). Developed UFC deck slab consists of 40mm thick slab portion and 83mm tall rib portion and prestress is introduced by pretensioning system. The fatigue durability of the UFC deck slab was confirmed by a wheel loading test. In the wheel loading test, minute cracks occurred along prestressing steel on the rib side. Therefore, in this study, a cause of the cracks was examined and an influence to structural performance of the pretensioned member by cyclic loading experiment. As a result, it was confirmed that the cracks did not influence structural performance of the pretensioned member.

Key words : Ultra high strength fiber reinforced concrete, Poisson's ratio, Bending failure

1. はじめに

著者らは、超高強度繊維補強コンクリート (UFC) を用い、自重が鋼床版と同程度で耐久性の高い道路橋床版を開発している¹⁾。本床版は2方向リブ付き床版であり、これまでに試設計¹⁾や輪荷重走行試験²⁾により構造成立性を検証している。輪荷重走行試験において、設計輪荷重の約2倍の輪荷重載荷時ではあるが、リブ側面にPC鋼材に沿って微細なひび割れが発生した。構造性能に与える影響は小さかったが、ひび割れ発生の原因について検討する必要がある。また、PC鋼材に沿ったひび割れは付着を劣化させる可能性があるが、輪荷重走行試験は弾性範囲内での確認であったため、破壊性状に及ぼす影響を確認しておく必要がある。

そこで、本研究では、原因について検討するとともに、リブ側面のひび割れを梁部材で再現し、破壊性状に与える影響を検討した。

2. UFC床版および輪荷重走行試験の概要

UFC床版の適用概念を図-1に、輪荷重走行試験の試験体および試験の概要を図-2に示す。

UFC床版は橋軸方向に2.5mピッチで配置される鋼横桁または鋼横リブおよび鋼主桁の4辺で支持される構造である。本床版は橋軸方向および橋軸直角方向に約250mm間隔でリブを有し、床版リブ位置での高さは123mm、リブのない版部材の厚さは40mmである。リブには高強度PC鋼材1S15.7mmが2本ずつ配置され、プレテンション方式で2方向にプレストレスが導入される¹⁾。

試験体は、実構造物と同様に橋軸方向に2.5mピッチに配置された横リブに支持される構造とし、表-1に示すエトリングイト生成系のUFC³⁾ (AFt系UFC) を用いて製作した。PC鋼材を233kN/本で

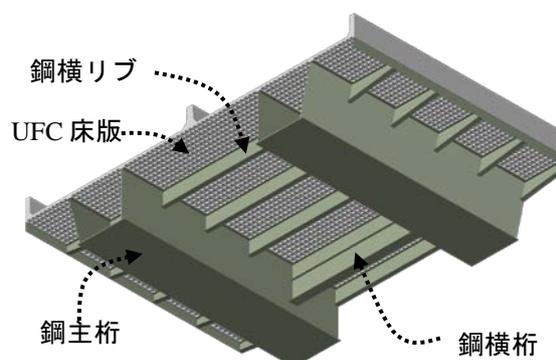


図-1 適用構造の概念図

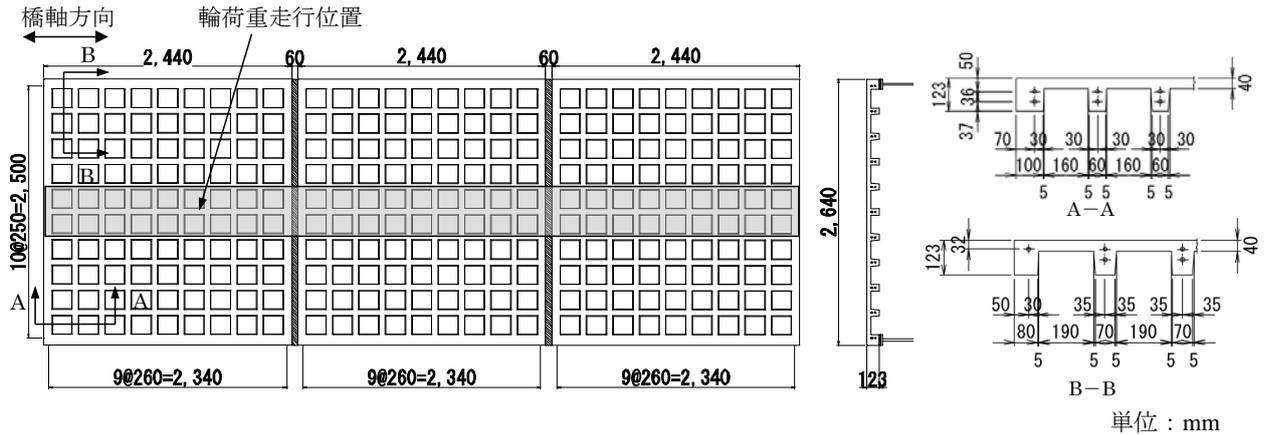


図-2 輪荷重走行試験体および試験の概要

表-1 Aft系UFCの配合

空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
	水	プレミックス結合材	骨材	混和剤	
2.0	195	1287	905	32.2	137.4

水の単位量は混和剤の水分を含む

緊張してUFCを打設し、圧縮強度が100～120 N/mm²で緊張力を解放してUFC床版にプレストレスを導入した。その後、85℃の蒸気養生を24時間行い、試験時の圧縮強度は182～198N/mm²であった。橋軸方向に3枚の床版を並べ、中央の試験体は横リブのみで支持される2辺支持とし、両側の試験体は鋼主桁または鋼縦桁で支持されることを想定して4辺支持とした。輪荷重走行試験では、最大220kNまで載荷できるジャンボタイヤを用いて100kNから220kNまで30kN刻みで階段状に荷重を増加させながら各荷重で4万回ずつ繰返し載荷し、合計20万回（10万往復）輪荷重を走行させた。図-3に載荷プログラムを示す。

190kNでの4万回載荷後、リブ付け根の側面水平方向に、目視のみでは確認は困難であるがアセトンの蒸発状況の違いにより認識できる程度の微細なひび割れが観察された(写真-1)。また、220kNでの4万回までに同様なひび割れが数十か所で観察された。既往のUFCの載荷実験で確認された0.01mm程度のひび割れは目視で確認できたため、この0.01mm未満であったと考えられた。ひび割れが生じたのは設計輪荷重の約2倍の荷重載荷時であったこと、UFCはひび割れが生じても鋼繊維の補強効果によりひび割れ発生強度以上の引張応力を伝達することができること、たわみ分布やひずみ分布からは剛性の低下は見られなかったことから、床版の構造性能に与える影響は小さいと考えられた。

3. ひび割れ原因の推定

輪荷重走行試験では、試験前はひび割れは確認されず、走行試験中にひび割れが確認された。輪荷

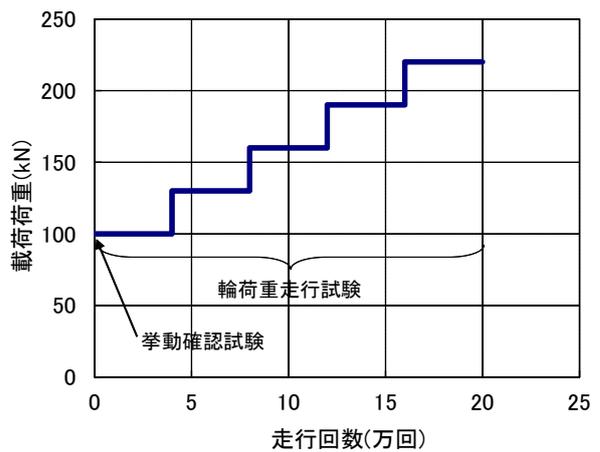


図-3 輪荷重走行試験載荷プログラム

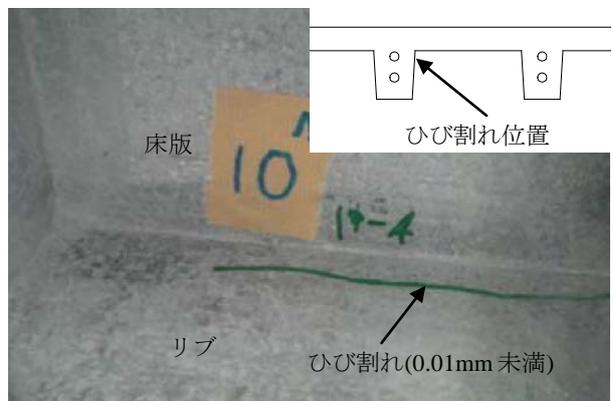


写真-1 リブ側面の微細ひび割れ

重走行試験に用いられたAFt系UFCでは100mm×100mm×400mmの試験体を用いた曲げ疲労試験が行われており、ひび割れ発生強度以下の応力振幅では、200万回でもひび割れが発生しないことが確認されている³⁾。したがって、輪荷重の繰返し载荷による変動応力だけでなく、初期応力が生じていたと考えられる。

ひび割れはほぼPC鋼材に沿って生じていることから、初期応力は、プレテンション方式でプレストレスを導入する際に生じた可能性が考えられる。伝達長区間ではPC鋼材がすべることによってPC鋼材の軸ひずみの方がUFCの軸ひずみよりも大きくなり、PC鋼材のポアソン効果によってUFCに円周方向の引張応力が生じると考えられる。しかし、ひび割れは伝達長区間外の試験体中央付近にも発生していることから、UFCとPC鋼材のポアソン比の差(約0.2と0.3)差によってPC鋼材のポアソン効果の方が大きくなり、UFCに円周方向の引張応力が生じたと考えられる。そこで、ポアソン比の差による引張応力度がどの程度になるか確認するため、FEM解析により検討した。

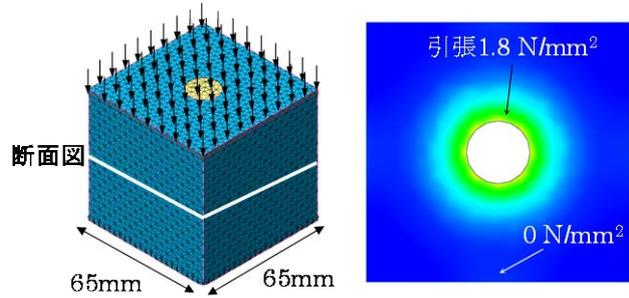


図-4 プレストレス導入時円周方向引張応力度

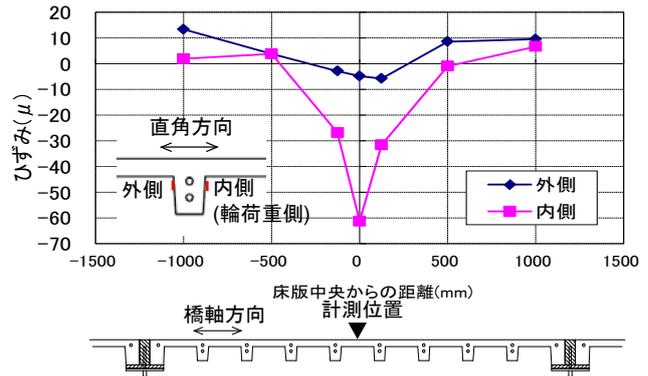


図-5 リブ側面の鉛直ひずみ

図-4に解析モデルおよび解析結果を示す。UFCとPC鋼材のヤング係数はそれぞれ33.6kN/mm²と200kN/mm²、ポアソン比はそれぞれ0.2と0.3とした。伝達長区間外を想定してUFCとPC鋼材は一体化されていると仮定し、PC鋼材は円でモデル化した。プレストレス力は、UFC床版に導入される約20N/mm²の応力度に相当するひずみ600μを軸方向に強制変形として与えた。PC鋼材の方がポアソン比が大きいためPC鋼材の横方向ひずみの方が大きくなり、UFCにはPC鋼材周囲の円周方向に1.8N/mm²の引張応力度が生じた。PC鋼材は円でモデル化した、実際には7本より線であるため、素線周辺の応力の干渉によって局所的にはより大きい引張応力度が生じている可能性があるが、UFCのひび割れ発生強度の特性値8N/mm²よりも小さいと考えられる。

輪荷重の作用による挙動確認試験結果の例として、100kNの輪荷重を影響線载荷した場合の中央から2番目の橋軸方向リブの側面鉛直ひずみを図-5に示す。リブ側面の鉛直ひずみは計測点の直近に载荷された場合に圧縮ひずみが生じており、圧縮ひずみは最大で-61μ(応力度に換算すると-2.8N/mm²)であった。ひび割れが確認された190kN载荷時には、約2倍程度の応力度が作用したと考えられる。

プレストレス導入による引張応力度や輪荷重走行試験時における計測点以外の応力変動の定量的な評価は難しいものの、プレストレス導入時においてUFCとPC鋼材のポアソン比の差によってUFCにPC鋼材直角方向の引張応力が生じ、引張応力が残留した状態のリブ側面に輪荷重の繰返し载荷による除荷側への変動応力が作用することによって、ひび割れが顕在化した可能性がある。ただし、ひび割れ発生強度以下程度の引張応力度では繰返し载荷によってひび割れは発生しないため、FEM解析では再現できていないPC鋼材近傍に生じた局所的な応力が生じていた可能性がある。

4. リブ側面のひび割れ再現試験

UFCとPC鋼材のポアソン比の差によって生じる円周方向の引張応力度はPC鋼材周辺に生じるものであ

り、UFC表面における応力度は小さいため試験で内部応力を再現して原因を究明するのは困難と考えられる。そこで、輪荷重走行試験と同様な応力状態を試験体に与えてリブ側面のひび割れを再現し、破壊性状に与える影響を検討することとした。

試験体は、図-6に示すようにUFC床版のリブ1本分を切り出したプレテンション梁試験体とした。PC鋼材は床版と同様に高強度PC鋼材1S15.7を用い、233kN/本で緊張してUFCを打設した。試験体は表-1に示すAFt系UFCを用いて製作し、プレストレス導入時の圧縮強度は153N/mm²、二次養生後の圧縮強度、ひび割れ発生強度および引張強度はそれぞれ205N/mm²、10.6N/mm²、13.6N/mm²であった。

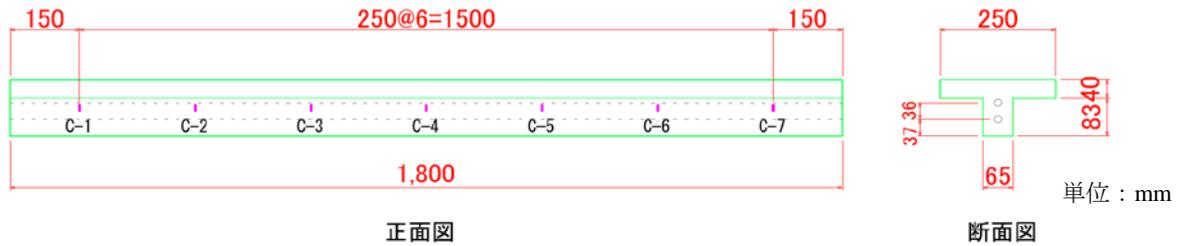


図-6 試験体の概要

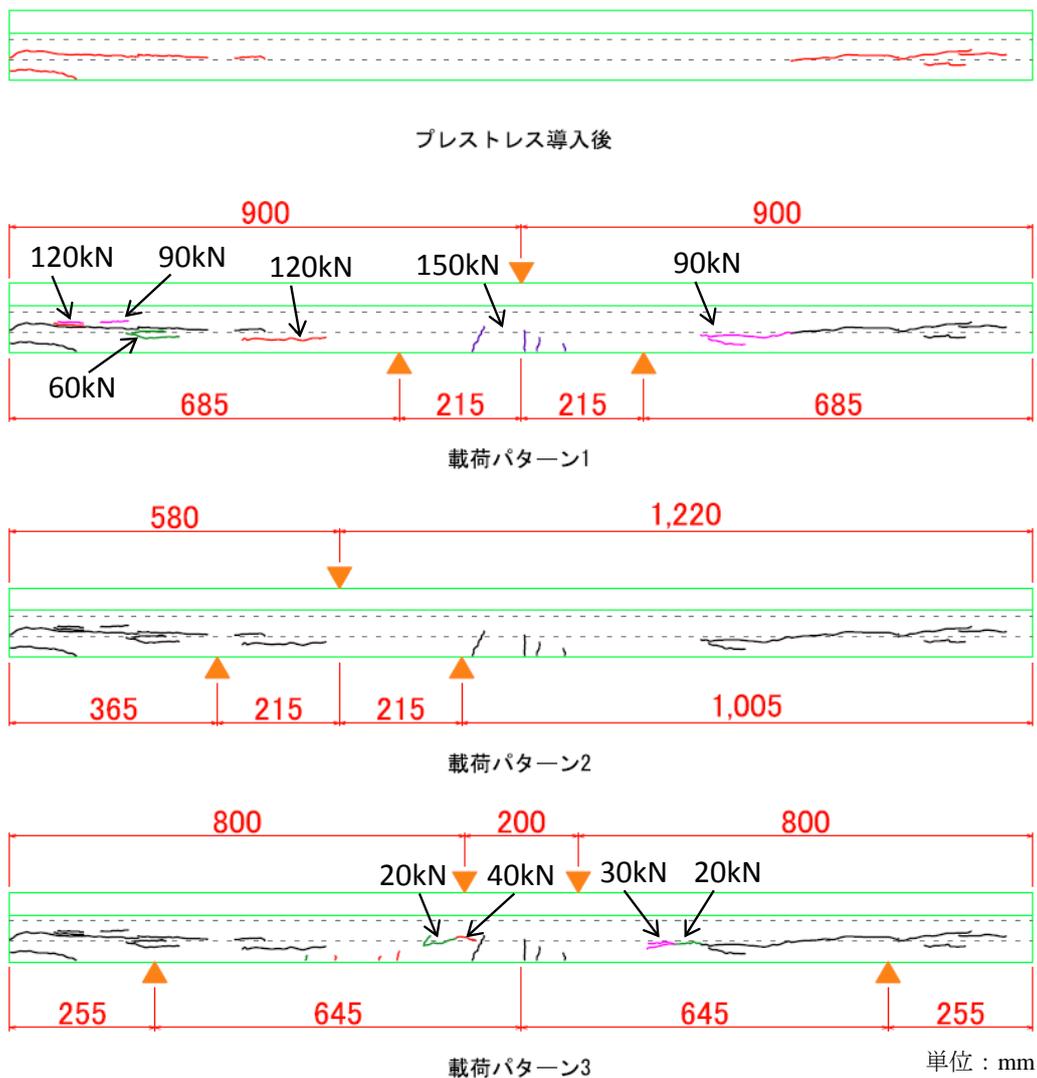


図-7 荷重パターンおよび試験体のひび割れ発生状況

表-2 載荷荷重と回数

載荷パターン	載荷荷重 (kN)	等価輪荷重 (kN)	載荷回数 (回)
1	60	95	20,000
	90	143	20,000
	120	190	20,000
	150	285	1
2	60	95	20,000
3	20	95	20,000
	30	143	20,000
	40	190	20,000

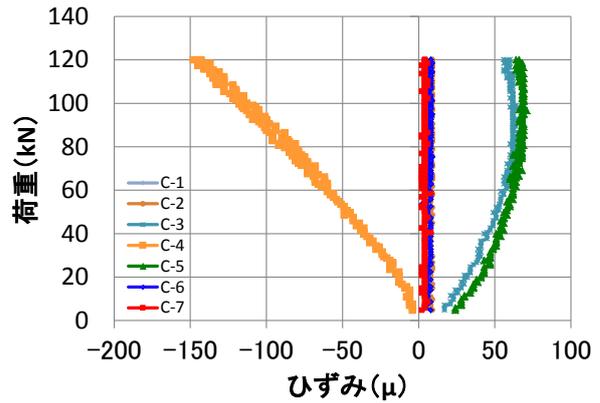


図-8 リブ側面の鉛直ひずみ

繰返し載荷試験では、試験体を単純支持し、支持位置・載荷位置や支間長を図-7に示すように変化させて載荷した。表-2に示すように、各載荷荷重で2万回の繰返し載荷を基本とした。表中の等価輪荷重は、梁試験体と試験体下縁の最大引張応力度が同じになる輪荷重走行試験における輪荷重である。載荷する荷重の振幅は、輪荷重載荷試験でひび割れが確認された190kN載荷による載荷点直下の下縁引張ひずみ1000 μ が再現される荷重（例えば、せん断支間長215mmの場合120kN）を基本とし、その半分の荷重から曲げひび割れ発生まで載荷荷重を増加させた。載荷中に図-6に示すC-1~C-7でリブ側面の鉛直ひずみを計測した例として、載荷パターン1における計測結果を図-8に示す。載荷荷重120kNでリブ側面の鉛直ひずみは-140 μ であった。図-5より輪荷重100kNで-60 μ のひずみが生じており、載荷パターン1における載荷荷重120kNと輪荷重走行試験における載荷荷重190kNで同程度の鉛直ひずみがリブに生じていたと考えられる。

繰返し載荷試験によって生じたひび割れを図-7に示す。プレテンション方式でプレストレスを導入する時点で、試験体端部付近にリブに水平ひび割れが生じたのが目視により確認された。プレストレス導入のみでひび割れが生じたのは、試験体端部ではPC鋼材の付着切れによってPC鋼材の軸方向ひずみが大きくなったためと考えられる。UFC床版ではプレストレス導入時にはひび割れが確認されなかったが、直角方向のリブが拘束することによってひび割れが抑制されたためと考えられる。

載荷パターン1では、載荷荷重60kN（等価輪荷重95kN）で2万回載荷中に支点の外に水平ひび割れが生じ、載荷荷重を大きくしていくとともに水平ひび割れが増加した。載荷荷重150kNでは曲げひび割れが生じたため、1回で載荷を終了した。載荷パターン2では、有効プレストレスが小さかったため載荷荷重60kN（等価輪荷重95kN）で2万回載荷したが、水平ひび割れは増加しなかった。載荷パターン3では、載荷荷重20kN（等価輪荷重95kN）で2万回載荷中に載荷点近傍に水平ひび割れが生じ、載荷荷重を大きくしていくとともに水平ひび割れが増加した。梁の繰返し載荷試験では、等価輪荷重が190kNよりも小さい荷重の繰返し載荷で水平ひび割れが生じたが、2方向のリブ付き床版では直角方向のリブが拘束するため、梁試験体ではリブの水平ひび割れが生じやすかったものと考えられる。

リブ側面ひび割れの再現試験では原因を特定するには至らなかったが、プレテンション部材に繰返し載荷することによって、リブの水平ひび割れを再現することができた。

5. 曲げ載荷実験

輪荷重走行試験では、設計輪荷重の倍以上の荷重を載荷しているが、曲げひび割れが生じない弾性範囲での試験であり、リブ側面に生じるひび割れがUFC床版の破壊性状に与える影響は確認できていない。PC鋼材に沿ってリブ側面に生じたひび割れはPC鋼材の付着劣化を生じさせることが懸念されるため、前章でリブ側面のひび割れを再現した試験体を用いて曲げ載荷実験を行い、破壊性状に与える影

響を確認した。載荷は、図-9に示すようにせん断支間を545mm、等曲げ区間を200mmとして2点載荷による曲げ実験を行った。

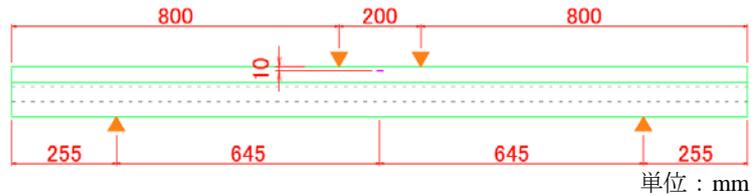


図-9 曲げ載荷実験の概要

図-10に載荷荷重と試験体中央変位の関係を、図-11に載荷荷重とUFC上縁ひずみの関係を示す。最大荷重110kNでPC鋼材降伏前に上縁のUFCが圧縮破壊した。試験体端部においてPC鋼材の引込みは確認されず、付着力は保たれていたと考えられる。また、曲げ破壊実験によってリブの水平ひび割れは増えていなかったため、リブの水平ひび割れは繰返し載荷によって生じたものと考えられる。

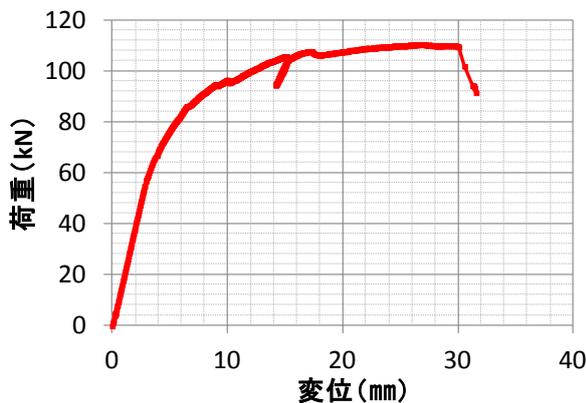


図-10 載荷荷重-中央変位

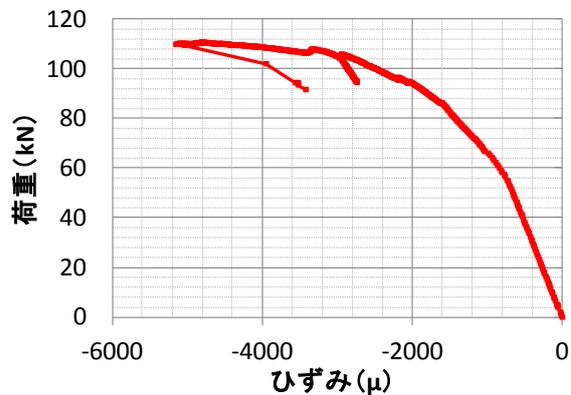


図-11 載荷荷重-UFC上縁ひずみ

6. おわりに

UFC床版のリブ1本分を切り出した梁試験体を用いて繰返し載荷試験によるリブ側面のひび割れ再現試験、ならびに破壊性状を確認するための曲げ載荷実験を行った。リブの水平ひび割れの原因を特定するには至らなかったが、以下のことが確認された。

- ・プレストレス導入時においてUFCとPC鋼材のポアソン比の差によってUFCにPC鋼材直角方向の引張応力が生じ、引張応力が残留した状態のリブ側面に輪荷重の繰返し載荷による除荷側への変動応力が作用することによって、ひび割れが顕在化した可能性が示された。
- ・繰返し載荷によってリブ側面に水平ひび割れが生じたが、ひび割れ幅が大きくなって破壊に至ることはなかった。
- ・ひび割れを発生させた試験体を用いて曲げ載荷実験を行い、付着力の低下によって付着破壊することなく曲げ圧縮破壊することを確認した。

本研究を行うにあたり、大阪工業大学松井教授、長岡技術科学大学長井教授、東京工業大学二羽教授および神戸大学三木准教授にご指導をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小坂ら：鋼床版と同等の軽量かつ耐久性の高いUFC道路橋床版の開発，第22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，2013年10月
- 2) 一宮ら：鋼床版と同等の軽量かつ耐久性の高いUFC道路橋床版の輪荷重走行試験，第22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，2013年10月
- 3) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書，技術推進ライブラリーNo.3，2006.11