

高強度繊維補強コンクリートとAFRP緊張材のPC床版の疲労特性に関する研究

三井住友建設(株)	正会員	工修	○三加	崇
西日本高速道路(株)	正会員		大城	壮司
西日本高速道路(株)	正会員		松井	隆行
三井住友建設(株)	正会員	博(工)	永元	直樹

Abstract : In order to enhance the durability of concrete bridges, the authors developed a “Non-metal bridge” that completely eliminates the use of steel members such as steel reinforcements and prestressing steel. The structure was made from high-strength fiber reinforced concrete and aramid FRP rods as prestressing tendons. We conducted wheel load running tests to verify the fatigue durability of the deck slab. The test specimen was full scale model and fabricated as precast segment method, in the same way as the proposed bridge. This test showed that the proposed structure provided adequate fatigue durability for more than 100 years of service. After that test, we carried out static loading test by using that specimen and confirmed that it had a certain amount of strength.

Key words : High-strength fiber reinforced concrete , Aramid FRP tendon , Prestressed concrete slab, Fatigue durability

1. はじめに

近年、経年劣化した橋梁構造物では、塩害や中性化などによって鋼材が腐食してコンクリートのはく落が発生している。さらに、鉄筋やPC鋼材の腐食が進行し断面欠損や破断が生じた場合には、構造性能が低下することが懸念される。そこで、著者らは鉄筋やPC鋼材を使用せず、高強度繊維補強コンクリートと錆びない新素材としてアラミドFRP緊張材¹⁾によって構成された橋梁構造物の開発を行っている。このような構造物は、今後膨大な数の補修補強が予想されるなかで、維持管理作業を低減し長寿命化を図る一手法であると考えられる。

本構造のコンクリートは短繊維とアラミドFRP緊張材のみで補強されているため、床版の疲労耐久性が懸念された。これまでに、PC床版などにおいて疲労耐久性に関する研究²⁾は行われているが、鋼材が配置されていない床版での検討は、ほとんど行われていない。本論文では、鋼材が配置されていない床版の疲労耐久性を検証するために、高強度繊維補強コンクリートとアラミドFRP緊張材で構成する橋梁構造物の上床版をモデル化して試験体を製作し、輪荷重走行試験を実施した。また、輪荷重走行試験後に試験体の一部を切り出して静的載荷試験を実施し、解析値と比較して耐力を評価した。

2. 試験体形状

試験体の形状を図-1に示す。試験体は、箱桁断面を想定した上床版の切り出しモデルである。試験体は、中央に配置した試験対象となる2つの中央セグメントと橋軸方向の軸力が中央セグメントに均等に作用するように両端に配置した端部セグメントの4つのセグメントで構成されている。床版には橋軸直角方向に水平リブを設けている。試験体の寸法は、全長8060mm、幅3950mm、床版厚200mmである。使用材料を表-1に示す。中央セグメントは、鋼繊維を使用した高強度繊維補強コンクリートで構成されている。横締め緊張材は、φ7.4アラミドFRPロッドを4本束ねたアラミドFRP緊張材である。セグメントには鉄筋およびPC鋼材は使用していない。アラミドFRP緊張材は、1セグメントあたり床版に10本、水平リブに2本を配置した。プレストレスの導入はプレテンション方式により、試験体にプレ

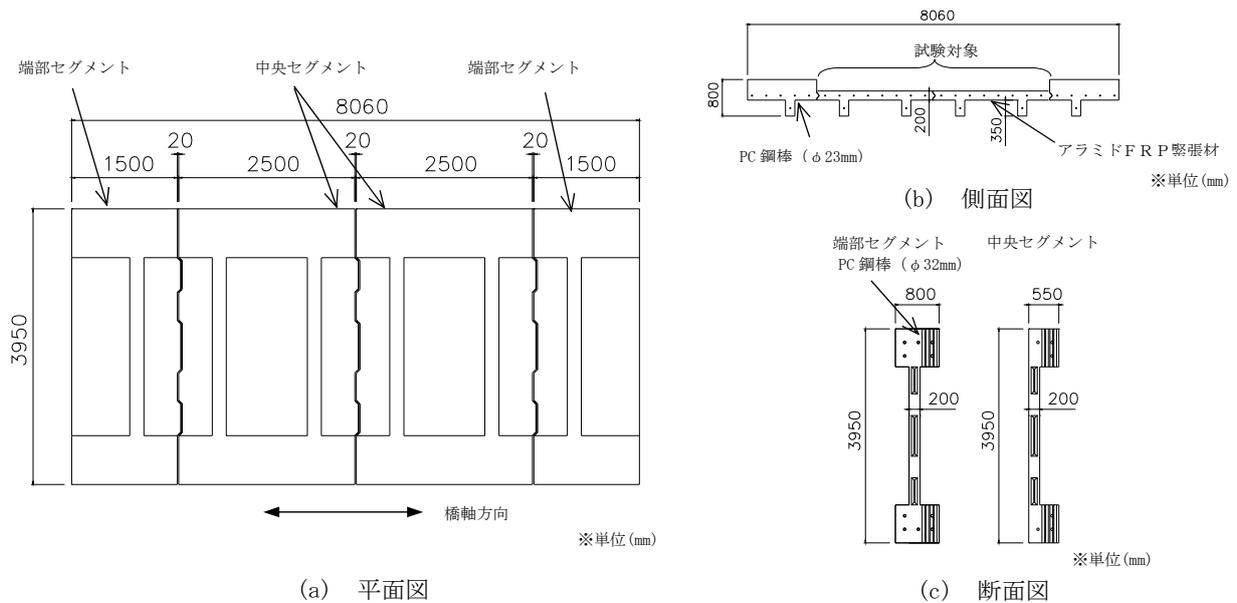


図-1 試験体形状 (輪荷重走行試験)

表-1 材料物性

(a) コンクリート, モルタル

試験体部位	使用材料	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
中央セグメント	高強度繊維補強コンクリート	118	40.9	4.3
端部セグメント	高強度コンクリート	143		
間詰め	無収縮モルタル	114		

(b) アラミドFRP 緊張材 (4φ7.4)

保証耐力 (kN)	断面積 (mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
325.6	42.4	53

ストレスを導入した。アラミドFRP緊張材1本あたりの有効緊張力は165kNであり、コンクリートに発生する圧縮応力度は、床版部で2.5N/mm²、横リブで2.0N/mm²である。端部セグメントのコンクリートは、高強度コンクリートを使用し、鉄筋とφ23mmのPC鋼材を横締めを使用した。セグメントの接合面にはせん断キーを配置しており、20mmの隙間を設けて設置して高強度の無収縮モルタルを充填した。外ケーブルによる軸力を想定し、φ32mmのPC鋼棒10本を配置し、プレストレスを導入した。なお、中央セグメントは、PC鋼棒をセグメントに接触させない構造とし、端部セグメントで定着する外ケーブル方式とした。緊張力は、1本あたり500kNで軸圧縮応力度として4.0N/mm²とした。

静的載荷試験で使用する試験体は、輪荷重走行試験で使用した試験体のうち、中央セグメントを切り出して試験を行った。試験体の形状を図-2に示す。試験体の寸法は、長さ2500mm、幅3950mm、床版厚200mmであり、高強度補強繊維コンクリートと横締めのアラミドFRP緊張材を用いたセグメントである。橋軸方向のプレストレスは導入しない。

3. 試験方法

3.1 輪荷重走行試験

試験装置は、実際の輪荷重の走行状態を再現するために、床版に車輪による荷重を負荷させ



写真-1 セグメント製作状況

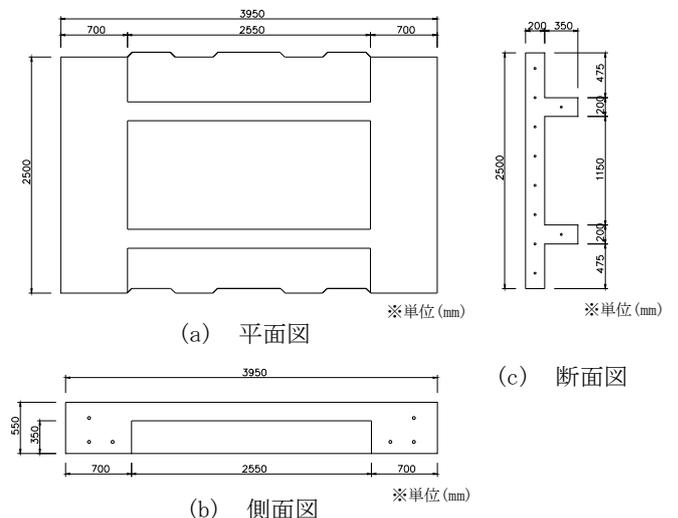


図-2 試験体形状 (静的載荷試験)

た状態で荷重位置を移動させるものであり、実物大の橋梁床版などの疲労耐久性を実際に近い状態で確認する構造である。試験体は、ウェブ間隔を支間長(3400mm)とするピン支持とした。輪荷重走行にともない端部での浮き上がりを生じさせないために、浮き上がり防止措置を行った。荷重は1輪荷重とし、試験体と車輪の間には、鉄板と不陸調整用にベニア板を設置した。車輪の走行範囲を図-3に示す。試験体中央部で長さ3000mm、幅500mmの区間を走行させた。

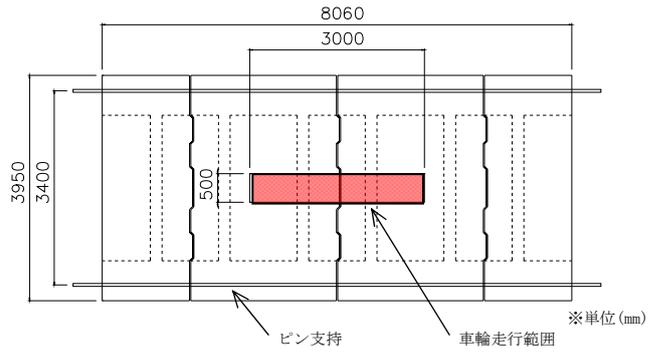


図-3 輪荷重走行試験荷重位置

荷重方法を図-4に示す。ステップ1は、荷重にともなう支持条件などの確認を目的に荷重荷重150kNで走行回数5万回の荷重を行った。ステップ2は、供用年数100年に相当する196kNを30万回走行した。さらに、ひび割れおよび目地部の貫通を確認するために、図-5に示すように試験体上面に水を張り196kNで再度走行回数を5万回実施して水漏れの確認を実施した。ステップ3では、水を張ったままの状態に荷重を1.5倍の294kNで5万回走行した。その後、橋軸方向の緊張力を低減させ、軸圧縮応力度を 4.0N/mm^2 、 1.0N/mm^2 、 0.5N/mm^2 とした状態で各5万回づつ走行して、軸圧縮応力度の低下によるひび割れおよび目開きの状況を確認することとした。また、走行回数が5万回毎に静的荷重を実施した。荷重位置は図-6に示すセグメント中央、水平リブおよび目地部の5箇所である。荷重時の計測は、荷重、たわみ、コンクリートおよびアラミドFRP緊張材ひずみを計測した。

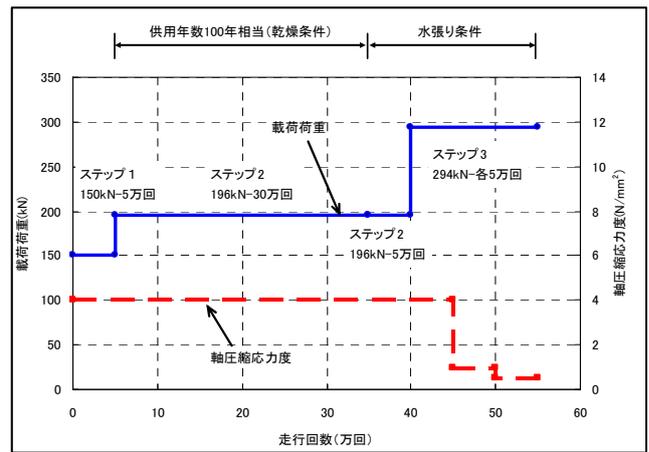


図-4 荷重方法

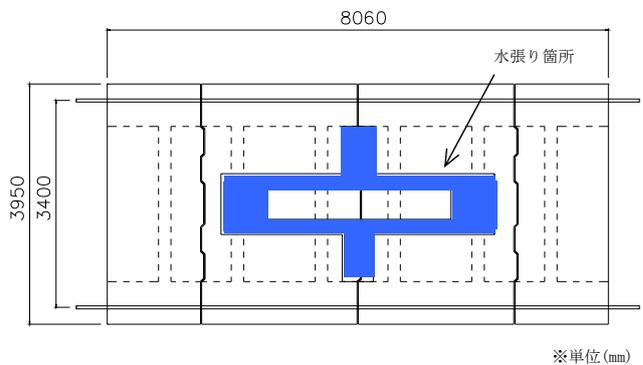


図-5 水張り位置

3.2 静的荷重試験

静的荷重試験では、輪荷重走行試験後に中央セグメントを切り出して破壊に至るまで荷重した。荷重試験装置を図-7に示す。輪荷重走行試験と同様に支間長3400mmとして、支点はピン支持とした。荷重位置は、セグメント中央に $660\text{mm} \times 360\text{mm}$ の範囲に鉛直荷重を与えた。荷重はひび割れ発生後に一度除荷し、次に破壊まで荷重した。計測項目は、荷重、たわみ、コンクリートおよびアラミドFRP緊張材ひずみである。

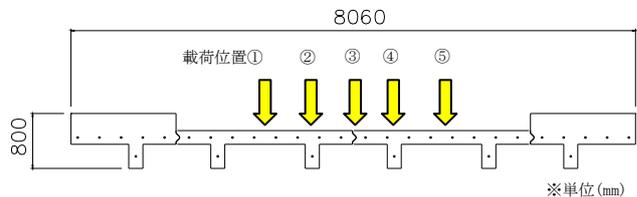


図-6 静的荷重位置

4. 解析検討

静的荷重試験での曲げ性状について断面分割法により解析を行った。材料モデルを図-8、断面モデルを図-9に示す。材料モデルのコンクリートは、材料試験結果からモデル化を行った。アラミドFRP緊張材は、弾性体としてモデル化した。



写真-2 輪荷重走行試験装置



写真-3 輪荷重走行試験状況

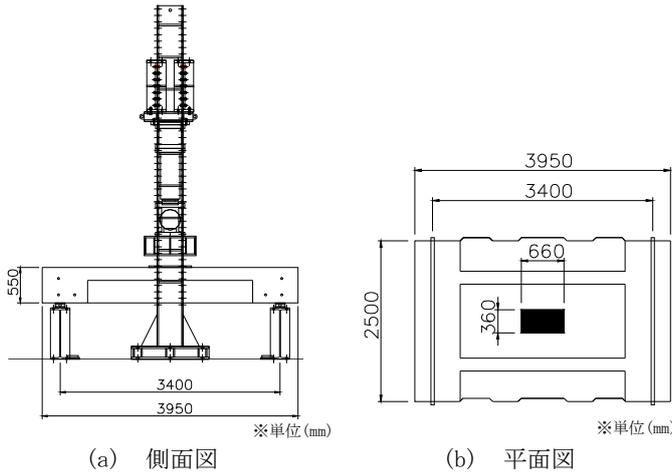
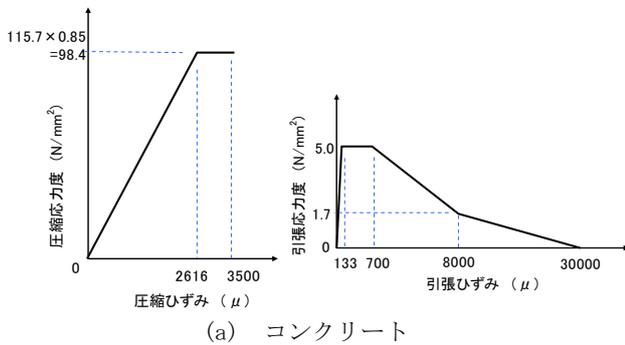


図-7 載荷装置図 (静的載荷試験)



写真-4 静的載荷試験状況



(a) コンクリート
(b) アラミドFRP緊張材

図-8 材料モデル

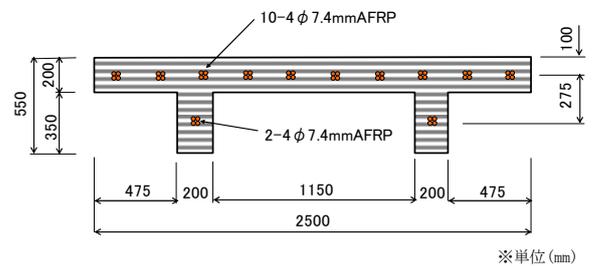


図-9 断面モデル

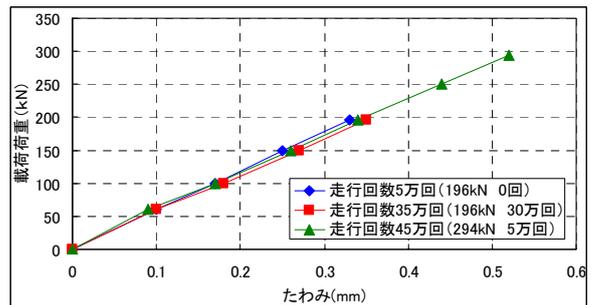


図-10 載荷荷重とたわみ

5. 試験結果

5.1 輪荷重走行試験

輪荷重走行試験時に走行回数 5 万回毎に輪荷重の静的載荷を実施した。試験体中央部 (載荷位置 ③) に輪荷重を静的載荷したときの載荷荷重と試験体中央のたわみの関係を図-10に示す。走行回

数が 5 万回、35 万回および 45 万回時の結果である。載荷荷重とたわみの関係は、線形で 45 万回までほぼ同じ関係を示しており、剛性の低下は認められない。

試験体中央部（載荷位置③）に輪荷重を静的載荷したときの最大荷重時における試験体中央のたわみと走行回数（図-11）を示す。載荷荷重が 150kN、196kN では、たわみは走行回数に対してほとんど変化していない。床版の軸圧縮応力度が 4.0N/mm^2 で、載荷荷重を 294kN に上昇させた 5 万回の輪荷重走行においてたわみの増加は認められない。この結果より、高強度繊維補強コンクリートとアラミド FRP 緊張材を併用し、橋軸方向に 4.0N/mm^2 の軸力を与えた床版は、供用期間 100 年に相当する輪荷重に対する耐荷性能を有すると言える。軸圧縮応力度を低減させると、5 万回の繰り返しの間にたわみが若干増加している。これは、目地部に目開きが発生しているためと考えられる。

セグメント中央部（載荷位置①）に輪荷重を静的載荷したときの最大荷重時における橋軸方向のたわみ分布（図-12）を示す。載荷位置のたわみが大きく、目地を跨ぐたわみに連続性が保たれていることから目地部にずれは生じていない。最大荷重時における載荷位置床版上下面の橋軸方向コンクリートひずみを（図-13）を示す。橋軸方向のプレストレスによってコンクリートに発生するひずみは 98μ 、引張強度を弾性係数で除すると 105μ であり、ひび割れ発生が予想されるひずみは 203μ である。静的載荷時では、床版下面に発生した引張ひずみは、走行回数 35 万回の 196kN で 80μ 、45 万回の 296kN で 124μ であり、床版部にひび割れの発生は認められなかった。

セグメントリブ部（載荷位置②）に輪荷重静的載荷したときの最大荷重時における水平リブ下面の橋軸直角方向コンクリートひずみを（図-14）を示す。294kN で走行回数 40 万回の際に 160μ の引張ひずみが発生している。橋軸直角方向のプレストレスによってコンクリートに生じるひずみは 49μ 、ひび割れが発生するひずみは計算上 154μ であり、実験値はひび割れ発生ひずみに達しているがひび割れは確認できなかった。プレストレスを 0.5N/mm^2 まで低減させると水平リブに、橋軸方向の微細なひび割れが 1 箇所発生した。

セグメント中央部（載荷位置①）に輪荷重を静的載荷したときの最大荷重時における床版断面のひずみ分布を（図-15）を示す。ひずみ分布は、床版上下

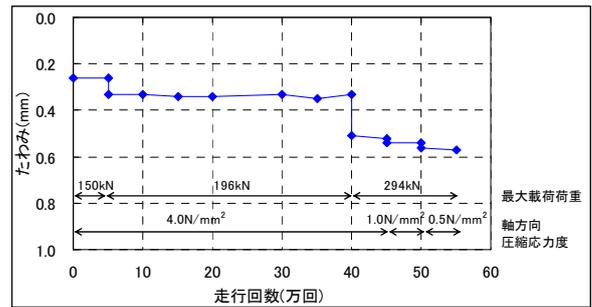


図-11 走行回数とたわみ

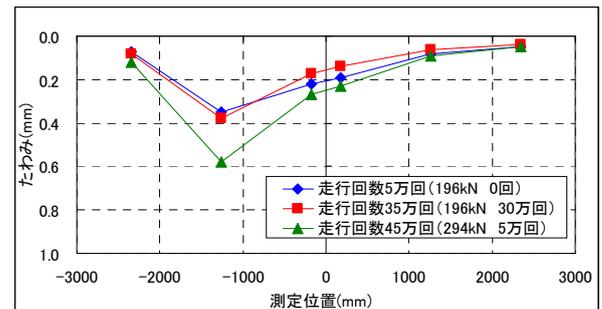


図-12 走行回数とたわみ分布

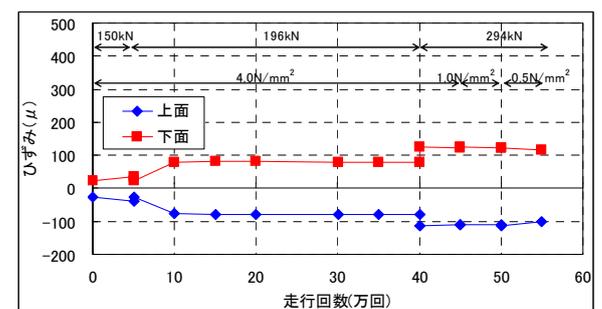


図-13 走行回数と床版ひずみ（橋軸方向）

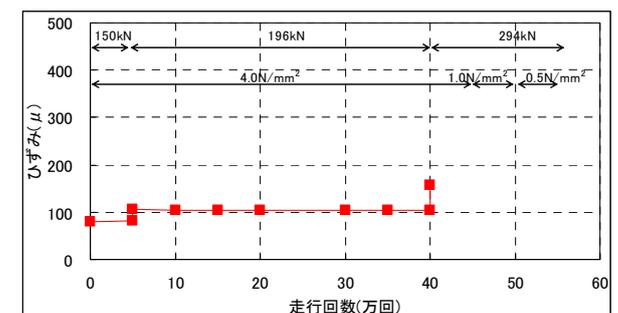


図-14 走行回数と水平リブひずみ
（橋軸方向）

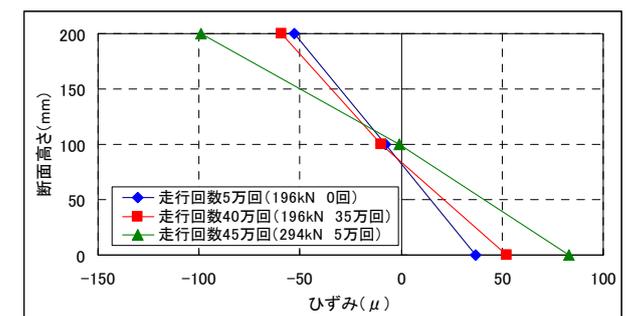


図-15 床版断面のひずみ分布

面およびコンクリート内部に埋め込んだモールドゲージの結果である。載荷荷重によってひずみの増加は認められるが、ほぼ線形を示しており平面保持が成り立っている。

試験体中央部（載荷位置③）に輪荷重静的載荷したときの最大荷重時における接合部の目開き変位を図-16に示す。走行回数 45 万回までは線形を示しており、目開きの発生は認められない。50 万回目に軸力を低減させた場合に目開きが確認されたが、水張り状態で漏水は確認できないことから貫通はしていない。

5.2 静的載荷試験

切り出したセグメントの静的載荷試験における荷重とたわみの関係を図-17に示す。ひび割れの発生が 356kN で最大荷重 876kN でリブに配置したアラミド FRP 緊張材が破断して耐力が低下した。解析では、ひび割れ発生が 278kN、アラミドロッドが破断する荷重が 848kN であり、断面分割法による計算結果とよく一致している。また、健全な場合の解析と実験の相違がほとんどないことから、輪荷重走行試験による床版の損傷は、ほとんどなかったと考えられる。

6. まとめ

本試験によって、下記の知見が得られた。

- ①橋軸方向プレストレスにより床版に軸圧縮応力度を 4.0N/mm^2 で与えた高強度繊維補強コンクリートとアラミド FRP 緊張材で横締めしたコンクリート床版は、供用年数 100 年以上に相当する輪荷重に対する疲労耐久性を有する。
- ②目地部のたわみに連続性が保持されており、目地部においても供用年数 100 年以上に相当する疲労耐久性を有する。
- ③軸方向圧縮応力度を低減した場合でも静的載荷試験では所定の曲げ耐力を有することが確認された。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー88 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)，土木学会，1996
- 2) 例えば，松井 繁之，角 昌隆，向井 盛夫，北山 耕造：RC ループ継手を有するプレキャスト PC 床版の移動載荷試験，第 6 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. 149-154，1996 年

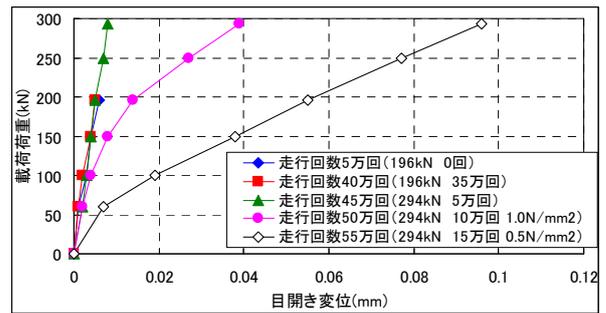


図-16 載荷荷重と目開き位

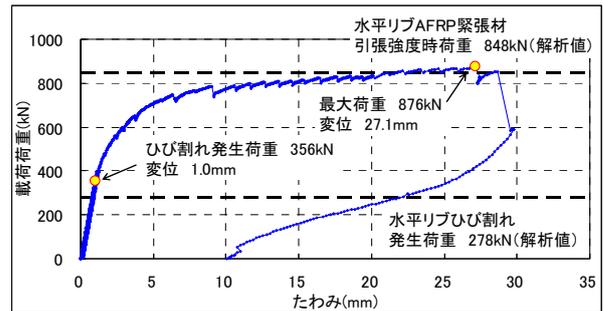


図-17 載荷荷重とたわみ