

報告 繰返し載荷作用が UFC の力学的特性に及ぼす影響に関する検討

永井 勇輔*1・一宮 利通*2・小坂 崇*3・濱崎 浩太*4

要旨: 筆者らが開発したワッフル型 UFC 床版は、設計供用期間相当の車両の繰返し走行に対して、十分に高い耐疲労性を有することを輪荷重走行試験で確認している。しかし、この試験では本 UFC 床版は破壊に至らなかったため、破壊モードが明らかになっていない。そこで、非線形有限要素解析により本 UFC 床版の破壊モードおよび損傷進展過程を明らかにするための構成則を設定することを目的として、UFC 試験体を用いた各繰返し載荷試験を実施し、UFC の力学的特性を把握した。その結果、載荷回数の増加に応じた UFC の弾性係数の減少や変位の増加などを確認でき、これらを構成則として設定できる可能性が示された。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, 疲労破壊, 繰返し作用, 力学的特性

1. はじめに

鋼床版では、車両（特に大型車）の走行による変形に起因する溶接部の疲労亀裂の発生が顕在化している。筆者らは、超高強度繊維補強コンクリート（UFC）を用いて、ワッフル型の形状で鋼床版と同程度の重量とした耐疲労性の高い道路橋床版（ワッフル型 UFC 床版）を開発しており¹⁾、阪神高速道路豊橋入路橋に初適用した²⁾。

筆者らはこれまでに、車両の繰返し走行に対するワッフル型 UFC 床版の耐疲労性について、土木研究所の輪荷重走行試験機を用いて最大 400kN を作用させ、設計供用期間を超える高い耐疲労性を有することを確認している³⁾。一方で、試験体は破壊までには至らず、破壊モードが明らかになっていない。床版の計画、設計、施工および維持管理においては、UFC 床版の破壊に至る過程を明らかにすることが必要である。そこで、非線形有限要素解析によって UFC 床版の破壊モードおよび損傷の進展過程を明らかにするための構成則の設定を検討している。

本検討では、力学的特性として UFC 試験体の弾性係数と変位の変化を確認することを目的とし、UFC 試験体を用いた圧縮、引張、せん断の各繰返し載荷試験を実施した。またその他に、本試験結果を既存の疲労強度式と比較することとした。

表-1 UFC の配合

単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 ^{*3}
水 ^{*1}	結合材 ^{*2}	細骨材	高性能減水剤	
195	1287	905	32.2	1.75vol.1%

*1: 高性能減水剤中の水分を含む

*2: エトリンサイト生成系プレミックス結合材

*3: 繊維長 15mm および 22mm, 径 0.2mm, 引張強度 2,000N/mm² 以上

2. 試験体製作

UFC は、細骨材、セメントおよび混和材による密実なセメント系複合材であり、圧縮強度が従来のコンクリートと比較して 4~6 倍程度大きいことが特徴である。本研究で用いた UFC の配合を表-1 に示す。本 UFC は、鋼繊維を含有するエトリンサイト生成系 UFC であり、圧縮強度 180N/mm² 以上、引張強度 8.8 N/mm² の材料特性値を有する⁴⁾。

練混ぜは、水平二軸式強制練りミキサ（容量100L、回転数60r.p.m.）を用いて、1 回の練混ぜ量を 80L とした。練混ぜは、結合材と表乾状態の骨材をミキサに投入して 30 秒間攪拌した後、水と高性能減水剤を投入して 8 分間攪拌し、その後繊維を投入し 2 分間攪拌した。

試験体は、圧縮試験用、引張試験用およびせん断試験用に各 6 体製作し、各試験で静的載荷試験用と繰返し載荷試験用に各 3 体用いることとした。圧縮試験体は、φ 50×100mm の円柱試験体とした。引張試験体は、100mm × 100mm × 400mm の鋼製型枠に鋼製金具を取り付けて、試験体形状がドッグボーン型となる試験体を製作した。引張試験体の打込み時には、繊維方向が長辺方向で一様となるように、鋼製型枠の短辺片側から長辺方向に片流しで打ち込んだ。せん断試験体は、100mm × 100mm × 100mm の立方体とした。

製作した試験体は、常温の封かん養生を 24 時間行い、その後 85°C の蒸気養生を 24 時間行った。

3. 試験概要

3.1 圧縮試験

圧縮試験状況を写真-1 に示す。静的載荷試験および繰返し載荷試験は、それぞれ 200kN 万能試験機、500kN サーボパルサを用いて実施した。計測は、試験体側面中央

*1 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造グループ 研究員 修士(工学) (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造グループ 担当部長 修士(工学) (正会員)

*3 阪神高速道路(株) 建設事業本部神戸建設部技術統括課 エキスパート 修士(工学) (正会員)

*4 阪神高速道路(株) 建設事業本部神戸建設部湾岸西伸第二建設事業所 学士(工学)

部とその対面にひずみゲージ（ゲージ長30mm）を鉛直方向および水平方向に設置し、縦ひずみおよび横ひずみを計測した。

静的荷重試験時の荷重速度は、0.6N/mm²/sとした。繰返し荷重試験の荷重速度は5Hzとし、上限応力は、静的荷重試験で得られた静的強度の60%、70%、80%とした。計測は繰返し荷重試験中に動的にデータを取得することを基本とした。そのほかに、荷重速度の影響を確認することとし、繰返し荷重途中で荷重を停止して10回、100回、300回、1,000回、3,000回、10,000回、30,000回で静的荷重を実施した。

3.2 引張試験

引張試験状況を写真-2に示す。静的荷重試験および繰返し荷重試験は、圧縮試験と同じ試験機を用いて実施した。荷重治具は図-1に示す引張試験治具を各荷重試験機に接続し、PC鋼棒を介して治具を引っ張り、試験体のテーパ部と治具を接触させて試験体の長辺方向に引張力を与えた。また、試験体に偏心曲げが発生しないように、接触面に厚さ1mm程度のゴムを緩衝材として挟んだ。計測は、くびれ部の4側面に対して長辺方向にひずみゲージ（ゲージ長60mm）を設置し、ひずみを計測した。また、くびれ部を含む140mm区間を標点区間として変位計を2箇所設置し、変位を計測した。

静的荷重試験時の荷重は、0.5mm/minの変位制御にて行った。繰返し荷重試験の上限応力は、静的荷重試験で得られた静的強度の40%、60%、80%とした。荷重速度や計測データの取得方法は圧縮試験と同じとした。

3.3 せん断試験

静的荷重試験および繰返し荷重試験は、圧縮試験と同じ試験機を用いて実施した。せん断試験治具および各計測位置を図-2に示す。荷重は、15度の傾斜がある治具を用いたため、せん断応力度の算出は、15度分の角度補正を行った。すなわち、試験機の荷重Pをせん断方向に作用する荷重に換算（ $P \times \cos 15^\circ$ ）してから、せん断力が作用する断面積（図-2内の赤破線）で除して算出した。計測は、試験体両面のせん断力の作用方向およびその直角方向に変位計を設置し、せん断力が作用する断面の鉛直ずれ変位および水平開き変位を計測した。いずれの変位計も、標点区間は80mmとした。また、試験体側面中央部の両面に3軸ひずみゲージを設置してひずみの計測も試みたが、静的強度の50%程度（25N/mm²程度）でひずみゲージが剥離し評価するに至らなかったため、本検討では試験結果を省略する。

静的荷重試験時の荷重速度は、0.6N/mm²/sとした。繰返し荷重試験の上限荷重は、静的荷重試験で得られた静的強度の50%、70%、80%とした。荷重速度や計測データの取得方法は圧縮試験と同じとした。

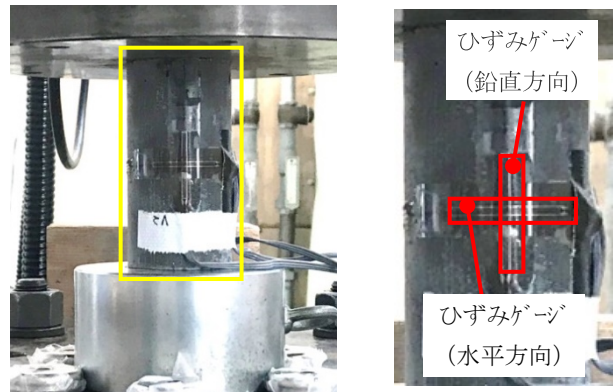


写真-1 圧縮試験状況 (左: 全体, 右: 試験体拡大)

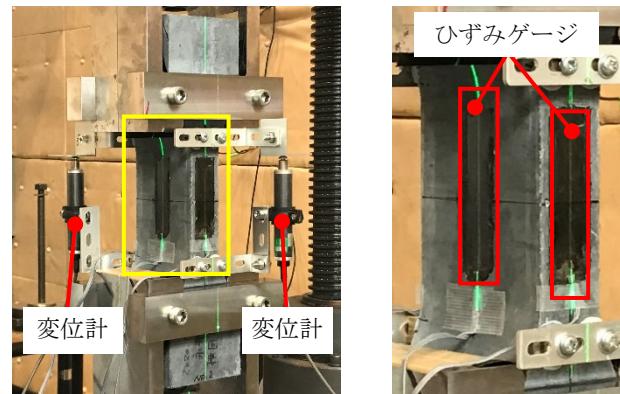


写真-2 引張試験状況 (左: 全体, 右: くびれ部拡大)

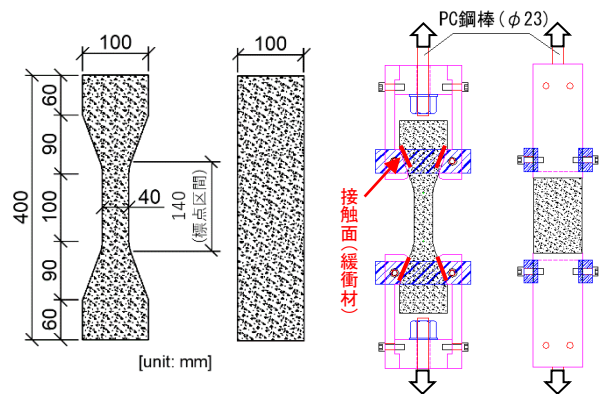


図-1 引張試験体および引張試験治具

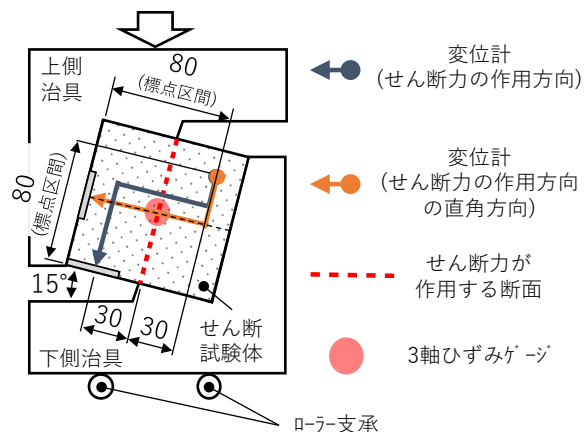


図-2 せん断試験治具および各計測位置

4. 試験結果

各繰返し載荷試験結果一覧を表-2、各繰返し載荷試験終了後の試験体の写真を写真-3に示す。ここで、以降に示す表および図内の記号は、C：圧縮試験、T：引張試験、S：せん断試験、(S)：初期載荷および繰返し載荷途中の静的載荷試験、(D)：繰返し載荷試験を意味する。また、各試験結果は上限応力時の値である。

4.1 圧縮試験

(1) 損傷の進行

C-70、C-80 試験体は、それぞれ載荷回数 24,648 回、1,667 回で破壊した。試験体側面は、写真-3に示すように損傷していた。C-60 試験体は、ひずみゲージの剥離によって載荷回数 23 万回以降のひずみが計測できていないが、試験体は破壊せずに載荷回数 200 万回に到達した。そのため、再度ひずみゲージを設置して載荷回数 400 万回まで載荷を継続した。その結果、ひずみゲージは早期に剥離したが、試験体は破壊せずに載荷回数 400 万回に到達した。試験体側面は、C-70、C-80 試験体と同程度で

はないが損傷していた。

(2) 疲労強度式との比較

載荷回数と圧縮疲労強度の関係を図-3に示す。図内に示す直線は、式(1)に示す土木学会コンクリート標準示方書[設計編]の疲労強度式(以下、土木学会式と記す)から算出した⁵⁾。

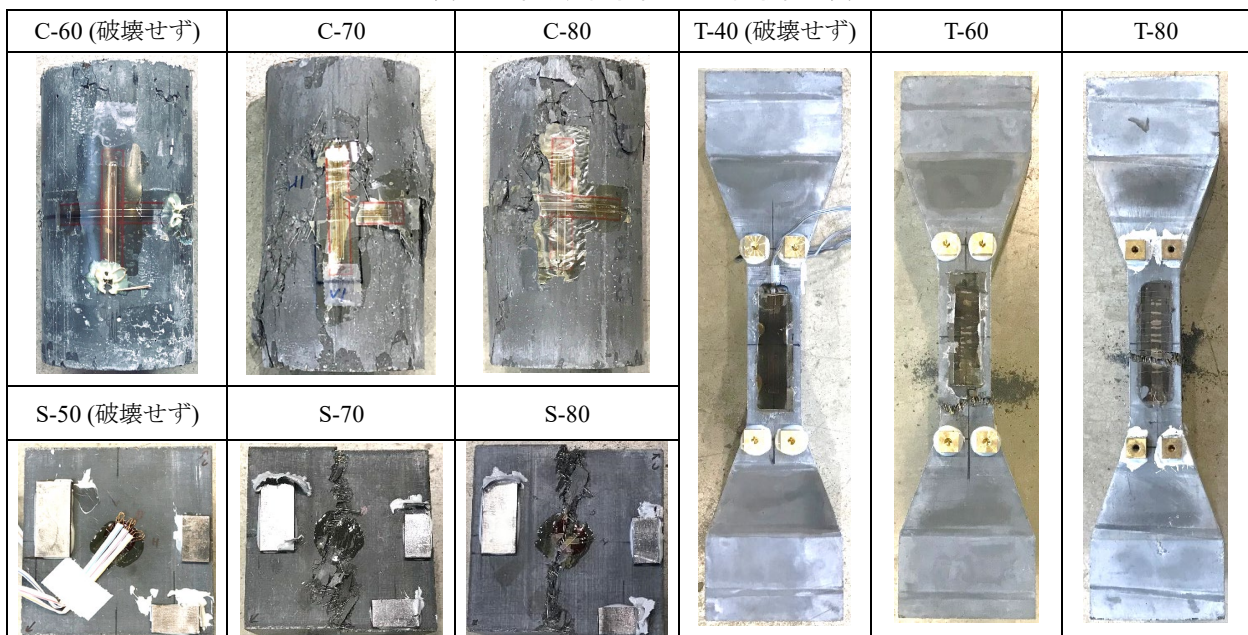
$$f_{rd} = k_{1f} f_d \left(1 - \frac{\sigma_p}{f_d}\right) \left(1 - \frac{\log N}{K}\right) \quad (1)$$

ここで、 f_{rd} は疲労強度、 f_d は圧縮強度、 k_{1f} は低減係数(圧縮の場合は0.85)、 σ_p は永久荷重による応力度(繰返し載荷の場合は0)、 N は疲労寿命、 K はコンクリートの状態に関する係数(UFCの場合、土木学会超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)⁶⁾(以下、UFC指針と記す)より、普通コンクリートと同様に17)である。また、図内の直線の内、「実設計強度」は圧縮強度を材料係数1.3で除して算出したもの、「安全係数1.0」は圧縮強度を材料係数1.0で除して算出したもの、「低減係数なし」は k_{1f} を1.0として算出した直線である。本報文

表-2 各繰返し載荷試験結果の一覧

—	静的強度 (N/mm ²)	繰返し載荷 試験ケース	作用応力 (N/mm ²)			破壊した載荷回数 N (回)
			下限	上限		
圧縮	$f'_c = 224.5$	C-60	1.0	$0.6 \times f'_c$	135	400 万回 (破壊せず)
		C-70	1.0	$0.7 \times f'_c$	157	24,648
		C-80	1.0	$0.8 \times f'_c$	180	1,667
引張	$f_t = 11.5$	T-40	0.5	$0.4 \times f_t$	4.6	640 万回 (破壊せず)
		T-60	0.5	$0.6 \times f_t$	6.9	82,888
		T-80	0.5	$0.8 \times f_t$	9.2	26,412
せん断	$\tau = 55.1$	S-50	0.2	$0.5 \times \tau$	27.6	200 万回 (破壊せず)
		S-70	0.2	$0.7 \times \tau$	38.6	10,174
		S-80	0.2	$0.8 \times \tau$	44.1	13

写真-3 各疲労試験終了後の試験体写真



と同じ寸法の試験体を用いて行われた一宮ら⁷⁾の試験結果についても図-3内に示しており、本試験の結果は圧縮疲労強度式よりも大きい値であることから、全試験ケースにおいて土木学会式で安全側に評価できると考えられる。

(3) 荷回数-圧縮弾性係数

荷回数と圧縮弾性係数の関係を図-4に示す。本図に示す圧縮弾性係数は、最大応力度を最大応力度時の平均縦ひずみで除して算出した。C-80試験体について、初期荷時の弾性係数が他試験ケースより 3kN/mm^2 程小さい結果となったが、非線形域に入っている可能性が考えられる。また、繰返し荷開始前に一度実施した予備荷が挙げられるが、荷応力は 1.0N/mm^2 程度と繰返し荷試験の下限応力以下であるため、可能性は低いと考えられる。

全試験ケースにおいて、荷回数の増加に伴う圧縮弾性係数の低下が確認された。C-60、C-70試験体は、圧縮弾性係数の急激な低下がそれぞれ荷回数約5,000回、約20,000回で確認されたのに対して、C-80試験体は急激な低下は確認されず、荷回数1,667回で破壊に至った。また、初期荷および繰返し荷試験途中に実施した静的荷試験の圧縮弾性係数は、繰返し荷試験結果よりも 1.0kN/mm^2 程小さい結果となった。

(4) 荷回数-ポアソン比

荷回数とポアソン比の関係を図-5に示す。本図に示すポアソン比は、最大応力度時の平均横ひずみを最大応力度時の平均縦ひずみで除して算出した。

全試験ケースにおいて、荷回数の増加に伴いポアソン比の増加が確認された。また、試験体C-80について、図-4では圧縮弾性係数の急激な低下は確認されなかったが、荷回数200回程度からポアソン比の急激な増加が確認された。写真-3に示すように、試験体側面の表面が損傷していることから、縦ひずみのみでなく横ひずみにも大きなひずみ変化があったと考えられる。また、初期荷および繰返し荷試験途中に実施した静的荷試験のポアソン比は、繰返し荷試験結果よりも小さく、荷回数の増加につれて両者の差の広がり確認された。以上より、圧縮の繰返し試験による損傷進展過程は、ポアソン比および荷速度を解析に用いる構成則として設定できると考えられる。

4.2 引張試験

(1) 損傷の進行

T-60とT-80試験体は、それぞれ荷回数82,888回、26,412回で破壊した。T-40試験体は、荷回数200万回に到達したため荷を継続したが、試験体は破壊せずに荷回数640万回に到達した。写真-3に示すように、T-60とT-80試験体は、ひずみゲージ内および変位計の標

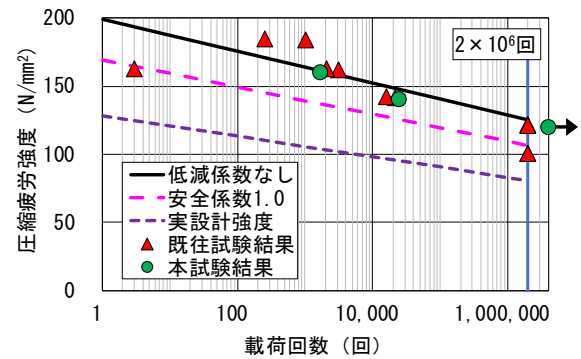


図-3 荷回数-圧縮疲労強度

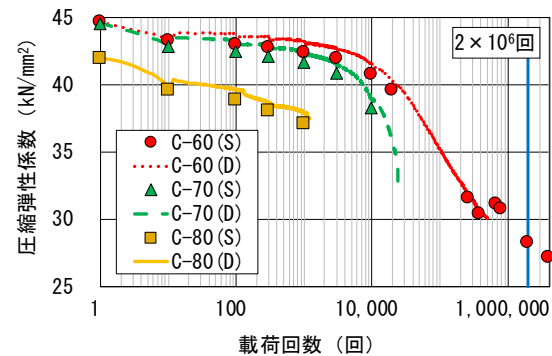


図-4 荷回数-圧縮弾性係数

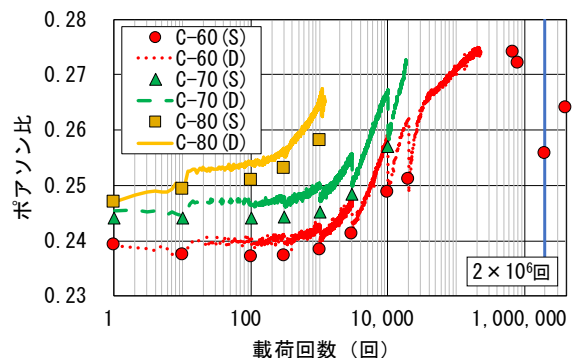


図-5 荷回数-ポアソン比

点区間内でひび割れが進行した。T-80試験体のひび割れは試験体中央で進行しているのに対し、T-60試験体はテーパ部が弱部となりひび割れが進展したと考えられる。また、T-40試験体では、目視によるひび割れは確認されなかった。

(2) 荷回数-引張疲労強度比

荷回数と引張疲労強度比の関係を図-6に示す。図内の直線は、UFC指針の曲げ疲労強度式であり、 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の曲げ試験体を基に算出されている。ここで、UFC指針では静的試験から求められた曲げ強度と引張強度の関係式が示されており、曲げ疲労強度式から換算した引張疲労強度式との比較を試みたが、両式に大きな違いが観られなかった。そのため、繰返し荷試験結果を曲げ強度に換算せずに、引張強度との比を用いて曲げ疲労強度式と比較した。その結果、引張の繰返し荷試験結果は、UFC指針の曲げ疲労強度式と同様の結

果が得られた。よって、応力の作用方法は異なるが、
 載荷回数と引張疲労強度比の関係は、UFC 指針の曲げ疲労
 強度式を用いて表すことができると示唆される。

(3) 載荷回数－引張弾性係数

載荷回数と引張弾性係数の関係を図-7 に示す。本図
 に示す引張弾性係数は、最大応力度をひずみゲージで計
 測した最大応力度時の平均ひずみで除して算出した。T-
 60、T-80 試験体はそれぞれ載荷回数 5 回、4,000 回近
 で引張弾性係数が急激に減少しており、その後、試験体
 はそれぞれ数 10 回、数 1000 回程度の繰返し回数で破壊
 に至った。この急激な減少時点で試験体を観察したとこ
 ろ、目視で確認できる微小なひび割れが確認された。急
 激な引張弾性係数の減少後は、架橋している鋼繊維が荷
 重を負担していると考えられる。T-40 試験体は、載荷回
 数 30,000 回を超えてから、多少の引張弾性係数の減少は
 確認されたが、載荷回数 640 万回まで大きな変動はなく、
 200 万回到達時と同程度の引張弾性係数を維持してい
 ると言える。載荷回数 200 万回から 640 万回までで引張弾
 性係数の多少の変動が確認されたが、載荷回数 200 万到
 達後に載荷を一度止めて 0N/mm² まで除荷したため、再
 載荷時の試験体と載荷治具との接触具合が影響したと考
 えられる。

(4) 載荷回数－変位

載荷回数と変位の関係を図-8 に示す。T-60、T-80 試
 験体は、変位が 0.5mm に到達した付近から、急激に変位
 が伸びていることが確認された。T-40 試験体の変位は、
 載荷回数 640 万回到達後で 0.05mm 以下であった。ここ
 で T-80 試験体は、T-40、T-60 試験体と比較すると初期載
 荷で 0.2mm 程度の変位が計測されているのに対し、図-
 7 に示す引張弾性係数では大きな違いが見られないが、
 これはひずみゲージ区間外でひび割れが発生したため
 である。また図-7 と比較すると、T-60、T-80 試験体の変位
 は、急激な引張弾性係数の減少が確認された回数付近で
 大きな変化は見られないが、この引張弾性係数の低下分
 (約 30kN/mm²) を変位に換算すると 0.02mm 程度であ
 り、図-8 の変位の目盛上では小さく表示されたためであ
 る。以上より、引張の繰返し載荷試験による損傷進展過
 程は、試験体に初期のひび割れが入るまでは載荷回数と
 引張弾性係数の関係を、試験体が破壊するまでは載荷回
 数と変位の関係を解析に用いる構成則として設定でき
 ると考えられる。

4.3 せん断試験

(1) 損傷の進行

S-70、S-80 試験体は、それぞれ載荷回数 10,174 回、13
 回で破壊した。S-50 試験体は、破壊せずに載荷回数 200
 万回に到達した。写真-3 に示すように、S-80、S-70 試
 験体は、試験体の中央部（上部治具の角部分から下部治

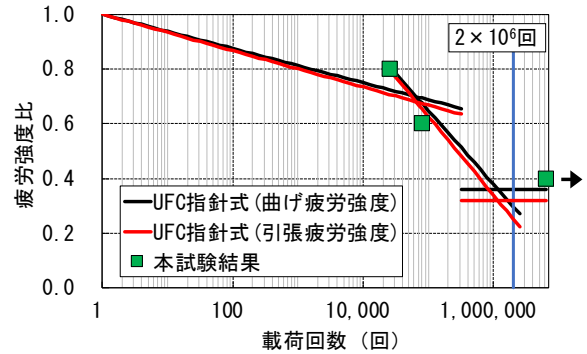


図-6 載荷回数－引張疲労強度比

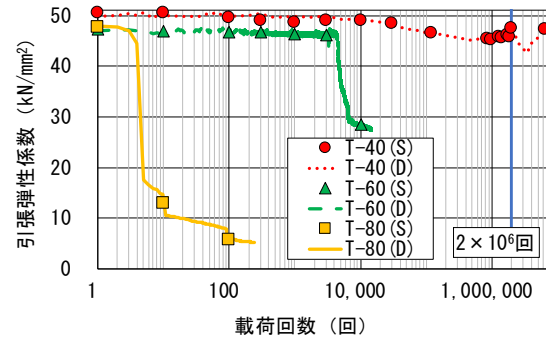


図-7 載荷回数－引張弾性係数

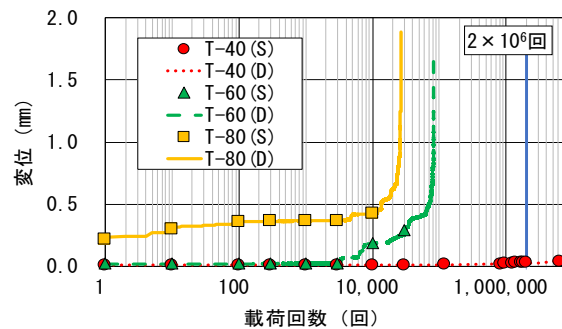


図-8 載荷回数－変位

具の角部分にかけて) でひび割れが入り破壊した。鋼繊維
 は断面間で架橋しているものと破断しているものが見
 られた。試験体の載荷中に目視によるひび割れ観察を行
 ったが、破壊の載荷回数直前ではひび割れは確認されず、
 破壊に至る予兆はみられなかった。S-50 試験体は、目視
 で確認できるひび割れはみられなかった。

(2) 載荷回数－せん断疲労強度比

せん断の疲労強度式は定められていないため、土木学
 会の圧縮疲労強度式および UFC 指針の疲労強度式を用
 いて、試験結果と比較することとした。載荷回数とせん
 断疲労強度比の関係を図-9 に示す。本繰返し載荷試験
 の結果は、既存の疲労強度式よりも小さい値であるため
 危険側に評価する可能性がある。

(3) 載荷回数－鉛直ずれ変位

載荷回数と鉛直ずれ変位の関係を図-10 に示す。S-80
 試験体は、載荷回数 2 回以降に急激に変位が増加して破
 壊した。S-70 試験体は、載荷回数 10,000 回程度まで変位
 0.06mm 程度を保ちながら、載荷回数 10,000 回以降は急

激に増加し破壊した。一方で S-50 試験体は、変位 0.02mm 程度を推移しながら最大変位 0.05mm 程度で荷回数 200 万回に到達した。S-70, S-80 試験体は、いずれも変位 0.08mm 程度から変位が急激に増加しているため、S-50 試験体についても荷数を継続した場合に破壊に至ると推測できる。

(4) 荷回数－水平開き変位

荷回数と水平開き変位の関係を図-11 に示す。図-10 と比較すると、鉛直ずれ変位よりも水平開き変位が大きく、変位の増加率も大きい結果となった。S-80, S-70 試験体は、変位が 0.3mm を超えたあたりで急激に変位が増加し、破壊に至っている。そのため、S-50 試験体についても荷回数 200 万回で 0.3mm を超えていることから、破壊に至るまでの残り回数は少ないと推測できる。また S-50 試験体について、荷回数 200 万回到達時に変位が 0.3mm を超えているにもかかわらず試験体側面にひび割れは確認されなかったが、試験体がクリープ変形をしていると推測される。

5. まとめ

本検討では、非線形有限要素解析によって UFC 床版の破壊モードおよび損傷進展過程を明らかにするための構成則を設定することを目的として、圧縮、引張、せん断の繰返し荷重試験を実施し、UFC の力学特性を把握した。以下に得られた結果を示す。

- (1) 本試験で得られた荷回数と圧縮疲労強度の関係は、土木学会の圧縮疲労強度式よりも大きい値であり、土木学会式を用いて安全に評価できると考えられる。
- (2) 圧縮の繰返し荷重試験による損傷進展過程は、圧縮弾性係数およびポアソン比を解析に用いる構成則として設定できると考えられる。
- (3) 引張の繰返し荷重試験による損傷進展過程は、試験体のひび割れ発生までは引張弾性係数を解析に用いる構成則として設定できると考えられる。
- (4) せん断繰返し荷重試験による損傷進展過程は、鉛直ずれ変位および水平開き変位を解析に用いる構成則として設定できると考えられる。

限られた数の試験から得られた結果ではあるが、今後、UFC 床版の破壊モードおよび損傷進展過程を明らかにするため、本結果を踏まえた解析モデルの検討および UFC 梁部材の再現解析を実施中である。

本検討実施にあたり、横浜国立大学藤山知加子准教授にご指導を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 超高強度繊維補強コンクリート(UFC)道路橋床版に関する技術評価報告書, 土木学会, 技術推進ライブ

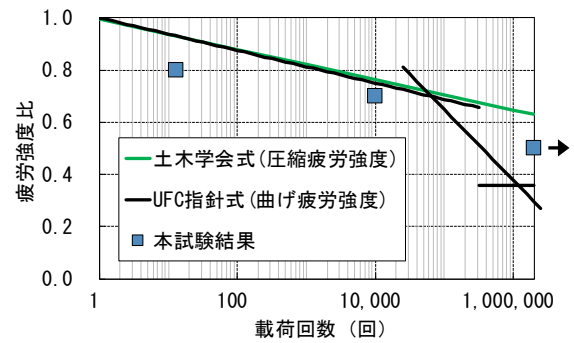


図-9 荷回数－せん断疲労強度比

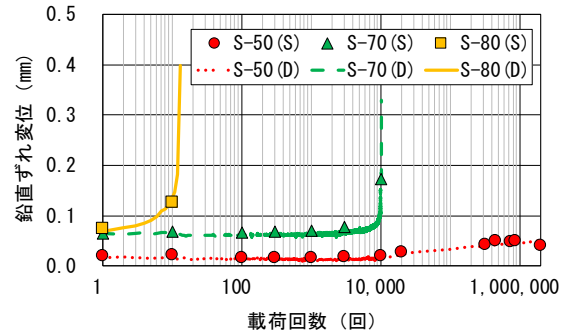


図-10 荷回数－鉛直ずれ変位

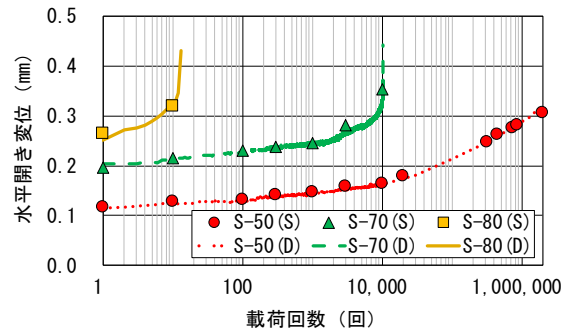


図-11 荷回数－水平開き変位

ラリーNo.17, 2015

- 2) 辻野博史ほか: ワッフル型 UFC 床版の適用－阪神高速道路信濃橋入路橋－, 橋梁と基礎, pp.5-11, 2020.2
- 3) 永井勇輔, 一宮利通, 小坂崇, 近藤恒樹: 輪荷重走行試験によるワッフル型 UFC 床版の耐疲労性評価, 第 29 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, pp.589-594, 2020.10
- 4) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」技術評価報告書, 技術推進ライブラリーNo.3, 2006.11
- 5) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2018.3
- 6) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案), 2004
- 7) 一宮利通, 金治英貞, 小坂崇: 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, プレストレストコンクリート, pp.37-42, 2014.