

論文 超高強度繊維補強コンクリートとモノレール鋼軌道桁からなる複合桁の疲労耐久性に関する実験的研究

吉本 宏和*1・川口 哲生*2・名嘉真 浩昭*3・井上 美佐男*4

要旨：本研究では、超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）とモノレール鋼軌道桁（以下、鋼軌道桁）からなる複合桁の疲労耐久性を検証するために、疲労試験と耐力確認試験を行った。ここでは、UFC パネルおよび鋼軌道桁を想定した鋼桁、両部材間の無収縮モルタル、スタッドボルトにより一体化を図った複合桁を製作して、水平方向に載荷する疲労試験を実施した。その後、静的単調載荷による耐力確認を行った。疲労試験の結果、200 万回の疲労載荷終了時まで、試験体のひび割れ、スタッドボルトの過大なひずみは確認されなかった。また、耐力確認試験においても、本構造は十分な耐力を有していることが確認された。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、複合桁、スタッドボルト、疲労耐久性、軌道、UFC

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリートは、非常に緻密な硬化体組織を有する材料であり、 200N/mm^2 級の圧縮強度を有し、高い耐久性を有する材料である。また、高強度の鋼繊維が混入されているため、設計に見込めるほどの高い引張抵抗力を有する材料である。この特性を生かし、UFC パネルとして用いることで、薄肉軽量化を図ることが可能となる。これらの特徴に着目して、従来、走行路に使用されていた場所打ちコンクリート床版の補修方法として、走行安定性および耐久性向上が期待できる UFC パネルの適用を検討した。

図-1 は、UFC パネルを走行路として用いたモノレール鋼軌道桁の構造形式を示したものである。図に示したように、鋼軌道桁上に UFC パネルが設置されており、プレキャスト部材である UFC パネルと鋼軌道桁上面との間に無収縮モルタルを充填して、スタッドボルトにより両部材を一体化している。ここで対象としているモノレール車両は跨座型であり、走行輪は UFC パネル上を走行する。また、案内輪および安定輪は、鋼軌道桁に設置された案内輪用および安定輪用の鋼製部材を走行する。

本構造形式を実現するに当たり、これらの構成部材が十分に一体化していることが重要であるが、疲労荷重により、UFC パネルと無収縮モルタルの間に存在する界面の付着切れが懸念された。この界面の一体性が十分であれば従来の構造同様、疲労耐久性はスタッドボルトの疲労を考慮すればよいとも考えられる。そこで本研究は、実大の試験体を用いて UFC パネルに水平荷重を作用させる疲労載荷を実施して本構造の疲労耐久性を検証することとした。なお、本検討においては、鋼桁表面にグリスを塗布して鋼桁と無収縮モルタルとの付着を防止した。

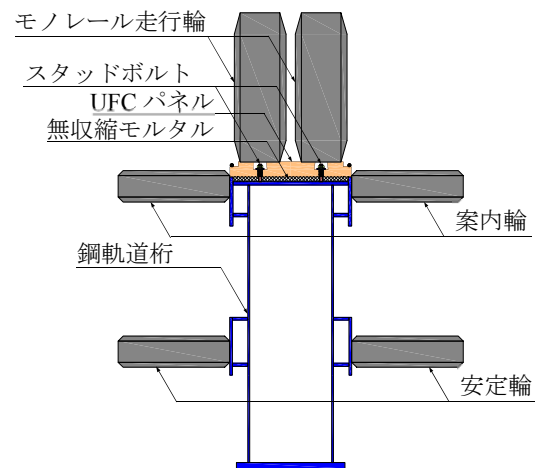


図-1 モノレール鋼軌道桁の構造形式（断面図）

ここで、載荷荷重には設計水平軸方向荷重に加えてたわみの影響により発生する荷重を考慮した。たわみの影響により発生する荷重は、事前に実施した FEM 解析により設定した。さらに、疲労試験を終了した後、水平軸方向に対して静的単調載荷を実施し、本構造が有する耐力の確認を行った。

2. 実験概要

2.1 疲労試験

(1) 試験体

図-2 に試験体の概要を示す。試験体は、UFC パネル、モノレール鋼軌道桁を想定した鋼桁、両部材間の無収縮モルタルにより構成されており、鋼桁に溶接した 8 本のスタッドボルトにより一体化されている。ここで、UFC パネルについては、UFC パネルと充填した無収縮モルタルとの一体性を確保するために、パネル下面に 4 箇所の

*1 大成建設株式会社 技術センター 土木技術開発部 都市再生プロジェクト室 修(工)(正会員)

*2 大成建設株式会社 技術センター 土木技術開発部 都市再生プロジェクト室 博(工)(正会員)

*3 モノレールエンジニアリング株式会社 技術部 部長補佐

*4 東京モノレール株式会社 技術・企画部 副部長

(a) 平面图

(b) UFC パネル (下面側)

单位: mm

(c) 側面図

(d) 断面図

図-2 試験体概要図

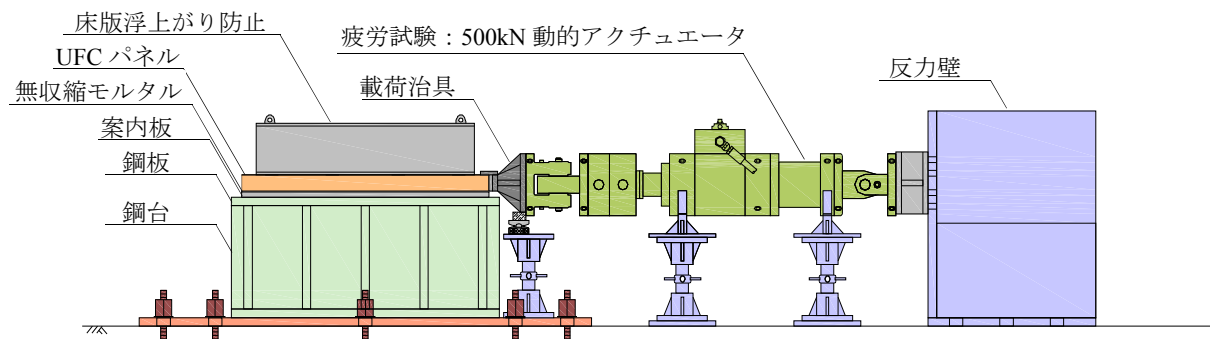


図-3 疲労試験の概要

表-1 UFC の構成材料

名称	記号	物性または成分
標準配合粉体	P	UFC 指針（案）に準拠 ¹⁾
専用細骨材	S	UFC 指針（案）に準拠 ¹⁾
鋼繊維	SF	長さ：15mm，径：0.2mm 引張強度：2700N/mm ² 以上
高性能減水剤	SP	ポルカルボン酸系

表-2 UFC の示方配合

示方配合				強度特性	
単位量(kg/m ³)				圧縮強度 (N/mm ²)	ひび割れ 発生強度 (N/mm ²)
W	P+S	SF	SP (水に含む)		
180	2212	157	15	199	11.2

突起を設けた。これは、水平方向荷重に対してせん断キーとして機能させることを目的としたものである。また、無収縮モルタルの充填性を向上させるために、パネルの標準部および突起下面に排気孔（無収縮モルタルの注入にも使用）を設けるとともに、突起下面の排気孔には排気促進のための勾配を設置した。さらに、パネルと案内

板（鋼桁の両側に軸方向に沿って設置したガイド）との
 離隔を 30mm としている。スタッドボルトには、ネジ付
 きスタッドボルトを使用し、UFC パネルはナットと座金
 で固定した。なお、実験においてはスタッドボルトに水
 平方向荷重を作用させることを目的とするために、鋼桁
 にグリスを塗布して、鋼桁と無収縮モルタルの付着を防

表-3 無収縮モルタルの配合と圧縮強度

単位量(kg)	コンシステンシー J14 ロート流下値 (s)	圧縮強度(N/mm ²)		備考
		疲労試験 開始時	耐力確認 試験時	
水	プレミクス 粉体			
339	1925	8±2	61.3	68.5 常温用, 始発: 0-25, 終結 0-30(h-min) 太平洋マテリアル社製

表-4 スタッドボルトと鋼桁の諸元

名称	材質	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	仕様
スタッドボルト	SWRCH10A	397	448	ネジ付き M20(軸径: 18.3mm), L=119mm, ネジ部 80mm
鋼桁	SM400	299	449	

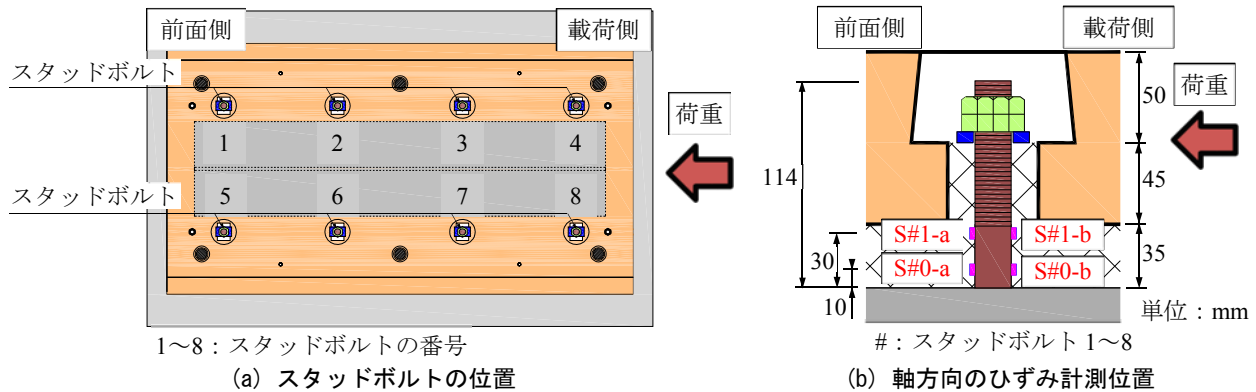


図-4 スタッドボルトのひずみ計測位置

止した。また、鋼桁を構成する鋼板と鋼台は、載荷時に変形しないよう補剛材により剛性を高めた。

(2) 試験体の製作

UFC パネルは、実構造物で使用するものと同じサイズとし、二次製品工場にて製作した。実施工を想定した施工方法により鋼桁にスタッドボルトを溶接し、UFC パネルを据え付けた後、鋼桁と UFC パネルとの間に無収縮モルタルを充填して一体化した。なお、無収縮モルタルは UFC パネルに設けたスタッドボルト用の箱抜き部まで充填しており、スタッドボルトは、無収縮モルタルとのみ接触している。

表-1 に UFC の構成材料、表-2 に UFC の示方配合をそれぞれ示す。UFC には、UFC 指針 (案) ¹⁾ に準拠した標準配合粉体を使用した。UFC 指針 (案) に従い、標準熟養生 (90℃, 48 時間) を行った。養生後の圧縮強度は 199N/mm² であり、所定の強度が発現していることを確認した。表-3 に無収縮モルタルの配合および品質管理試験結果を示す。無収縮モルタルは、実施工を想定して数時間で十分な強度発現を確保する必要があることから、速硬化のものを用いており、可使時間は 30 分程度である。無収縮モルタルの疲労試験開始時の圧縮強度は、61.3N/mm² であった。表-4 にスタッドボルトおよび鋼桁の仕様および試験結果を示す。スタッドボルトはネジ付きスタッドボルトであり、M20×L119mm(ネジ部 80mm) とし、仕上り高さ 114mm(基準: ±2mm) である。スタッドボルトの溶接にあたっては、鉛直精度を確保するため、垂直治具を使用した。その結果、スタッドボルトと鋼桁

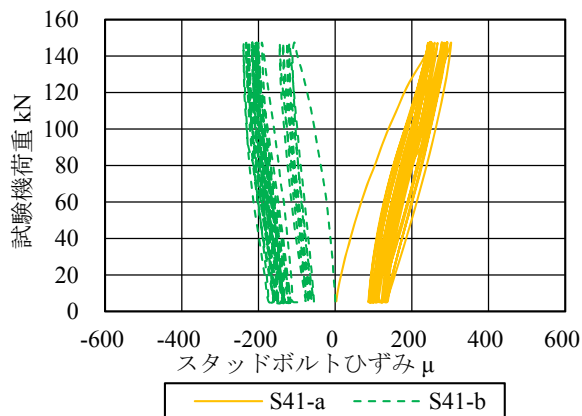
のなす角は 89°～90° となった。また、事前に 10×10×50mm の鋼部材に試験溶接を行い、曲げ試験 (JIS Z 3145 に準拠) および引張試験を実施し、溶接条件を確認した。

(3) 載荷方法

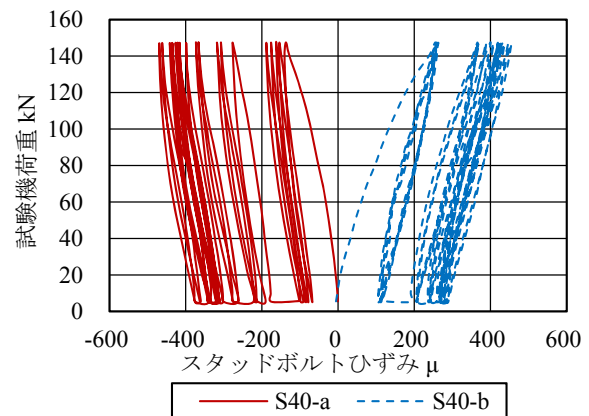
図-3 に疲労試験の概要を示す。動的アクチュエータ (容量: 500kN) を用い、反力壁により反力をとって載荷を行った。疲労試験における載荷荷重の範囲は、軸方向の設計荷重 (14kN) と桁のたわみによる軸方向荷重 (128kN) を加算して算出した 142kN とした。ここで、軸方向の設計荷重は、モノレール構造物設計指針 ²⁾ に従って、モノレール軸重より算出した制動・始動荷重である。また、桁のたわみによる軸方向荷重は事前に実施した FEM 解析結果より定めた。試験の実施にあたり、載荷治具と試験体を常に接触させるため、荷重の下限値を 5kN、上限値を 147kN とし、載荷を行った。載荷速度は 3Hz とし、載荷回数は、供用期間 20 年を想定した 200 万回とし、疲労載荷の継続中、1, 2, 3, 10, 100, 1000, 5000, 1 万, 10 万, 20 万回, 20 万回以降は 20 万回に 1 回, 200 万回まで疲労試験を一旦停止して静的単調載荷を行った。静的単調載荷では、設定した疲労荷重を静的に載荷して各種計測を実施し、疲労載荷による試験体の変状を確認した。

(4) 計測方法および項目

疲労載荷中は、荷重のモニタリングのみを実施し、所定の荷重が載荷されていることを確認した。疲労試験を一旦停止して実施した静的載荷における計測項目は、荷重、水平 2 方向および鉛直変位、スタッドボルトのひず



(a) 計測位置 上段



(b) 計測位置 下段

図-5 スタッドボルト 4 における荷重-ひずみ関係

み、UFC パネルの外観、スタッドボルトに取り付けたナットの弛みとした。変位の計測は、荷重状況を確認するため実施したが、大きな偏心は確認されなかった。図-4 にスタッドボルトのひずみ計測位置を示す。スタッドボルトのひずみは、スタッドボルト軸方向のひずみとし、スタッドボルト 1 本につき荷重側面 2 段、前面 2 段の 4 か所、計 32 か所 (S#0-a, S#1-a, S#0-b, S#1-b) のひずみを計測した。

2.2 耐力確認試験

(1) 荷重方法

本複合構造が十分に一体化していることを検証するために、疲労試験終了後の試験体を用いて耐力確認試験を実施した。耐力確認終了後に、試験体を解体し、UFC パネル、無収縮モルタルおよびスタッドボルトの状況を確認した。耐力確認試験では、疲労試験と比較して最大荷重が数倍になることが予想されたため、荷重装置を油圧ジャッキ (容量:2000kN) に変更して試験を実施した。

耐力確認試験の荷重方法は静的単調荷重とし、疲労試験における荷重荷重が 147kN であることを考慮して、1 ステップ 150kN とし、1 ステップ毎にひび割れ発生状況等の観察を行った。荷重方法は、荷重荷重 450kN までは荷重制御とし、荷重スピードは 0.25kN/sec とした。450kN 以降は変位制御とし、荷重速度は 0.005mm/sec とした。

(2) 計測項目および方法

疲労試験時の静的荷重試験と同様に、荷重、試験体の水平および鉛直変位、スタッドボルトのひずみとパネルの外観およびスタッドボルトに取付けたナットの弛みの有無を観察した。

3. 試験結果および考察

3.1 疲労試験

(1) 疲労荷重時の状況

200 万回の疲労荷重終了後の、試験体の外観目視観察の結果、UFC パネル、無収縮モルタルともひび割れは確

認されなかった。また、疲労荷重中の軸方向 (荷重方向) の変位はごくわずかであり、UFC パネルと無収縮モルタルとの相対変位もごくわずかであった。したがって、UFC パネルと無収縮モルタルとの界面の付着切れはなく、両者は一体として挙動しており、場所打ちコンクリート床版の場合に近い挙動を示していると考えられた。さらに、全ての試験の終了後に実施した解体調査の結果、スタッドボルトの疲労破壊は生じていなかった。

(2) スタッドボルトのひずみ

図-5 に、計測結果の代表例として、スタッドボルト 4 における荷重とひずみ関係を示す。図は、疲労試験を一時停止して実施した静的荷重試験時の計測値を連ねて示したものである。同図(a)は、スタッドボルトに貼り付けた 4 枚のゲージの内、上段 (鋼板から 30mm の位置) におけるひずみを示している。また、同図(b)は、下段 (鋼板近傍) におけるひずみを示している。同図において、荷重とひずみの関係は直線的であり、各回の静的荷重においてはスタッドボルトは弾性変形を示している。また、スタッドボルトのひずみは上段・下段とも、荷重側面と前面で符合が異なっており、引張および圧縮の組み合わせとなっていることが分かる。このひずみの分布から、スタッドボルトは S 字状に曲げ変形していると考えられた。これは、スタッドボルトの付け根で曲げ変形が生じるが、スタッドボルトは無収縮モルタルを介して UFC パネルにより拘束されたことによると考えられる。したがって、スタッドボルトにはせん断応力に加え、曲げ応力が作用したと考えられる。また、疲労荷重回数とともに残留ひずみは増加傾向を示している。これは、疲労荷重により、スタッドボルト周辺の無収縮モルタルの局所的な損傷などにより生じた残留変位の影響が現れたものと考えられる。

図-6 は、各スタッドボルトにおける荷重側面、下段の計測位置で静的荷重中に計測された引張ひずみの最大値を示したものであるが、概ね荷重位置に近い順にひずみ

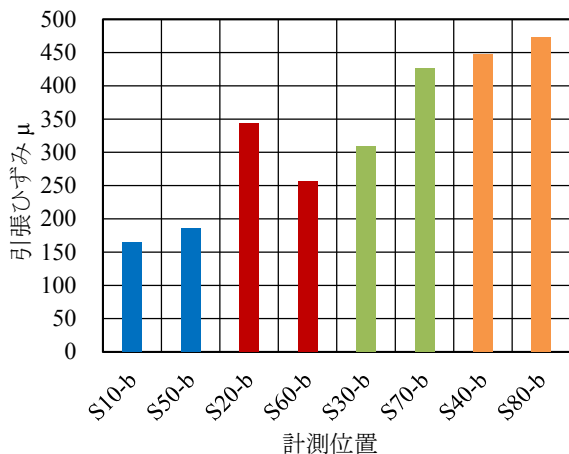


図-6 各スタッドボルトの引張ひずみの最大値
(載荷側面・下段)

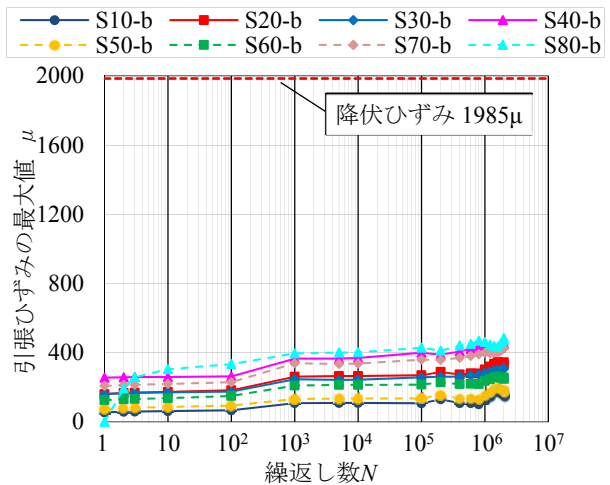


図-7 各スタッドボルトの引張ひずみの最大値の履歴
(載荷側面・下段)

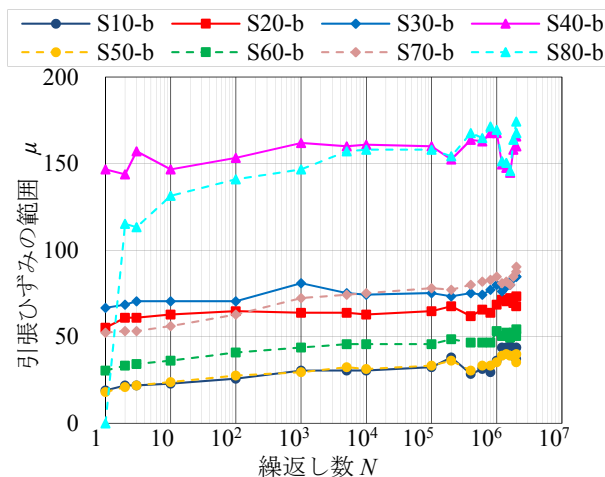


図-8 各スタッドボルトの引張ひずみの範囲の履歴
(載荷側面・下段)

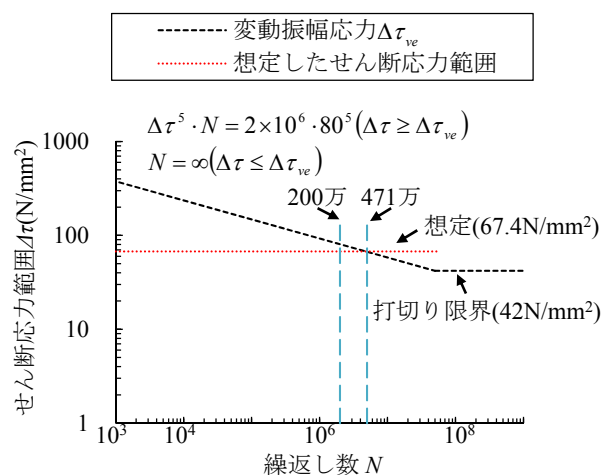


図-9 疲労設計曲線 (せん断応力を受ける継手)

が大きいことがわかる。

図-7に、各スタッドボルトの載荷側面の下段における引張ひずみの最大値の履歴を示す。8本のスタッドボルトの内、スタッドボルト8において最も大きな引張ひずみ(473 μ)が発生した。このひずみは、降伏ひずみ(1985 μ)の約25%程度であり、降伏ひずみに対しては余裕があると言える。また、ひずみの最大値は疲労載荷回数200万回まで緩やかに増加傾向を示している。ただし、10万回以降の載荷回数では、スタッドボルト4、7、8のひずみの増減と、その他のスタッドボルトの増減が逆になる傾向が見られた。各スタッドボルトの応力分担は載荷回数によって若干変動していると考えられる。次に、図-8は各スタッドボルトの載荷側面の下段における引張ひずみの範囲の履歴を示したものである。ここで、引張ひずみの範囲は各回における静的載荷時のひずみの最小値と最大値の差であり、疲労による残留ひずみをキャンセルした弾性ひずみに相当する。全てのスタッドボルトとも200万回まで、ひずみの範囲はほぼ一定で、ひずみ範囲

の変動は小さかった。ただし、載荷位置に最も近いスタッドボルトの下段の載荷側面(S40-b, S80-b)では、疲労載荷の初期の段階からひずみ範囲が大きかった。これは、上述のように各スタッドボルト毎に応力分担が異なっていることと同様の結果であると考えられる。その原因としては、一体として機能するUFCパネルと無収縮モルタルは剛体ではなく、UFCパネルと無収縮モルタルの変形により、載荷端からの距離が離れた位置のスタッドボルトでは分担荷重が小さくなったことが考えられる。また、載荷側のスタッドボルトと無収縮モルタルとの付着が早期に切れたことも考えられる。

(3) スタッドボルトに作用したせん断力

スタッドボルトの軸方向ひずみにより、スタッドボルトに作用したせん断力を簡易的に評価した。スタッドボルトの計測においては、せん断ひずみは直接計測できないため、軸方向ひずみを計測している。したがって、想定したせん断力がスタッドボルトに作用したかどうかを計測された軸方向ひずみにより評価した。ここで、載荷

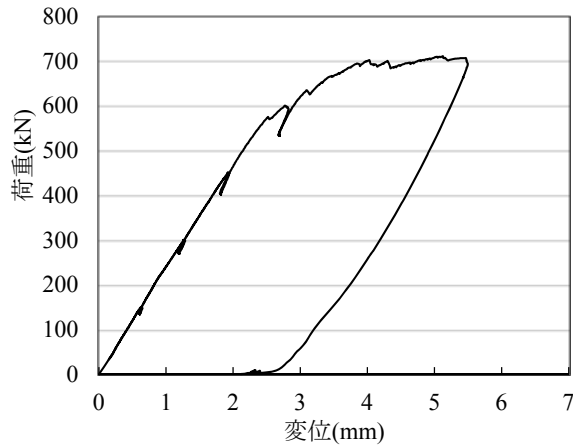


図-10 荷重-変位関係(耐力確認試験)

荷重の設定において想定したせん断力は、17.8kNである。鋼構造物の疲労設計指針・同解説³⁾では、各継手の疲労強度について、強度等級に応じて疲労設計曲線を設定している。スタッドボルトを溶接した継手は、せん断応力を受ける継手に分類され、変動振幅応力の場合、図-9に示す疲労設計曲線が示されている。図の疲労設計曲線は式(1)、式(2)で与えられる。

$$\Delta \tau^m \cdot N = D_0 \quad (\Delta \tau \geq \Delta \tau_{ve}) \quad (1)$$

$$N = \infty \quad (\Delta \tau \leq \Delta \tau_{ve}) \quad (2)$$

ここで、 $\Delta \tau$ ：せん断応力範囲(N/mm²)、 m ：疲労設計曲線の傾きを表す指数(せん断応力を受ける継手 $m=5$)、 N ：繰返し数(cycles)、 D_0 ：疲労設計曲線を表すための定数($D_0 = 2 \times 10^6 \cdot \Delta \tau_f^m$)、 2×10^6 回基本疲労強度(強度等級 S: 80N/mm²)、 $\Delta \tau_{ve}$ ：変動振幅応力における応力範囲の打ち切り限界(N/mm²)、である。

変動振幅応力における応力範囲の打ち切り限界 $\Delta \tau_{ve}$ は、42N/mm²である。ここで、本構造において想定したスタッドボルトのせん断応力範囲は、67.4N/mm²であり、式(1)より疲労寿命は471万回と評価される。つまり、200万回の疲労載荷において健全であった本試験結果は、既往の疲労設計曲線とも矛盾しないことが確認された。

3.2 耐力確認試験

図-10に、耐力確認試験における荷重-変位関係を示す。最大荷重711kNで荷重の増加が認められなくなり、全てのスタッドボルトの降伏が確認されたため、載荷を終了した。なお、道路橋示方書・同解説(Ⅱ鋼橋編)⁴⁾より、引張強さ448N/mm²を $\sqrt{3}$ で除して求めたスタッドボルト8本によるせん断耐力は543kNとなる。図-11は、耐力確認試験時における載荷側面、下段におけるスタッドボルトの計測ひずみが降伏ひずみ(1985 μ)に達した時点

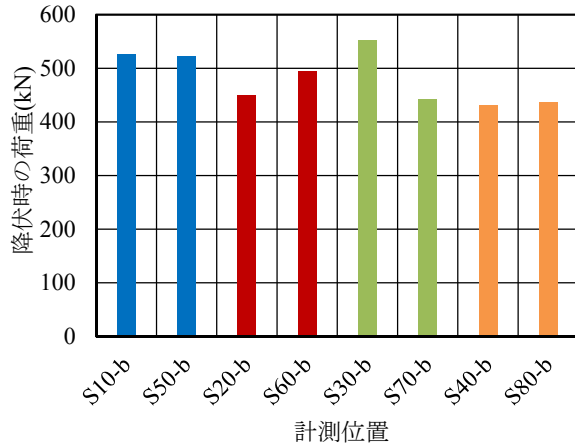


図-11 各スタッドボルトにおける降伏時の荷重(載荷側面・下段)

の荷重を示したものである。スタッドボルトは載荷荷重430～550kNの範囲で降伏したと考えられる。載荷側のスタッドボルト4、スタッドボルト8においては430kN程度であり、比較的早期に降伏に達したと考えられる。これは、スタッドボルトと無収縮モルタルとの付着が比較的早期に切れたことによると考えられる。

4. 結論

本研究より得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 実大の試験体を用いた200万回の疲労載荷後の目視観察の結果、200万回の疲労耐久性が確認された。なお、スタッドボルトのひずみは、最大で473 μ であった。
- (2) 200万回の疲労載荷において健全であった本試験結果は、既往の疲労設計曲線とも矛盾しない。
- (3) スタッドボルトの変形モードはS字状の曲げ変形を呈した。
- (4) 耐力確認試験の結果、最大荷重は711kNであり、引張強さから換算したスタッドボルト8本によるせん断耐力543kNより大きかった。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー第113号，超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，pp.54-70, 2004
- 2) 日本道路協会：モノレール構造物設計指針，pp.61-81, 1975
- 3) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説一付・設計例一，pp.27-50, 19
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，p.153