

## S 2. 橋梁伸縮装置の損傷原因に関する調査研究

施工技術総合研究所 研究第二部 ○小野 秀一

### 1. はじめに

施工技術総合研究所は約150,000m<sup>2</sup>の広大な敷地と様々な試験設備を有しており、これらを活用して実物大模型による載荷試験や繰り返し載荷、実地向けの施工試験等を行うとともに、耐荷性能や疲労耐久性、出来形の確認といった施工法の検証などの調査研究を行っている。このような構造物の耐久性や耐荷力に関する調査研究の経験を生かし、当研究所では、建設機械や公園遊具、橋梁部材など様々な実構造物の損傷状況の調査や原因の解明、さらにそれらの対策方法の検討や追跡調査などを行ってきた。

ここでは、これまでに検討を行った各種損傷原因調査研究業務のなかから、最近実施した、道路橋に設置されている鋼製の伸縮装置の損傷原因に関する調査研究について紹介する。

なお、本報告の内容は、平成22年7月に開催されたInternational Association for Bridge Maintenance and Safety主催の「Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization」に投稿した論文「Fatigue evaluation of steel finger type expansion joints for highway bridges」(S.Ono, S.Sakai, T.Imamura)をもとに編集したものである。

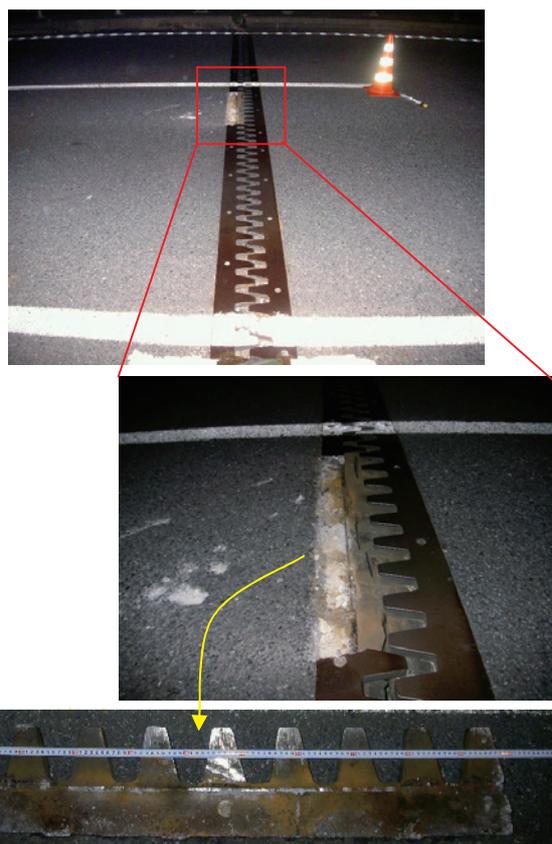
### 2. 損傷概要と検討方針

近年、東名高速道路の橋梁部に設置されている鋼製の伸縮装置の一つである、鋼製フィンガージョイントに疲労損傷が見つかった<sup>1)</sup>。東名高速道路は1969年に供用を開始し、当該道路には損傷が見つかったジョイントと同種のもので、およそ1,300基が取り付けられている。橋梁伸縮装置は、温度変化や活荷重による橋梁の伸縮やたわみによる角折れを吸収し、路面の平坦性を確保し、スムーズな車両走行のためには、欠くことのできない重要な部材である。

ここで対象とする鋼製フィンガージョイントの損傷事例を図-1に示す。これは、鋼製フィンガージョイン

トのフェースプレートが破断し、外れてしまった事例である。外れたフェースプレートは、図-1に示したように、長さ1m、厚さ30mmの鋼部材であり、重さは約340kN (35kgf)であった。また、この事例においては、走行車両が、フェースプレートが外れた伸縮装置部を走行したために、横転するという事故を引き起こしてしまった。さらには、この損傷を機に行われた緊急点検によって、他のフェースプレートにも損傷が見つかったことから、高速道路における安心・安全な通行を確保するために伸縮装置の適切な維持管理が重要であると再認識された事例である。

鋼製フィンガージョイントは図-2に示すように、路面に設置される楕形のフェースプレートと、フェース



Length:1m, Thickness:30mm, Width:200mm, Weight:35kgf

図-1 Damage case of finger type joint

プレートの裏面側には、橋梁本体と固定し、荷重を橋梁本体に伝達させるためのアンカープレート、リブプレート、ウェブプレートが溶接によって取り付けられた構造である。通行車両は鋼製フィンガージョイント上を直接走行することから、鋼製フィンガージョイントは通過車両ごとに繰り返しの荷重を受けるため、疲労条件としては厳しい環境にある。しかし、その一方で、これまでには鋼製フィンガージョイントの破壊メカニズムや疲労寿命に関する検討事例は少なく、適切な維持管理を行うためには、疲労に対するデータが必要であると考えられる。

このようなことから本研究では、今後の適切な維持管理を行う上で必要な疲労に関する基礎データを得る目的で、破損した鋼製フィンガージョイントを詳細に観察し、立体FEM解析によって、破壊に至る過程および損傷メカニズムを推定するとともに、疲労試験によってフェースプレートが破断に至るまでの疲労寿命について検討したものである。

### 3. 検討結果概要

#### 3.1 損傷ジョイント詳細調査

実橋から回収された鋼製フィンガージョイントに取り付けられていたアンカープレートを図-3に示す。アンカープレートの破断位置近傍の腐食が特に著しく、減肉している状況が確認された。また図-1に示した、回収されたフェースプレートの裏面においては、フェースプレートに接続されていたアンカープレート、リブプレート、ウェブプレートの破断が確認されるとともに、フェースプレートの裏面全体に腐食が認められた。特にアンカープレートおよびリブプレートの腐食が著しいことが確認された。

フェースプレートの破断面を図4に示す。フェースプレートの破断面には、疲労破面の特徴的な模様であるビーチマーク模様が観察され、繰り返しの力が作用することによって生じた疲労破断であることが判明した。またビーチマーク模様から、疲労き裂の起点は、ウェブプレートとの溶接部であることが分かった。

さらに別の事例として、フェースプレートにき裂が発生していることが確認されたために実橋から取り外された鋼製フィンガージョイントを図-5に示す。この事例においても、既にアンカープレートとリブプレートが破断しており、ウェブプレートにき裂は水平方向に長さ1m程度まで進展していた。またフェースプレ

ートのき裂は、ウェブプレートのき裂の両端部からフェースプレート方向に進展していることが分かった。

以上のことから推定した鋼製フィンガージョイントの破壊メカニズムおよび損傷過程を図-6に示す。最初

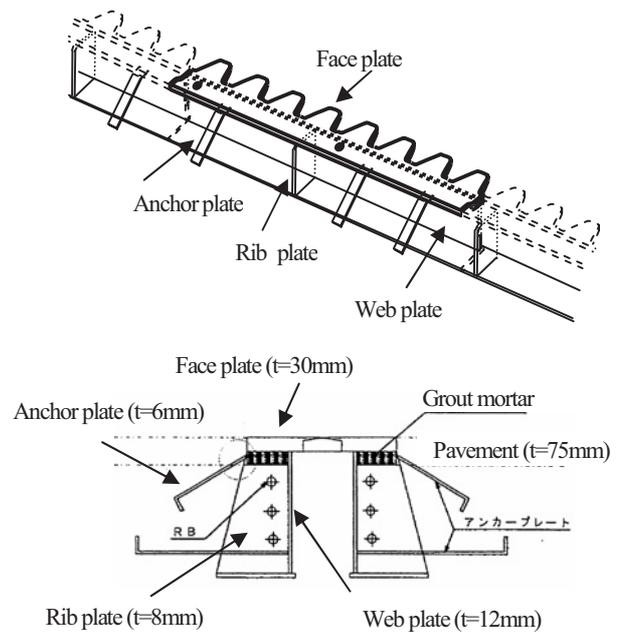


図-2 Steel finger type expansion joint

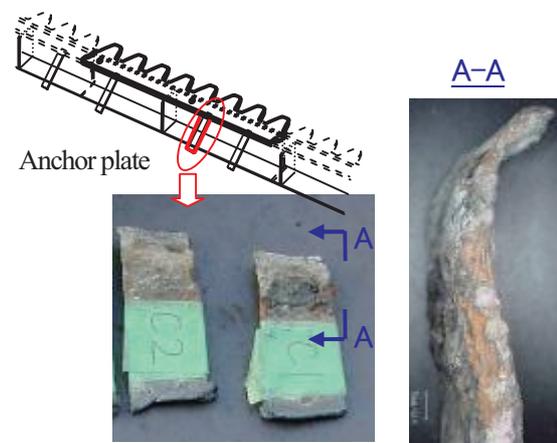


図-3 Fractured anchor plates

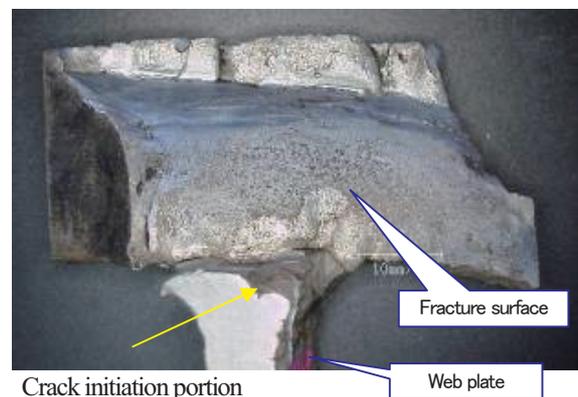


図-4 Fracture surface of face plate

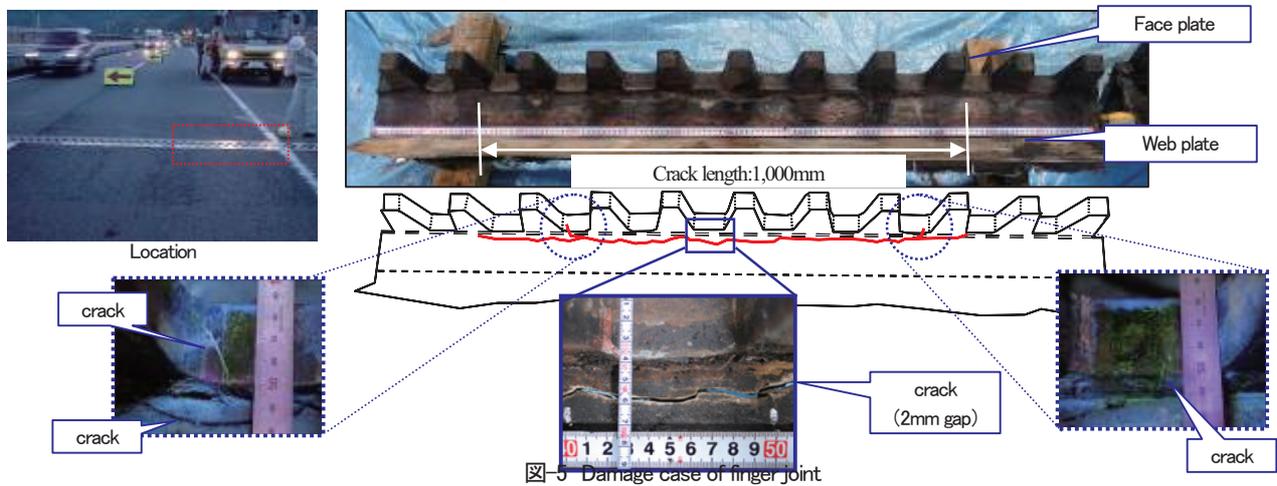


図-5 Damage case of finger joint

にアンカープレートが輪荷重の繰り返しによる疲労および腐食により破断し、次にリブプレートが疲労もしくは腐食によって破断する。その後、フェースプレートとのウェブプレートとの溶接部には、輪荷重による首振り現象によってウェブプレートにき裂が発生し、ウェブプレートのき裂は橋軸直角方向に進展する。さらにウェブプレートのき裂の進展にしたがい、輪荷重によるフェースプレートの変形挙動は橋軸直角方向の曲げが卓越するようになり、最終的にはフェースプレートの曲げの繰り返しにより、フェースプレートの橋軸方向にき裂が発生したのちに破断する、と推定した。

### 3.2 FEM解析による損傷メカニズムの検証

立体FEMは、損傷した鋼製フィンガージョイントの詳細観察で推定した破壊メカニズムと損傷過程を解析的に検証する目的で行った。以下に、解析の概要と結果を示す。

#### (1)FEMモデル

FEMモデルの概要を図-7に示す。モデルを構成する部材や部材寸法等は、損傷が見つかった実際のフィンガージョイントと同様とした。図に示すように、フェースプレートとウェブプレートはソリッド要素、それ以外の部材についてはシェル要素でモデル化した。

荷重条件は、図-8に示すように、実際の車両が通過する状況を再現できるように移動荷重とし、移動荷重はLoad case A,B,Cの3パターンで表した。ここで、Load case Aはフェースプレートの床版側に、Load case Cはフェースプレートの楕円部に荷重を載荷した場合であり、Load case Bはフェースプレート全面に荷重が載荷された場合である。載荷荷重はLoad case AおよびCは25kN、Load case Bは50kNとした。

#### (2)解析手順

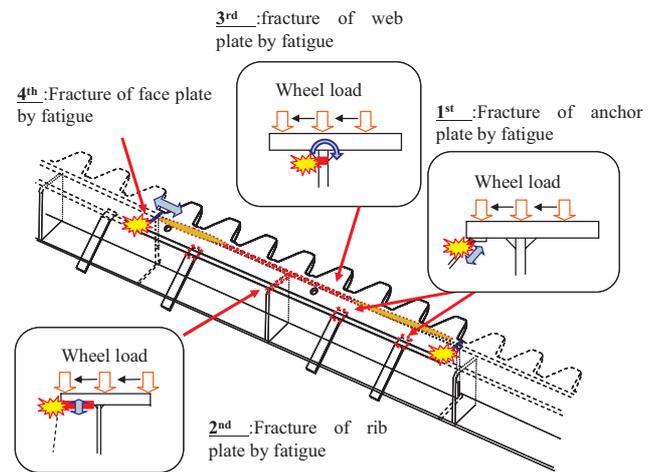


図-6 Fracture mechanism and procedure

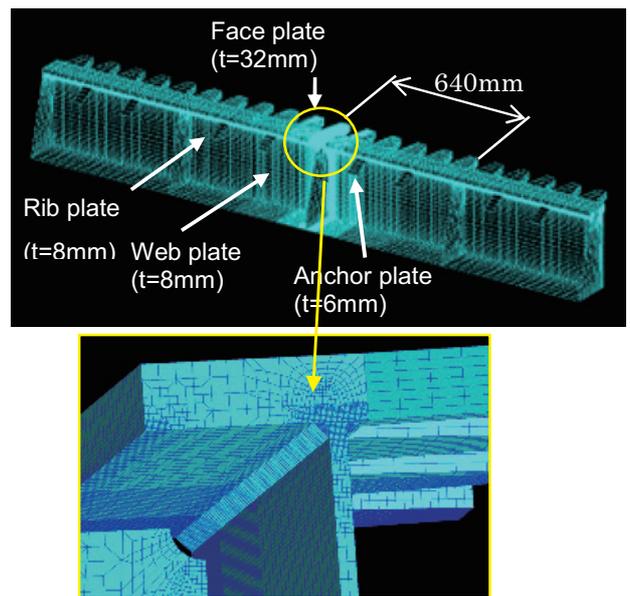


図-7 General view of the FEM model

解析では、図-6に示した損傷過程を検証する目的で、各損傷過程に対応する4つの解析モデル (Model Aは損傷のない健全モデル、Model Bはアンカープレー

ト破断モデル、Model Cはリブプレート破断モデル、Model Dはウェブプレート破断モデル) を用意した。

これらの4つのモデルを用いて、次の手順でFEM解析を行った。

- ①健全モデル (Model A) を用いたFEM解析により鋼製フィンガージョイント各部に生じる応力範囲を求め、溶接継手部の破断寿命を推定する。
- ②解析により、寿命が最も短いと推定された継手部材の破断モデルを選定する。
- ③選定されたFEMモデルを用いて再度、解析を行い、寿命が短いと推定される部材を抽出する。
- ④寿命の短い部材を取り外した解析モデルを再度、選定し、解析結果から寿命を求める。

### (3)解析結果

鋼製フィンガージョイント各部の疲労強度を図-10、寿命計算の基礎データとした東名高速道路の軸重頻度分布を図-11に示す。FEM解析結果の一例として、図-12に応力コンター図を示す。この結果では、アンカープレートおよびリブプレートに生じる応力範囲は、それぞれ34MPa、35MPaと算出されている。

表-1および表-2は、それぞれ各部の応力範囲と算出された疲労寿命を示す。健全モデルであるModel Aの解析の結果、アンカープレート、リブプレート、ウェブプレート、フェースプレートのそれぞれの応力は、34、35、28、4MPaとなり、各部の疲労寿命は4.7年、18.8年、37.8年、64,000年以上と算出された。よって、最初に破断すると考えられる部材は、アンカープレートとなる。次に、アンカープレートを破断させた解析モデル (Model B) を用いて解析を行ったところ、次に破断する部材は、リブプレートとなる結果が得られた。同様に順次、解析を進めたところ、次はウェブプレートの破断となり、先に実施した損傷ジョイントの詳細調査から推定した損傷過程と一致する。すなわち、図-6に示した破壊メカニズムおよび損傷過程は妥当であると考えられる。

### 3.3 疲労試験

鋼製フィンガージョイントの最終破壊形態であるフェースプレートの破断寿命について検討するために、実物大フェースプレート試験体による疲労試験を行った<sup>2)</sup>。フェースプレートの破断寿命を知ることは、図-1に示すような、フェースプレートの破断による事故を未然に防止するためには重要な検討課題である。

#### (1)試験方法

フェースプレート試験体を図-13に示す。試験体の形状寸法は、図-5で示した、実際に損傷が生じていた鋼製フィンガージョイントのフェースプレートを模擬したもので、フェースプレートの板厚32mm、ウェブ

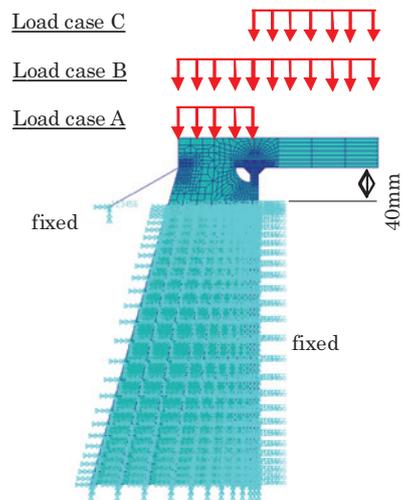
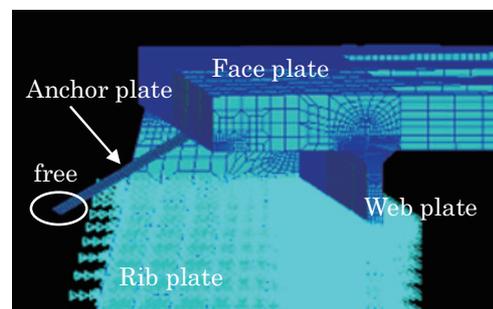
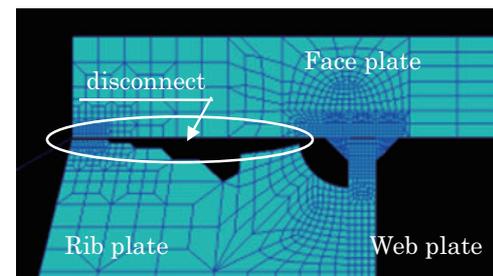


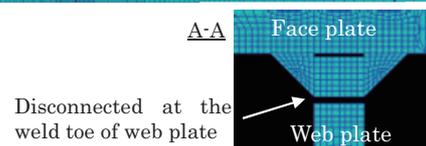
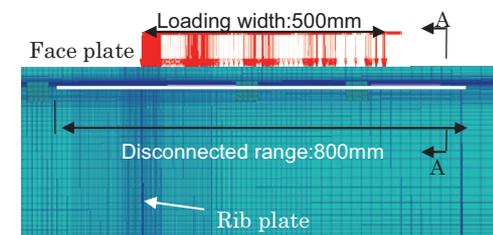
図-8 Loading and boundary conditions



(Model B) Rib plate fracture model



(Model C) Rib plate fracture model



(Model D) Web plate fracture model

図-9 Analysis models

プレート厚8mmである。長さは1.6mとした。また、試験体の両端には、疲労き裂を誘発させるべくV字型のノッチを入れた。

試験の载荷姿図を図-14に示す。試験体の両端は固定として、中央に32kNの繰り返し荷重を負荷した。疲労試験中は、磁粉探傷試験を併用した目視観察により、疲労き裂の発生および進展を観察した。また、疲労き裂の起点と進展状況を、疲労試験後に試験体の破断面から確認するために、負荷荷重を正規荷重の1/2にするピーチマーク操作を行った。

### (2)試験結果

繰り返し载荷を473万回まで実施した時点で、試験体が破断した。図-15に試験後の試験体を示す。試験体の両端部に設けたV字型ノッチよりき裂が発生し、破断に至っている。疲労き裂の破面観察によると、き裂はウェブプレートとフェースプレートの溶接部を起点としていることが確認され、このき裂の起点および進展状況は、実際の破断したフェースプレートで観察されたものと同様であることが確認された。すなわち、本疲労試験は実際のフェースプレートの破断を再現しているものと考えられる。

### (3)疲労寿命評価

疲労試験結果から、フェースプレートにき裂が発生し、破断に至るまでの疲労寿命を推定した。

疲労試験では、32kNの繰り返し载荷を473万回行った時点でフェースプレート試験体が破断した。図-11に示した東名高速道路の軸重分布を基に算出した疲労寿命は、およそ3.2年となった。すなわち、少なくとも

三年に一度は、フェースプレートに疲労き裂が生じていないかどうかを検査することで、フェースプレートの破断による事故を未然に防止することが出来ると考えられる。

### 3.4 まとめ

本試験研究では、高速道路橋に設置されている鋼製フィンガージョイントの破壊形態および疲労特性を明

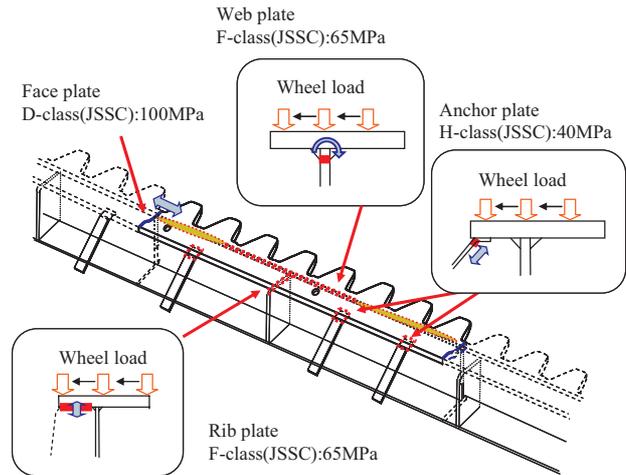


図-10 Fatigue strength of each weld joint

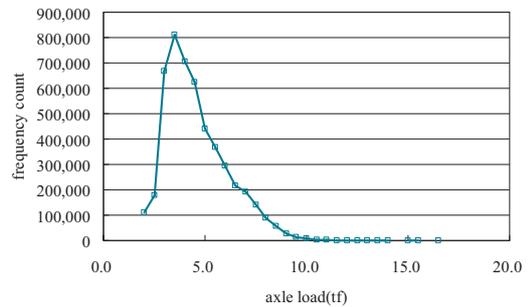


図-11 Frequency histogram of axle load

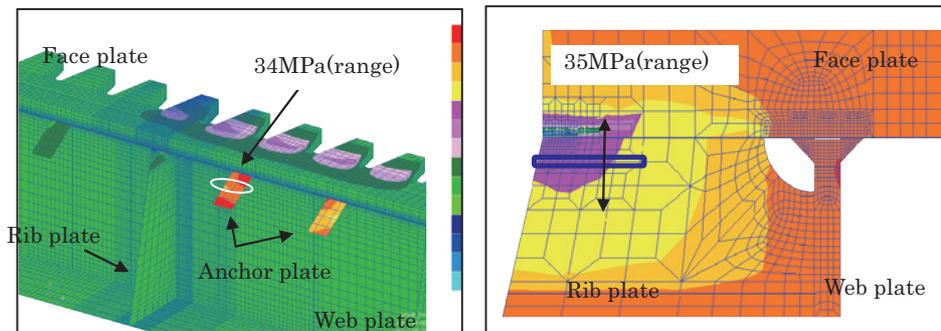


図-12 Results of FEM analysis

表-1 Stress range at each member

Member	Fracture procedure			
	Model A	Model B	Model C	Model D
Anchor plate	34	-	-	-
Rib plate	35	53	-	-
Web plate	28	31	67	-
Face plate	4	5	9	154

表-2 Fatigue life of each member connection

Member	Fracture procedure			
	Model A	Model B	Model C	Model D
Anchor plate	4.7	-	-	-
Rib plate	18.8	4.1	-	-
Web plate	37.8	24.4	0.7	-
Face plate	64172.1	27070.6	4874.1	0.8

らかにするために、損傷したジョイントの詳細調査、立体FEM解析、疲労試験などを行った。これらの検討結果を以下にまとめる。

- (1) 鋼製フィンガージョイントの破壊は、走行車両の輪荷重が直接、負荷したことによる疲労である。
- (2) 破壊過程は、アンカープレート、リッププレート、ウェブプレート、そして最終的にはフェースプレートが破断する。
- (3) フェースプレートの損傷メカニズムについては、ウェブプレートのき裂によってフェースプレートがたわむことで、橋軸直角方向の両端固定梁としての曲げ挙動を示し、その繰り返しによって疲労き裂が生じ、破断に至る。
- (4) フェースプレートにき裂が生じ破断に至るまでの疲労寿命は、疲労試験結果から約3.2年と推定された。したがって、少なくとも三年に一度は、疲労き裂の有無を点検する必要がある。

#### 4. おわりに

本報は、橋梁に取り付けられている伸縮装置の損傷事例を取り上げて、損傷メカニズムや損傷原因の推定を行った調査研究について報告したものである。

今日、我が国においては橋梁をはじめとする膨大な社会基盤ストックの老朽化が進み、より適切かつ効率的な維持管理が必要である。一方、そのためには対象物の損傷メカニズムや損傷過程、疲労寿命等を詳細に把握することが重要である。

当研究所では長年培った構造物の耐久性や耐荷力検討、各種構造物の損傷や事故原因調査等の経験を生かし、我が国のより良い社会基盤整備、そして維持管理技術の向上に貢献できるよう、さらに努力を重ねてい

く所存である。

#### 参考文献

- 1) 長尾、米川: 東名高速道路(沼津～富士間)における鋼製くし形伸縮装置の損傷に関する考察、第63回土木学会年次学術講演会、I-072、2008.9.
- 2) 荒本、酒井、小野: 鋼製フィンガージョイントの疲労試験、第63回土木学会年次学術講演会、I-073、2008.9.

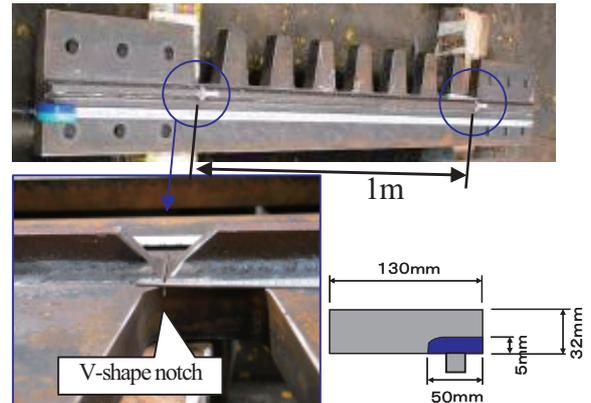


図-13 Face plate specimen

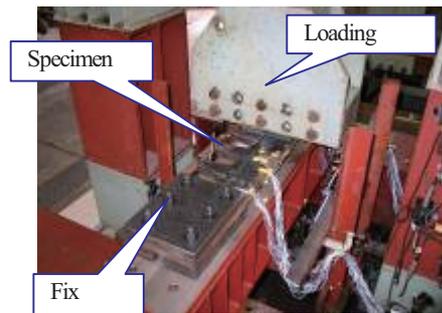
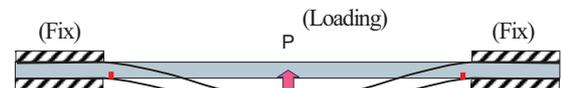
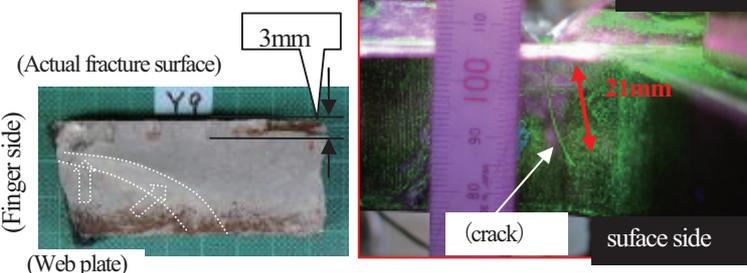


図-14 Fatigue test set-up



(specimen after fatigue test)



(Finger side)

(Web plate)

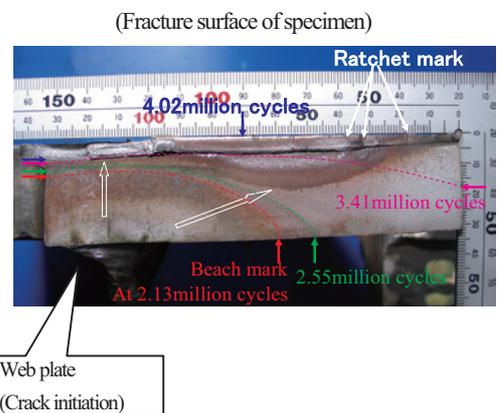


図-15 Result of fatigue test