

## 鑄鉄製フィンガージョイント破断の原因究明

阪神高速技術(株) 技術部調査点検課	吉田 貴保
阪神高速技術(株) 技術部調査点検課	高村 義行
阪神高速技術(株) 技術部技術開発課	山上 哲示
阪神高速道路(株) 大阪管理部保全技術課	崎谷 淨

### 要 旨

2008 年 5 月に長大橋梁の端部にある鑄鉄製の伸縮継手の爪の 1 本が破断しているのが発見された。外観目視から明確な変状は見当たらず、さらなる詳細な原因分析が必要と考えられた。そこで、破損部材の破断面分析と材質組成分析を実施し、破断の可能性を破壊力学的に検討した。その結果、伸縮継手製造上の不具合から生じた下面の強度の比較的弱い片状黒鉛部で疲労亀裂が発生、球状黒鉛部へ疲労亀裂が進展、ぜい性破壊に至ったものと判明した。

キーワード：伸縮継手、鑄鉄、球状黒鉛、片状黒鉛

### はじめに

今回伸縮装置の損傷が発見された橋梁は、阪神高速道路 4 号湾岸線に位置し、中央径間 355 m、橋長 653m、主塔 2 本、ケーブルが 1 面ケーブル（ハープ型 4 段）の長大斜張橋である。

4 号湾岸線は、1982 年 9 月に開通しており、交通量が 86,600 台/日（2008 年平均）、大型車混入率が約 29%（2004 年阪神高速道路起終点調査）、片側 3 車線の往復 6 車線の重交通路線である。

その橋梁の西側に設置されている伸縮継手装置は、伸縮量および端部のペンデル支承による強制沈下量が大きいため、球状黒鉛鑄鉄製（FCD40 1490mm×1012mm×135mm）の 2 点支持 1 端片持ちフィンガー形式を採用している。この伸縮継手が開通後 26 年経過した 2008 年 5 月に破断しているのが発見された。破損したフィン

ガーパネルを写真-1、破断したフィンガーを写真-2 に、フィンガージョイントの断面図を図-1 に示す。

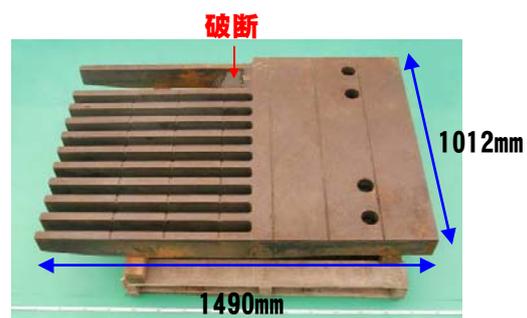


写真-1 破損したフィンガーパネル

破断したフィンガーについて、磁粉探傷試験、断面組織観察、衝撃試験、硬度試験および引張試験を実施しフィンガー破断原因の究明を行った。

以上の調査結果に加え、疲労亀裂、ぜい性破壊などを含む破壊力学的検討を行い、伸縮継手破断に至った経緯の検討を実施した。



写真-2 破断フィンガー（側面）

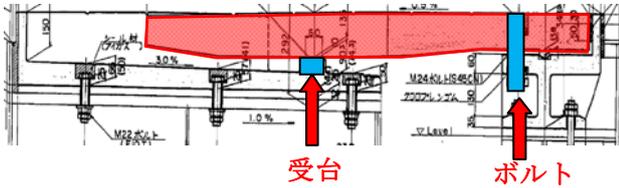


図-1 フィンガージョイント側面図

## 1. 鋳鉄とは

鋳鉄は、冷却過程、黒鉛の量、形状、寸法および分布状態により、様々な特性を示す材料である。

球状黒鉛鋳鉄（FCD）は、鋼材のような延性があり、引張強さも同じ程度有する材料である。

一方、片状黒鉛鋳鉄（FC）は、球状黒鉛鋳鉄に比べ、ほとんど延性がなく引張強度も小さい。

鋳鉄は鋳型に溶けた鉄を流し一体成型するため、特に今回損傷したフィンガープレート（厚さ最大 135mm）のような複雑な形状で、かつ板厚が大きいものに用いられている。

## 2. 調査内容

破断したフィンガーに対して、蛍光磁粉探傷試験（MT）にて亀裂の有無の確認を行い、断面組織観察、硬さ測定、引張りおよび衝撃試験により材料特性を調査した。マイクロ破面観察では、破断面の表面状況、指示模様から亀裂の判別を行い、さらに、材料特性を調査した。

また、今回の損傷が特異な損傷か判断するため破断したフィンガープレートについても外観状況観察、磁粉探傷試験を行い、亀裂の有無を確認し、スンプ法による組織観察で材料特性を調査した。

さらに、今回破断したフィンガープレートに隣接するフィンガープレートについても現地にて磁粉探傷試験を行った。

## 3. 調査結果

### 3-1 蛍光磁粉探傷試験

破断フィンガーについて、蛍光磁粉を用いた磁粉探傷試験を行った結果を写真-3 に示す。破損部近傍の下面には線上の指示模様が認められ、当該部表面の拡大観察により、複数の亀裂が存在していることを確認した。

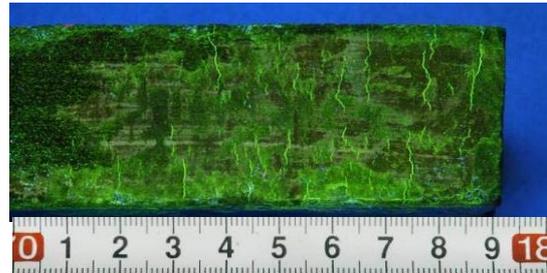


写真-3 破損フィンガー下面側の磁粉探傷試験結果

また、破損したフィンガープレートの磁粉探傷試験を行った結果を写真-4、図-2 に示す。破損部に隣接するフィンガープレート縁端のフィンガー1本にも、同様の線状指示模様を確認した。

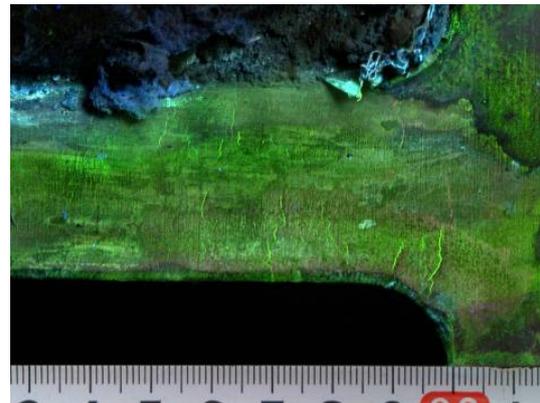


写真-4 破断フィンガーに隣接するフィンガーの磁粉探傷試験結果

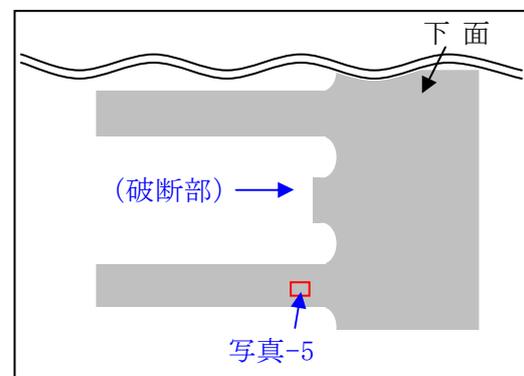


図-2 磁粉探傷位置

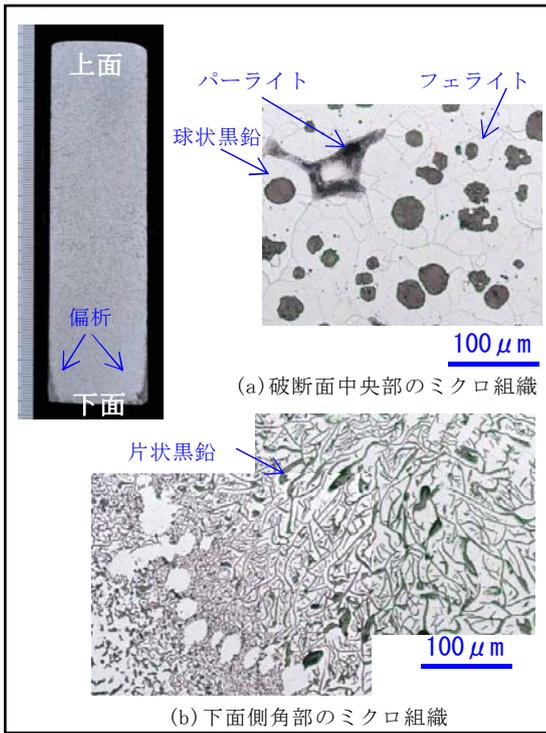


写真-5 断面組織観察結果（光学顕微鏡）

### 3-2 断面組織観察

破断したフィンガーについて、光学顕微鏡による破断部近傍の断面組織観察の結果、下面側の両角部に偏析が確認された。その観察写真が写真-5 (a) (b) である。破面中央部には、球状黒鉛の組織が見られるが、下面側角部の偏析部には強度の小さい片状黒鉛を確認した。

次に、その偏析部を電子顕微鏡により調査した。その結果を写真-6 に示す。光学顕微鏡による断面組織観察結果同様、下面側の両角部に片状黒鉛を確認した。

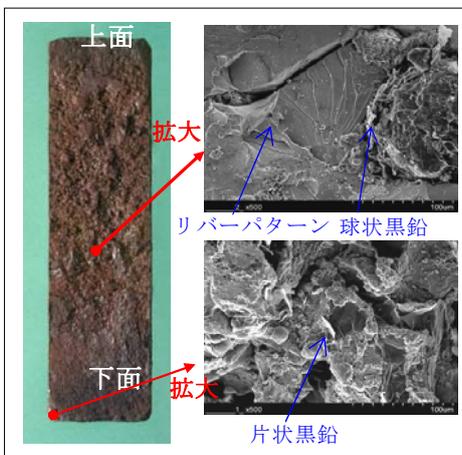


写真-6 断面組織観察結果（電子顕微鏡）

断面組織観察の結果、放射状模様、リバーパターンなどの様相から、下面側を起点として疲労亀裂が生じ、上面側に進展、ぜい性破壊したものと考えた。

また、下面側の両角部は球状黒鉛でなく片状黒鉛が認められ、下面側より約 20mm 位置から上では球状黒鉛が認められた。そのため、フィンガーパネル下面は球状黒鉛本来の機械的性質が不足している。ちなみに、下面に偏在する片状黒鉛は鋳型成形時の冷却過程の違い等が原因で形成されたものと考えられる。

破損したパネルの他のフィンガーについても、下面側の組織観察を実施したところ、いずれのフィンガーにも、破断部と同様に片状黒鉛を確認した。

### 3-3 衝撃試験、硬度試験および引張試験

破断したフィンガーから切り出した球状黒鉛部の供試体の強度特性は、表-1、表-2 に示すようにシャルピー衝撃値にばらつきがあり、低めであるものの、ブリネル硬さおよび引張特性は、球状黒鉛鋳鉄の JIS 規格である FCD-400-18A 規格値を満足していた。

なお、ビッカース硬さを計測したところ球状黒鉛部は、144~160HV で異常はないと見られるが、偏析部の片状黒鉛部は 95.3~103HV と球状黒鉛部に比べて、極めて低い値であった。

表-1 衝撃試験、硬度試験結果

試験片番号	衝撃性質		ブリネル 硬さ HBW 10/300
	吸収 エネルギー (J)	シャルピー 衝撃値 (J/cm <sup>2</sup> )	
球状黒鉛部①	7	8	152
球状黒鉛部②	10	13	154
球状黒鉛部③	12	15	152
FCD-400-18A 規格値 (JIS G5502)	個々の値 ≥ 11 3 個の平均 ≥ 14	—	120~180

表-2 引張試験結果

試験片番号	衝撃性質			
	0.2%耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	絞り (%)
球状黒鉛部①	307	445	15.2	13.0
球状黒鉛部②	305	442	19.8	17.0
FCD-400-18A 規格値 (JIS G5502)	≥250	≥390	≥15	—

#### 4. 破壊力学的検討

##### 4-1 片状黒鉛鑄鉄部の疲労亀裂発生について

###### (1) フィンガーの荷重条件と作用応力

フィンガーの作用応力を表-3に示す荷重条件、図-3に示す構造モデルにより算出した。その結果を表-4に示す。

ここでは、図-3に示す構造モデルのC部とB部に荷重が繰返し作用する場合のフィンガー下端における作用応力を算出した。なお、計算時の遊間は標準温度20℃（しゅん工図通り）の値とした。

表-3 荷重条件<sup>2)</sup>

検討荷重	輪荷重100kN
衝撃係数	i = 0, 1
輪荷重載荷幅	500mm
フィンガー間隔	85mm（フィンガー35mm＋すき間50mm）
フィンガー断面	35mm×135mm

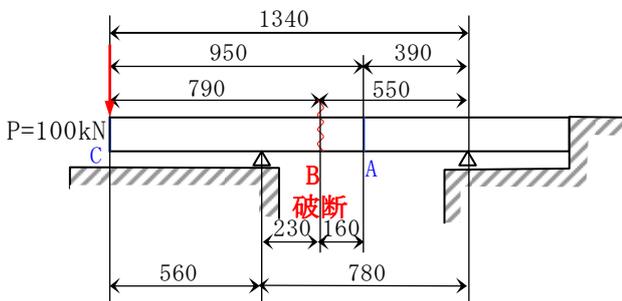


図-3 構造モデル

その結果、43.7～87.4MPa 相当の応力振幅が作用していることが判明した。

また、フィンガー下面に作用する応力は引張応力だけでなく圧縮応力も作用していることが

分かる。

表-4 作用応力

作用応力	衝撃係数		荷重位置
	i = 0	i = 1	
最大応力 $\sigma_{max}$ (MPa)	25.4	50.8	B
最小応力 $\sigma_{min}$ (MPa)	-61.9	-124	C
応力比 R	-2.44	-2.44	
応力範囲 $\Delta\sigma$ (MPa)	87.3	175	
応力平均 $\sigma_m$ (MPa)	-18.3	-36.5	
応力振幅 $\sigma_a$ (MPa)	43.7	87.4	

##### (2) 鑄鉄の疲労強度

図-4に示す各種鑄鉄の疲労設計曲線（S-N 曲線）より、FCD-F（球状黒鉛鑄鉄 フェライト基地）の $10^7$ 回における疲労強度 $\sigma_{max}$ ＝約260MPa（片振り引張、R=0）である。これに対し、FC-F（片状黒鉛鑄鉄、フェライト基地）の疲労強度は約50MPaと約1/5であることが分かる。

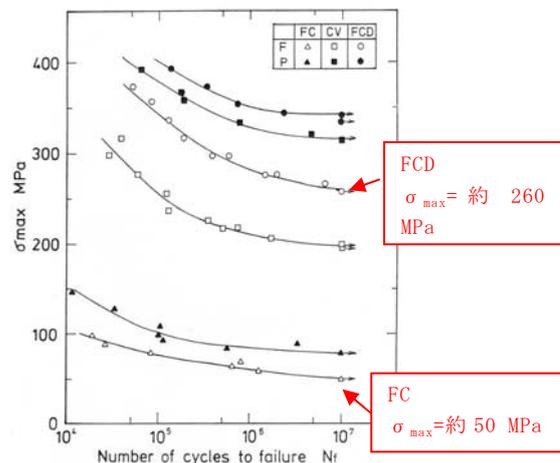


図-4 各種鑄鉄のS-N曲線  
（片振り引張、R=0）<sup>3)</sup>

表-5 機械的性質<sup>3)</sup>

(a) Graphite condition and mechanical properties of cast iron

Material	Spheroidization $\alpha_s$ (%)	Graphite area $\alpha_g$ (%)	Elastic modulus E (GPa)	Proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength $\sigma_B$ (MPa)	Elongation $\delta$ (%)	Reduction of area $\psi$ (%)	Hardness H <sub>B</sub>
FC-F	6.5	17.5	90	122	145	1.2	0.7	132
FC-P	7.0	14.5	100	265	321	0.8	0.6	229
CV-F	37.8	13.9	142	254	334	8.1	7.5	137
CV-P	40.0	9.3	145	384	524	3.4	2.3	259
FCD-F	82.5	12.6	163	293	436	24.7	24.7	143
FCD-P	78.5	9.1	170	502	823	2.8	2.8	255

また、表-5に鑄鉄造製品の機械的性質を示す。引張強度について、FCD-Fが436MPaに対し、FC-Fが145MPaと約1/3となっている。

### (3) 疲労強度の検討

図-5 に球状黒鉛 (FCD-F) と片状黒鉛 (FC-F) について、フィンガーに作用する応力平均と応力振幅と疲労限との関係を示す。

図-5 に示す疲労限は、Goodman 線図を用いて作成している。横軸に応力平均、縦軸に応力振幅をとり、応力振幅=0 の点に表-5 から得られた引張強度を示し、応力比  $R=0$  の線上に図-5 で求めた応力振幅の点 (○と●,  $R=0$  のとき  $260/2=130\text{MPa}$ ,  $50/2=25\text{MPa}$ ) をとった 2 点を結んだ線を疲労限度線、つまり Goodman 線図としている。

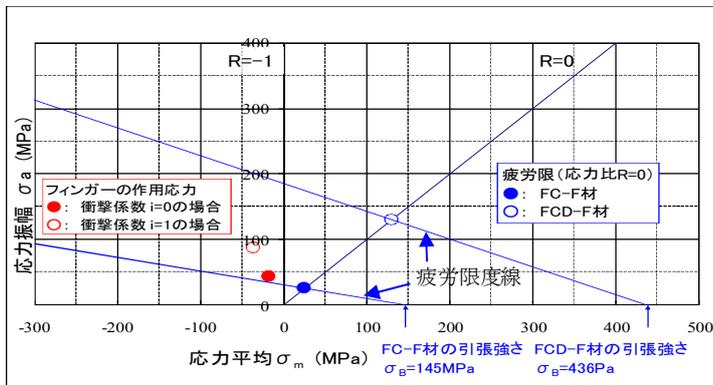


図-5 フィンガーに作用する応力平均と応力振幅と疲労限界との関係

この疲労限度線に表-4 で求めた作用応力 (○と●) を示すと、 $i=1$  のとき片状黒鉛鉄の疲労限を上回る結果となる。すなわち、疲労限を上回った応力が作用したことにより片状黒鉛鉄部に疲労亀裂が発生したと判断できる。

なお、仮にフィンガージョイントがすべて球状黒鉛鉄であった場合、その疲労限は作用応力より大きいいため、疲労亀裂の発生はなかったと考えられる。

## 4-2 球状黒鉛鉄部の疲労亀裂進展について

### (1) 球状黒鉛鉄の疲労亀裂成長下限界値

球状黒鉛鉄 (FCD450) の球状黒鉛鉄の疲労亀裂進展速度と応力拡大係数の関係を図-6 に示す。

疲労亀裂の進展速度は、図-6 に示すように、繰り返し応力が大きくなるにつれて早くなるという傾向がある。

図-6 から、亀裂非成長限界の  $\Delta K$  値を表す疲労亀裂成長下限界値  $\Delta K_{th}$  を読みとると、応力比  $R=0.7$  で約  $4\text{MPa m}^{1/2}$ , 応力比  $R=0.1$  で約  $9\text{MPa m}^{1/2}$  である。(たとえば、応力比  $R=0.7$  で約  $4\text{MPa m}^{1/2}$  のとき、あるいは応力比  $R=0.1$  で約  $9\text{MPa m}^{1/2}$  のとき、繰り返し応力 1 サイクルあたり  $10^{-11}\text{m}$  /回の速度で疲労亀裂が進展する。)

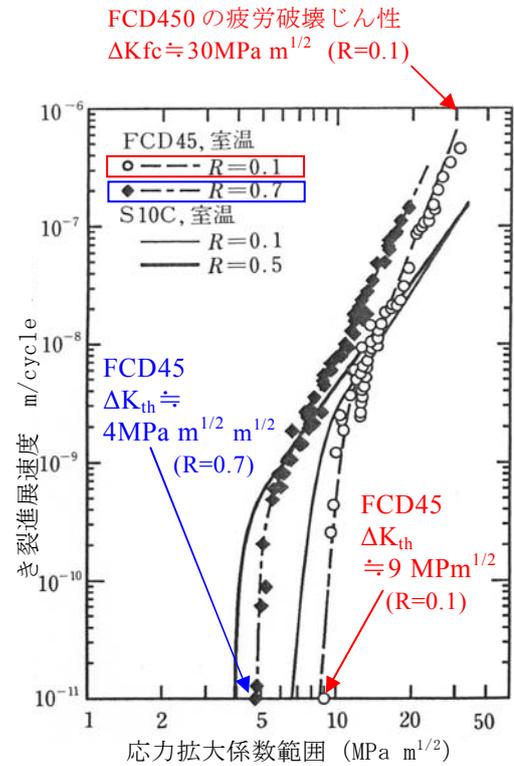


図-6 球状黒鉛鉄の疲労亀裂進展速度と応力拡大係数範囲<sup>4)</sup>の関係

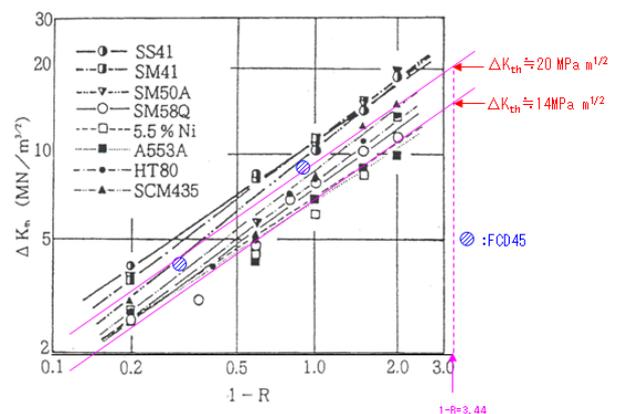


図-7  $\Delta K_{th}$  におよぼす応力比の影響<sup>5)</sup>

各種鉄鋼材料の  $\Delta K_{th}$  と  $(1-R)$  との関係を図-7 に示す。これに図-6 で読みとった、応力比  $R=0.7$  で約  $4\text{MPa m}^{1/2}$ , 応力比  $R=0.1$  で約  $9\text{MPa m}^{1/2}$  を

プロットした. このように球状黒鉛鋳鉄 (FCD450 材) の疲労亀裂成長下限界値  $\Delta K_{th}$  は応力比により影響し, その関係は各種鉄鋼材料とほぼ同等であることがわかる. この図に各種鉄鋼材料の  $\Delta K_{th}$  の下限及び平均を仮定しグラフ化した. このグラフから, 応力比  $R = -2.44$  のときの  $\Delta K_{th}$  を求めると, 下限値が約  $14\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , 平均値が約  $20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  であり, これを球状黒鉛鋳鉄の  $\Delta K_{th}$  とする.

## (2) 疲労亀裂進展の検討

フィンガー下面で発生した疲労亀裂が球状黒鉛鋳鉄部で進展するか検討を行った.

疲労亀裂成長下限界については, 以下の式により算出した.

$$\Delta\sigma = \frac{6\Delta M}{W^2 t} \quad (1a)$$

$$\Delta K = F \left( \frac{a}{W} \right) \Delta\sigma \sqrt{\pi a} \quad (1c)$$

$$\approx 1.0 \Delta\sigma \sqrt{\pi a}$$

$\Delta K$  : 疲労亀裂成長下限界値

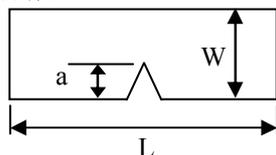
$\Delta M$  : 曲げモーメント

$W$  : 伸縮継手の断面係数

$t$  : 板厚

$a$  : 初期亀裂深さ

$F$  : 近似値 ( $\approx 1$ )



衝撃係数  $i=0$  のとき, 作用応力範囲  $\Delta\sigma=87.3\text{MPa}$  であり, 仮に, フィンガージョイントがすべて球状黒鉛鋳鉄だとすると, 亀裂が約  $8\text{mm}$  以上 (図中の●) あれば, 亀裂が進展することが図-8 から推測できる. (亀裂が  $8\text{mm}$  未満, たとえば,  $3\text{mm}$  の亀裂であればこの応力ではこの亀裂はこれ以上進展しない.)

同様に,  $i=1, \Delta\sigma=175\text{MPa}$  のとき, 亀裂が約  $2\text{mm}$  以上 (図中の●) あれば疲労亀裂が進展すると推測される.

破断面調査から, フィンガー下面の片状黒鉛鋳鉄部に発生していた亀裂深さは約  $5\sim 8\text{mm}$  であった.

これらのことから, 衝撃係数  $i=0\sim 1$  の応力が

繰り返し作用したことにより, 疲労亀裂が進展したと推測できる.

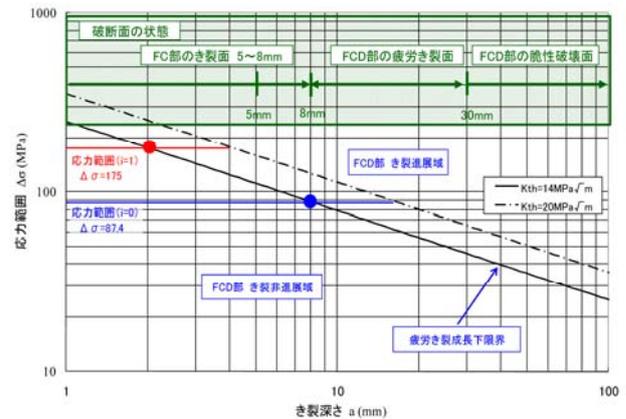


図-8 疲労亀裂の進展の検討

## 4-3 球状黒鉛部のぜい性破壊発生について

図-6 より得られた球状黒鉛鋳鉄部の疲労破壊じん性値  $K_{fc}$  および文献データから得られた破壊じん性値  $K_{IC}$  ( $44.75\text{MPa}/\text{m}^{3/2}$ ) を用いて, 疲労亀裂が進展, ぜい性破壊へ移行することの可否を検討した. その結果を図-9 に示す.

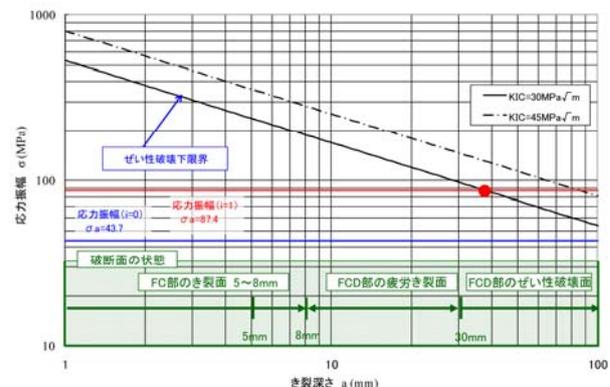


図-9 ぜい性破壊の検討

破壊じん性値については疲労亀裂成長限界値の式を参考に算出した.

図-9を確認すると, FCD450の疲労破壊じん性値  $K_{fc}=30\text{MPa}$ , 衝撃係数  $i=1$  において, 約  $36\text{mm}$  のき裂深さでぜい性的な破壊が発生すると推定される. (図中の●)

破断面調査から, フィンガージョイントに発生していたぜい性破壊直前のき裂長さは  $30\text{mm}$  程度であった.

そのため, 破壊力学的検討は, 破損状況とほぼ

一致していた。

#### 4-4 損傷発生位置の推測

図-10 に伸縮継手損傷図を示す。今回破断したフィンガーは、第二走行車線の右タイヤ位置と一致する。また、破損したフィンガープレートの磁粉探傷結果では、破断したフィンガーに隣接するフィンガーの根元部にのみ線状指示模様が発見された。

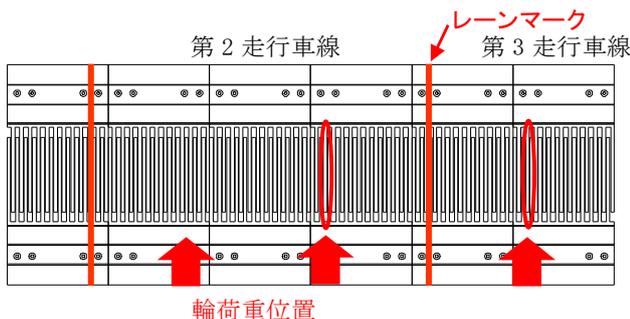


図-10 伸縮継手損傷部

フィンガープレートの取替え時に、現地で行った磁粉探傷試験では、第3 走行車線の左タイヤ位置の根元部にも線状指示模様が発見された。以上のことから、タイヤ位置で輪荷重の大きな応力が生じた箇所に損傷の可能性があると考えられる。

また、損傷位置がフィンガープレート縁端に集中していることから、フィンガープレートを固定しているセットボルトの外側の自由端であることも損傷発生原因の1つであることが考えられる。

また、2軸以上の大型貨物車と大型バスの交通量は、6,712台/日(2008年平均)であり、フィンガージョイントが破断するまでの2軸以上の大型貨物車の累計通行台数は、6,712台/日×365日×25.5年/3レーン≒約2100万台となり、疲労に対して厳しい路線であったと考える。

#### 5. まとめ

疲労亀裂、ぜい性破壊などを含む破壊力学的検討を行い、破断面状況と照らし合わせ、伸縮継手破断に至った経緯の究明を行った。

- 破断原因を破壊力学的に検討した結果、フィンガー下面にある疲労強度の小さい片状黒鉛

部で発生した亀裂が成長し、亀裂進展長限界を超えた時点でぜい性破壊へ移行したことが分かった。

- これらの現象は、破断面状況とほぼ一致していた。(図-11参照)

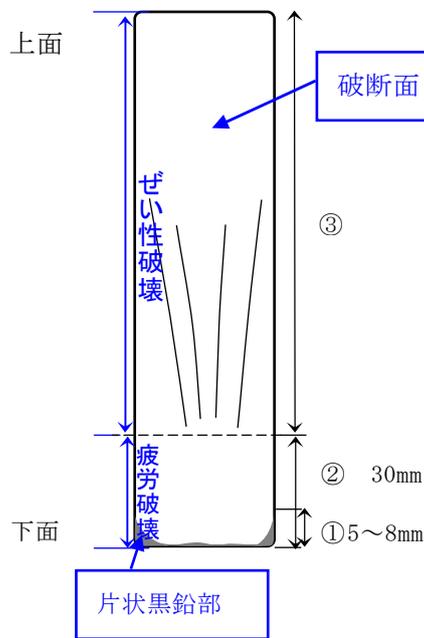


図-11 調査結果及び検討のまとめ

#### おわりに

本検討において得られた知見は、材質不良が破断を誘発する大きな要因になることが分かった。よって、同種構造物の破壊原因の検討を行う上で、本調査内容が参考になると考える。

#### 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説，平成14年3月
- 2) 阪神高速道路株式会社：設計基準，第4部 構造物設計基準（付属構造物），第1編 伸縮装置，平成14年5月
- 3) 式田昌弘，松本弘司：社団法人日本材料学会第58回フラクトグラフィ部門委員会資料，1993
- 4) 社団法人日本材料学会：疲労設計便覧，1995
- 5) 金尾正雄，佐々木悦男，太田昭彦，小管男雄：鉄と鋼第69年第7号868，1983
- 6) 江原隆一郎，石橋保博，木村四郎，増尾義信，塩田俊夫，小松真一郎：材料，vol132No.355，1983
- 7) 社団法人日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，平成14年3月
- 8) 梅垣さゆり，高村義行，山上哲示：鑄鉄製フィンガージョイントの破断面調査，2009.9 第64回土木学会年次学術講演会
- 9) 梅垣さゆり，高村義行，山上哲示：大和川橋梁伸縮継

## INVESTIGATION OF THE FRACTURE SURFACE OF A CAST IRON FINGER JOINT

Takayasu YOSHIDA, Yoshiyuki TAKAMURA, Tetsuji YAMAGAMI and Kiyoshi SAKIYA

In May 2008 a cast iron expansion joint in one end of a long span bridge was found to have a broken finger. Visual inspection detected no major problems in the appearance, suggesting a need for detailed causal analysis. The authors carried out fracture surface analysis and material composition analysis on the damaged member to investigate possibility and mechanism of such fracture from the viewpoint of fracture mechanics. The results revealed that there were portions of flake graphite in the underside of the expansion joint attributable to manufacturing defects and that fatigue cracks occurred in these low strength regions and propagated into spheroidal graphite portions, ultimately causing brittle fracture.

吉田 貴保



阪神高速技術株式会社  
技術部 調査点検課  
Takayasu Yoshida

高村 義行



阪神高速技術株式会社  
技術部 調査点検課  
Yoshiyuki Takamura

山上 哲示



阪神高速技術株式会社  
技術部 技術開発課  
Tetsuji Yamagami

崎谷 淨



阪神高速道路株式会社  
大阪管理部 保全技術課  
Kiyoshi Sakiya