

破面分析による鋼製伸縮装置の破断原因の推定

阪神高速技術(株)技術部調査点検課

勝島 龍郎

阪神高速技術(株)技術部調査点検課

塚本 成昭

阪神高速道路(株)大阪管理局保全部保全設計課

杉岡 弘一

要 旨

近年、湾岸線の比較的フィンガーの長い鋼製伸縮装置の破断が増加傾向にある。本論文では、破断した伸縮装置について外観調査や破面分析を実施し、破断原因を推定した。その結果、き裂は下面側が先行して発生進展し、その後上面側から発生したき裂と合流し破断する疲労破壊と考えられた。土砂堆積による湿潤状態継続、凍結防止剤による塩化物蓄積等により発生する下面側の腐食減肉も破断の一因と考えられた。また、伸縮装置下面から発生するき裂の早期発見を目的として、路面側からの超音波探傷試験の実用性を示した。

キーワード: 鋼製伸縮装置, 腐食, 疲労, 破面分析, 非破壊検査

はじめに

近年、阪神高速道路では湾岸線を中心に、比較的フィンガーの長い鋼製伸縮装置(以下、伸縮装置)の破断が多く報告されている。代表的な伸縮装置の破断例を図-1 に示す。阪神高速道路の伸縮装置は本体とフェースプレートがボルト接合されており、フェースプレートが取替可能という特徴を有している^{1),2)}。そのため溶接部は有していないが、床版端部との接触位置よりやや付け根側から破断する事例が多く、破断したフィンガーのほとんどが進行方向奥側という傾向がある。特に平成 20 年以降、18 レーンで累計 34 本が破断しており、このような事例は図-2 に示すように年々増加傾向にある。

伸縮装置は設計時に疲労は考慮されておらず、静的な荷重のみによる設計がなされているが¹⁾、実際には輪荷重が直接載荷され、非常に過酷な疲労環境下にある。現在は異常がない伸縮装置にお



図-1 伸縮装置の破断例

いても今後、輪荷重による累積疲労回数の高まりから同様な損傷の発生も懸念される。

また、湾岸線の大部分は平成 6 年の関西空港開港前後の同時期に供用開始しており、伸縮装置の取替えがほとんど実施されていないことから、破断した伸縮装置の近傍における伸縮装置は同様な疲労環境(軸重, 軸数)であるといえ、今後も伸縮装置の破断増加が懸念される。伸縮装置が破断す

ると、走行安全性の低下にもつながる。万が一大型車の通行時に巻き上げて飛散すると重大な第三者災害に繋がる。阪神高速道路の伸縮装置とは異なる構造であるが、鋼製伸縮装置の破断による第三者災害が報告されている³⁾。

一方で、伸縮装置の点検は路上点検による点検車からの目視点検に依存しており、破断を事前に精度よく検知することは困難な状況にある。

そこで、今後の伸縮装置における点検や維持管理、取替補修などの構造設計改良に資することを目的として、平成 25～26 年度に発生した破断事例(8 例)を分析し破断原因を推定した。加えて、破断の起因となるき裂発生・のり剥離の事前検知を目的として非破壊検査の検討をした。

1. 調査対象および調査内容

調査対象は平成 25～26 年度に破断したフィンガーの先端側 5 本(海 P20→2 本、湾 P296→3 本)及び、取替補修時に回収した、破断部を含む伸縮装置 3 体(海 P17, 岸 P33, 湾 P384)とした。調査項目を表-1 に示す。

なお、今回調査対象とした伸縮装置破断箇所の補修はすべて完了している。

2. 調査結果と考察

2-1 外観調査

今回分析した代表的な伸縮装置の破断部を図-3 に示す。伸縮装置 3 体は概ねフィンガーの根元近傍で破断していた。下面の接触痕などの状況から、破断位置は床版端部よりやや根元側であった。路面の表面は平滑である一方、下面および側面には、著しい腐食と減厚が認められた。特にフィンガー付け根部から床版端部接触部にかけては減厚が特に著しい傾向がみられた。伸縮装置遊間部における土砂の堆積状態の一例を図-4 に示す。一般的に非排水構造の伸縮装置に設置されている樋は清掃されず、路面の土砂が樋部に徐々に堆積する。設計では交互に隣り合うフィンガーが均等に輪荷

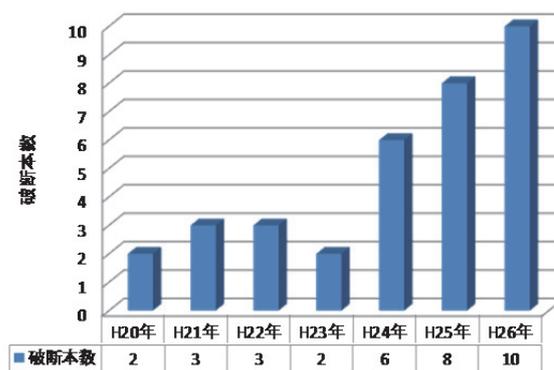


図-2 破断本数の推移

表-1 調査実施項目

調査項目	主な目的
① 外観観察	破断位置、破断部周辺における異常の有無を確認する
② マクロ破面観察	起点部、破壊形態を把握する
③ ミクロ破面観察	材料欠陥の有無、破壊形態を把握する
④ 断面組織観察	材料欠陥の有無、組織性状を把握する
⑤ 硬さ測定	材料強度を把握する(ブリネル硬さ値)
⑥ 腐食、減肉状況観察	肉厚寸法を測定、腐食状況を把握する
⑦ 磁粉探傷試験	未破断部のき裂有無を確認する
⑧ 超音波探傷試験	肉厚寸法の測定、未破断部のき裂有無を確認する



図-3 伸縮装置下面の破断状況(海 P17)

重を負担することが前提となるが、しかし、この土砂の状況から、図-5 に示すように、伸縮装置のフィンガーが温度変化による伸縮時に土砂に乗り上げ、フィンガー先端部が浮き上がり、輪荷重を大きく負担する場合がある。このフィンガーには車両が通行する際に設計以上の負荷により、付け根近傍に過大な繰返し曲げ応力が生じ、破断することが考えられる。

また、過去に伸縮装置取替補修時に併せて、撤去した伸縮装置に発生したさび中の塩分量を分析した。分析の結果、腐食が著しいフィンガー根元部近傍では、さび中の塩化物が約 120g/m²(塗装塗り替え時の許容残存塩分量の 2,400 倍)もあったことから極めて厳しい腐食環境であることが示される。

これらの環境状況から判断すると、下面の腐食や減厚が進行した原因は、遊間部に土砂が堆積し常に湿潤状態であり、加えて冬季の凍結防止材散布による土砂中の塩化物量増加など、極めて厳しい腐食環境であったと推測できる。

また、フィンガー部の板厚測定の結果、設計図から参照した本体の板厚との差から推測する減肉深さは、減肉が顕著な部分で約 5mm(図-6 左)であった。

2-2 破面観察

巨視的な破壊形態を分析するため、マクロ破面

観察を行った。代表例を図-6 に示す。マクロ破面観察ではいずれの破面にも、板厚の半分からやや路面寄りに段差が生じていた。腐食等により破面形態が不明瞭なものもあるが、路面側にステップ(個々に生じた複数のき裂が進展していく過程で、合流する際に生じる段差)が生じており、路面から下面への放射状模様とそれに直交するビーチマーク



図-4 土砂の堆積状態

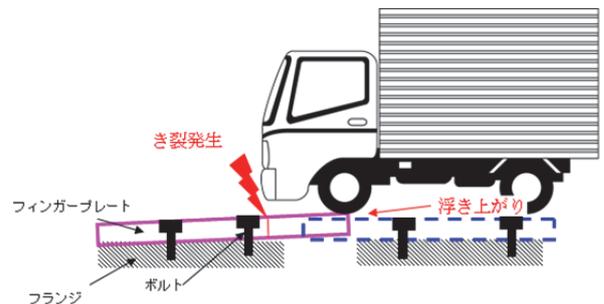
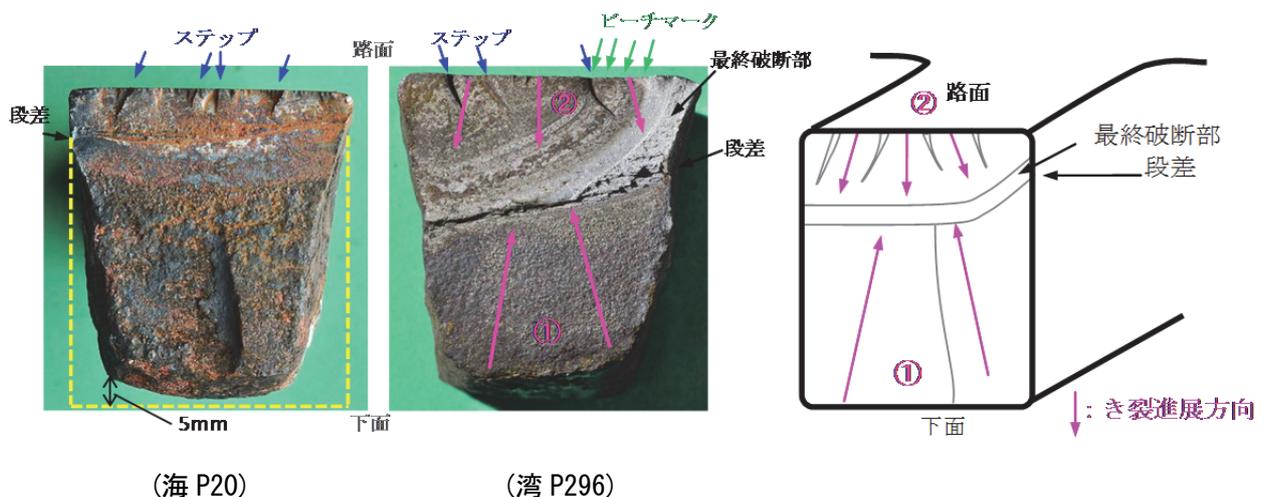


図-5 破断状況の模式図



(海 P20)

(湾 P296)

図-6 マクロ破面と破断状況の模式図

ークが認められるものもあった。

走査型電子顕微鏡(以下、SEM)による拡大観察では、破面の路面側には疲労破面の特徴であるストライエーションや、それに類する縞状模様が認められ、段差近傍には延性破面の特徴であるディンプルが認められた。SEMによる破面写真の例を図-7に示す。

これらの破面や前述した外観調査の結果から、き裂は路面と下面の両側から発生した疲労破壊であると考えられる。下面側が平坦で比較的領域が大きく、腐食も著しいことから、下面の腐食による凹凸を起点としたき裂が進展し、断面が減少したところで路面からのき裂が発生、進展し、下面のき裂と合流した結果最終破断に至ったと推測できた。

なお、断面組織観察の結果、疲労破壊の要因となりうる顕著な材料欠陥は認められなかった。また、引張試験や硬さ試験などの材料試験からも材料欠陥がないことを確認している。

2-3 未破断部に対する非破壊検査

未破断のフィンガー(図-3 a 部)についてき裂の有無の確認をするため、磁粉探傷試験(以下、MT)を実施した。MTの結果、一部の伸縮装置には下面から側面にかけて図-8に示すような磁粉模様が見られた。いずれも目視で確認できるき裂であり、破断に至る過程であったと考えられる。それ以外に明瞭な磁粉模様は認められなかった。

前述の通り、伸縮装置のき裂は下面側が先行し路面側が遅れて発生するため、き裂の早期発見には、先に発生する下面のき裂を検知する必要がある。しかし、伸縮装置下面のき裂は、通常路面からの目視検査では検知不可能である。そこで、伸縮装置の下面に生じたき裂を路面から探傷可能であることを確認するため、路面側から超音波探傷試験(以下、UT)した。MTによる指示模様検出位置の模式図とUTによるき裂深さの推定結果を図-9に示す。MTによる測定数値は、磁粉模様を直接測定した。UTの結果、推定されるき裂深さはMT実施による磁粉模様の状況と比較して概ね一致し

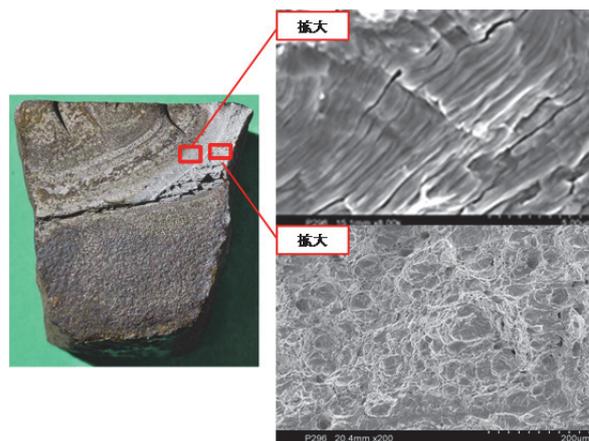


図-7 破断したフィンガーのストライエーション(上)とディンプル(下)

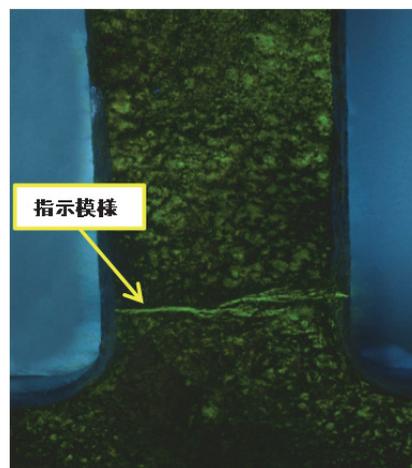


図-8 MTによる指示模様例(海 P17)

た。また、フィンガーの根元から先端までの板厚測定結果は、マイクロメーターでの測定値とほぼ同じであった。

したがって、UTによる路面からの検査は、伸縮装置下面のフィンガーに生じたき裂の探傷及び、減厚の確認が可能であり、き裂の早期発見を目的とした現場における探傷方法として実用性を示した。

3. 現場調査における UT の適用

3-1 調査対象

前述した UT の有用性を踏まえ、平成 27 年の岸線のフレッシュアップ工事の通行止め期間を利用し、実橋における伸縮装置のき裂や腐食の潜在傾向の把握を目的に、フィンガーの探傷および腐食

減厚の調査を実施した。調査対象は、工事区間内に供用する鋼製伸縮装置の中から、フィンガー部の長さが概ね 200mm 以上の 75 レーンを抽出した。

3-2 調査内容

(1) フェイズドアレイ超音波探傷試験

フェイズドアレイ超音波探傷試験(以下、PA)では、各車線輪荷重位置(左右車輪)の伸縮装置について腐食による減肉の確認をするために肉厚分布の調査を行った。

PAは、一般的な超音波探傷試験の探触子は1つの振動子(高周波音波の発信と受信両方を行うもの)で構成されるのに対し、本試験の探触子は16の振動子により構成される。PAはそれらの振動子が超音波を送受信するタイミングを独立に制御し、合成された超音波破面を形成することにより探傷する方法である。PAを用いた探傷のイメージを図-10に示す。

(2) UTによるき裂の検査

UTでは、下面より進展したき裂の検知を目的として調査を実施した。

UTは探傷面に対して超音波を斜めに伝播(送受信)させて検査を行う方法(以下、斜角探傷)である。斜角探傷では垂直探傷とは異なり、健全部の底面エコーに相当するエコーは受信されず、き裂が存在するときにき裂エコーが現れる事を利用して、き裂の有無の確認に用いる。斜角探傷を用いた探傷例を図-11に示す。

3-3 調査結果

(1) フェイズドアレイ超音波探傷試験

調査の結果、減厚量は最大で14mm程度であった。全体的な傾向としては、フィンガー部とステンレス樋の接触境界部に減肉が集中していた。

(2) UTによるき裂の検査

調査の結果、4レーン(計5本)でき裂を検出した。き裂の発生位置は根元付近ではあるが、腐食の著しい箇所との関係性は確認出来なかった。最大のき裂は岸下P6の、板厚52mmに対してき裂深さ30mmであった。この岸下P6のき裂の発生状況を図-12に示す。なお、本損傷はフレッシュアップ工事期間中に応急補修済みである。

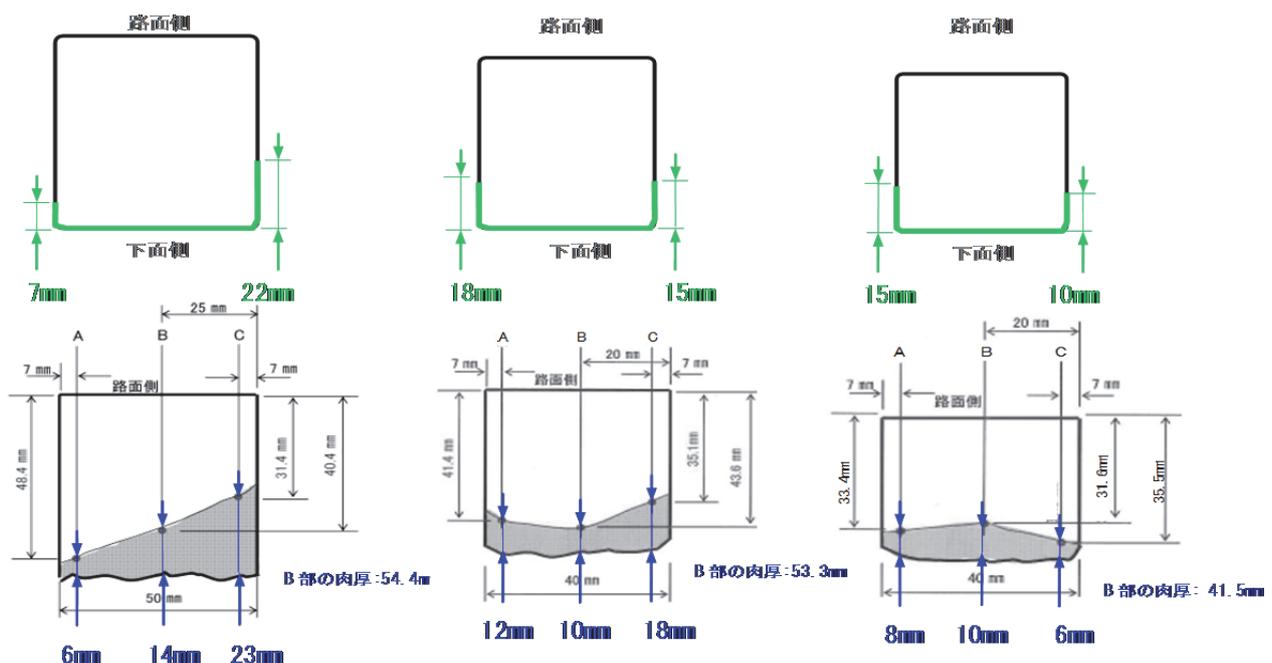


図-9 MT(上側)とUT(下側)によるき裂深さの推定

今回き裂を確認したのは、岸下 P1-32, 岸下 P6(2 本), 岸上 P17, 岸下 P17 であった。このうち、岸下 P1-32, 岸下 P6 では、過去に同一管理番号の伸縮装置において破断している。また、岸 P17 では今回、上下線ともにき裂が確認された。したがって、建設時における同一の材料、製作条件、また供用後の使用環境が同一とみなせる、同一箇所であれば今後も同様の損傷が発生する傾向があるといえる。

また、調査を実施した全 75 レーンのうちき裂を発見したのは 4 レーンであり、約 5%にあたる。これは現在供用中の鋼製伸縮装置についても、相当数のき裂が潜在する可能性を示している。

4. 供用中における伸縮装置の応力状態の測定

4-1 調査要領

前述のとおり、フィンガーの破断の一番の要因が疲労であることから、フィンガーの疲労環境を把握するため、供用下における伸縮装置の応力測定を行った。測定箇所は、伸縮装置部の樋が破損してゲージのリード線を橋脚梁上に配線可能であった岸上 P20 走行車線を選定した。この伸縮装置は PA および UT によりフィンガー下面の腐食およびき裂がないことを確認している。なお、計測に当たり、フレッシュアップ工事期間中にゲージの貼付け、結線を行い、工事終了後の供用再開後に 72 時間計測した。

ひずみゲージの貼付け位置を図-13 に示す。測定対象の伸縮装置は、嵌合する進入側と退出側を 2 本 1 対として、走行車線側の輪荷重が作用する範囲内の位置に 2 対選択した(計 4 本)。貼付けるゲージは、車両通過時の荷重による挙動把握のための単軸ゲージ、せん断力の影響を把握するための 3 軸ゲージの 2 種類とした。

4-2 調査結果

輪荷重通過時の代表的な応力波形を図-14 に示す。図-13 赤○に示すフィンガー根本部下面側の応力および図-13 赤□に示す床版端部下面側の応

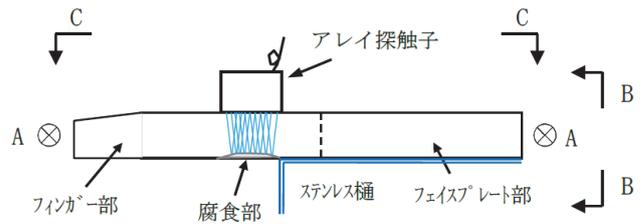


図-10 PA を用いた探傷イメージ

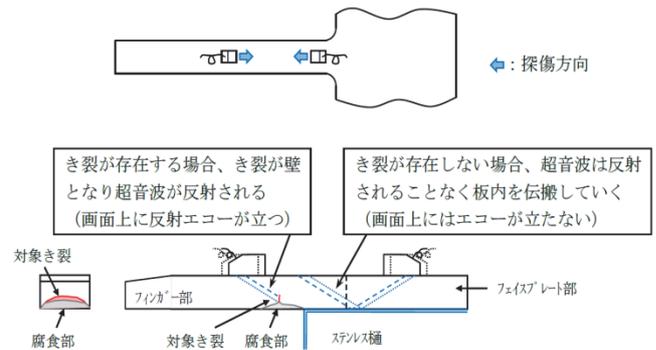


図-11 斜角探傷を用いた探傷イメージ



(a) 側面のき裂状況



(b) 下面のき裂状況

図-12 岸 P6 のき裂発生状況

力を示している。これらのゲージは、フィンガー下面より 12mm 上方の応力である。輪荷重によりフィンガーの下面に大きな圧縮応力が生じている。また通過後に、わずかながら振動による応力の変動が生じている。先述したように、伸縮装置の破断事例は下面からの疲労き裂発生が主要因であるため、下縁側が厳しい疲労環境と推測していた。しかし、**図-14** に示すように、比較的発生応力の大きかった下面における応力波形からも、最大値が $7\text{N}/\text{mm}^2$ であり、大きい引張応力は確認できなかった。今回の応力計測では、上面から 15mm、下面側から 12mm の位置の応力を計測したが、これらから下縁の応力を外挿した結果でも、 $14\text{N}/\text{mm}^2$ であり、疲労耐久性に影響を及ぼすものではないと判断できる。

一方、今回の計測対象フィンガーは健全であり、平坦であるため応力集中がないと判断できるが、腐食による減厚やき裂を有する場合、応力集中の影響により今回の計測値の数倍の応力値になることが考えられる。その場合には、疲労耐久性に影響を及ぼす可能性があると考えられる。

5. まとめ

本論文では、破断した伸縮装置について外観調査や破面分析から破断原因を推定した。また、実橋において UT 調査を実施し、潜在する損傷の規模を把握するとともに、疲労環境を明らかにする目的で応力計測した。得られた結果を以下に示す。

- 1) き裂は路面と下面の両側から発生した疲労破壊である。
- 2) き裂は、下面側が先行して発生進展し、その後上面側から発生したき裂と合流し、破断すると推測できた。
- 3) 下面側の腐食や減肉の要因は、土砂堆積による湿潤状態の継続、凍結防止剤による塩化物蓄積等の極めて厳しい腐食環境であったことが推測できる。
- 4) き裂の早期発見を目的とした、伸縮装置下面から発生したき裂の現場における探傷方法として、UT の実用性を示した。
- 5) 供用下の伸縮装置において UT による調査を

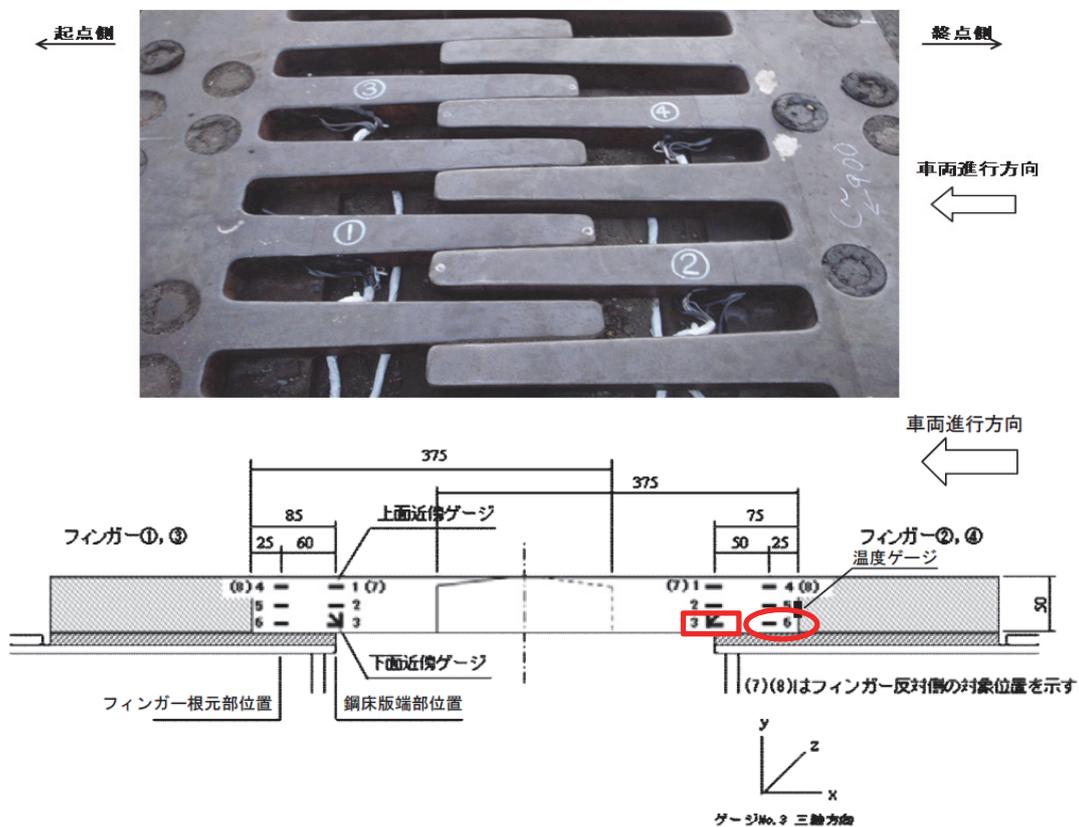


図-13 鋼製伸縮の応力測定におけるゲージの設置位置 (岸 P20)

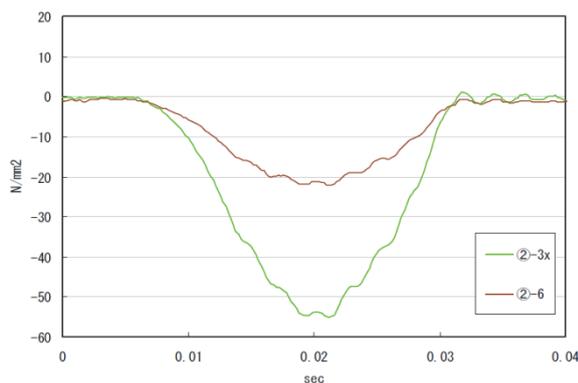


図-14 フィンガー下縁の応力波形の一例

実施し、未破断き裂を検出した。

- 6) 本調査で実施した応力測定からは、伸縮装置下縁に、疲労き裂の要因となる大きな引張応力は確認出来なかったが、腐食やき裂を有する場合、応力集中の影響で疲労耐久性に影響を及ぼす可能性がある。

6. 今後の課題

阪神高速道路では伸縮装置の破断事象を調査し、原因分析を行ってきた。これらの結果を踏まえ、フィンガーの破断による第三者災害を予防すべく、優先順位をつけた伸縮装置の調査を開始した。

今後は、伸縮装置の検査や応力計測を進め、定量的な破断のメカニズムの解明、それを踏まえた維持管理方法の確立、さらには疲労を考慮した補修または新設時の設計法の検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 阪神高速道路株式会社：設計基準第 4 部構造物設計基準（付属構造編），2011. 11.
- 2) 阪神高速道路株式会社：付属構造物標準図集，2012. 7.
- 3) 例えば，小野秀一：橋梁伸縮装置の損傷原因に関する調査研究，平成 22 年度論文集・梗概集：論文集，一般社団法人日本建設機械施工協会，pp.173-178，2010.

ESTIMATION OF FRACTURE CAUSES IN STEEL EXPANSION JOINTS THROUGH FRACTURE SURFACE ANALYSIS

Tatsuro KATSUSHIMA, Shigeaki TSUKAMOTO and Koichi SUGIOKA

An increasing number of fractures have been found in steel expansion joints having relatively longer fingers on the Wangan Route in recent years, especially after 2008. Fragments of broken joints can scatter with the passage of large vehicles and may cause a serious disaster involving third parties. In order to find the causes of the fracture, visual inspection and fracture surface analysis were carried out on the broken joints. The results suggested that cracks would occur and develop initially in the underside and then join those occurring in the top surface, leading to fatigue fracture. The other likely cause was corrosion. For early detection of the problems, we examined applicability of ultrasonic flaw detection test from the top surface.

勝島 龍郎



阪神高速技術株式会社
技術部 調査点検課
Tatsuro Katsushima

塚本 成昭



阪神高速技術株式会社
技術部 調査点検課
Shigeaki Tsukamoto

杉岡 弘一



阪神高速道路株式会社
大阪管理局 保全部 保全設計課
Koichi Sugioka