

耐震補強部材の損傷検知技術の開発

大越靖広 * 服部翼 *

鋼板巻立て工法等により補強されたラーメン高架橋柱は、東日本大震災をはじめ数回の強震動を経験したが大きな損傷は確認されておらず、その有効性が明らかになっている。しかし、強震動を受けた後の既設部材の損傷状況については、鋼板で巻立てられているが故に確認が困難であることが土木学会¹⁾等でも指摘されており、今後の課題のひとつである。著者らは地震後の緊急時に、専門的な知識を必要とせず早急に鋼板巻立て補強済みの既設部材の損傷状況を把握できる技術の確立を目指し、健全度確認センサーの開発を行ってきた。また、本センサーは施工中のトンネルの支保工や開削工事の土留め工に設置することにより、施工中の安全の見える化に貢献できるものであり、施工中のトンネルで実際に適用する例を紹介する。

キーワード：高架橋柱、損傷、センサー、安全の見える化

1. はじめに

本技術は、鋼板巻立て補強された高架橋柱の補強鋼板に、地震時に作用する圧縮力を圧力測定フィルムにて可視的に検知するものである。鋼板に作用する圧縮力は、高架橋柱の損傷度が大きくなると増加することから、圧縮力を検知することにより耐震補強済みの既設部材の損傷度が判定できる仕組みである。本技術の主な特徴は、①圧力測定フィルムは不可逆的であり、地震後の残留変位が小さくても、補強鋼板の最大圧縮力時の着色が残るピークセンサーであること、②地震時の停電に備えて無電源であること、③構造が単純で安価であること、等である。本センサーの最終的な目標は、Fig.1 に示すように、例えば列車の運行の可否等の判断基準になりうる高架橋柱の既設部材の降伏点や最大耐力点を可視的に判断することである。

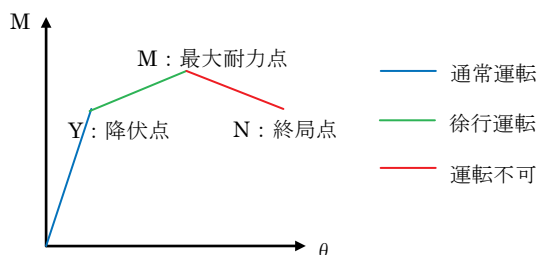


Fig. 1 柱部材の骨格曲線と列車運行のイメージ

また、本技術はトンネルの支保工や開削の土留め工に適用することにより、通常の計測工とは別に、施工中に誰もが異変に気付くことができるセンサーとして、安全の見える化に貢献できるものであり、当社で施工中のトンネルにおいて適用する例を報告する。

*技術本部 技術研究所 防災技術研究室

2. 健全度確認センサーの概要

2.1 センサーの概要

健全度確認センサー(以降、センサーと呼ぶ)はPhoto. 1やFig. 2に示すように圧力測定フィルムを透明磨きしたアクリル板で挟み込んだものである。補強鋼板は導入された圧縮力により歪み、補強鋼板に接着された鋼製の取付け板間に強制変位が発生する。その強制変位によるひずみがアクリルに伝達され、アクリルのヤング係数に応じた圧縮応力が圧力測定フィルムに導入される仕組みで

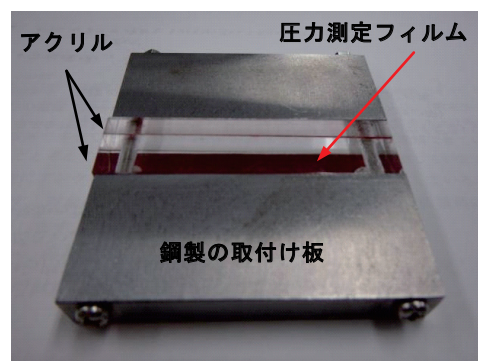


Photo. 1 健全度確認センサー

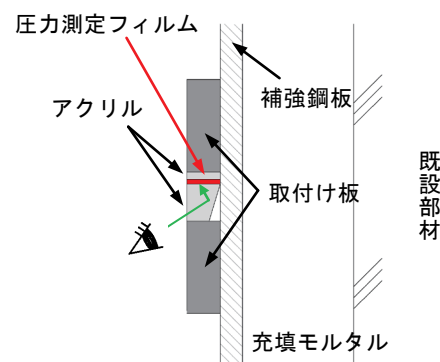


Fig. 2 センサーの概要

ある。なお、アクリルに設けている角度は、光の屈折により圧力測定フィルムの着色を外側から確認できるようにしたものである (Photo. 1)。


2.2 圧力測定フィルムの性能

本技術の圧力測定フィルムは、市販されているものを用いている。例えば Table1 に示す 3 種の圧力測定フィルムは、表中の矢印のような測定範囲 (例えば中圧用であれば 10N/mm² で着色が始まり 50N/mm² で完全に着色する) が示されているが、本センサーで用いるような載荷面が小さなものでも同等の性能を発揮するかの確認を行った。圧力測定フィルム (12×100mm) を厚さ 6mm のアクリルで挟んだ供試体を作成し、実際にアムスラーにて圧縮試験を行い、その際の着色を表に示した。Table1 に示すように商品に示される測定範囲と同等の結果が得られた。表中の①と②の様子を Photo. 2 に示す。

Table1 圧縮試験の結果

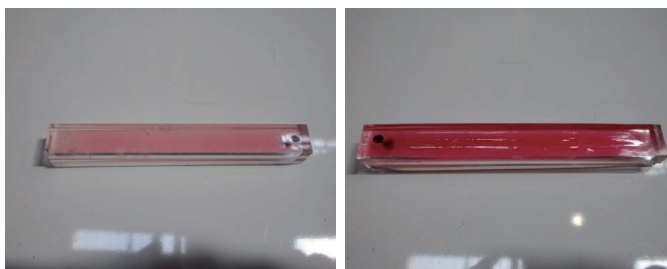
荷重 (kN)	応力 (N/mm ²)	低圧用	中圧用	高圧用
3	2.5			
6	5			
12	10	↓		
18	15			
24	20			
48	40		↓	
60	50			
90	75			
120	100			①
138	115			
156	130			
180	150			
210	175			②
240	200			

着色状況



商品の測定範囲 →

※表中の矢印は製品で示されている着色範囲



①時の様子 ②時の様子

Photo. 2 圧力測定フィルムの様子

3. センサーの性能確認試験

3.1 取付け板を装着した要素試験

Photo. 3 に示すような載荷治具を用いて、センサーを取付け板に設置した状態で 2.2 と同様の圧縮試験を行った。Photo. 4 に 100N/mm² 時の様子 (左に高圧用、右に中圧用の圧力測定フィルム) を示す。Table2 に示すように、取付け板を装着した状態で載荷を行っても圧力測定フィルムの測定範囲と同等の結果を得ることができた。

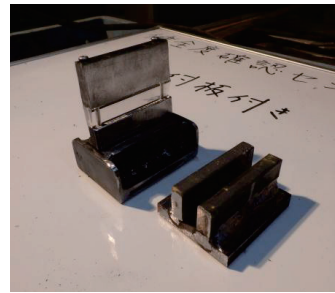


Photo. 3 載荷治具

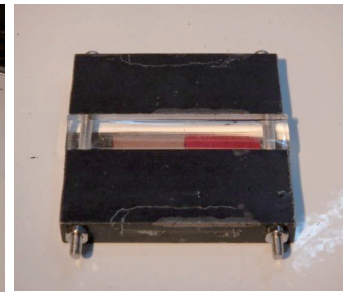


Photo. 4 センサーの様子

Table2 取付け板を装着した場合の圧縮試験結果

荷重 (kN)	応力 (N/mm ²)	低圧用	中圧用	高圧用
1.35	2.5			
2.7	5			
5.4	10	↓		
8.1	15			
10.8	20			
27	50		↓	
40.5	75			
54	100			
62.1	115			
70.2	130			
81	150			↓

3.2 縮小梁供試体を用いた載荷試験

Photo. 5 に示すような縮小梁供試体 (断面 200×200mm, 鋼板厚 6mm) にセンサーを設置して鋼板のひずみとセンサーの着色の関係を確認した。センサー設置位置での鋼板のひずみは最大で 250μ に達しており、鋼板のヤング係数で換算すると 50N/mm² 程度の圧縮応力がセンサーに導入されたと想定できた。載荷終了時のセンサーの様子を Photo. 6 に示す。センサーには左から高、中、低圧用の圧力測定フィルムが設置してある。Table1 に示すように、50N/mm² は低圧用だけではなく中圧用も十分に着色する圧縮応力であるが、着色は低圧用のみとなった。



Photo. 5 縮小梁供試体

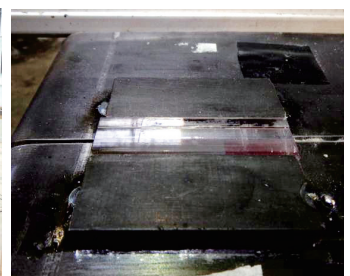


Photo. 6 載荷後のセンサー

以上のように、取付け板を鋼板に接着して載荷した場合、予測した着色を確認することができなかったことから、次のような仮定をした。Fig. 3 に概念図を示す。

- Fig. 3 の①のように取付け板に直接圧縮力を作用させた場合は、その断面積で除した応力がそのまま圧力測定フィルムに導入される (本稿 3.1 で確認済)。
- ②のように取付け板を接着した鋼板が圧縮力を受けた場合は、アクリルには圧縮力が作用するのではなく、

取付け板間の強制変位によって補強鋼板と同等のひずみが発生する。その結果、圧力測定フィルムにはアクリルのヤング係数に応じた圧縮応力が導入される。アクリルではなく非常に柔らかいものでフィルムを挟んだ場合には着色しないことは容易に想像できる。

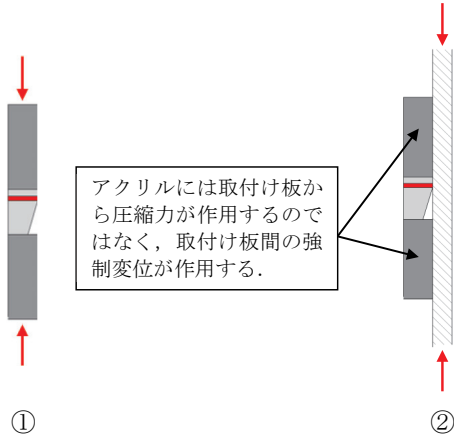


Fig. 3 概念図

したがって、本センサーを取付け板を介して鋼板等に設置した場合の圧力測定フィルムに導入される応力は、鋼板等のひずみとアクリルのヤング係数により求めるものとした。なお、アクリルのヤング係数は、文献や実際に行ったヤング係数試験による 2000N/mm^2 (鋼材の $1/100$ 程度) を用いた。

3.3 H形鋼を用いた載荷試験

上記の仮定の確認と、後述するトンネルの支保工への適用のためにセンサーをH形鋼に設置して載荷試験を行った。H-125×125を載荷した場合の理論値と載荷試験結果をTable3に示す。3.2の②の考え方が正しければ表中の②に示す矢印の範囲で着色するはずである。載荷試験の結果は表中に着色したとおりであり、理論値よりも大きな応力で着色する結果となった。以下に考察を述べる。

- ① 上側に設置する台形のアクリルの長さを5~20mm, 下側に設置する矩形のアクリルを2~20mmと変化させ、データを蓄積した。図表中の結果は、上側15mm, 下側20mmの時の代表的なものであり、現状ではこの大きさに固定している。
- ② 取付け板間の距離が長い(実際にはアクリルの長さが長い)ほど、隙間の影響が少なく、計算した応力での着色に近づく。
- ③ アクリルにもひずみゲージを設置して載荷したが、アクリルにひずみが導入されれば相応の着色が確認できた。
- ④ アクリルと取付け板やアクリルと圧力測定フィルムとのわずかな隙間が影響して着色が遅れる。

Table 3 H-125×125の場合の理論値と載荷試験の結果

荷重	①H鋼のヤング係数使用			②アクリルのヤング係数使用 (ひずみはH鋼と同じ)				
	σ_H	ε_H	フィルム	σ_A	ε_A	フィルム		
kN	N/mm ²	μ	低圧用	N/mm ²	μ	低圧用	極超低圧	微圧用
7.5	2.5	13		0.03	13			
15	5.0	25		0.05	25			
30	10.0	50	↓	0.10	50			
42	14.0	70		0.14	70			
60	20.0	100		0.20	100			↓
100	33.3	167		0.33	167			
150	50.0	250		0.50	250			
180	60.0	300		0.60	300		↓	
300	100.0	500		1.00	500			
420	140.0	700		1.40	700			
600	200.0	1000		2.00	1000			
750	250.0	1250		2.50	1250			
840	280.0	1400		2.80	1400			
3000	1000.0	5000		10.00	5000	↓		

※アクリルのヤング係数は鋼材の $1/100$ のため、応力も $1/100$ となる。

Fig. 4に上側アクリルの高さを15mm, 下側アクリルの高さを20mmとした場合の載荷試験における鉛直荷重と鋼板, アクリルのひずみの関係を示す。また, Fig4中の微圧用No.1のセンサーの様子をPhoto.7に示す。現状では, 微圧用を用いた場合は概ね鋼板ひずみが 500μ 程度

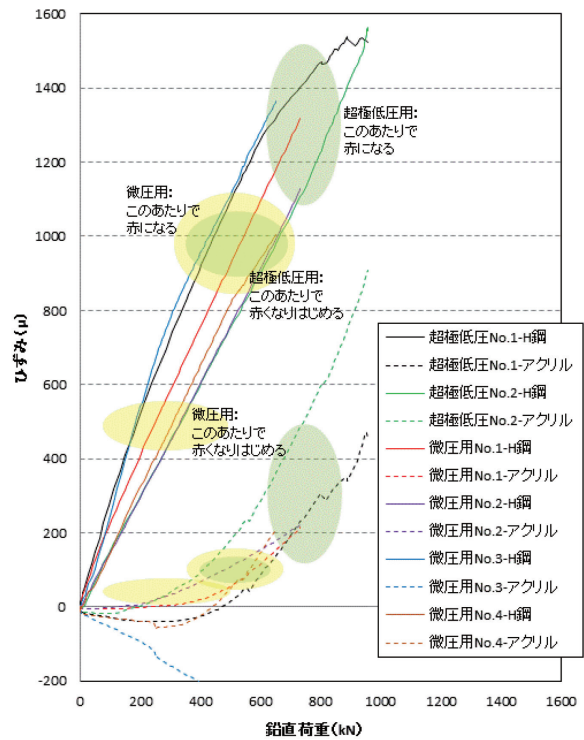


Fig. 4 載荷荷重とひずみ(鋼板, アクリル)の関係

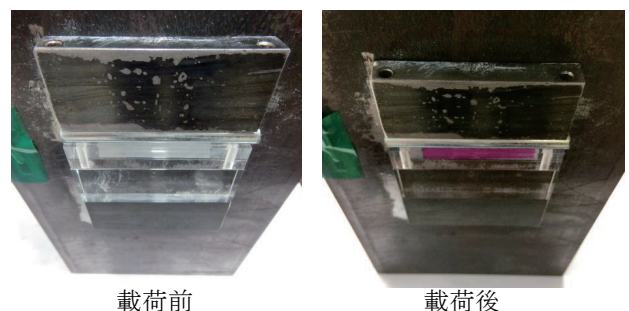


Photo. 7 微圧用 No. 1 のセンサーの様子

でセンサーの着色が確認され、1000 μ では完全に着色し、超極低圧用を用いた場合は1000 μ 程度で着色が確認され、1400 μ で完全に着色する結果となった。今後は、センサーの製作精度を上げて、センサーによるばらつきを抑え、計算値の応力での着色に近付くような改善が必要である。

3.4 縮小柱試験体を用いた载荷試験

本センサーを耐震補強済みの柱に実際に設置した場合の反応を確認するために、当社で実施した波形分割鋼板巻立て工法（耐震ラップ工法）の正負交番载荷試験体にセンサー（微圧用の圧力測定フィルムを使用）を設置した。Photo. 8～9にセンサーを設置した供試体や設置の様子を示す。供試体は、柱の既設断面が1300×400mm、せん断スパンが1420mmのせん断破壊先行型の柱に6mmの耐震ラップ鋼板を巻立て補強した実物の2/3縮小モデルである。柱の実験自体は、Fig. 6の水平荷重－水平変位関係の履歴に示すようにせん断破壊を抑制して変形性能が向上したものであり、実際の耐震補強済みの柱の挙動に近い条件であると考えられる。センサーはPhoto. 9とFig. 5に示すように、基部から130、330、530mmの耐震ラップ鋼板の中央と耐震ラップ工法特有の上下鋼板の継ぎ目に設置した。継ぎ目に設置したセンサーは、継ぎ目により大きい強制変位を受けることから、本センサーの設置に向いていると考えられたが、実際には引張時の隙間も大きく、アクリルのかみ合わせが不良となり、着色はほぼ確認できなかった。

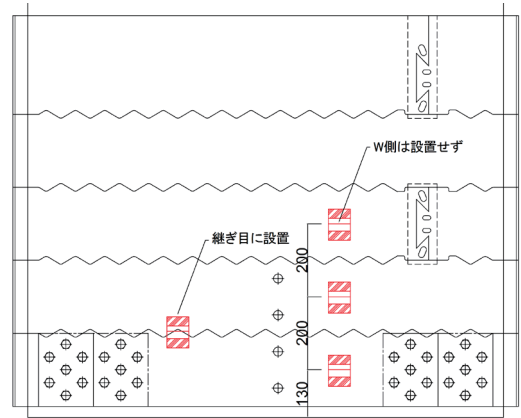


Fig. 5 センサーの設置位置

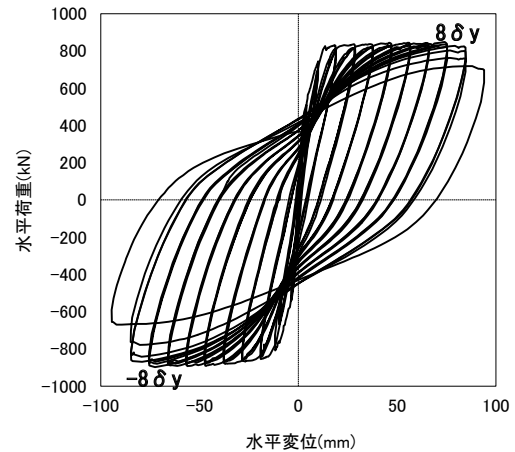


Fig. 6 水平荷重－水平変位関係の履歴

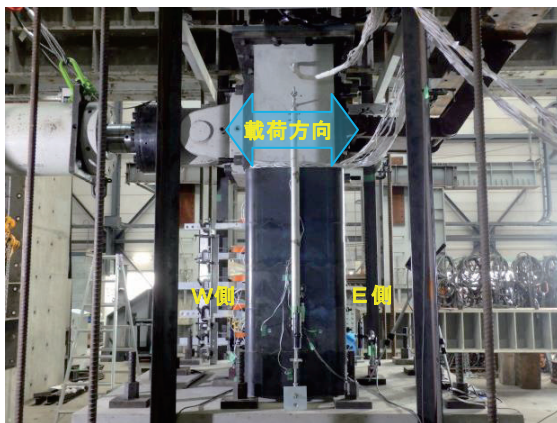


Photo. 8 载荷試験の状況

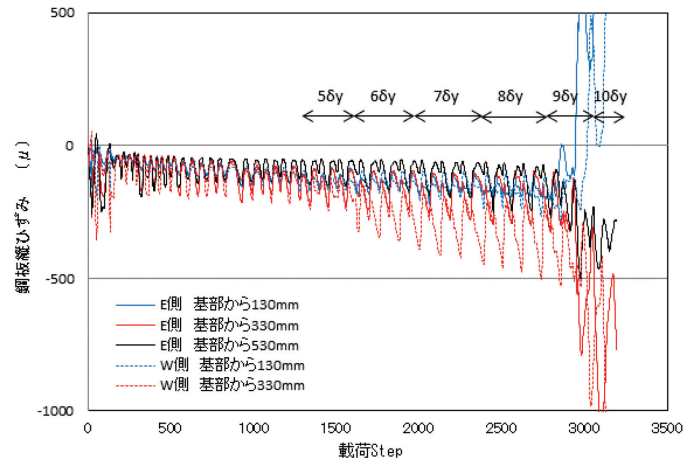


Fig. 7 センサー設置位置での鋼板の縦ひずみ

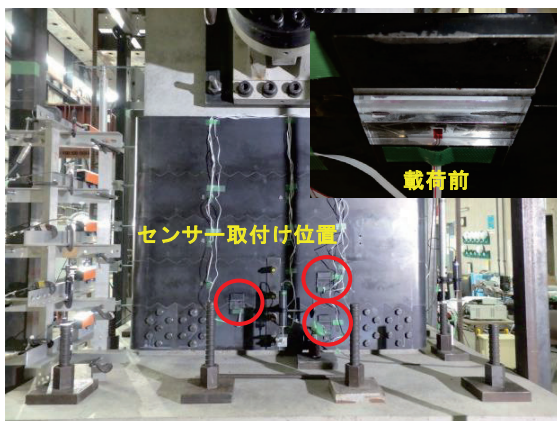


Photo. 9 センサー取付け位置

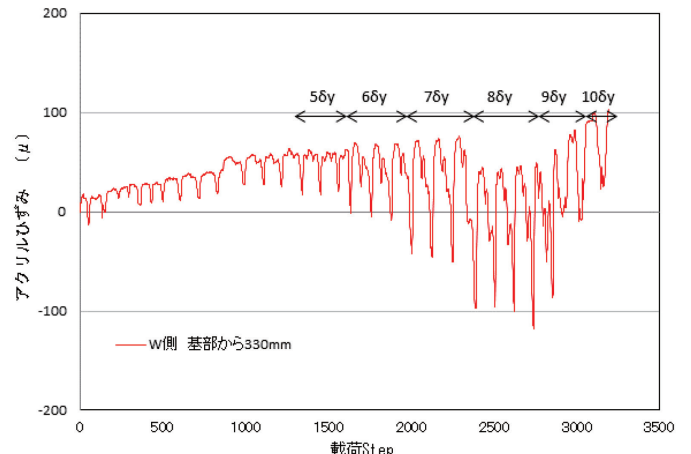


Fig. 8 センサーアクリルのひずみ

一方、その他の箇所に設置したセンサーについては、同位置での鋼板のひずみを計測しており、鋼板ひずみとセンサーの着色の関係を確認できた。Fig. 7 にセンサー設置位置での鋼板の縦ひずみを示す。青線で示した基部から 130mm の位置の鋼板の縦歪みは、鋼板と基礎の間に 30mm の隙間があること、終局前からは軸方向鉄筋のはらみ出しにより引張が卓越したことからセンサーの着色はわずかであった (Photo. 10 参照)。赤色で示した基部から 330mm の位置の鋼板の縦歪みは、特に W 側で大きく、最大耐力点である $6\delta y$ で 350μ 、 $8\delta y$ で 500μ 弱、最終的に 1000μ を超える圧縮ひずみとなり、センサーは Fig. 4 で示したような範囲で着色した (Photo. 11 参照)。

Fig. 8 にはセンサーの亚克力部に設置したゲージから得られた亚克力のひずみを示す。亚克力のひずみは $8\delta y$ 時には約 100μ に達しており、Fig. 4 や Table3 通りにこの時点でセンサーは完全に着色している。黒線で示した基部から 530mm の位置の鋼板の縦ひずみは、330mm の位置と比較すると小さいものの終局時には 500μ に達しており、センサーも相応に着色した (Photo. 12 参照)。

以上より、センサーの鋼板巻立て工法等により補強された柱への適用の可能性が示された。取付け位置は、損傷範囲である基部より 1D 程度が妥当と考えられるが、今回の対象が分割鋼板による補強柱であったために、想定よりも鋼板の縦ひずみが小さかったこと等を踏まえて、適切な設置位置や使用する圧力測定フィルムの選定等の詳細な検討が必要であると考えられる。



Photo. 10 センサーの状況 (130mm, 載荷終了後)

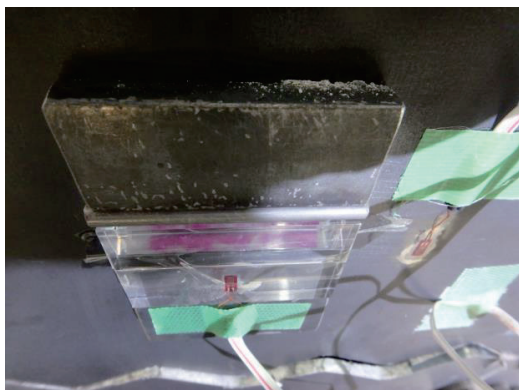


Photo. 11① センサーの状況 (330mm, $8\delta y$ 時)



Photo. 11② センサーの状況 (330mm, 載荷終了後)



Photo. 12 センサーの状況 (530mm, 載荷終了後)

3.5 トンネル支保工への適用

本センサーは、高架橋柱以外にも応用ができ、現状ではトンネル支保工や土留め工の鋼部材に設置して、施工中の安全の見える化への貢献が可能であると考えている。例えば、本センサーをトンネルの支保工に設置することにより、掘削に伴い H 形鋼に大きな軸力が発生した場合に赤く着色することで、トンネル内の誰もが異変に気付くことができ、早急な対応も可能であると考えている。

実際に適用を予定しているトンネルにおいては、FEM 解析の結果、施工中に Fig. 9 に示すような支保工の軸力と曲げモーメントの発生が予測されている。本センサーは圧縮力のみ反応するものであることから、支保工に内側引張の力が生じる場所への設置には適さないが、Fig. 9 の右側の曲げモーメント図に示すように、内側引張は青色で示された部分のみであり、それ以外の位置への設置が可能である。

支保工は H-200×200 (HT590) を用いるため、軸力 1,654kN では計算上 1,231 μ のひずみが予想される。これは、Fig. 4 の結果をそのまま用いれば微圧用の圧力測定フィルムで完全に着色するひずみであり、発生する軸力の確認のためにもこの圧力測定フィルムを用いる予定である。また、これとは別に H 形鋼の降伏の 2/3 程度で反応する極超低圧用の圧力測定フィルムを用いる予定としている。なお、本トンネルの H 形鋼の曲率半径は 5000mm 程度であることから、このような曲線の H 形鋼についてもセンサーが反応するかの確認を別途荷重試験にて行っている。Photo. 13 に荷重状況を、荷重後 (H 形鋼ひずみ

最大 1200 μ) のセンサーの状況を Photo. 14 に示す。写真に示すように、曲線 H 形鋼でも問題なくセンサーが機能することを確認している。

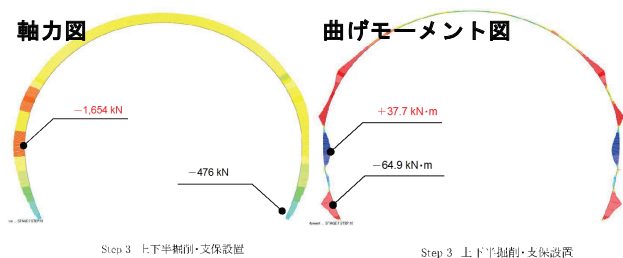


Fig. 9 トンネルの FEM 解析の結果

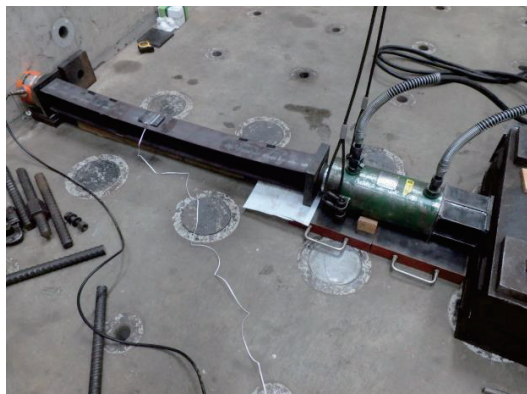


Photo. 13 曲線 H 形鋼での載荷試験状況

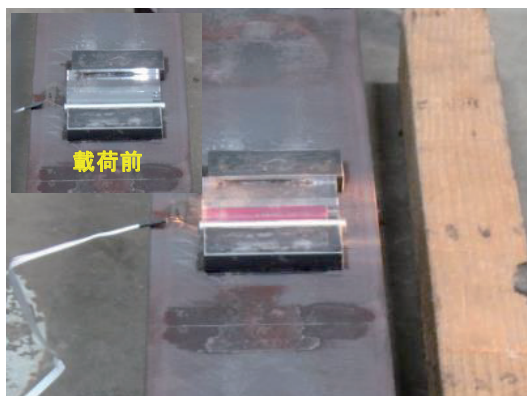


Photo. 14 曲線 H 形鋼に設置したセンサーの状況

4. まとめ

鋼板巻立て工法等により補強された高架橋柱の既設部材の損傷状況を把握するためのセンサーの開発を行い、本技術の適用への可能性を示した。また、トンネルの支保工や土留め工の鋼部材へ適用することにより安全の見える化に貢献できることも示した。これまでに得られた知見と今後の課題を次に示す。

- ・波形分割鋼板により補強された柱の交番載荷試験体に設置し、最大耐力点近傍ではあるがセンサーの着色を確認した。今回は分割鋼板による補強材であるため発生するひずみが通常の鋼板巻立てに比べて小さくなったが、今後は通常の鋼板巻立て補強試験体で検討する等、最適な設置位置や圧力測定フィルムの選定等の詳細な検討が必要である。
- ・トンネル支保工や土留め工の鋼部材への適用については、要素試験により一定の適用範囲を示せたが、実用にはセンサーの製作精度を上げる必要がある。
- ・トンネル支保工への設置については、要素試験を終了し、施工中のトンネルに実際に設置して、同一部材で実施される計測と比較する等、その適用性を確認する必要がある。

謝辞

本技術は、株式会社ジェイアール総研エンジニアリングとテクノス株式会社の 3 社で特許を出願しているものである。共同研究者の協力に感謝する。また、本技術の開発に助言を頂いた土木事業本部の皆様、施工中のトンネルでの適用に尽力頂いた北海道支店土木部の皆様に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会 最終報告書，土木学会，pp. I-158-159，2015. 8

Development of damage detection technology for RC columns retrofitted with steel jacketing works

Yasuhiro OKOSHI and Tsubasa HATTORI

Abstract

The RC columns retrofitted with steel jacketing works etc. experienced several strong ground motions including the Great East Japan Earthquake. No serious damage has been confirmed, and its effectiveness has been clarified. However, it is difficult to confirm the damage status of the existing members after being subjected to strong ground motion, because it is wrapped with the steel plate. Therefore, the authors develop a damage detection sensor that can grasp damage status of existing members reinforced with the steel plate without requiring specialized knowledge in the emergency after earthquake. In addition, this sensor can contribute to the visualization of safety during construction by installing it on the supporting material of the tunnel under construction or the retaining wall in open cutting works. We also introduce an example of actual application in the tunnel under construction.

Keywords: RC columns, Damage status, Sensor, Visualization of safety