

論文 鉄道 RC ラーメン高架橋柱の損傷レベル検知システムの開発

鈴木 哲也^{*1}・仁平 達也^{*2}・曾我部 正道^{*3}・宮本 則幸^{*4}

要旨：近年，RC ラーメン高架橋柱に鋼板巻き補強が多く施工されており，地震による損傷状況を目視により確認することが困難になってきている。このような背景から本研究では，鋼板巻き立て補強柱を含む柱の損傷レベルを検知するシステムを開発した。本システムの精度を実物大柱模型等により検証した結果，最大応答部材角の測定誤差は 10%程度であることが分かった。また，実構造物へ設置した場合，作業員 2 名により 150 分程度で設置可能であること，無線 LAN の伝送距離は概ね 200m 程度であることなどを明らかにした。

キーワード：損傷レベル，ピークセンサー，最大応答部材角，無線 LAN

1. はじめに

鉄道 RC ラーメン高架橋の損傷は，通常被災後の随時検査において目視により確認する。しかし，近年鋼板巻き補強が施され，目視による損傷の把握が困難な RC 柱の本数が増加している。

柱端部に生じる最大応答部材角と損傷レベルの関係は概ね把握されているため¹⁾，最大応答部材角を効率的に測定出来れば，地震後早期に柱の損傷レベル評価が可能となり，復旧作業の効率化やダウンタイムの減少が期待できる。

このような背景から本研究では，鉄道 RC ラーメン高架橋柱の損傷レベル検知システムの開発を実施した。図 - 1 に全体システムの概要図を示す。RC ラーメン高架橋柱に，センサーとして図 - 2 に例示するような最大応答部材角測定装置（以下，部材角測定装置という）を設置し，地震時における最大応答部材角を測定する。このデータを，送受信機を中継しながら基地局へ伝送するとともに，地震後の随時検査において RF-ID（Radio Frequency Identification）タグにより回収するものである。

本研究の目的を以下に示す。

- (1) 実用的なセンサーネットワークが構築可能な，精度の高い部材角測定装置を開発し，そ

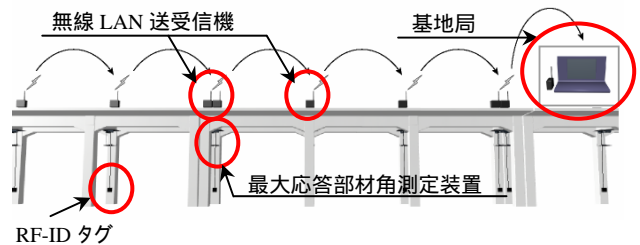


図 - 1 全体システムの概要図

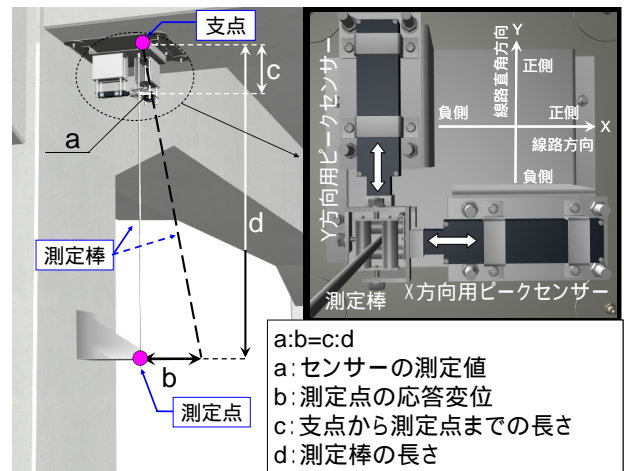


図 - 2 最大応答部材角測定装置

の測定精度を確認する。

- (2) 部材角測定装置の精度について実大模型実験により検証する。
- (3) 実構造物における全体システムの実用性について，設置の作業性，コスト面，データの送受信の観点から検証する。

*1 西武鉄道株式会社 鉄道本部 工務部 飯能保線所 副所長 (正会員)

*2 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 研究員 工修 (正会員)

*3 (財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学 主任研究員 博(工) (正会員)

*4 (株)計測リサーチコンサルタント 企画開発室長

2. 部材角測定装置の開発

2.1 装置の構造

部材角測定装置は、鉄道 RC ラーメン高架橋柱の損傷レベル検知システムのセンサー部分に相当する。このような目的で使用可能なセンサーは様々なものが提案されているが、本研究ではリセット機能を有し、常時電源不要のピークセンサーに着目して開発を行うこととした。図 - 3 にピークセンサーの構造を、表 - 1 にピークセンサーの仕様を示す。ピークセンサーは正側と負側の両方の最大変位量の検出、記憶が可能なセンサーである。センサーの検出範囲は $\pm 10\text{mm}$ であるが、RC ラーメン高架橋柱天端の地震時の変形は、高架橋の高さ、柱の諸元にもよるが、水平変位 $50 \sim 300\text{mm}$ 程度を想定する必要がある。そこで、図 - 2 に示すような幾何学的な相似の関係を利用した治具を開発した。このような治具は 1 方向のものが既に提案されているが²⁾、鉄道 RC ラーメン高架橋の柱は全方向に振動することが予測されるため、図 - 2 に示すような、任意方向の変位量を X 方向(線路方向)と Y 方向(線路直角方向)成分に分解し、1 装置で 2 方向の最大応答部材角を測定する機構を新たに開発した。実構造物へ設置する場合、測定点となる測定棒先端の柱への接続箇所は、基部より $1000 \sim 2000\text{mm}$ 程度の塑性ヒンジ部(RC 柱部材の基部付近の損傷集中箇所)を避けることとし、センサー部と上層梁の接続箇所についても水平性を確保するためハンチを避けることとした。

2.2 精度確認の実験方法

開発した部材角測定装置について、精度確認実験を実施した。表 - 2 に実験ケースを示す。実験は、正弦波および模擬地震波(L1 と L2 地震波)により想定した高架橋の柱天端に生じる応答部材角を、図 - 4 の a)に示す専用の実験フレームに設置し、部材角測定装置に静的に与えることにより実施した³⁾。測定棒の全長は 1000mm 、支点からセンサー検知位置までの長さは X 方向を 230mm 、Y 方向を 200mm とした。これらの諸元は、鉄道 RC ラーメン高架橋の柱天端の応答部

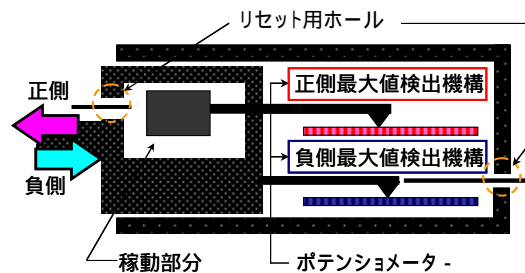


図 - 3 ピークセンサーの構造

表 - 1 ピークセンサーの仕様

項目	仕様
寸法	127×18×32mm
重量	155g
検出範囲	$\pm 10\text{mm}$
分解能	$2\mu\text{m}$

表 - 2 実験ケース

Case	想定した鉄道 RC ラーメン高架橋	入力地震波	測定方向	装置の向き
0-1-1		正弦波	L 方向	下
0-1-2				上
0-2-1			C 方向	下
0-2-2				上
1-1-1	柱高さ 12m (1 層)	L1 G3 地盤	L 方向	下
1-1-2				上
1-2-1			C 方向	下
1-2-2				上
2-1-1	柱高さ 7m (1 層)	L2 G3 地盤	L 方向	下
2-1-2				上
2-2-1			C 方向	下
2-2-2				上

L 方向:線路方向(X 方向), C 方向:線路直角方向(Y 方向)

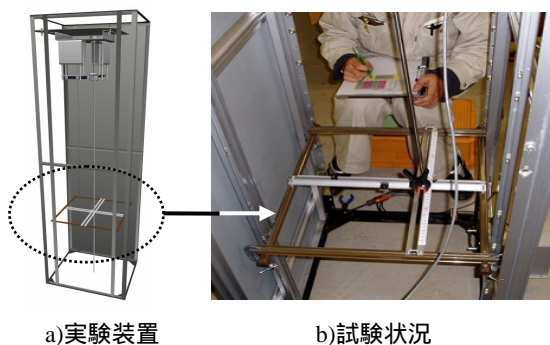


図 - 4 実験装置および試験状況

材角、センサーの仕様および測定精度との関係より定めた。また、塑性ヒンジ部は柱天端と柱基部に生じるため、部材角測定装置は上向きの場合、下向きの場合の両方について実施した。

実験に用いた波形は、想定した鉄道 RC ラーメン高架橋の線路直角方向の非線形動的解析により得られた柱天端における各時刻歴での応答部材角を、測定棒先端に与える変位量に逆算したものである。さらに、線路方向を X 方向、線路

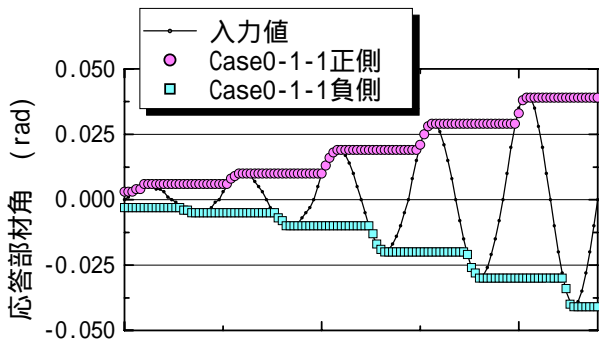


図 - 5 正弦波 (Case0-1-1)

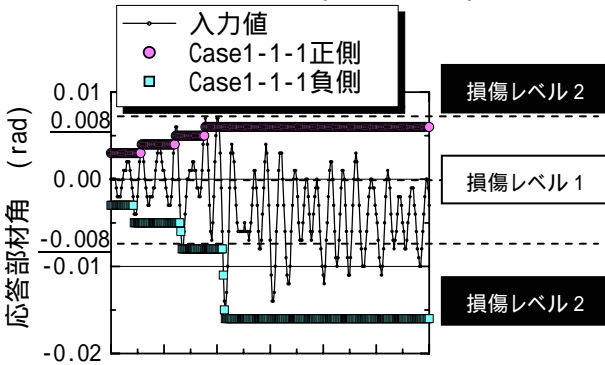


図 - 6 L1 地震動 (Case1-1-1)

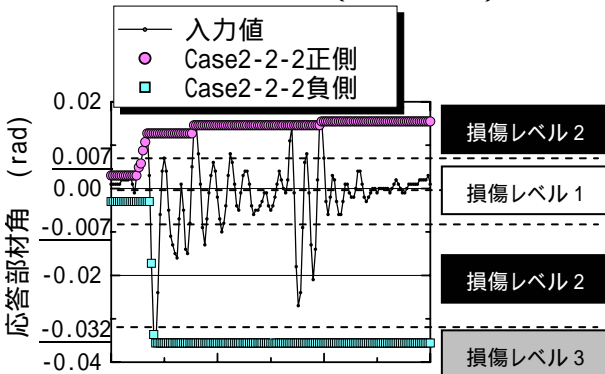


図 - 7 L2 地震動 (Case2-2-2)

直角方向を Y 方向とした両方向に同一変位量を与えることを目的として、振幅を $\sqrt{2}$ 倍し、図 - 4 の b)に示すように 45° 方向から入力するものとした。

2.3 精度確認の実験結果

図 - 5 に正弦波下向きの場合の Case0-1-1、図 - 6 に L1 地震動下向きの場合の Case1-1-1、図 - 7 に L2 地震動上向きの場合の Case2-2-2 の実験結果を示す。正弦波および入力した模擬地震波に対し、センサーは正負側ともに経験した最大応答部材角を測定可能であることがわかる。なお、センサーに構造上発生する検知不能な微小な変位（不感帯）量が発生するが（図 - 8）、本実験における不感帯量は、XY 方向および正負側ともにアーム先端の変

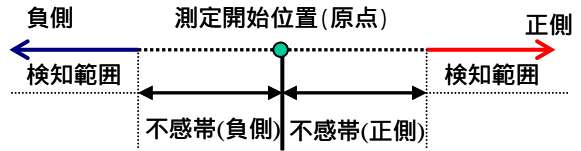


図 - 8 不感帯

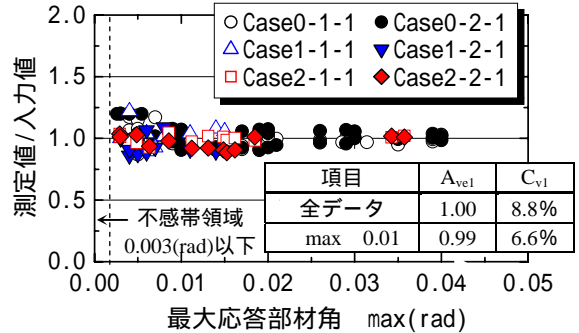


図 - 9 測定値/入力値 (下向き)

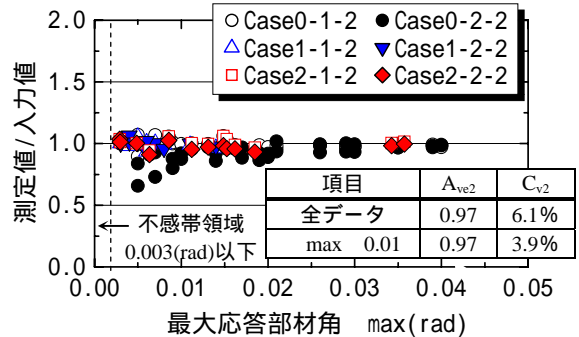


図 - 10 測定値/入力値 (上向き)

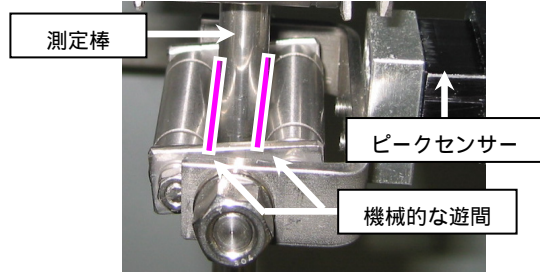


写真 - 1 センサーと測定棒の接続箇所

位量に換算して 3.0mm (0.003(rad)) であった。図中の測定値にはこの不感帯量を考慮している。

図 - 6 と図 - 7 に示すように、鉄道標準¹⁾により求めた各ケースの損傷レベルのしきい値を事前に設定し、最大応答部材角を検知することにより、軸方向鉄筋の座屈が生じる損傷レベル 3 程度の大きな応答部材角を入力しても、RC 柱の損傷レベルの推定が可能であることを確認した。

本実験の最大応答部材角の入力値に対する測定値の誤差割合について、図 - 9 に装置が下向きの場合 (Case 番号の末尾が 1)、図 - 10 に装置が上向きの場合 (Case 番号の末尾が 2) について示す。最大応答部材角の値が小さい場合、値に

ばらつきが見られるが、最大応答部材角の値が大きくなるにつれて、測定精度が向上する傾向がみられた。変動係数(C_v)で表すと、装置が下向きのケース、上向きのケースの場合それぞれ 8.8%, 6.1% となった。鉄道 RC ラーメン高架橋柱の損傷レベル 1 と 2 のしきい値程度である部材角 0.01(rad)以上のデータでは、変動係数(C_v)は 6.6%, 3.9% となった。測定誤差が発生する要因として、写真 - 1 に示すセンサーと測定棒の接続箇所に生じる機械的な遊間が考えられる。この誤差は機械的なセンサーとして不可避なものであるが、本実験結果から損傷レベルを大きく変える決定的な誤差ではないことを確認した。また、装置の向きで大きな相違はみられなかったことから、図 - 2 に示すようなラーメン高架橋柱頭部のほかに、柱基部や橋脚基部にも設置可能であることを確認した。

3. 部材角測定装置の模型実験

3.1 実験方法

前章で開発した部材角測定装置を実大模型柱（以下、実験体）に設置し、その性能を確認した。図 - 11 に実験概要を示す。

荷重点位置が基部より 3300mm（柱高さ 1/2 点、ラーメン高架橋柱に生じる逆対称のモーメント分布を考慮）の実験体に部材角測定装置を設置し、正負交番荷重実験により柱の応答部材角を測定した。応答部材角の測定点は柱高さ 1/4 点（部材角は塑性ヒンジ部に集中することを考慮¹⁾）とし、ピークセンサーの設置高さは基部より 165mm とし、柱高さ 1/4 点との縮尺率は 1:10 とした。実験体は、RC 柱の No.1 と、塑性ヒンジ部である基部より 80~980mm の範囲に鋼板を巻き立てた柱の No.2 の 2 体を用いた。荷重方法は、0.00758 (rad) (=25mm) を 1 y (y: 曲げ降伏時の部材の変形角) とした整数倍の応答部材角を最大値とした正負漸増交番荷重とした。水平変位計は、柱高さ 1/2 点と柱高さ 1/4 点に設置した。応答値は、同一高さの柱高さ 1/4 点の水平変位計により得られた値とし、部材角測定

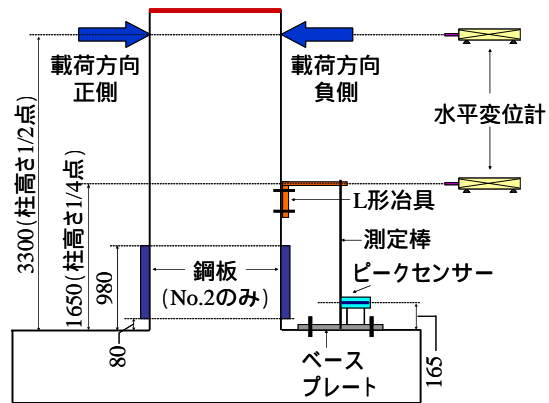


図 - 11 実験概要 (単位mm)

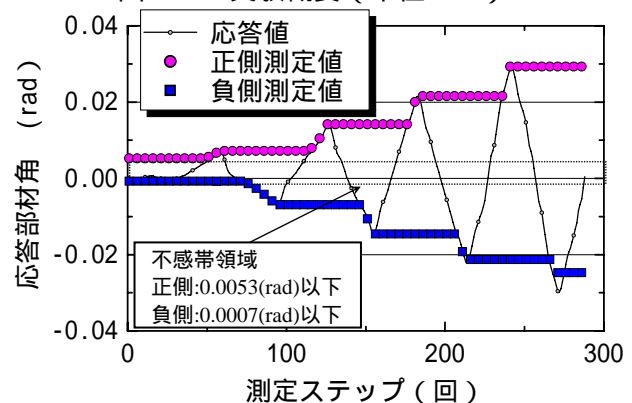


図 - 12 No.1 の応答値と測定値

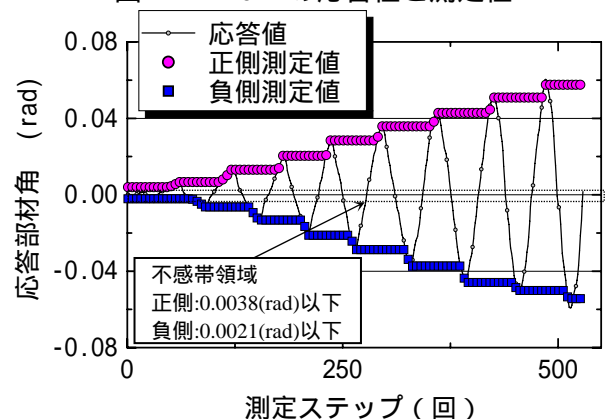


図 - 13 No.2 の応答値と測定値

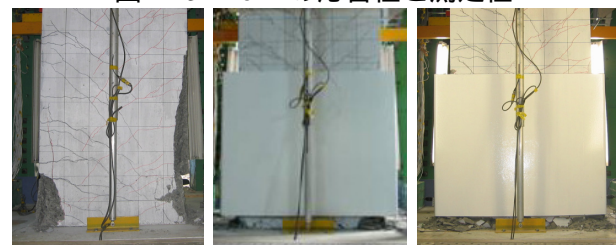


写真 - 2 No.1, No.2 の損傷状況

表 - 3 精度確認実験結果(測定値/応答値)

試験体	No.1		No.2	
	平均	変動係数 (%)	平均	変動係数 (%)
正側	1.06	5.8	0.99	3.3
負側	0.97	8.7	0.97	4.8
全データ	1.01	8.6	0.98	4.1

装置の測定値と比較した。

3.2 実験結果

図 - 12 に No.1, 図 - 13 に No.2 の応答値と測定値を示す。写真 - 2 の a) に示すように, No.1 は 4_y においてかぶりコンクリートのはく落が顕著となり, はく落片が装置に落下したため載荷を終了した。No.2 は鋼板を巻き立てているためはく落はみられず, 8_y まで載荷した。

表 - 3 に, 最大応答部材角の応答値に対する測定値の誤差割合について示す。載荷方向, 実験体間に大きな差異は認められなかった。変動係数で整理すると全データで No.1 は 8.6%, No.2 は 4.1% となった。このことから, 実大柱においても, 精度確認実験とほぼ同等の精度が得られることを確認した。

RC 柱の No.1 の鉄道標準¹⁾における骨格曲線上の M 点¹⁾ (最大曲げ耐力点) は 3.9_y である。本実験は, かぶりののはく落によるセンサーへの影響を考慮し, 4_y までで実験を終了したが, 損傷レベル 2 と 3 のしきい値である M 点程度の最大応答部材角について, 十分検知可能であることがわかった。なお, 装置に防護カバーを設置すること等により, ポストピーク領域を検知限界点に設定することが出来ると考える。

鋼板を巻き立てた柱の No.2 は写真 - 2 の b), c) に示すように, 4_y と 8_y において, 目視により明らかな差異は認められなかった。そのため, 装置による検知限界点をポストピーク領域まで設定する必要があるといえる。

図 - 14 に柱高さ 1/4 点と柱高さ 1/2 点における水平変位計から算出した応答部材角を示す。柱部材は変形が塑性ヒンジ部に集中するため, 両点の応答部材角にほとんど差異がない。このことから, 本装置は, 柱高さ 1/4 点を測定位置として, 柱部材の最大応答部材角を測定できることがわかった。

4. 全体システムの検証実験

4.1 実験方法

開発した部材角測定装置を含む全体システム

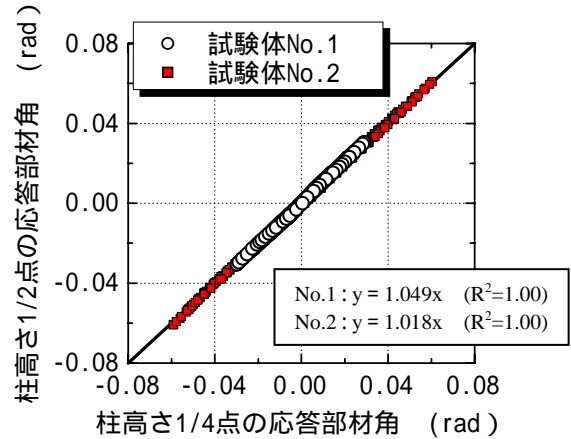


図 - 14 柱高さ 1/4 点と柱高さ 1/2 点の応答部材角

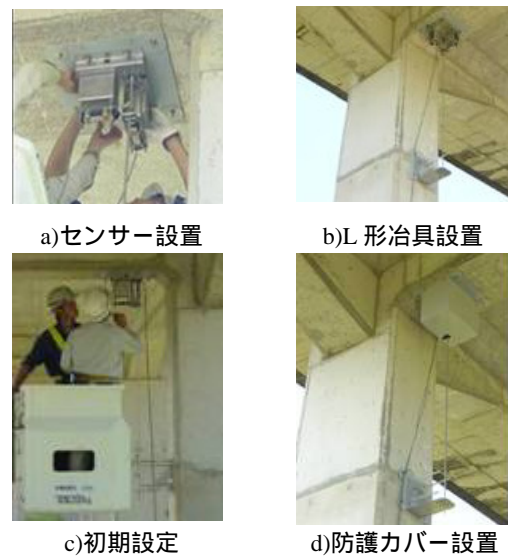


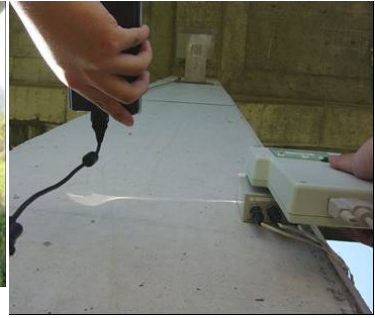
写真 - 3 装置設置概要

を実際の RC ラーメン高架橋に設置し, その実用性を検証した。具体的には, 設置作業項目の抽出と所要時間の算出を行い, 実構造物に設置可能であることを実証するとともに, 無線 LAN によるデータ伝送および RF-ID タグによるデータ伝送についても併せて検討を行った。

4.2 実験結果

(1) 実構造物への適用性

写真 - 3 に装置設置概要を示す。設置は, 作業員 2 名と高所作業車 (バケットタイプ) 1 台を配して実施した。高所作業車の据付け, センサー設置 (写真 - 3 a)), L 形治具設置 (写真 - 3 b)) までに 120 分程度, 測定棒の鉛直調整, 不感帯領域を把握し測定開始点の設定などの初期設定 (写真 - 3 c)) に 25 分程度, 防護カバー (地震時のかぶりのはく落, 耐久性及び鳥の巣対策) の設置 (写真 - 3



a)データ送信状況 b)送受信機(左:受信機 右:送信機) c)データ受信状況
写真 - 4 無線 LAN 伝送実験

写真 - 5 RF-ID タグ伝送実験

d)に5分程度かかり,1装置を設置するのに150分程度要することが確認された。以上より1日あたり3箇所程度の設置が可能であることなど,実務作業における設置条件が明らかとなった。

(2)無線 LAN 伝送実験

損傷レベル検知システムにおいて,部材角測定装置を設置する構造物の間隔を把握するために,無線 LAN による伝送実験を行った。写真 - 4 に無線 LAN 伝送実験状況を示す。無線 LAN 装置を 50,100,150,200,240m の順に部材角測定装置から距離をとり,通信状態の実験を行った。写真 - 4 の a) に示すように試験用の入力装置を用いて,測定棒先端に静的に部材角を入力し,その値を伝送により確認した。その結果,200m までは通信状態は安定し,240m では通信状態が不安定となった。以上から,鉄道の標準的な4径間 RC ラーメン高架橋(30~40m)では,5~6ブロックごとに受信装置を設置すればよいことが分かる。なお,通信状態は周囲の環境状態にも依存するが,本実験は周囲に人家が無く,また見通せる側道がある状態で実験を行った。

(3)RF-ID タグ伝送実験

写真 - 5 に RF-ID タグ伝送実験状況を示す。上記と同様に入力装置を用いて測定棒先端に静的に部材角を入力し,その値を RF-ID タグにより回収し,伝送が行えることを確認した。

5. まとめ

鉄道 RC ラーメン高架橋柱の損傷レベル検知システムを開発し,各種精度確認実験を実施した。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

1)精度確認実験の結果,応答波形や装置の向きに

関係なく,測定精度は変動係数で10%程度,損傷レベル1と2のしきい値程度である最大応答部材角0.01(rad)以上では7%程度となり,精度よく損傷レベルの検知が可能であることを確認した。

2)実大模型柱実験の結果,変動係数9%程度で精度よく損傷レベルの検知が可能であることを確認した。

3)実構造物への設置実験により,部材角測定装置は,高所作業車と作業員2名により,150分程度で取付け可能であることを確認した。

4)無線 LAN 実験の結果,鉄道における標準的な4径間 RC ラーメン高架橋5~6ブロック分の距離に相当する200mまで通信可能であることを確認した。

本研究の一部は国庫補助を受けて実施された。

参考文献

- 1) 財団法人鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物),丸善,2004.
- 2) 下見成明,松井義昌,新川秀一,中泉義政:最大ひずみ記憶センサーを用いた橋梁の診断技術,「耐震補強,耐震技術,耐震診断技術に関するシンポジウム」講演論文集,Vol.3, pp.143-150,1999.
- 3) 仁平達也,曾我部正道,谷村幸裕,宮本則幸,濱田弘志,鉄道 RC ラーメン高架橋柱の最大応答部材角測定装置の開発について,第61回土木学会年次学術講演会講演概要集,Vol.61, pp.771-772,2006.