鉄道高架橋の地震時不同変位計測のための 高密度地震観測システムの構築

坂井 公俊¹・本山 紘希¹・室野 剛隆¹・盛川 仁²・ 荒木 正之³・浦口 尚貴⁴

¹正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail: ksakai@rtri.or.jp

²正会員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259-G3-7)
³正会員 エーラボ (〒151-0053 東京都渋谷区代々木1-42-10 ブルックリンコート2F)
⁴正会員 西武鉄道 工務部 (〒359-0037 埼玉県所沢市くすのき台1-11-1)

地震時の地盤・構造物挙動の詳細な把握および地震応答解析等の各種シミュレーションの精度検証のた めのデータ取得を目的として、地盤〜高架橋の高密度地震観測システムを構築した.本観測システムの構 築においては、実用ダイナミックレンジ24bit、サンプリング周波数200Hzのデータロガーを活用すること で、極めて高精度な観測を実現している.本システムでは地震計を地中、地表および高架橋上に設置し、 耐震設計で用いられる地盤応答解析、地盤〜構造物の一体解析の検証材料となるデータの蓄積を実施した. さらに、連続した4スパンのラーメン高架橋の両端部(計8箇所)に地震計を設置し、地震時の走行性に影 響の大きな角折れ、目違いを直接計測可能とした.

Key Words: monitoring system of seismic motion, high-density monitoring, data logger, phase difference of neighbor structure, validation of seismic response analysis

1. はじめに

現在の鉄道構造物の耐震設計、地震時挙動評価等を行 う場合には、数値解析が多用されている¹⁾.数値解析に おいては、そのモデル化の際に工学的なある種の割り切 りにより、現象を理想化して扱っている部分がある. 一 方,構造物の三次元的な挙動や隣接構造物との相互作用 については、未解明な部分も多く残っており、これらの モデル化における理想化については十分検証されている とは言いがたい. 一例を挙げると, 一般的な高架橋の設 計計算においては、構造物を二次元断面でモデル化し、 隣接構造物の影響は荷重としてのみ考慮するが、構造物 の三次元的な挙動の影響や、隣接構造物の位相差により 発生する力の伝達等が詳細に扱われることは少ない. ま た設計計算以外にも、列車通過に伴う地盤振動の伝播等 の問題に対して数値解析による評価が実施される場合が あり^{例えば2)},各解析結果が有する精度や信頼性について 十分に議論し、検証しておくことは重要である.

また,上でも述べたが隣接構造物の地震時挙動が一様 でないために,構造物間には角折れ,目違いが発生し, 車両の走行性に大きな影響を与える可能性が指摘されて いる³. しかしながらこの角折れ,目違いの大きさを実 構造物,実地震に対して計測した例はほぼ皆無であり, 数値解析による議論に終止している.設計で取り扱って いる地震動の波長や構造物振動の位相差を考慮した走行 安全性の評価が妥当な結果となっているかについては議 論を要する.

そこで本研究では、観測記録のみから連続する構造物 の地震時挙動を詳細に分析するとともに、数値計算の精 度を検証する際に必要な地震観測データを収集するため の地中 - 地表 - 高架橋群の高密度地震観測システムを構 築することを目的とする.過去に地震観測システムを構 築した事例は多数存在するものの、これらは主に地震動 の伝播特性、空間変動の評価⁴⁵⁹や高層建築物⁹、長大橋 梁⁷等の単体構造物の挙動評価のための観測に限定され ている.一方で本システムの大きな特徴としては、入力 地震動から地盤、構造物応答までを高精度に計測してい るだけでなく、連続する高架橋群に対して高密度に同時 地震観測を実施することで、角折れ、目違い量の直接計 測を可能としている点が挙げられる.

高密度地震観測システムの目的と要求される 性能

今回開発する地震観測システムは、地震発生時の地盤 -連続する構造物群の挙動を観測記録のみから詳細に分 析することと、シミュレーションの検証材料としての観 測記録を得ることを目的としている.これらの目的を達 成するために必要な計測項目を図-1に示した.また、項 目のみを列挙すると、次のようになる。

基盤位置での地震動

② 地表面位置での地震動

③構造物の地震応答

④連続する構造物の角折れ、目違い量

これらの項目を詳細に分析する上ために、システムに 要求される性能を以下に整理する.

本システムでは地震計として加速度計を用いることと する. そのため、地盤や構造物の応答変位を詳細に把握 するためには、加速度記録を積分により変位に変換する 必要がある.積分を行うと低振動数側の影響が大きくな るが、一般に低振動数側の信号はノイズによる影響を受 けやすいという問題がある.このため、デバイス選定に おいては、極力低振動数側の自己発生ノイズが小さいも のを選択する必要がある.一方,地盤の応答に注目する と、地盤の挙動は1~4Hz程度に存在する1次モードの影 響だけでなく、高次のモードの影響も無視できない⁸た め, 高振動数側の信号についても, 高精度に観測できる ことが望ましい.以上から、広い振動数帯域にわたって、 ノイズの影響を極力抑えた高精度の観測が必要となる. 高振動数側の振動を計測するためには、従来地震観測に おいて用いられてきた100Hzのサンプリングでは精度が 保証できる振動数帯域が狭いため、より高サンプリング が可能なシステムが要求される.

地震を対象に観測を行う場合には、大きな地震が観測 できることは稀であり、数gal程度、または1galに満たな いような地震動も対象とすることが現実的である.これ らの地震動を高精度に観測でき、かつ、大きな地震が発 生した場合にも、確実に地震観測を行うためには、シス テムのダイナミックレンジを大きく設定する必要がある. 一般に、サンプリング周波数とダイナミックレンジはト レードオフの関係にあるため、データロガーはこのトレ ードオフの関係を把握した上で、地震観測に最適となる よう開発する必要がある.

地震時に要求される鉄道特有の性能としては、車両の 走行安全性が挙げられ、単一構造物の振動の影響だけで なく、構造物間の振動が一様でないことに起因する角折 れ、目違いの影響も大きい(上記項目④).この振動変 位の差分(角折れ、目違い)を観測記録から直接評価す るためには、上記で述べた高サンプリングが可能なシス



図-1 地震観測システムに要求される計測箇所,性能

テムであると同時に、それぞれの記録が高精度に時刻同 期されている必要がある.

さて、本観測システムの主目的は地震観測であり、発 生した地震に対する計測を確実に実施する必要がある. しかしながら鉄道構造物には車両走行に伴う非常に大き な振動が頻繁に発生しており、従来から一般的に実施さ れている単純なトリガー方式による計測では、中小地震 を取り逃してしまう可能性がある.そのため、観測方式 としても何らかの工夫を行う必要がある.

以上をまとめると、①~④の計測を達成するためには、 広い周波数帯域において高精度、高分解能の同時計測が 要求される.また、列車振動のような比較的大きな環境 ノイズが存在する観測であることに十分配慮したシステ ムの構築が要求される.

3. 高密度地震観測システムの構築

(1) 地震観測装置の選定, 開発

前章で示したシステムに要求される性能を満足するに は、地震計およびデータロガー、各種システムに十分な 性能を設定する必要がある.また、データを効率的に取 得するには、観測システムとして、データの取扱いに特 徴を持たせる必要がある.そこで本検討では、観測に使 用する地震計を選定するとともに、新たな高精度データ ロガーの開発を行った.また本計測システムの接続方法 としても一般的な屋外観測システムと比較して高精度計 測が可能となるように工夫を行ったので、本節ではこれ らについて述べる.

a) 地震計の選定

本観測システムにおいて必要とされる地震計は、応答 変位に影響の大きな低振動数領域から、隣接構造物間の 位相差を計測するために必要となる高振動数領域に至る まで、広い振動数帯での感度が求められる.また、数少 ない地震観測の機会を最大限に活用するため、微小な地 震応答や、構造物の微動も精度よく観測できることが望 ましく、そのためには、地震計の自己ノイズが十分小さ いことが求められる.さらに、温度や湿度に対する耐性 に優れていること、3成分の観測を可能としながらも、 高架橋上に設置できる程度にコンパクトな形状であるこ とが望まれる.これらを満足する最適な地震計として Nanometrics社の加速度計(Titan)を選択した.この地震計 は表-1に示したように、DC成分から430Hzまでの広帯域 をカバーしており、特に0.01Hz~10Hzまでにおいては、 150dB以上の高ダイナミックレンジを確保している.こ れは防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netで使用されて いる地震計の性能⁹(132dB程度)に比べても十分高い性 能を有しており、微振動においても有効なデータとして 活用が期待できる.また、野外での観測用に作成された ものであるため、温度や湿度などの環境条件への耐性も 高い.

b) データロガーの開発

通常の地震観測に用いられているデータロガーの調査 を行った結果,荒木ら¹⁰によって擬似的に32bit,実効 29bit以上の分解能を有する高性能ロガーが開発されてい るが,構成が大がかりになり,本研究において許容され るコストを大きく上回る,これを採用することは難しい. そこで,200Hzサンプルで時刻同期を保証し,ノイズの 発生を極力抑制した上で,24bitでのAD変換を実現する ことを要求性能とした,ロガーの開発を行った.

今回選定した地震計の実力は150dB(29bit)であることか ら、データロガーの要求性能である24bit (125dB) 以上 の表現力を有している. ADコンバータには量子化ノイ ズが内包されるが、要求性能を極力廉価に実現するため、 本検討では実効112dB(量子化ノイズ2bit)の24bitADコ ンバータを採用した. また、2bit分の感度を稼ぐためロ ガー内部では800Hzで4倍オーバーサンプリングを行い、 デシメーションフィルタを用いてエイリアシング信号 (妨害波成分)を除去した上で、量子化ノイズをマスク したデータをオーバーサンプル分で平均化することで 2bit(13dB)の底上げを行い、見かけ上の実効ダイナミック

レンジが24bit (125dB) という極めて高い性能を持った データロガーを構築した. 地震計とデータロガーの概観 を図-2に示す.

c) データ伝送手法, 観測システムの実装方法の選択

高架橋上の観測では、多数の列車振動が存在すること から、中小地震を対象としてトリガーを設定した場合に は、結果的に常時の振動計測が実施されてしまう可能性 が考えられ、データ容量の削減効果は小さい.また、仮 にトリガーを大きく設定した場合には、中小地震記録を 取り逃す可能性が高い.そこで、本システムでは、特別 なトリガー等によるデータ選別は実施せず、全時刻のデ ータ取得を実施することとした.これによりデータ欠損 等を防ぐことが出来る.

しかしながら常時観測を実施することにより、データ 量が膨大となるため、データロガーにSDカード等の小

表-1 選定した地震計の性能一覧

フルスケールレンジ	±4g,±2g,±1g,±0.5g,±0.25g (シリアルで選択可能)
感度	5V/g, 10V/g, 20V/g, 40V/g, 80V/g (フルスケールレンジに対応)
帯域	DC~430Hz(-3dB)
ダイナミックレンジ	150dB以上(0.01Hz~10Hz)
シリアルポート	RS232 コンパチブル 9600bps
消費電力	通常1.1W 最大3.2W
湿度	0~100%
動作温度範囲	-40~+60°C
寸法	14cm(L)x8.5cm(W)x5.8cm(H)
重量	0.96 kg



図-2 地震計とデータロガーの概観

型の電子メディアを設置する手法では、観測データ全て を保存することは困難である.そこで、観測小屋を設置 し大容量ハードディスクに地震データを直接蓄積する仕 様を採用した.ハードディスクヘデータを蓄積する際に は、観測システム内で一時的なデータ整理を行うことを 考え、観測小屋にPCを設置することで、データの取得 および整理に必要なプログラムを稼働させるものとして いる.また、地震計・データロガーと観測小屋の間では、 伝送経路としてLANを用いたシステムを採用した.

本システムにおいては、時刻同期においても、観測小 屋と伝送経路を活用することとした.一般に、高精度の 時刻同期を考える場合にはGPSによる時刻同期が一般的 であるが、本システムでは計測器が高架橋の影に入って しまうケースが想定されるため、GPSを用いた常時の高 精度時刻同期は困難である.そこで、観測小屋のPCに NIPサーバーを構築することで、データロガーの時刻を 同期する手法を採用する.これにより、数ミリ秒単位の 時刻同期が可能となる.

さらに、観測小屋に設置したPCをデータサーバーと しても活用することで、外部からデータをダウンロード できる仕組みを採用した(図-3).これにより、データ 取得の度に現地を訪れる必要がなく、またデータロガー で稼働しているプログラムの更新もネットワーク経由で 実施可能となり、メンテナンスの利便性も高いシステム となった.さらに従来の大規模地震観測システムではセ ンサ、ロガーの故障によるデータ欠損の可能性が高くな



図-3 観測状況のリモート確認の状況

るが、リモートでのリアルタイム監視が可能となるため に、システムの異常発生時に迅速な対応を取ることが可 能となる.

(2) 観測実施箇所の選定

観測を実施する対象構造物としては、鉄道において一 般的に採用されているラーメン高架橋とした.また、角 折れ、目違いの計測も目的としているため、構造条件が 変化している箇所を含むことが望ましい.このような条 件に基づいて候補地を選択した.

具体的には、図-4に示す連続した4スパンの高架橋を 対象に地震計の設置を行った.また、図-5にはこのうち、 RC69の構造寸法を概略的に示すが、柱高さ5m程度、杭 長10m程度の標準的なラーメン高架橋である.ここで示 すラーメン構造物は、線路直角方向には1径間である. 特徴として、RC69、RC71は道路を跨ぐ桁を支持する構 造物であり、道路に沿った形で斜角を有している. RC65、RC67は整形な構造であるが、柱長さがRC67で多 少短くなっている.このように各構造物はそれぞれ異な る特徴を有しており、振動特性としても異なることが予 想される.

(3) 地震観測システムの構築

前節で選定した高架橋に対して、地震観測システムを 構築した.地表位置の計測は本来であれば高架橋の振動 の影響を受けない自由地盤で実施することが望ましい. しかしながら本計測地点で観測箇所の制約により、観測 小屋、地表位置の地震計は図-4に示したようにRC69の 下に設置した.また、各地震計・ロガーは観測小屋から 電源ケーブルおよびネットワークケーブルを配線するこ とで接続している.

まず,高架橋における地震計の設置状況を図-6(a)に示 す.観測記録は構造物天端のデータに近いことが望まれ る.そのため地震計をできるだけ高い位置に設置するた



め、ラーメン高架橋の外側に設置している.設置はまず プレートを柱にアンカーで固定し、そのプレートに対し て地震計を固定するという方法を取った.こうすること で、地震計に不具合が発生した場合に比較的容易に計器 の取り換えが可能である.また、防水・防塵を考え、地 震計全体をカバーで覆っている.データロガーは外観に 与える影響に配慮し、柱を挟んで地震計の裏側に図-6(b) に示すように固定した.

続いて、地中位置の地震計は、深さ約13mに位置する 耐震設計上の基盤面(Vs=400m/s程度の硬質地盤)まで ボーリングマシンで掘削を行い、防水加工した地震計 (図-6(c))を挿入した後、土の埋め戻しを行った.地表 面の地震計は地中の地震計のほぼ直上位置に、軽量コン クリートを打設、鉄板を設置した上で、鉄板に対して地 震計を固定した(図-6(d)).観測小屋と高架上の地震計



(d) 地表地震計の設置状況 (e) 観測小屋と高架上の地震計の状況 図-6 地震観測システムの構築状況

の位置関係の例を図-6(e)に示す.

なお、本観測システムのうち地中、地表観測点と構造 物上観測点の4箇所(S04~S07)の観測は2012年3月より 開始し、残りの4地点(S01~S03, S08)は2012年10月より 観測を実施している.

4. 地震観測地点の詳細調査

本システムは、シミュレーションの精度検証のための データ取得を第一の目的としている。そのためシステム 構築箇所において、今後シミュレーションのための解析 モデルを作成する必要がある。そこで、観測地点の地震 環境、地盤、構造物特性について事前に詳細調査を実施 した.以下にこれらの調査結果をまとめる。

(1) 観測地点周辺の地震環境の整理

観測地点の地震環境について整理する.まず,地震調 査研究推進本部^{ID}によって評価されている観測地点周辺 の震源域の分布状況を図-7に示す.この図より,観測地 点の近傍には活断層等の大規模地震を発生させる震源域 は存在しない.ただし、立川断層や大正型関東地震の震 源域からいずれも20~30kmの距離に位置しているため、 これらの地震が発生した場合には、比較的大きな震動が 発生する可能性がある.また、この図には示していない が、関東地方の広域にわたって、「その他の南関東で発 生するM7程度の地震(首都直下地震)」の発生の可能 性が指摘されている.これは南関東エリア内のどこで発 生するかは不明であるものの、発生確率が非常に高く、



近年の予防対策を考えるうえで重要視されている首都直 下地震である¹²⁾.また、これ以外にもM6~65程度の地 震の発生が背景領域という形で評価されている.さらに 2011年東北地方太平洋沖地震に伴って、比較的規模の大 きな余震が東北地方~茨城県沖において現在でも頻発し



ており、東京においても震動が感じられることもある.

以上より、本地点では構造物に損傷が発生するような 強震が発生する可能性は低いと考えられるが、中小規模 の地震は比較的頻繁に発生するものと考えられ、解析の 検証に有効なデータを効率的に取得できる可能性が高い. 図-8には、周辺の公開地震観測点(K-NET, KiK-net)を 示す.本地点から半径数km以内の極近傍エリアには公 開地震観測点は存在しないが、15km程度の範囲内には K-NET川口(SIT011),K-NET新宿(TKY007),K-NET 小金井(TKY006),KiK-net所沢(SITH04)などが存在 する.観測記録の蓄積に伴い、これら観測点との比較を 行うことで、地点の地震増幅特性(サイト増幅特性¹³) を評価することも可能である.

(2) 観測地点周辺の地盤調査

地中の地震計を設置する前に、地点の詳細な地盤調査 を実施した.まず、標準貫入試験、ダウンホールPS検 層によって得られた土質柱状図を図-9に示す.本地点の 土層構成は、表層2.6m程度に埋土層(Bc)が堆積してお り、直下には関東ローム(Lm)が7.5m程度分布し、以 深には武蔵野礫層が分布する層序となっている.砂礫層 はN値50以上でかつVs=450m/sと判定されており、耐震設 計上の基盤面として扱うことが妥当であると考えられる. そこでPS検層結果を用いて固有値解析を行うと、耐震 設計上の基盤面以浅の地盤の固有周期Tg=0.256秒となり、 鉄道構造物の耐震設計においてはG3地盤(普通地盤) と分類される地盤に該当している.

さらに、土の変形特性を求めるための繰り返し三軸試 験をローム層において実施している.試験は図-9に示す 深さの異なる2地点で採取した試料に対し、拘束圧を変 化させて実施した(図-10).また、今後の地盤応答解 析の検証に用いることを念頭に、地盤の非線形特性のモ デル化を行った.地盤の非線形特性としてはGHE-S¹⁴モ デルを用いることとし、動的変形特性試験に基づいてパ



図-12 衝撃振動試験の状況

ラメータのフィッティングを行った.得られた結果を図 -11に示しているが、G/G0-γ/35関係は過去に提案されて いるGHE-Sモデルの標準パラメータ¹⁵⁾を用いることで、 試験結果を十分表現できていることが分かる.一方で h~γ/35関係は標準パラメータでは試験結果と異なった結 果を与えるが、今回新たに設定したパラメータを用いる ことで、試験値を良好に再現できている.

以上の試験結果,パラメータ評価に基づき,地盤応答 解析に必要なパラメータは全て抽出できており,これを 用いることで,今後地盤応答解析と観測記録との比較, 検証が可能である.

(3) 観測地点の構造物調査

構造物の基本特性調査として,RC67について衝撃振動試験¹⁰を実施した.試験は図-12に示すように電柱か

ら重錘を懸垂し計10回の打撃を加え、これにより生ずる 振動を速度計により計測した.計10回の打撃により計測 された波形の平均およびフーリエ振幅、位相を算定した 結果を図-13に示す.構造物の周期帯を考慮し、フーリ エ振幅のピークを読み取ることで、RC67の固有振動数 として2.81Hzが得られた.

5. 地震観測システムによる計測状況

(1) 計測される記録の例

構築した地震観測システムによって計測された記録の 例を示すとともに、システムの検証を行う.まず、観測 記録の例として2013年3月2日1時35分に発生したM4.8の 地震で得られた記録を図-14に示す.これより、地中~ 地表~構造物上に地震動が伝わるに従い、振幅が大きく なっていることが分かる.また、lgal程度の地震記録で あってもノイズに埋もれることなく計測できている. さ らに、図-15のフーリエ振幅を見ると、0.5Hz以下(0.1Hz 程度まで)の低振動数領域で各構造物上の振幅と、地表 面位置の振幅がほぼ一致している.これは、低振動数側 では、0Hzに向かって、構造物の伝達関数が理論的には 1に漸近することに対応している.実際に、図-16には構 造物上のフーリエ振幅を地表面位置のフーリエ振幅で除 した値(伝達関数)を示しているが、高振動数から 0.2Hz辺りまでは、応答倍率が徐々に小さくなり、かつ 値が1に漸近しており、理論的な伝達関数の形状と一致 している.つまり今回構築したシステムは、数galとい う非常に小さい振幅を有する記録であっても高い振動数 成分はもちろんのこと、0.2Hz程度の低振動数成分にお いても十分な分解能を有していると言える.

続いて、本システムは常時計測を実施しており、列車 振動や常時振動も計測している.そこで、これらの記録 の例を図-17に示す.また図-18には、地震記録、列車振 動、常時微動における高架上と地表のフーリエ振幅比を 示している.この結果から常時微動、地震記録によるス ペクトル比のピークは類似しているものの、加振源の異 なる列車振動によるスペクトル比は、特徴が異なってい る.この原因については今後検討が必要であるが、常時 微動という非常に振幅の小さな記録からも良好な伝達関 数が評価出来ており、本システムの分解能が非常に高い ことが確認出来る.

(2) 地震観測記録の収集, 整理

本システムでは微小地震の取りこぼしを防ぐために常 時データ取得を行っているが、各種検討時に毎回記録の 選定を実施するのでは作業が煩雑になり、構築したシス テムが有効に活用されない可能性がある.そこで、地震



発生毎に逐次データベースを構築することとした.2012 年3月の計測開始以降,震度1以上の地震は150回程度発 生(2013年9月現在)しており,それぞれに対して波形 を切り出し,1次データ整理を行っている.具体的には, 各地震の加速度記録から,速度,変位記録への変換,各 記録の最大値抽出,フーリエ振幅,位相の算定,構造物 上記録と地表,地中記録との振幅スペクトル比(伝達関 数)の算定,各結果の図化等を実施している.データ整 理の例として,地中,地表,構造物上(S06)における 最大加速度(線路直角方向)の一覧を図-19に示す.こ れより,計測された地震記録のほとんどは数ガル程度の 微小地震であるが,10galを上回るような地震記録も複 数回観測されていることが分かる.



(3) 構造物毎の振動特性の変化

a) 伝達関数による評価

地震時の構造物上と地中面位置の記録に対して、フー リエスペクトルの比(構造物/地中)を算定することで、 各構造位置の振動特性の差異を把握した.用いた観測記 録は、2013年3月までに計測された記録のうち、列車や 自動車等の振動ノイズのない良好な記録を用いた(SO4 ~SO7:49記録、SO1~SO3、SO8:19記録).伝達関数の 算定例を図-20に、観測地点毎の伝達関数(水平成分) の平均値を比較したものを図-22に示す.

まず図-20より,各観測記録の伝達関数の山谷の傾向 はほぼ一致しているものの,記録ごとのばらつきは大き い.このばらつきは高振動数成分ほど大きくなっており, 振幅の大小によって伝達関数が変化している可能性が考 えられる.

また、各地点の平均伝達関数を比較した図-21を見る と、隣接している構造のために地盤条件、構造条件が類 似している影響で、伝達関数の大まかな傾向は一致して いる.特に線路直角方向における1次ピークは全構造で 2.81Hzとなっており、衝撃振動試験の結果とも一致して いる.一方で詳細にスペクトルの形状を見ていくと、細 かな変化がみられる.例えば、線路方向においては全地 点で3Hz程度にピークが見られるが、S01~S03ではこれ と併せて2.5Hz付近にもピークが見られる.線路直角方 向ではピーク周波数は全ての構造で一致しているものの、



最大加速度抽出結果(2012年3月~12月)

ピークの値はSO1~SO3において他の構造よりも大きくなっている.また,SO3のピーク値はSO2,SO4の中間的な値となっているなど,これら構造毎の変化は単独で発生しているのではなく,SO1~SO8で連続的に変化していることが分かる.そのため各構造の振動は少なからず隣接構造の影響を受けていることが考えられる.

これら各構造の振動特性の解明,振幅依存による変化, 隣接構造物の影響等については今後解析等も含めて詳細 に検討を行う予定である.

b) 時刻歴波形による評価

地震時の各構造物の振動状況を把握するために、上記 図-14の加速度記録を絶対変位に換算した.得られた結 果を図-22(a)に示すが、各構造は概ね同位相で振動して いることが分かる.同図には地表面位置での絶対変位波 形も記載しているが、各構造の位相は地表の動きに追従



図-21 フーリエ振幅比の算定結果総括(水平成分)

していることが分かる.ただし,各応答の振幅値は多少 異なっている.続いて,S04を基準とした場合の相対変 位を算定した結果を同図(b)に示す.これを見ると,構 造毎の相対変位は特徴が異なっている.具体的には, RC65とRC69~RC71の相対変位波形は位相が逆転してい るように見える.そのため,RC67に対する隣接構造物 の影響としては,RC65個とRC69側で逆方向の力を受け ている可能性が示唆される.実際に,この影響が構造物 の挙動にどの程度の影響を及ぼすかについては、上記応 答倍率に関する検討と同様、解析的な検討を交えながら 今後議論を行う必要がある.

同様の地震動に対して,角折れの評価および不同変位 の評価を行った結果を示す.図-23に角折れの時刻歴波 形を示す.今回取り扱った比較的振幅の小さい地震動に おいては,桁を挟んだ両側において,ほぼ正負反対の角 折れが発生していることが分かる.また,各構造物間で, 異なる角折れが発生していることから、隣接する構造物 や位置関係により異なる相互作用の影響が示唆される結 果となっている.

このように、本システムによる観測記録は変位0.1mm 以下の振動を詳細に計測出来ているため、今後蓄積され るデータを用いることで、地震時の角折れ、目違いの発 生状況を評価することが可能であると考えられる.

6. まとめ

本研究では、観測記録のみから入力地震動,地盤・構造物挙動を詳細に把握することと、地震応答解析等の各種シミュレーション結果の検証のためのデータを取得することを目的として、地盤~高架橋の高密度地震観測システムを構築した.本システムの特徴を以下に示す.





(1) 今回採用した計測システム(データロガー+センサ ー)では、構造物の地震時挙動を超高精度(ダイナミ ックレンジ24bit,200Hzサンプリング,時刻同期)に 計測可能である.これにより、常時微動、列車振動、 強震動というあらゆる振動レベルに対して 0.2Hz~100Hzという広い振動数帯域で十分な精度を有

するデータ取得を実現した. (2) 地中〜地表〜高架上の振動を同時に計測することで, 鉄道構造物の耐震設計で用いられる地盤応答解析,地

- 盤~構造物の一体解析等の検証材料となるデータの蓄 積が可能となった.
- (3) 連続した4スパンのラーメン高架橋のそれぞれ両端部 (計8箇所)に計測システムを設置することで、地震時の走行性に影響の大きな角折れ、目違いを直接計測可能とした。
- (4)構築した観測システムは、常時データ取得を行って おり、その結果をネットワーク上でのリアルタイムモ ニタリングにより監視可能なツールを具備している. さらに任意時間を指定してデータ取得を行う作業もネ ットワーク経由で簡易に実施可能なシステムも開発した.これにより、地震時挙動評価以外の列車振動や常時微動データなどを用いた検討を行う場合にも本計測システムを活用することが出来る.
- (5) 観測システム構築箇所において地盤,構造物の基本

調査を実施することで,詳細な動的解析に必要な基礎 データを収集した.またシステム構築後に発生した約 200個の地震観測記録をデータベース化することで, 今後の各種検討時に用いる基礎資料を構築した.

以上のように今回開発したシステムは、地中〜地表〜 連続する高架上の振動を高精度に常時計測するものであ り、常時微動、列車振動に伴う振動伝達問題などにも展 開が期待される. 今後は本システムによって計測された データに基づき、地盤、構造物の振動特性の詳細評価と 各種解析手法の検証を行う予定である.

参考文献

- (公財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計,2012.
- 吉岡修, 芦谷公稔:新幹線鉄道振動の発生・伝播モデル,物理探査,第48巻第5号, pp.299-315, 1995.
- (財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標 準・同解説 変位制限,2006.
- Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-net), Seismological Research Letters, Vol. 69, pp.309-332, 1998.
- Goto, H. et al: Very dense seismic array observations in Furukawa district, Japan, *Seismological Research Letters*, Vol.83, No.5, pp.765-774, 2012.
- 6) 大木洋司、山下忠道、盛川仁、山田哲、坂田弘安、山中浩明、笠井和彦、和田章:超高層免震建物の長期観測システム構築に関する具体的取り組み、日本建築学会技術報告集、第21号、pp.73-77、2005.
- 山本泰幹,藤野陽三,矢部正明:地震観測された長 大吊構造系橋梁の動的特性と動的解析モデルによる 再現性,土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.738-757, 2009.
- 8) 野上雄太,坂井公俊,室野剛隆,盛川仁:表層地盤 と入力波の周期特性を考慮した表層地盤での地震増 幅率の評価,土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, No.1, pp.191-202, 2012.
- 藤原広行,功刀卓,安達繁樹,青井真,森川信之: 新型 K-NET:強震動データリアルタイムシステムの 構築,日本地震工学会論文集,第7巻,第2号,pp2-16,2007.
- 10) 荒木正之,盛川仁,伊藤貴盛,谷川正真,松本敬太 郎: A/D コンバータのハイブリッド利用による広ダ

イナミックレンジのデータロガーの開発, 日本地震 工学会論文集, Vol. 11, No. 3, pp.59-72, 2011.

- 地震調査研究推進本部地震調査委員会:全国地震動 予測値図, 2009.
- 12) 中央防災会議:中央防災会議地震防災対策強化地域 指定専門委員会検討結果報告, 1992.
- 13) 野津厚,長尾毅,山田雅行:スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例,日本地震工学会論文集,第7巻,第2号,pp.215-234,2007.
- 14) 室野剛隆,野上雄太:S字型の履歴曲線の形状を考慮

した土の応力~ひずみ関係, 第 12 回日本地震工学シ ンポジウム, pp.494-497, 2006.

- 15) 野上雄太,室野剛隆:S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定,第30回土 木学会地震工学研究発表会論文集,Vol.30, 2-0014, 2009.
- 16) 西村昭彦: ラーメン高架橋の健全度評価手法の研究, 鉄道総研報告, Vol.3, No.9, 1990.

DEVELOPING OF THE HIGH-DENSITY MONITORING SYSTEM FOR SEISMIC MOTION OF GROUND AND VIADUCTS

Kimitoshi SAKAI, Hiroki MOTOYAMA, Yoshitaka MURONO, Hitoshi MORIKAWA, Masayuki ARAKI and Naoki URAGUCHI

We developed the high-density monitoring system for the seismic motion of the ground and the viaducts for the understanding of the motion of those in earthquakes and the validation of the accuracy of the seismic response analyses. This system has the data logger with 24bit dynamic range and 200Hz sampling frequency, which enables the monitoring with high accuracy. Sensors of this system are set in and on the ground and on the structures. This system has already been started storing data which can be used for validation of seismic response analyses for seismic design of structures. Using this system we try estimating the difference of the motion of neighbor structures causing the running safety.