

構造物における高密度かつ高精度な地震観測システム

構造物技術研究部 耐震構造研究室
研究員 本山紘希

1. はじめに

鉄道構造物の耐震設計において、地震時挙動評価を行う場合には、数値解析が使用される。耐震設計における構造物のモデル化では、一般に線路方向または線路直角方向の2次元断面を切り出してモデル化を行う。しかし、実際の構造物は、隣接構造物の影響や荷重配置の影響などにより、少なからず3次元的に挙動すると考えられる。線路方向に連続した構造物の挙動の違いは、構造物間に発生する角折れや目違いの原因ともなる。これらの3次元的な挙動や2次元モデルの妥当性を検討するには、実地震動に対して、構造物に入力される地震動と構造物群の応答を観測することが重要であるが、一般的な高架橋の観測事例は非常に少なく、特に角折れ・目違いを計測した観測事例は、ほぼ皆無と言って良い。そこで本研究では、地震時の構造物の挙動を詳細に観測することを目的に、地震観測システムを開発し、連続する数スパンの構造物および周辺地盤に対して適用した。

2. 地震観測装置の選定、開発

本システムでは、構造物に入力される地震動や、角折れ・目違いを含めた構造物の挙動を観測することを主眼としているため、それらを精度よく計測できることが必須の条件であるが、地震が稀なイベントであることを考えると、地震動を取りこぼさないよう工夫する必要があるとともに、構造物・地盤の微動による検討を視野に入れることも有用であると考えられる。観測する項目として、下記の4点を見据えた開発を行った。

- ①基盤位置での全地震動
- ②地表面での全地震動
- ③連続する構造物群の全地震応答
- ④構造物・地盤の微動

これらの観測を一つの観測システム内で実現するには、4つのポイントがある。

1点目は、自己発生ノイズの極力小さい地震計を選定することである。地震観測においては、加速度・速度・変位のそれぞれの波形が十分な精度で観測される必要がある。このうち、特に変位は低振動数成分の影響が大きい。一般的に低振動数成分はノイズの汚染を受けやすいという特徴がある。そのため、ノイズの影響が極力小さいデバイスを選定することが重要となる。

2点目は、高サンプリングのデータロガーを用いることである。構造物の3次元挙動や隣接構造物との振動の位相差を観測するには、わずかな挙動の差を計測する必要がある。また、高サンプリングに見合った精度の高い時刻同期が地震計間で実現されることも必要となる。

3点目として、データロガーにはダイナミックレンジが大きく、高解像度のAD変換が可能であることも要求される。このうち、解像度はサンプリング周波数とトレードオフの関係にある。

4点目は、常時観測を行うことである。トリガー式では地震動の取り逃しの可能性が残る。



図 1 : 地震計



図 2 : データロガー (基盤構成)



図 3 : 地震計・データロガーの概要

また、トリガー式では、列車が走行し、高架橋に振動が発生する度にトリガーがかかる結果となり、効率も悪いことが想定される。

以上を念頭に、地震計を選定し(図1)、データロガーの新規開発を行った(図2)。地震計は Nanometrics 社の加速度計(Titan)を選定した。本地震計は、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に比べても、十分に高い性能を有している。データロガーは、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、32bitでのAD変換を実現することを要求性能として、新規にロガーの開発を行った。基盤構成としては、24bitのA/Dコンバーターを3個用いたハイブリット構成のデータロガーとなっている。地震計およびデータロガーの構成は図3に示す通りである。

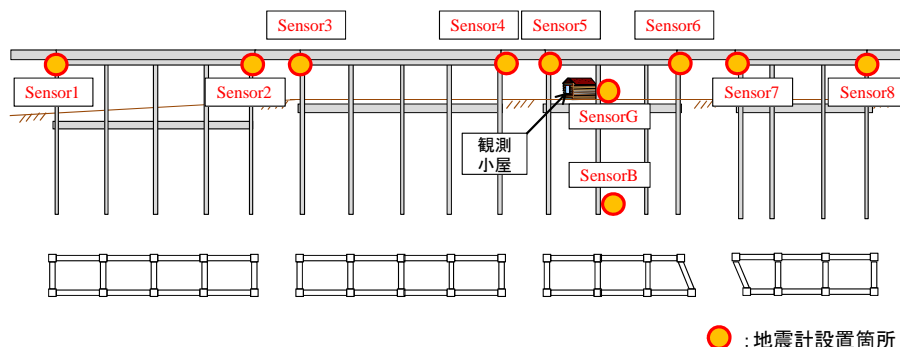


図 4 : 地震観測システムと観測実施箇所の概要

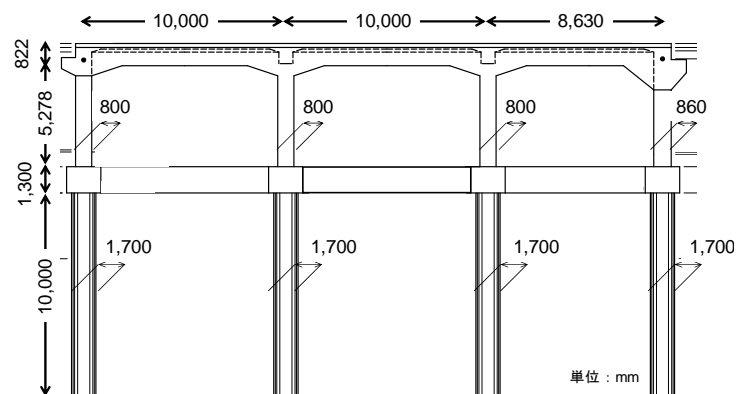


図 5 : 地震観測システムと観測実施箇所の概要

地震観測システム全体は観測小屋を中心としたシステムとして開発し、観測小屋にLANにより伝送されてきた常時観測データを次々貯めこむ形式とした。また、観測小屋のPCにはNTPサーバーを構築し、全データロガーの時刻同期を行う仕組みを採用した。

3. 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。選定の結果、都内の鉄道高架橋において、観測の許可を頂き、観測システムの設置を行うこととした。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、観測小屋直近の構造寸法を概略的に示す。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、[図4](#)の右側の2スパン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。[図4](#)左側の2スパンは整形な構造であるが、柱長さに変化がついている。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。

4. 観測システムの設置状況

観測小屋を設置し、この観測小屋周辺に地震観測システムを構築した。各地震計、データ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。

高架橋における地震計の設置状況を[図6](#)に示す。構造物天端のデータを計測するため、地震計をできるだけ高い位置に設置することを考え、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。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、柱を挟んで地震計の裏側に[図7](#)に示すように固定した。地中位置の地震計は、深さ約13mの基盤面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8](#))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し、鉄板を設置した上で、鉄板に対して地震計を固定した([図9](#))。観測小屋と高架上の地震計の位置関係の例を[図10](#)に示す。



図6：地震計の設置

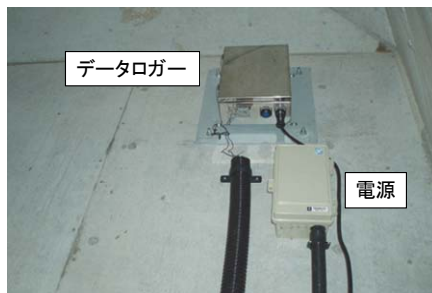


図7：データロガー



図8：地中用地震計



図9：地表面への地震計の設置



図10：観測小屋と高架上の地震計の状況

5. 地震観測システムによる計測状況

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11](#)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、1gal 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 1 2](#)・[図 1 3](#) はそれぞれ各地震計の観測波形に対するフーリエ振幅と構造物ごとの伝達関数（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）を示している。伝達関数を見ると、0.2Hz 程度の低振動数領域では応答倍率が 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精度で観測が可能であることが分かる。

構築したシステムを有効に活用するため、地震動データベースを作成し、整理している。例えば、2012 年に観測された地震動を取り出し、地中、地表および構造物上における最大加速度（線路直角方向）をまとめたものが [図 1 4](#) になる。これにより、10gal を上回る観測記録も複数回得られていること、最大で構造物が 50gal 程度の応答に至るような地震動が発生していたことが分かる。

6. おわりに

本研究では、構造物における高密度かつ高精度な地震観測システムを開発した。ここでは、使用したデバイス、観測システムの設置、観測例について紹介した。また、観測例から、システムが十分な精度で稼働していることが確認された。今後、このシステムを用いて、構造物の詳細な挙動の検討を行うとともに、構造物および周辺地盤を詳細にモデル化し、現在の構造物のモデル化手法の妥当性についても検討も行なっていく。

謝辞

本研究における地震観測システムの適用においては、西武鉄道株式会社殿に場所の提供を受けた。ここに記して謝意を表す。

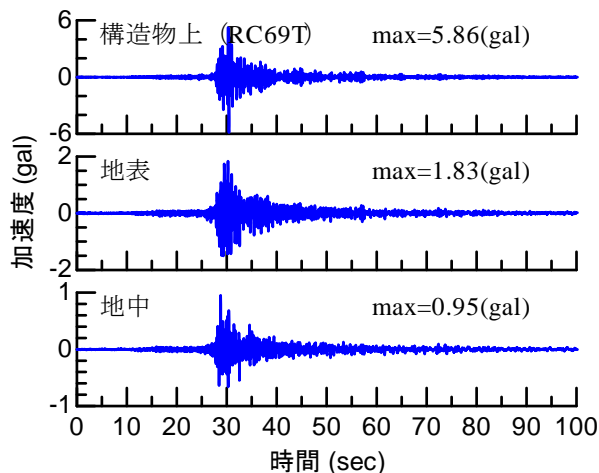


図 1 1 : 地震観測記録の例（線路直角方向）

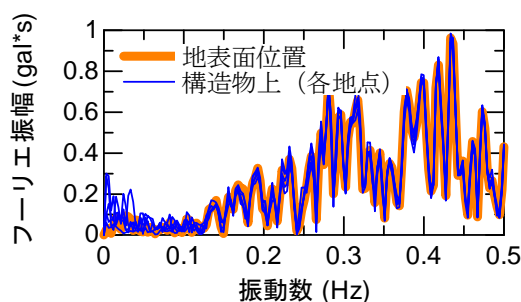


図 1 2 : フーリエ振幅（線路直角方向）
（0.5Hz 以下のみ表示）

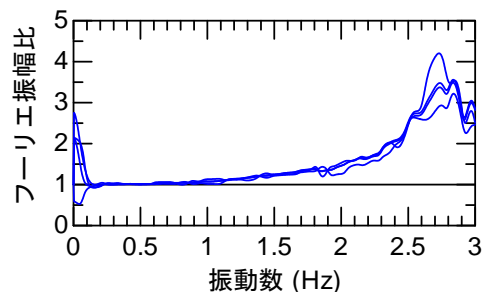


図 1 3 : フーリエ振幅比（構造物上/地表面）
（線路直角方向）

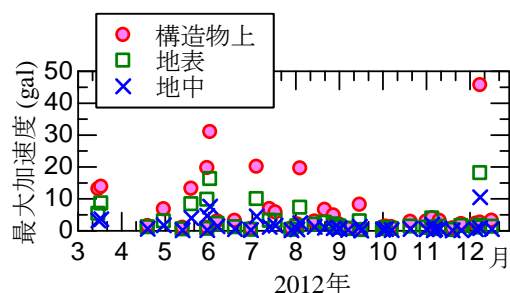


図 1 4 : 地震記録の最大加速度抽出結果
（2012年）