

地震動の並進、回転 6 成分観測と水平一回転成分の関係性の一考察

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員

○山下大輝, 坂井公俊

東京工業大学 正会員

盛川 仁

クローバテック (株) 非会員

松田滋夫

三陸鉄道 (株) 非会員 野田軍治, 畑村誠, 向折戸隆介

1. はじめに

地盤上の震動計測結果を用いて、地盤震動特性や地盤構造を把握する試みが多数行われている。これまでは水平・上下の 3 成分を用いた計測・評価が大半であったが、近年では震動の回転成分に着目した検討も見られるようになってきた^{例えば 1)}。また、鉄道分野においても構造物の回転挙動が車両や電柱等に影響を与える可能性が指摘されている等、回転挙動の適切な把握、評価の要請が高まってきている。

その一方で、地震時の地盤・構造物の回転挙動に関する計測事例の報告は限られており、振幅レベルや周波数特性等、未知な部分が多く残されている。そこで本検討では、水平(X, Y)・上下(Z)方向の加速度計とともに回転角速度計を地盤上に設置して同時計測を実施したので、その結果を紹介する。

2. 測定に使用した地震計の概要

計測は、図 1 に示すように水平・上下方向の並進成分を計測する加速度計と、回転 3 成分を計測する角速度計を隣接して設置することで、計 6 成分のデータ取得を行った。このうち、並進成分は Titan 加速度計(Nanometrics 社製)、回転成分は R-2 角速度計(eentec 社製)を使用した。なお以降で示す回転の成分は、X, Y, Z 軸周りの回転応答の値をそれぞれ Rx, Ry, Rz で表す。

3. 微動測定によるノイズフロアの把握

計測システム(地震計、データロガー)に起因するノイズレベルを把握することを目的とし、東丹沢の岩盤露頭近傍²⁾の地盤上で 2 時間の微動測定を実施した(図 2)。角速度計のデータの内、振幅レベルが低かった 10 分間のデータを抽出し、フーリエ振幅を算出した結果を図 3 に示す。各成分でほぼ同一の振幅レベルとなっており、計測システムのノイズフロア(内部ノイズ)が計測できたと考えられる。

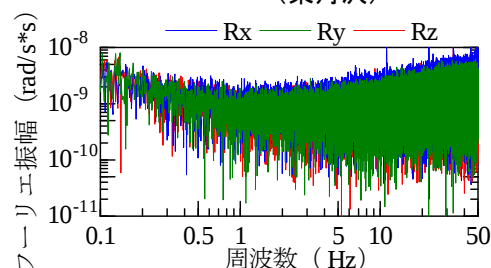
4. 地震観測に基づく水平一回転挙動の関係性

この計測システムを用いて、多点の鉛直アレイ観測を実施している箇所^{3,4)}近傍で自然地震観測を実施した。設置の状況を図 4 に示す。2022 年 12 月に設置した後、観測された主な地震を表 1 にまとめる。計測データの一例として、観測点での加速度が最大であった地震 No.8 の計測事例を以下に示す。

角速度の時刻歴波形(図 5)を見ると、Rz 成分はノイズの占める割合が大きいものの、図 6 に示すように 20Hz 以上をハイカットすることで、ノイズの影響を適切に除去できることがわかる。比較的振幅レベルの大きな時間(14 秒~19 秒)における回転角と水平変位を重ねたものを図 7 に示す(上段: Rx 成分, Y 成分, 下段: Ry 成分, X 成分)。この時、応答の関連性を考慮して X 軸回転と Y 軸並進、Y 軸回転と X 軸並進の応答を組み合わせ示している。回転成分には高周波数が多く含まれている



図 1 計測に使用した機材

図 2 機材の設置状況
(東丹沢)図 3 微動によるフーリエ振幅
(ノイズフロア)

キーワード 地盤震動, 回転速度計, ノイズフロア, 地震観測, フーリエ振幅比 (回転/水平)

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 TEL 042-573-7336

が、重ね描いた2波形の位相はある程度一致しているようにも見える。フーリエ振幅スペクトルを図8に示すが、回転成分では1Hz, 2Hz 周辺にピークが見られるとともに、並進成分では1Hz, 3Hz 周辺にピークが見られる。

次に、回転成分と水平成分の周波数特性の違いを把握するために、今回得られた全ての地震記録に対してフーリエ振幅比（回転／水平： $(R_x/Y + R_y/X)/2$ ）を算定した結果を図9に示す。この時に、フーリエ振幅は0.1HzのParzen windowで平滑化を行っている。これを見るとフーリエ振幅比は1Hz付近を谷にしたV字型の分布となっているが、1Hzより低周波数成分では振幅比のバラツキも大きく、地震動の特性を適切に計測できていない可能性が高い。その一方で1Hzよりも高振動数成分におけるフーリエ振幅比の傾向は、各地震において比較的良好に一致している。特に加速度レベル10gal以上の地震においては山谷の形状だけでなく、絶対値のバラツキも小さい。2Hz辺りに見られる振幅比のピークは、図8でも述べたように回転成分のみに見られるピークの影響であり、地盤震動特性として並進成分のみでは見られない特徴の可能性も考えられる。

5. まとめ

角速度計のノイズレベルを確認した上で、並進3成分の地震計に隣接して角速度計を設置し、6成分の地震観測を実施した。その結果、振幅レベルが10gal程度よりも大きい場合には、1Hzよりも高周波数側で適切な記録が取得できている可能性が高いことを確認した。今後、詳細な分析を行うとともに、地盤のみならず構造物においても同様の計測を実施し、地盤震動特性や構造物の地震時挙動の高度化、メカニズムの解明につなげる。

表1 発生した主な地震

No.	発生日時	発生位置	PGA (gal)
1	2022/12/28 03:51	福島県沖	2.7
2	2023/01/03 16:09	岩手県沖	25.4
3	2023/01/12 20:40	岩手県内陸北部	4.3
4	2023/01/20 14:48	宮城県沖	15.8
5	2023/01/20 20:14	岩手県内陸南部	3.0
6	2023/01/25 10:01	福島県沖	5.3
7	2023/02/25 22:27	釧路沖	14.3
8	2023/03/19 03:14	福島県沖	31.7



図4 地震観測における機材設置状況

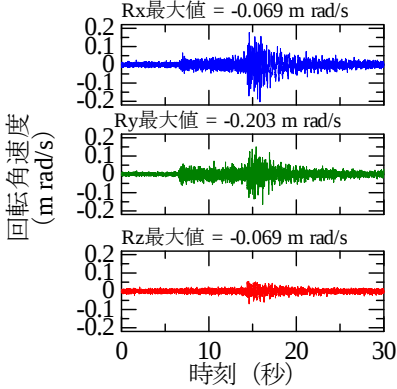


図5 回転角速度（地震 No.8）

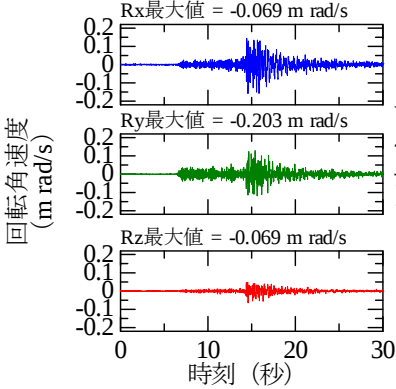


図6 回転角速度（地震 No.8）
（20Hz 以上を除去）

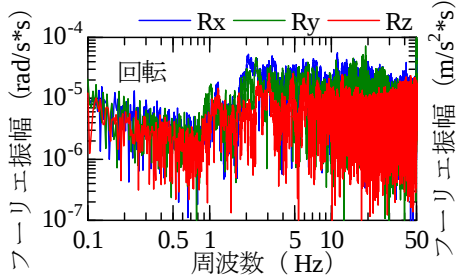


図8 フーリエ振幅（地震 No. 8）

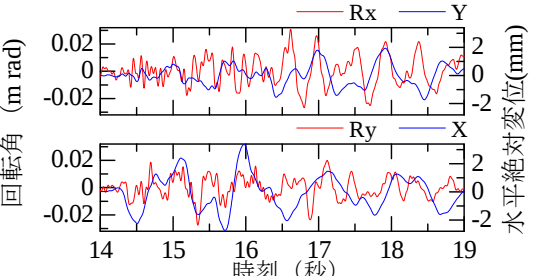
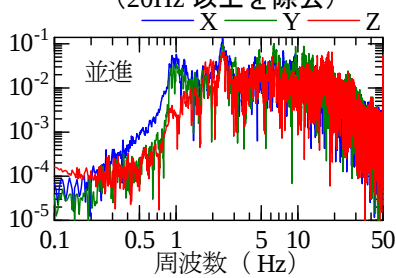


図7 回転角と水平変位の比較
（地震 No.8）

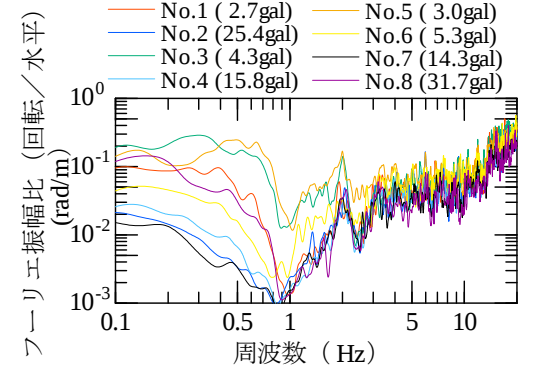


図9 フーリエ振幅比（回転／水平）

参考文献 1) Cho et al. : Microtremor surveys based on rotational seismology: theoretical analysis with focus on separation of Rayleigh and Love waves in general wavefield of microtremors, Geophysical Journal International, Vol. 228, No. 1, pp. 589–603, 2022, 2) 松田ほか：水晶振動子による加速度センサの微動観測への適用性に関する検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 76, No. 4, pp. I_793-I_803, 2020, 3) 田中ほか：鉛直多連地震観測システムの構築(その1 観測システムの概要)，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol. 74th, pp. 12–19, 2019, 4) 田中ほか：鉛直多連地震観測システムの構築(その2 観測記録による検証とその特徴)，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol. 74th, pp. 12–20, 2019.