

北上エリアの花崗岩体における振動調査

INVESTIGATION OF VIBRATION INSIDE GRANITIC ROCKS IN THE KITAKAMI AREA

小林真人^{#,A)}, 兼松亮^{A)}, 川端康夫^{A)}, 佐貫智行^{B)}, 京谷孝史^{B)}, 吉岡正和^{C)}
Masahito Kobayashi^{#,A)}, Takuya Kawasumi^{A)}, Kiyoshi Kanematsu^{A)}, Yasuo Kawabata^{A)}, Tomoyuki Sanuki^{B)},
Takashi Kyoya^{B)}, Masakazu Yoshioka^{C)}
^{A)} Tobishima Corporation,
^{B)} Tohoku University, ^{C)} Iwate University

Abstract

For confirming the effect of river vibration on the ILC facility, the vibration velocity was measured for about two years in the bedrock (G.L-4m, G.L-21m) near the Satetsu River in the Kitakami area of the ILC project candidate site. From the results, it was confirmed that the frequency component with a peak of 0.2Hz to 0.3Hz was always confirmed in the bedrock, and it was suggested that this was due to the influence of the waves according to the previous research. Therefore, we examined the correlation between the integrated spectrum of the displacement in the bedrock during the measurement period and the discharge of the Satetsu River, as well as the wave height along the Pacific coast. From the results, we confirmed the correlation between the displacement occurring in the bedrock and the wave height of the Pacific coast. In addition, no significant changes were observed in the power spectrum density and the integrated spectrum even when the wave height was low and the flow rate of the Satetsu River increased significantly. Furthermore, in order to confirm the influence of road traffic, the vibration velocity was measured on the ground together with the vibration investigation in the rock. Analysis results of the power spectrum density and the coherence between the ground surface and bedrock when a large vehicle traveled on a nearby prefectural road confirmed the impact of road traffic on the ground surface and G.L-4m, but not on G.L-21m. From the above, it was clarified that the influence of waves can be confirmed in the bedrock where the construction of the ILC facility is assumed, but the influence of rivers and road traffic is small.

1. はじめに

ILC 計画候補地の北上エリアには複数の道路や河川がとおり、その一部は ILC 施設を横断する可能性がある。そこで、これらによる影響を検討するため、筆者らはこれまでに、道路交通振動の測定や FEM による振動影響の評価[1]、砂鉄川河床部の地質調査と岩盤での振動調査[2]を行っている。河床部での振動調査は振動変位を評価対象として、ILC 施設のトンネル天端を想定した G.L-21 m の岩盤で 2020 年 3 月に着手し、2021 年 4 月には砂鉄川により近い G.L-4 m の岩盤での測点を追加して 2022 年 3 月まで実施した。これらの結果から、振幅の大きさは変動するものの、岩盤では 0.2 Hz から 0.3 Hz をピークとする周波数成分が常に観測された。これは既往研究[3-4]などを参照すれば波浪による影響であることが示唆された。そこで、波浪による影響をより明確にするために、調査期間中の岩盤における変位の積分スペクトルと砂鉄川流量や太平洋岸の波高との関係を検討した。さらに、地盤上と岩盤内で発生している振動の関係から道路交通や砂鉄川による影響を検討した。本報ではこれらの概要について報告する。

2. 砂鉄川河床部での振動計測

2.1 調査地点

Figure 1 に示す砂鉄川河床岩盤にて、ILC 施設のトン

ネル天端が想定されている G.L-21 m、および砂鉄川に近い G.L-4 m までボーリングを行い、孔底部を振動の調査ポイントとした。ボーリングとあわせて地盤調査・試験を実施して、地表から 2 m 以深は花崗岩が分布し、G.L-21 m では ILC で計画されている岩盤と同程度の強度を有する岩盤であることを確認[2]した。

2.2 調査方法

2020 年 3 月に G.L-21 m での振動計測に着手した。2021 年 4 月には G.L-4 m の測点を追加して 2022 年 3 月まで計測を継続した。Figure 2 に振動の計測システムを示す。計測システムのうち AD 変換器や PC は現地に設置した計測小屋へ収納した。岩盤内の振動計測に用



Figure 1: Outline of survey point.

[#] masahito_kobayashi@tobishima.co.jp

いた速度計は、埋設型 3 成分サーボ型速度計（東京測振 VSE-355D6M、測定周波数範囲 0.1 Hz から 70 Hz、感度 10 V/kine）で、ボーリング孔底部に設置したのち感度軸と方位を調整したうえで、速度計メーカー指定の 3 分砂利を充填して岩盤内へ埋設した。地盤上の振動計測に用いた速度計は、地表設置型 3 成分サーボ型速度計（東京測振 VSE-355EI、測定周波数範囲 0.05 Hz から 70 Hz、感度 2 V/kine）で、十分に突き固めた地表面にコンクリート板を設置してこの上に配置した。ここで、速度計の X 軸を緯度方向 (N-S)、Y 軸を経度方向 (E-W)、Z 軸を高度方向 (U-D) とした。速度の時間応答はサンプリング周波数 200 Hz で PC へ記録し、FFT 処理によりパワースペクトル密度を求め、これを周波数上で積分して変位とした。なお、周波数分解能は 0.1 Hz から 1 Hz について 0.00916 Hz、1 Hz から 10 Hz は 0.03662 Hz、10 Hz から 70 Hz までは 0.29297 Hz とした。

2.3 調査結果

2.3.1 砂鉄川流量と太平洋岸の波浪による影響

これまでの検討から岩盤内で発生している振動は波浪が原因となっていることが示唆された。ここでは、一関市大東町にある砂鉄川川内観測所（岩手県河川情報システム）による水位観測結果から求めた流量、および宮城県気仙沼市にある唐桑波浪観測施設（気象庁）が公開している波高と岩盤内での変位との関係を整理して波浪の影響が主体であることを示す。

砂鉄川流量と太平洋岸の波高の変動を整理すると、Fig. 3 に例示するように (a) 流量が多く波高も高い期間、(b) 流量のみ多い期間、(c) 波高のみ高い期間、といった特徴的な 3 つの期間（点線の囲み）に分類することができる。これらは各々の地域での気象による影響と考えられる。これらのうち、(b) の流量と変位、(c) の波高と変位の関係を見ることで、岩盤内で発生している振動に対する砂鉄川の影響、波浪による影響を検討する。

Figure 4 に砂鉄川の流量のみ多くなった 4 つの期間における、G.L.-21 m での変位の積分スペクトルと流量との関係を振動の方向別に示す。ここで、岩盤では 0.2 Hz から 0.3 Hz をピークとする周波数成分が常に観測されていることから、積分スペクトルは 0.2 Hz (上限 1.0 Hz) の値とした。分析対象期間に得られた積分スペクトルの最大

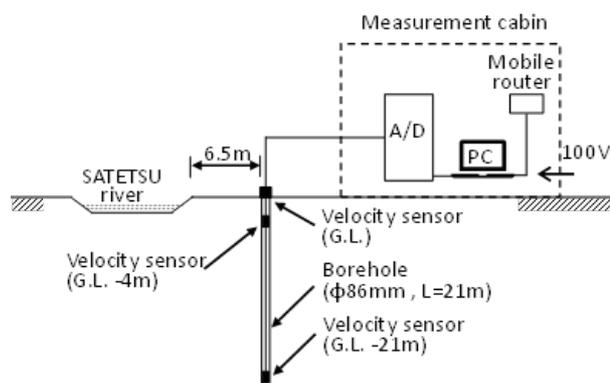
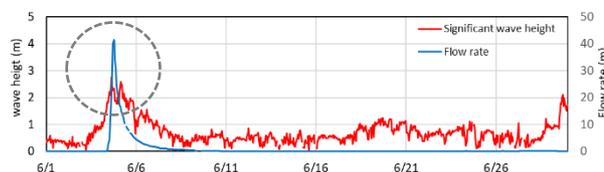
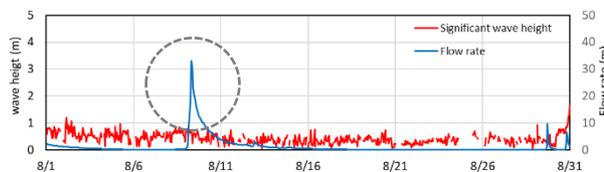


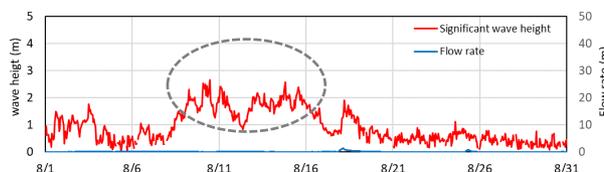
Figure 2: Measurement system.



(a) High flow rate and high wave height
(2021.6.4-2021.6.6)



(b) High flow rate (2020.8.9-2020.8.10)



(c) High wave height (2021.8.8-2021.8.16)

Figure 3: Fluctuations in the discharge of the Satetsu River and the wave height of the Pacific Ocean.

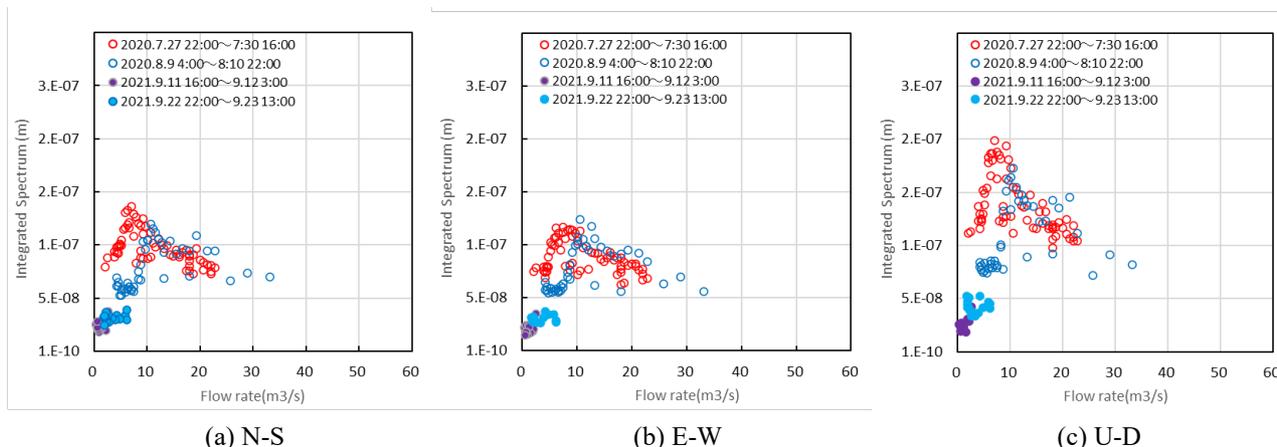


Figure 4: Relationship between integral spectrum and flow rate (High flow rate).

値は流量が $7.0 \text{ m}^3/\text{s}$ のときに $2.0 \times 10^{-7} \text{ m}$ (U-D)であった。流量の最大値は $34.0 \text{ m}^3/\text{s}$ であったが、どの振動方向でも、流量が $10.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度までは流量の増加とともに積分スペクトルも大きくなる傾向が見られるものの、 $10.0 \text{ m}^3/\text{s}$ を超えてから流量の最大値まで、流量の増加に対して積分スペクトルの増大は確認できない。このような挙動を示す要因を本研究では明らかにできないが、岩盤内で発生している振動に対して砂鉄川流量による影響は大きくないものと考えられる。

Figure 5 に太平洋岸の波高のみ高くなった 5 つの期間における、G.L-21 m での変位の積分スペクトルと波高との関係を振動の方向別に示す。ここで、波高は有義波高[5]である。分析対象期間に得られた積分スペクトルの最大値は波高が 1.3 m のときに $9.8 \times 10^{-7} \text{ m}$ (U-D)であった。また、波高の最大値は 5.2 m で、この時の積分スペクトルは $7.0 \times 10^{-7} \text{ m}$ (U-D)であった。振動の方向に着目すると U-D が大きく、同一の期間であっても N-S や E-W などの水平方向と傾きが異なることがわかる。また期間によって傾きが異なっており、12 月のデータとこれ以外で異なる傾向が見られる。振動の方向で大きさが異なることについて、例えば既往研究[4]では、海岸からの距離 1 km 以内の地表面における常時微動の観測結果から、波浪の到来方向と鉛直方向の振動が大きくなることを示している。本研究は海岸から約 30 km 離れた岩盤内

で調査を行っており、同一条件での比較はできないが、岩盤内であるため水平方向の変位が拘束されている可能性がある。期間によって傾きが異なることについて、潮位による影響が考えられたため、積分スペクトルと潮位の関係を振動の方向別に整理した結果を Fig. 6 に示す。しかし、Fig. 6 からは期間による差異は明確にならず、潮位によって傾きが異なることを説明できない。傾きの違いについては、潮位、波高、風速などの出現状況が影響しているものと思われ、これらの相互作用を明らかにする必要がある。

このように、振動の方向や期間によって傾きが異なり、本研究では要因を明確にすることはできないが、どの振動方向においても波高が高くなるほど積分スペクトルも大きくなる傾向が見られ、岩盤内で発生している振動は波浪の影響を受けていることが確認できる。

2.3.2 道路交通や砂鉄川による影響

ここでは地盤上と岩盤内での振動速度から、変位のパワースペクトル密度、積分スペクトル、コヒーレンスを求めて道路交通や砂鉄川による影響を検討する。

Figure 7 に測点別の常時微動の振動速度波形の一部を E-W で例示する。ここで示した波形は 2022 年 3 月 16 日、12 時 56 分から観測されたもので、この時の太平洋岸の波高は 0.92 m 、砂鉄川の流量は $0.69 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。

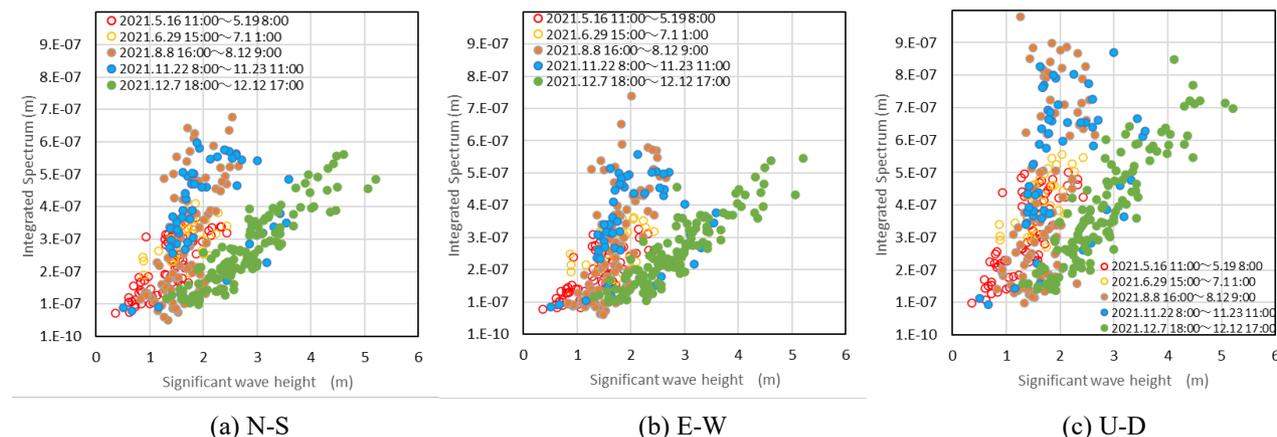


Figure 5: Relationship between integral spectrum and wave height (High wave height).

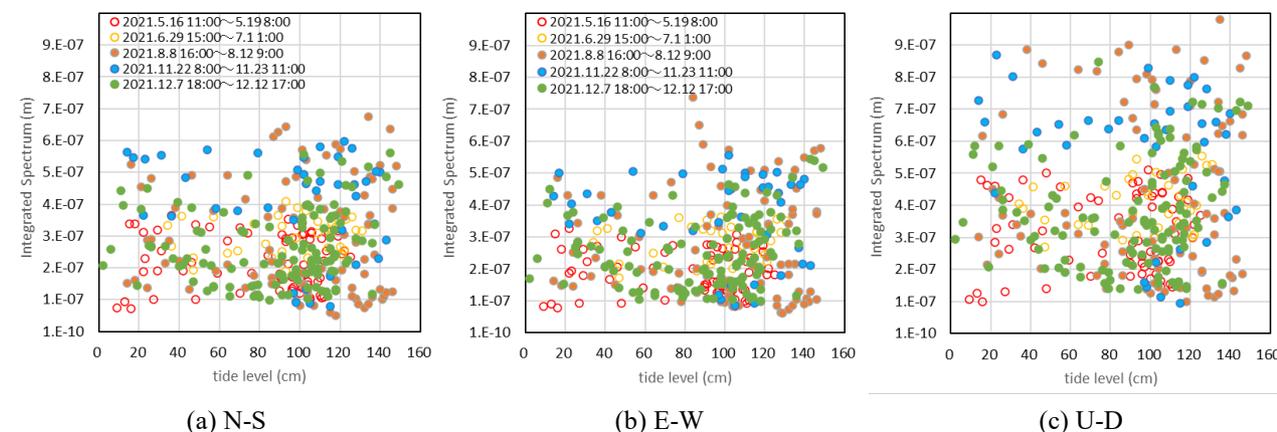


Figure 6: Relationship between integral spectrum and tide level (High wave height).

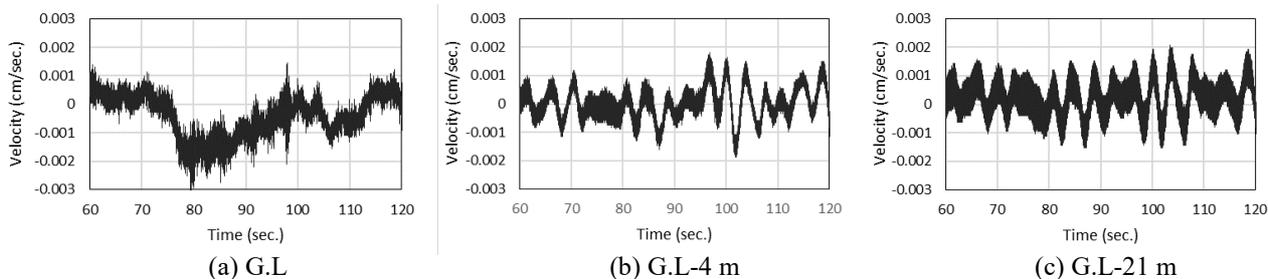


Figure 7: Velocity waveform of microtremor. (E-W)

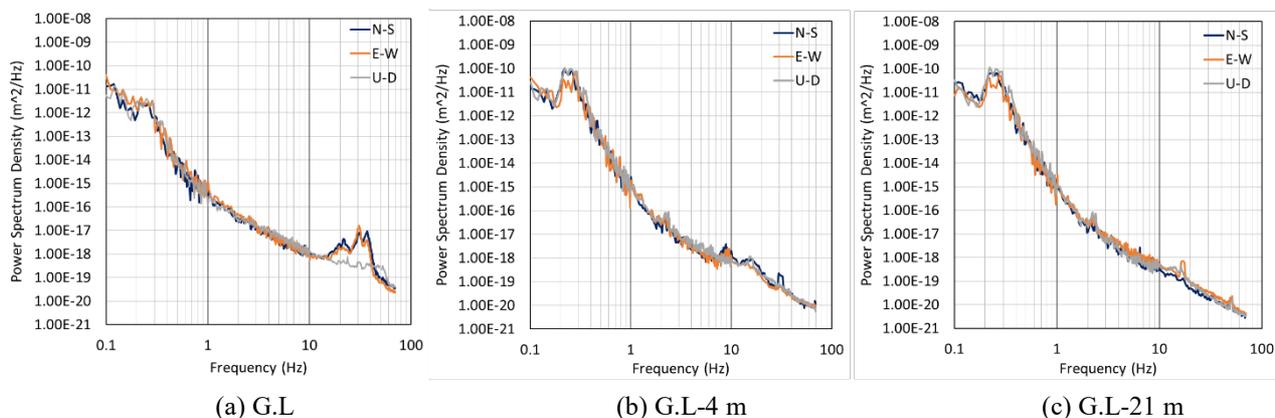


Figure 8: Power spectrum density measurement results.

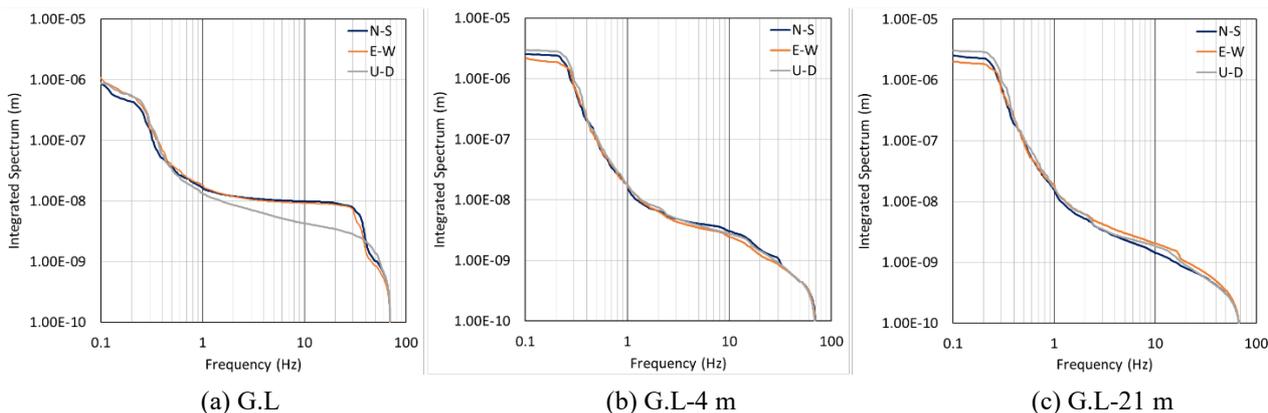


Figure 9: Integrated spectrum measurement results.

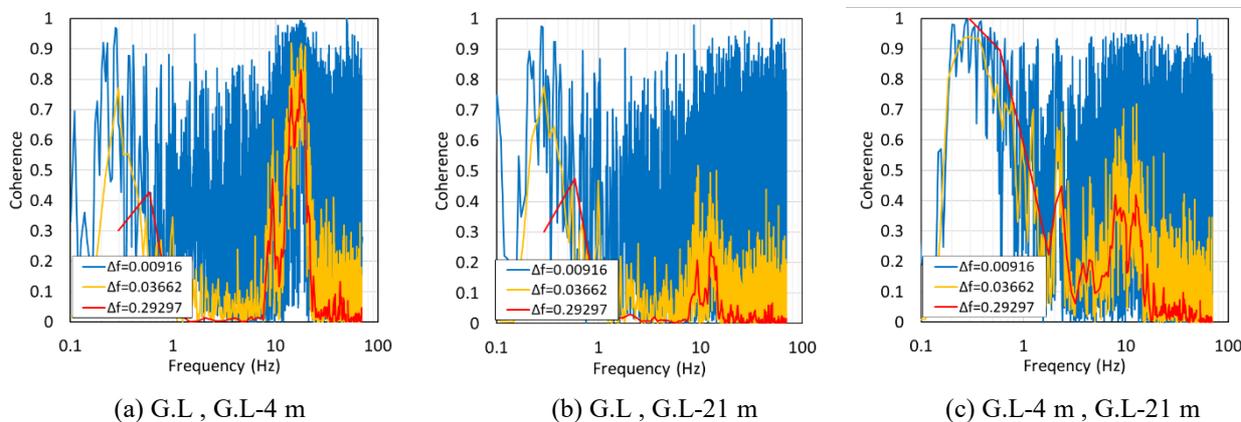


Figure 10: Coherence measurement results (E-W).

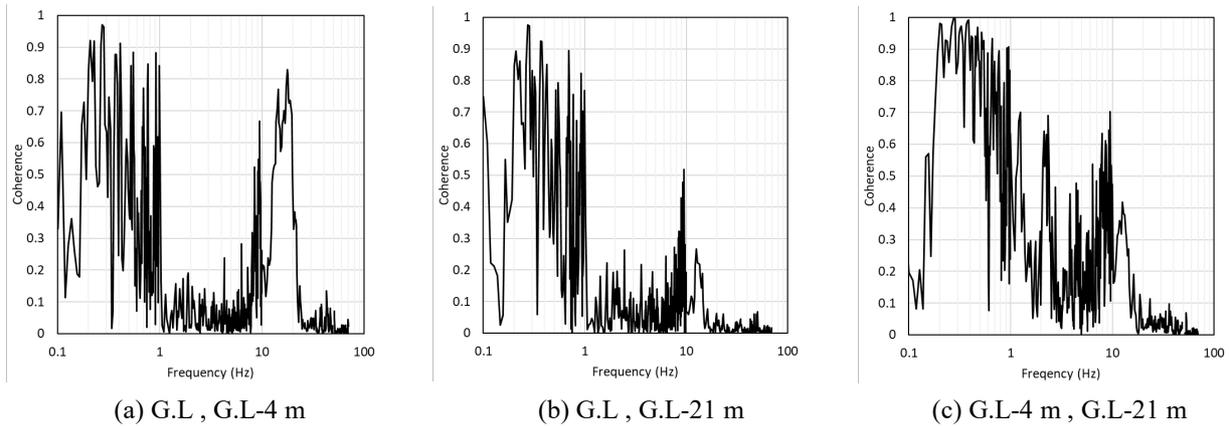


Figure 11: Coherence connecting data for each frequency range (E-W).

Figure 7 から、G.L(地盤上)においては道路交通による高周波の応答や測定時の風による影響と思われる長周期成分が確認できる。G.L-4 m と G.L-21 m では 1 分間に 10 回から 11 回程度の特徴的な変動が確認でき、これらは波浪による影響である。また、高周波にもわずかな応答が含まれている。

Figure 8 に測点別の変位のパワースペクトル密度を示す。全ての測点で 0.2 Hz から 0.3 Hz に波浪によるピークが確認でき、地盤上より岩盤内のほうが 10 倍程度大きく G.L-4 m と G.L-21 m ではほとんど差がない。岩盤内では深さによらず波浪によるピークが同程度確認できるので、岩盤は波浪によって一体振動している可能性がある。地盤上で波浪によるピークが小さくなることについて、速度計を地盤上へは接地、岩盤内では埋設しているため、速度計の設置条件の違いが要因として考えられる。または、河川付近の地盤は岩盤上の軟弱な堆積層であるため、岩盤とは挙動が異なっていることも要因として考えられる。一方、G.L-4 m では 9 Hz から 15 Hz の範囲に小さなピークが確認できる。既往研究[3]では、三瀬有料道路トンネルにおける微動調査結果から、沢の水流による影響で 12 Hz 近傍の幅広い振動が観測されたことを報告しており、本研究で得られた結果も河川による影響と考えられる。地盤上では 20 Hz から 30 Hz に道路交通によると思われるピークが確認できる。既往研究[3]では、本研究で調査対象とした花崗岩体と同種の花崗岩体に位置する、国立天文台江刺地球潮汐観測施設での常時微動に関する調査結果から、要因は明らかになっていないが 30 Hz 付近のピークの存在を報告している。

Figure 9 に測点別の積分スペクトルを示す。パワースペクトル密度の分析結果でも示したように、岩盤内では 0.2 Hz から 0.3 Hz で波浪による影響があるため、0.1 Hz における積分スペクトルが最も大きくなっている。

Figure 10 に、(a) 地盤上と G.L-4 m、(b) 地盤上と G.L-21 m、(c) G.L-4 m と G.L-21 m のコヒーレンスを周波数分解能で比較した結果を示す。周波数分解能を変えることで 10 Hz から 30 Hz の様子が見えるようになり、微弱でノイズに埋もれるような応答の特性を検討するのに適していることがわかる。Figure 11 には各周波数範囲で求めたコヒーレンスを繋げた結果を示す。(a)、(b)、(c)のいずれも 0.2 Hz から 0.3 Hz に相関が見られ、特に(c)での相関が良く、岩盤は波浪の影響を受けて一体となった

振動をしていることがわかる。一方、砂鉄川による影響が出ると思われる 10 Hz 付近の相関は良くないことがわかる。(a)では 20 Hz 付近の相関が比較的良く、G.L-4 m では道路交通による影響が見られるが、(b)での相関は良くないので、G.L-21 m では道路交通による影響は無いことがわかる。これら、コヒーレンスの分析結果から、G.L-21 m においては波浪による影響が確認できるものの、道路交通や砂鉄川による影響は小さいことがわかる。

3. まとめ

ILC 計画候補地の北上エリアにて、ILC 施設が計画されている岩盤における振動の調査を行った。その結果、岩盤内では調査した深さの範囲で波浪の影響により 0.2 Hz から 0.3 Hz の振動が卓越していることを確認した。地盤上では道路交通による影響が見られたが、G.L-21 m では影響が小さいことを確認した。G.L-4 m において砂鉄川による影響が見られたが、G.L-21 m では影響が小さいことを確認した。

謝辞

調査研究の実施において、岩手県南広域振興局、同科学 ILC 推進室、および一関市から多大な協力を頂いた。ここに深謝する。調査データの分析において、山岡氏(KEK)から助言を頂いた。ここに深謝する。

参考文献

- [1] M. Kobayashi *et al.*, “ILC 施設への道路交通振動の影響検討および河川の揺動による振動の調査計画”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31-August 3, Kyoto, Japan, 2019, pp. 950-953.
- [2] M. Kobayashi *et al.*, “ILC 施設への河川流下による影響の評価を目的とした地質と振動の調査”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-2, Online, 2021, pp. 234-237.
- [3] R. Sugahara *et al.*, “脊振地点および江刺地点における常時微動測定”, KEK Report 2007-6, February, 2008.
- [4] T. Izumiya *et al.*, “海岸護岸修正の常時微動特性と波浪諸元との関連性に関する研究”, Proceedings of Japan Society of Civil Engineers B2 (Coastal Engineering), Vol.72, No.2, 2016, pp. 121-126.
- [5] <https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/wave/comment/elmknwl.html>