

管内水質量および付加質量が栈橋固有周期に及ぼす影響に関する 解析的検討

菅原法城*, 竹信正寛**, 野津厚***, 長坂陽介****, 宮田正史*****

要 旨

港湾施設である栈橋の設計では、レベル1地震動に関する変動状態の性能照査において、加速度応答スペクトルを用いて照査用震度を設定する際に、固有周期を算出する必要がある。一方で、現行港湾基準においては、栈橋の固有周期を算定する際に、管内水質量および付加質量の考慮が必要となる条件や考慮方法が明示されていない。

本研究では、栈橋構造を有する耐震強化施設の設計事例（20断面）を対象として、管内水質量および付加質量の考慮の有無による固有周期の変化を、数値解析（FLIP）に基づく検討結果を用いて考察した。また、設計実務で活用できるように、固有周期の比と重量比の関係を定式化して、重量比を説明変数として固有周期の変化を予測するモデルの構築を行った。その上で、設計実務における照査用震度の算出の際に、管内水質量および付加質量の影響を考慮する際の手順について示した。

キーワード：港湾施設，栈橋，管内水，付加質量，固有周期，重量比，FLIP，MCMC

* 港湾研究部 主任研究官
** 港湾研究部 港湾施設研究室長
*** 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域長
**** 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 地震動研究グループ 主任研究官
***** 港湾局 技術企画課 技術監理室長（港湾研究部 併任）

目 次

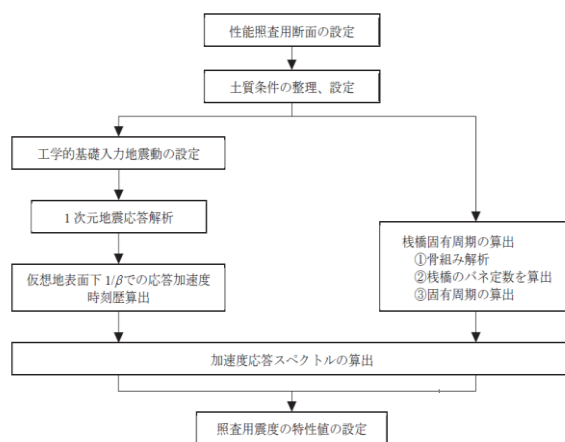
1. 本研究の目的・内容	1
2. 現行港湾基準類における管内水質量および付加質量の取扱い	2
2.1 管内水質量および付加質量の考え方	2
2.2 栈橋の設計における管内水質量および付加質量に関する港湾基準類での記載とその考慮手法	2
2.3 管内水質量および付加質量を考慮する場合の重量比の定義	3
3. FEMによる動的解析に基づく管内水質量および付加質量の栈橋固有周期への影響検討	4
3.1 FEMによる動的解析に基づく栈橋固有周期の算定方法の整理	4
3.2 解析結果及びその考察	7
4. 管内水質量および付加質量を考慮することによる栈橋固有周期の変化に関する検討	11
4.1 栈橋固有周期の比と重量比の関係の定式化と予測モデルの構築	11
4.2 実務設計での利用方法	12
5. 本研究で得られた知見・成果	14
謝辞	14
参考文献	14
付録A 検討対象とした栈橋の断面図およびFLIP断面（20断面）	
付録B 動的解析の結果の一覧	
付録C 断面毎の結果の説明	
付録D 地震動3波の加速度時刻歴，およびフーリエ振幅スペクトル	

1. 本研究の目的・内容

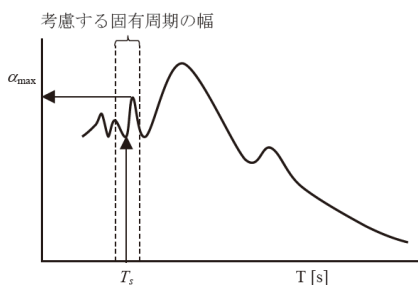
係留施設である栈橋の設計では、一般的にレベル1地震動に関する変動状態の性能照査において、図-1.1に示す設定手順に基づき、加速度応答スペクトルを用いて照査用震度を設定する。このため、照査用震度の設定に先立って、栈橋固有周期を算出しておく必要があり、栈橋固有周期を算出には、一自由度系の単振動の固有周期の理論解が用いられる。

現行の港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾（以降、港湾基準）においては、栈橋杭の管内水質量（以降、管内水質量と表記する）や地震動作用時付加質量（以降、付加質量と表記する）が、栈橋固有周期や発生する断面力に影響を及ぼす可能性について言及されている。しかしながら、これら管内水質量および付加質量の考慮が必要となる具体的な条件や考慮方法は明示されていない。

そこで、本資料では、管内水質量や付加質量の考慮の有無が、栈橋固有周期の算定結果にもたらす影響に着目した検討を行った。まず、管内水質量や付加質量の考え方と現行基準での取扱いについて整理し、重量比について定義を行った（2章）。その上で、全国から収集した栈橋構造を有する耐震強化施設の設計事例（20断面）を対象として、管内水質量および付加質量の考慮の有無による栈橋固有周期の変化を、数値解析（FLIP²⁾）に基づく検討結果を用いて考察した（3章）。更に、栈橋固有周期の変化を示す比と2章にて定義する重量比の関係を定式化した上で、重量比から栈橋固有周期の変化を予測するモデルを検討するとともに、設計実務で利用できるよう、管内水質量および付加質量を考慮する場合の栈橋固有周期の設定方法に関する考察を行った（4章）。



(a) 照査用震度の一般的な設定手法



α_{max} : 照査用震度の決定に用いる加速度最大値
 T_s : 骨組み解析により算定される栈橋の固有周期

(b) 加速度応答スペクトルを用いた応答加速度の設定

図-1.1 現行の耐震設計における栈橋の照査用震度の設定手順¹⁾

2. 現行港湾基準類における管内水質量および付加質量の取扱い

本章では、管内水や付加質量に関して概説し、現行港湾基準類におけるこれらの考慮方法に関する整理結果を示す。その上で、重量比について具体的に計算を行うための定義を行う。

2.1 管内水質量および付加質量の考え方

(1) 管内水質量

管内水とは、水中部に位置する栈橋杭等の部材の中空部分に存在する流体を指すこととする。地震時には、管内水にも栈橋杭や上部工同様に慣性力が作用するため、現行港湾基準ではその重量を考慮した上で、その効果を適切に考慮することが望ましい旨記載されている。

(2) 付加質量

付加質量とは、地震時等に流体中で振動する物体に対して外側の流体が及ぼす力を表現するために仮想的に考慮する質量のことである。これは桜井の考え方³⁾に基づいている。椎貝⁴⁾によれば、付加質量自体に様々な考え方があり、流体力学的な正確な定義が定まっているわけではないようである。ただし、土木構造物の設計では、流体中で振動する物体に対して外側の流体が及ぼす力を物体の加速度で除したものを付加質量と定義することが一般的であり（例えば土岐⁵⁾）、本稿でもこの定義に従う。現行港湾基準においては、「鋼管と一体的挙動をとる近傍海水（付加質量）」、「地震動により加わる杭周辺の付加質量」という表現が使われている。

2.2 栈橋の設計における管内水質量および付加質量に関する港湾基準類での記載とその考慮手法

(1) 直杭式栈橋における記載内容

現行港湾基準では、直杭式栈橋に対する耐震性能照査の留意事項として、「栈橋上部工の自重と地震時の載荷重の合計値に対する、杭の自重、杭内の水の重量及び地震動により加わる杭周辺の付加質量に対応する重量の合計値の割合が相対的に大きいと判断される場合は、骨組み解析においてこれら全ての重量を考慮し、栈橋固有周期及び断面力の評価を行うことが望ましい」とされている。

しかし、これらの評価を行うための管内水質量や付加質量を考慮すべき具体的な条件やそのモデリング方法は明示されていない。また、重量比について触れられているものの、具体的な考慮範囲などは示されていない。

なお、レベル 2 地震動に対する偶発状態における性能照査についても、「非線形地震応答解析等を用いた性能照査を行う際には、栈橋杭における管内水質量に対する慣性力及び付加質量の効果を適切に考慮することが望ましい」とされているが、前述の耐震設計の一般的な留意事項としての記載と同様に、具体的な条件やモデリング方法は示されていない。

(2) ジャケット式栈橋における記載内容

一方で、栈橋の一種であるジャケット式栈橋に対しては、現行港湾基準において、性能照査の詳細はジャケット工法技術マニュアル^{6),7)}（以降、ジャケットマニュアル）を参考にできるとされている。

平成 12 年発刊のジャケットマニュアル⁶⁾では、上部工に作用する地震力に比べて無視しうる程小さい場合を除き、地震時の「部材及び管内水の慣性力」と「部材に作用する動水圧」の 2 つを考慮しなければならないとされており、現行港湾基準は平成 12 年発刊版のジャケットマニュアルを引用している。

なお、ジャケットマニュアルは令和 3 年に改訂版⁷⁾が発刊され、その改訂版では、上部工に作用する地震力に比べ相対的に大きいと判断される場合においては、上記 2 つの地震力を考慮する必要があるという表現に変更されている。また、動水圧 P [kN] の算定式として、(式 2.1)が示されている。

$$P = (A + B) \cdot C \cdot w \cdot k \cdot l \sin \theta \tag{式 2.1}$$

ここで、 A は部材の断面積[m²]、 B は部材の中空部の断面積[m²]、 C は付加質量係数、 w は周囲の流体の単位体積重量[kN/m³]、 k は作用震度、 l は水中部分の部材長[m]、 θ は部材の長さ方向が加振方向が成す角度[°]を示す。なお、令和3年のマニュアル改訂時に、式中に $\sin\theta$ が追記されたことにより、鉛直方向に射影した長さに対して動水圧を計算することとされた。この式において管内水質量および付加質量を考慮している部分については図-2.1 に示す。

このように、直杭式栈橋およびジャケット式栈橋の両構造形式において、管内水質量や付加質量の考慮の必要性については触れられているものの、それらを考慮すべき条件や、その考慮の有無による影響程度は明示されていない。

2.3 管内水質量および付加質量を考慮する場合の重量比の定義

2.2 で記述したように、現行港湾基準¹⁾では、栈橋の設計における管内水質量および付加質量を考慮する目安として、重量比について言及されているものの、具体的な考慮範囲などは示されていない。そのため、実際に計算するためには、まず

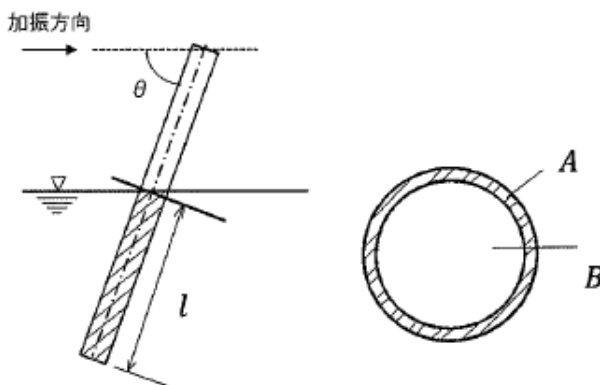


図-2.1 ジャケットマニュアルの式(式 2.1)で管内水質量および付加質量を考慮している部分⁷⁾

※着色箇所が重量を計上している範囲

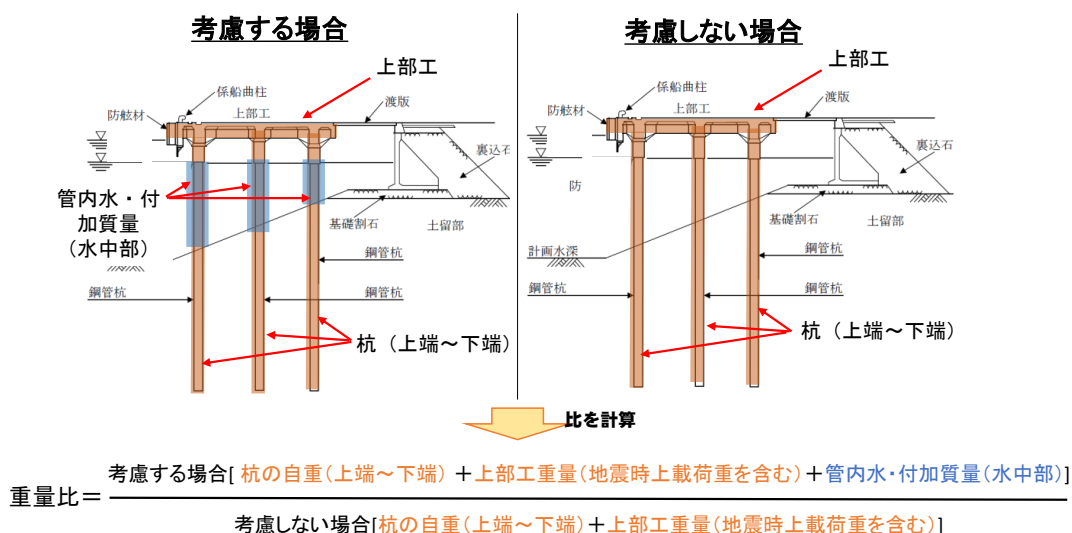


図-2.2 本資料で定義する重量比のイメージ図

重量比を定義しておく必要がある。

そこで、本資料において、「管内水質量および付加質量を考慮する場合の総重量【上部工重量（地震時上載荷重を含む）＋杭全長分の重量＋管内水質量および付加質量に対応する質量】」を「管内水および付加質量を考慮しない場合の総重量【上部工重量（地震時上載荷重を含む）＋杭全長分の重量】」で除した値を重量比として定義する。このように定義した重量比のイメージを図-2.2 に示す。

3. FEMによる動的解析に基づく管内水質量および付加質量の栈橋固有周期への影響検討

本章では、FLIP を使用した FEM による動的解析に基づき、管内水質量および付加質量が栈橋固有周期へ与える影響について検討する。

3.1 FEMによる動的解析に基づく栈橋固有周期の算定方法の整理

(1) 解析ツールおよび検討断面

管内水質量および付加質量の考慮の有無による栈橋固有周期への影響の検討に際して、本研究では二次元地震応答解析 (FLIP) を用いた。解析の対象として、栈橋構造を有する耐震強化施設の設計で用いられた解析断面を、栈橋の構造（直杭式栈橋 (PC/RC 別)・組杭式栈橋 (PC/RC 別)・ジャケット式栈橋）や設計水深、杭の列数などに可能な限り偏りがないように全国から収集した。収集の結果、20 の解析断面（直杭式栈橋が 12 断面、組杭式栈橋が 3 断面、ジャケット式栈橋が 5 断面）が得られ、設計水深は 7.5m～26.0m、法線直交方向の杭の列数は 2～7 本の範囲となった。

本検討に用いた断面の代表的な断面諸元の一覧を表-3.1 に示す。なお、また、断面図を付録A に示した。以後、解析結果は表中に示している施設番号で表記する。

(2) 管内水質量および付加質量の FLIP でのモデル化の方法

(1) で収集した各断面に対して、栈橋杭等に「管内水質量および付加質量を考慮する場合」（以降「Case ON」と表記）、「管内水および付加質量を考慮しない場合」（以降「Case OFF」と表記）の 2 ケースの比較により、栈橋固有周期に及ぼす影響を検討する。ここでは、管内水質量および付加質量の FLIP²⁾ 上でのモデル化手法について述べる。

それぞれの質量は節点集中質量要素を使用して、はり要素で構成される栈橋杭に 1m 程度の間隔（収集した FLIP 断面のはり要素の節点位置にあわせて設定）で貼り付けるようにモデル化した。モデル化のイメージを図-3.1 に示す。単位長さあ

表-3.1 使用した栈橋断面（20 断面）の諸元

施設番号	構造形式	杭径・板厚 [mm] (海側杭)	設計水深 [m]	杭の列数 (法線直交方向)	有効部材長 [m] (海側杭)	捨石マウンドの有無
施設1	PC直杭	1400×16	20.5	3	28.0	有(一部)
施設2	PC組杭	1300×14	15.0	5	22.0	無
施設3	RC直杭	1000×15	10.5	4	15.5	有
施設4	PC組杭	1400×14	15.6	4	19.9	有(一部)
施設5	RC直杭	800×11	7.5	4	13.5	有
施設6	RC直杭	800×9	7.5	3	11.3	有
施設7	RC直杭	900×12	7.5	3	11.2	有
施設8	ジャケット	1300×25	16.1	3	7.3	有
施設9	PC直杭	1500×21	12.1	3	21.0	有(一部)
施設10	RC直杭	1100×12	12.2	5	18.2	有
施設11	PC直杭	1300×14	14.1	3	20.5	有
施設12	ジャケット	1100×13	10.0	2	12.4	有
施設13	RC直杭	1500×18	16.0	5	23.0	有
施設14	RC直杭	1200×13	10.0	6	16.8	有(一部)
施設15	ジャケット	1500×21	26.0	3	10.2	無
施設16	RC組杭	600×9	10.5	4	16.1	有
施設17	ジャケット	1300×18	15.7	2	14.0	有
施設18	RC直杭	1200×12	13.2	3	20.3	有
施設19	RC直杭	1000×10	14.1	5	21.1	有
施設20	ジャケット	1200×18	11.8	3	12.2	無

たりの管内水質量 $M_1[t]$ は(式 3.1), 付加質量 $M_2[t]$ は(式 3.2)を用いてあらかじめ算定し, それぞれ FLIP に入力した.

$$M_1 = B \rho \tag{式 3.1}$$

$$M_2 = (A+B)\rho \tag{式 3.2}$$

(式-3.1), (式-3.2)において, A は部材の断面積[m²], B は部材の中空部の断面積[m²], ρ は周囲の流体の密度[t/m³]である. なお, (式-3.2)は, ジャケットマニュアルに記載されている動水圧を与える式(式-2.1)の考え方に基づいている. その際, 付加質量係数 C はジャケットマニュアルに従い, 1.0 として設定した. なお, 今回行った検討の大半が, ジャケットマニュアルの改訂前であったことから, 付加質量を算出する際には, (式 2.1)に示されている $\sin\theta$ は乗じない条件で計算している.

管内水質量および付加質量を考慮する範囲は, ジャケットマニュアルにおいて, 水中部の部材について考慮すると規定されていることに基づき, 実海底面から海水面 (収集した FLIP 断面で設定されている海水面位置) の間とした. なお, 管内水の水面位置は, 実際には杭の外側の潮位と同様に多少変動する可能性はあるものの, 栈橋固有周期の算定にあたりその変動が与える影響は小さいと考え, 収集した FLIP 断面で設定されている海水面位置と同じ位置で設定することとした. 考慮した範囲を図-3.2 に青色で示した. なお, ジャケット式栈橋においては, 鋼管トラス部材に対しても, 図-3.2 に示すように

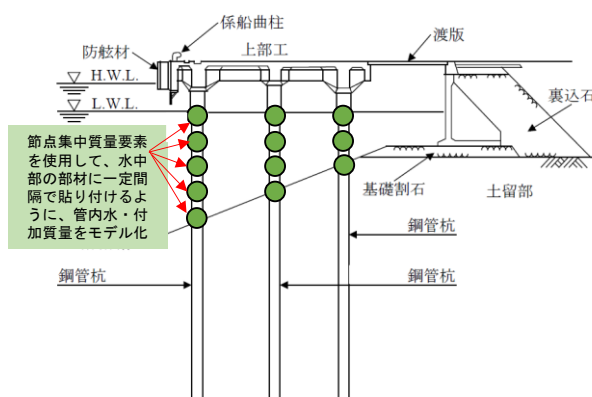


図-3.1 管内水質量および付加質量のモデル化のイメージ図

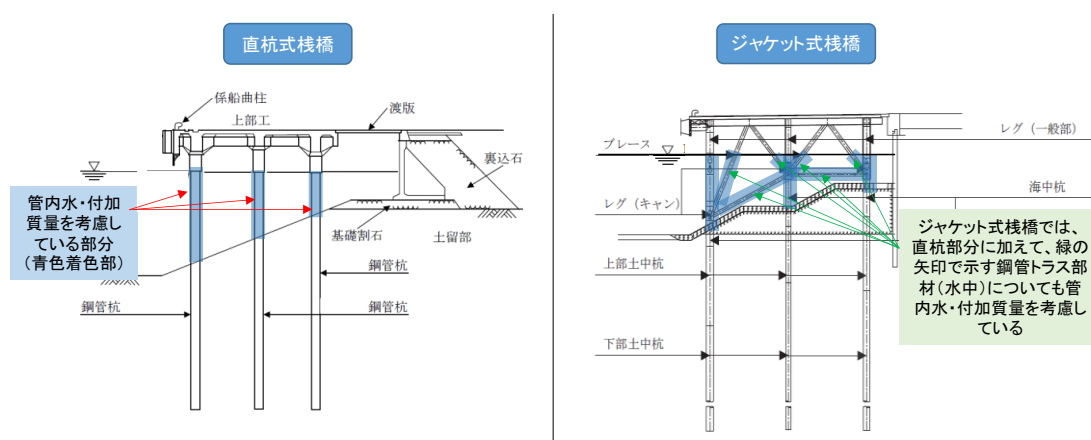


図-3.2 管内水質量および付加質量を考慮する範囲 (図中に青色で着色した範囲)

表-3.2 重量の内訳の一覧

施設番号	構造形式	重量[KN]			
		上部工	杭	管内水重量	付加質量
施設1	PC直杭	5772	497	668	702
施設2	PC組杭	3041	678	800	827
施設3	RC直杭	2358	658	168	178
施設4	PC組杭	3215	2099	526	545
施設5	RC直杭	2938	336	59	62
施設6	RC直杭	1195	105	92	96
施設7	RC直杭	3377	323	43	45
施設8	ジャケット	1610	1209	605	653
施設9	PC直杭	6194	2909	281	298
施設10	RC直杭	3340	537	307	319
施設11	PC直杭	5224	547	265	277
施設12	ジャケット	3719	242	137	145
施設13	RC直杭	8817	1860	634	666
施設14	RC直杭	3483	812	352	368
施設15	ジャケット	3635	2177	2077	2226
施設16	RC組杭	1267	119	90	94
施設17	ジャケット	3130	462	365	390
施設18	RC直杭	1569	323	274	287
施設19	RC直杭	2411	397	287	297
施設20	ジャケット	5855	947	636	681

水中に位置する部分について管内水質量および付加質量を考慮した。

以上の方法で求めた管内水質量と付加質量を、構造物の重量とともに表-3.2 に示す。

ジャケット式栈橋において、鋼管トラス部材の管内水を考慮するか否かは接合部分の構造によると考えられ、実際は考慮しない場合が多いと考えられるが、今回は鋼管トラス部材についても考慮することとし、ジャケット式栈橋については厳しい条件で解析を行った。なお、ジャケット式栈橋である施設 15 を対象として、水中に位置する鋼管トラス部材の管内水質量を考慮せず、付加質量のみを考慮し、浮力を考慮する条件で解析を実施したところ、栈橋固有周期はほとんど変化しないことを確認している。この結果については付録 B および付録 C に示している。

(3) 動的解析に基づく栈橋固有周期の特定手法

以下では、FLIP を使用した FEM による動的解析に基づく栈橋固有周期の特定手法を説明する。なお、本稿における FLIP での解析においては、地盤の過剰間隙水圧の上昇や液状化は考慮していない。

栈橋固有周期は、最大加速度10GalのImpulse波（解析の最初の時刻にのみ10Galの加速度を与えるもの）を入力波とした際の栈橋上部工中央位置での加速度時刻歴を出力し、それをフーリエ変換し、フーリエ振幅スペクトルを算出した。その上で、フーリエ振幅スペクトルのピークに対応する周波数（周期）を読み取って特定することとした（この作業のイメージを図-3.3 に示す）。ここで最大加速度10GalのImpulse波を用いた主な目的は、入力波の周波数特性の影響を除くこと、地盤を構成する要素のばねの非線形化の影響を極力防ぐことにある。なお、Impulse波ではなく、代表的なレベル1地震動相当の時刻歴波形を入力する方法も試みたが、スペクトルのピークが不明瞭になり栈橋固有周期の読み取りが難しい結果が多く確認されたため、本文ではImpulse波の結果についてのみ述べる。地震動を入力とした検討については、付録Bおよび付録Cにて結果の一覧とその説明を示し、付録Dにおいて入力地震動の情報について示している。

上述の手法により、解析対象とした20断面のうち17断面は栈橋固有周期を比較的明瞭に特定することができた。しかしながら、表-3.1の施設5, 7, 14についてはピーク位置が複数確認されるなど、明瞭に特定できなかった（付録B (5),(7),(14)参照）。その要因として背後地盤の影響が含まれている可能性があったため、以下に述べる検討を追加的に実施した。

まず、栈橋背後の土留め部法線から20m程度陸側に離れた背後地盤の加速度時刻歴から、フーリエ振幅スペクトルを算出した。このスペクトルのピークに対応する周期は、背後地盤自体の固有周期を示すものと考えられる。このため、上に述べ

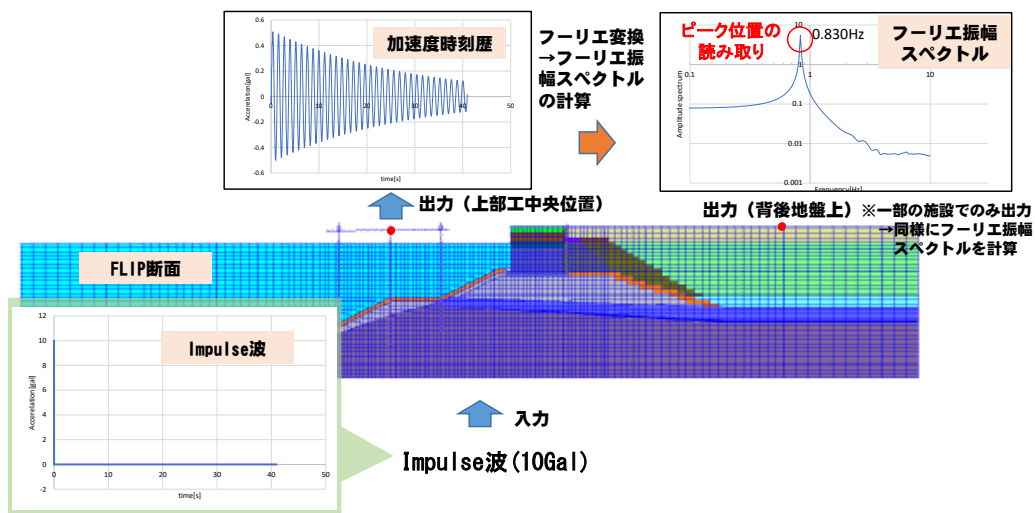


図-3.3 FLIPの入出力とフーリエ振幅スペクトルの算出のイメージ図

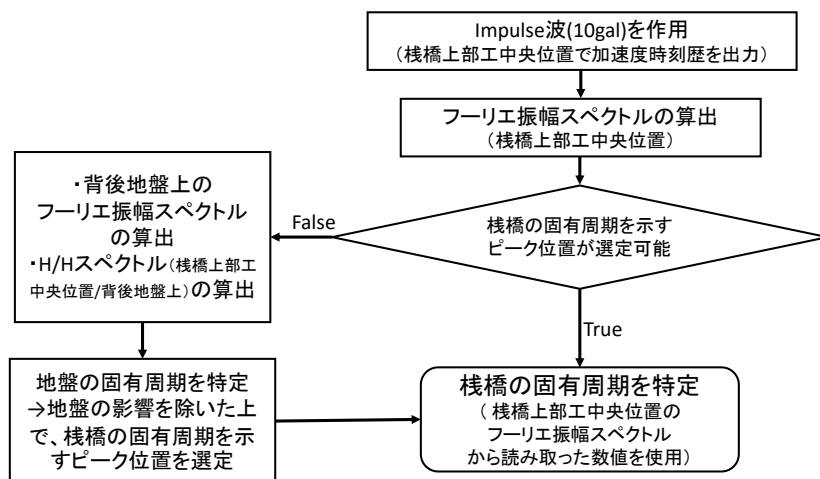


図-3.4 橋梁固有周期の特定作業のフロー図

た手法で得られる橋梁上部工中央位置でのフーリエ振幅スペクトルを背後地盤上のフーリエ振幅スペクトルで除して、地盤の影響が取り除かれていると考えられるH/Hスペクトル^{8),9)}を算出した。このH/Hスペクトルと、橋梁上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトルを見比べることによって、H/Hスペクトルのピーク位置に近い、橋梁上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトルのピーク位置を読み取り、橋梁固有周期とした。以上で述べた一連の手順については、図-3.4にフロー図として示す。

3.2 解析結果及びその考察

本節では表-3.1の20断面に対し、前項の手法に基づく管内水質量および付加質量の考慮の有無による橋梁固有周期に関する比較結果を示し考察する。なお、各断面に関する詳細説明は、付録Cで記述しているため、ここでは全体の特徴について記述する。橋梁固有周期を特定する際に用いた、加速度時刻歴、フーリエ振幅スペクトル、H/Hスペクトル(施設5,7,14のみ算出)については付録Bに示している。

図-3.5は、全20施設各断面における、「Case OFF」と「Case ON」各ケースの橋梁固有周期の特定結果である。また、橋梁固有周期の比(Case ONの橋梁固有周期をCase OFFの橋梁固有周期で除した値)の一覧を図-3.6に示す。以降、本資料で

はこの値を、“栈橋固有周期の比”と表記する。

また、解析結果を重量比に着目して考察する目的で、2.3 での定義に基づいて算出した重量比の一覧を図-3.7 に示すとともに、全 20 施設各断面の重量比、「Case OFF」「Case ON」各ケースの栈橋固有周期及び栈橋固有周期の比を表-3.3 に示す。

図-3.6より、管内水質量および付加質量の考慮による栈橋固有周期の変化は、栈橋固有周期の比でみると、1.00～1.17の範囲となった。

栈橋固有周期の比の大きい施設は、大きい方から順に、施設15（重量比：1.74）、施設8（重量比：1.45）、施設20（重量比：1.19）であるが、これらはいずれもジャケット式栈橋であり、当該構造形式の栈橋固有周期の比は、一見すると高くなる傾向にあると考えられる。しかし、今回の検討断面のうちジャケット式栈橋として他に施設12,17の2施設があり、この2施設の栈橋固有周期の比は特段大きくない。このことから、単に栈橋の構造形式の違いのみが栈橋固有周期の比を説明するわけではないことがわかる。

なお、施設15についてはこの中でも突出して栈橋固有周期の比が大きいですが、これは、杭径が大きく（海側杭で1500mm）、水深が深い（設計水深26m）という構造的な特徴により、管内水質量および付加質量を考慮する部分の体積が大きくなったことが要因と考えられる。

また、栈橋固有周期の変化がほとんどない結果は、上述の施設12（重量比：1.07）の他、施設5（重量比：1.04）、施設7（重量比：1.02）、施設9（重量比：1.06）、施設11（重量比：1.09）、施設14（重量比：1.17）においても得られた。全20施設の重量比の算術平均が約1.20であることを考えると、重量比が比較的小さい（1.00に近い）断面、つまり管内水質量および付加質量の効果が相対的に小さい施設において、栈橋固有周期の変化を表す比が1.00に近くなる結果が得られやすいと考えられる。

上記の点から、栈橋固有周期の比と重量比には一定の関連があると考えられるため、図-3.8にその関係を図示した。上述のように、ジャケット式栈橋であっても、重量比が小さい場合には栈橋固有周期の比は大きくならないことが図-3.8からも分かる。図-3.8は重量比の大小が栈橋固有周期の比に大きく影響することを示唆する結果となっており、現行港湾基準¹⁾において言及されている内容は、この結果からも確認することが出来る。

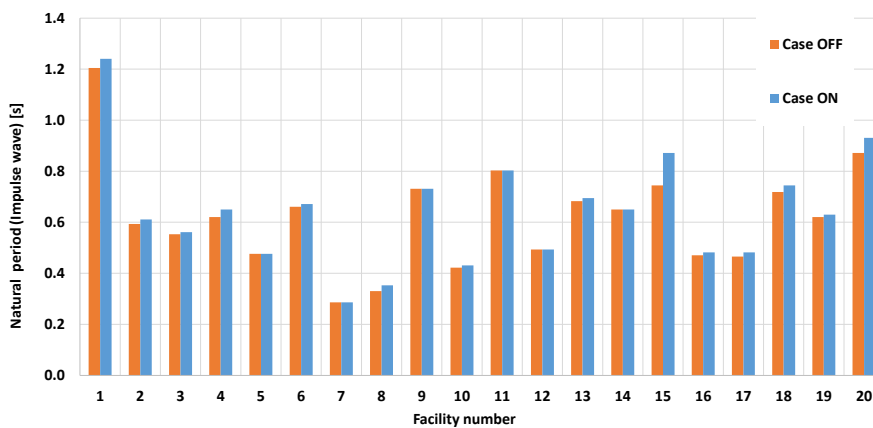


図-3.5 栈橋固有周期の結果の一覧 (20 断面)

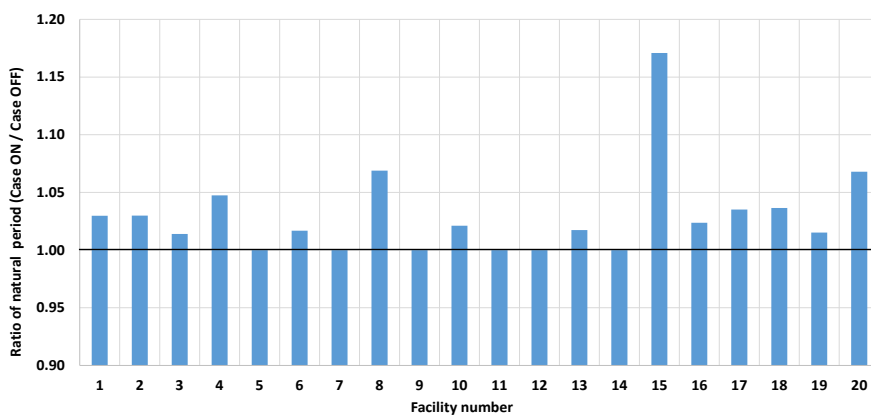


図-3.6 栈橋固有周期の比の一覧 (20 断面)

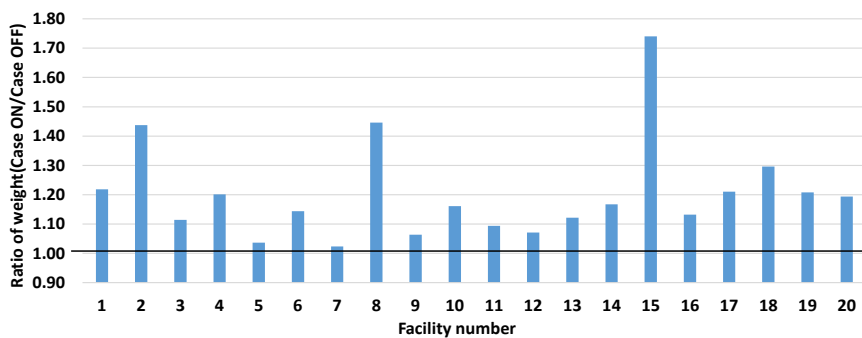


図-3.7 重量比の一覧 (20 断面)

表-3.3 特定した栈橋固有周期の一覧

施設番号	構造形式	杭径・板厚 [mm] (海側杭)	設計水深 [m]	杭の列数 (法線直交方向)	有効部材長 [m] (海側杭)	捨石マウンドの有無
施設1	PC直杭	1400×16	20.5	3	28.0	有(一部)
施設2	PC組杭	1300×14	15.0	5	22.0	無
施設3	RC直杭	1000×15	10.5	4	15.5	有
施設4	PC組杭	1400×14	15.6	4	19.9	有(一部)
施設5	RC直杭	800×11	7.5	4	13.5	有
施設6	RC直杭	800×9	7.5	3	11.3	有
施設7	RC直杭	900×12	7.5	3	11.2	有
施設8	ジャケット	1300×25	16.1	3	7.3	有
施設9	PC直杭	1500×21	12.1	3	21.0	有(一部)
施設10	RC直杭	1100×12	12.2	5	18.2	有
施設11	PC直杭	1300×14	14.1	3	20.5	有
施設12	ジャケット	1100×13	10.0	2	12.4	有
施設13	RC直杭	1500×18	16.0	5	23.0	有
施設14	RC直杭	1200×13	10.0	6	16.8	有(一部)
施設15	ジャケット	1500×21	26.0	3	10.2	無
施設16	RC組杭	600×9	10.5	4	16.1	有
施設17	ジャケット	1300×18	15.7	2	14.0	有
施設18	RC直杭	1200×12	13.2	3	20.3	有
施設19	RC直杭	1000×10	14.1	5	21.1	有
施設20	ジャケット	1200×18	11.8	3	12.2	無

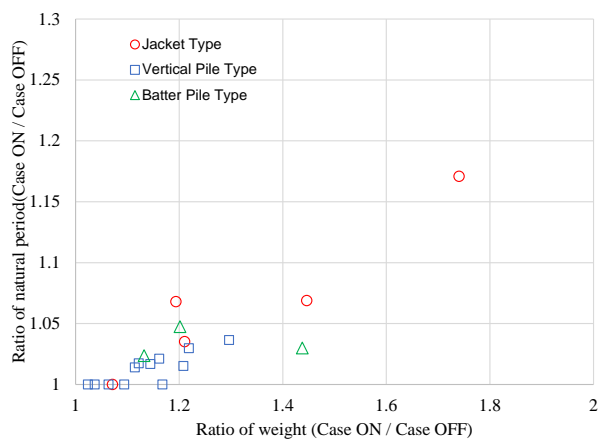


図-3.8 栈橋固有周期の比と重量比の関係

4. 管内水質量および付加質量を考慮することによる栈橋固有周期の変化に関する検討

本章では、設計実務での利用を目的として、まず、栈橋固有周期の比と重量比の関係を定式化し、重量比を説明変数として固有周期の変化を予測するモデルの構築を行う (4.1)。その上で、設計実務における照査用震度の算出の際に、管内水質量および付加質量の影響を考慮する際の手順について示す (4.2)。

4.1 栈橋固有周期の比と重量比の関係の定式化と予測モデルの構築

重量比を説明変数として栈橋固有周期の変化を予測するモデルを構築するためには、その関数形を仮定する必要がある。

ここで、栈橋の耐震設計で照査用震度を求める際に用いられる一自由度系の単振動の固有周期 T_s [s]の理論解を (式-4.1) に示す (M は考慮する栈橋の質量[t], K は栈橋のパネ係数[kN/m])。

$$T_s = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} \quad (\text{式-4.1})$$

さらに、管内水質量および付加質量を考慮しない場合と考慮する場合の質量[t]をそれぞれ m , m' と表し、その際の栈橋固有周期[s]をそれぞれ T , T' と表した時、2.3 で定義した重量比は m'/m であり、栈橋固有周期の比は T'/T となる。ここで栈橋固有周期の比を $y=T'/T$, 重量比を $x=m'/m$ と文字を置き直し、管内水質量と付加質量が栈橋固有周期を長くする影響が 1 自由度系で仮定しているとおりに完全に現れると仮定すると、栈橋固有周期の比と重量比について(式-4.2) の関係式が得られる。なお、管内水質量および付加質量の有無により、栈橋のパネ係数は変化しないと仮定している。

$$y = \sqrt{\frac{m'}{m}} = \sqrt{x} \quad (\text{式-4.2})$$

3章の図-3.8 で示した各解析断面の重量比と栈橋固有周期の比の関係に、(式-4.2) を示す曲線と追記したものが図-4.1 である。図のように、全ての点が(式-4.2) を示す曲線より下に位置する結果となった。これは、管内水質量および付加質量の重心が、栈橋上部工の重心より低いなどの理由により、管内水質量および付加質量が栈橋固有周期を長くする影響が、必ずしも 1 自由度系で仮定しているとおりに完全に現れるわけではないためと考えられる。

そこで、管内水質量および付加質量を Δm とし、これに α を乗じた分だけの質量が栈橋固有周期を長くすることに寄与すると考えると、(式-4.2) は以下ようになる。

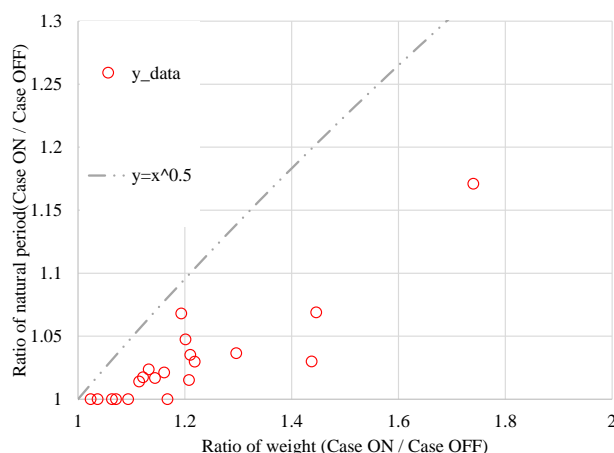


図-4.1 (式-4.2) の関数と実施の解析結果との関係

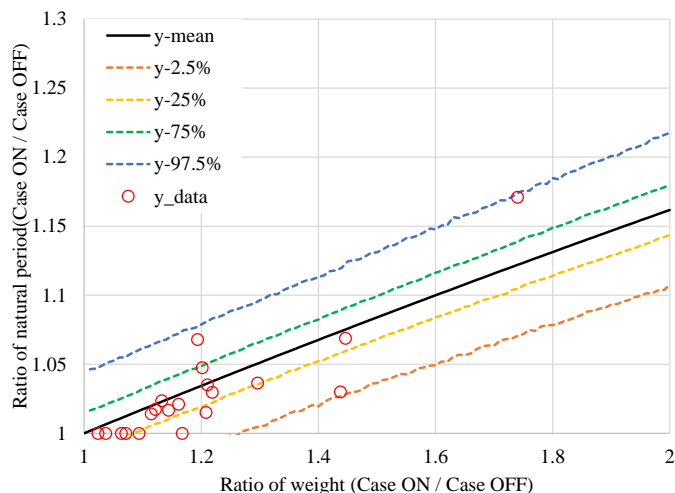


図-4.2 重量比を用いた栈橋固有周期の比の回帰モデルとベイズ予測区間

$$y = \sqrt{\frac{m + \alpha \Delta m}{m}} \quad (\text{式-4.3})$$

ここで、重量比 $(m + \Delta m)/m$ を x と置き、 Δm を式の中から消去すると、(式-4.4)が導かれる。なお、この関数は、重量比が1の時に栈橋固有周期の比が1となることを満たしている。

$$y = \sqrt{1 + \alpha(x - 1)} \quad (\text{式-4.4})$$

上式で表される重量比と栈橋固有周期の比の関係を、本検討で適用する関数形（重量比から栈橋固有周期の比を予測する式）とした。また、栈橋固有周期の算定結果には様々な誤差が含まれているものと考え、解析結果から算出した栈橋固有周期比は、(式-4.4)の予測値 y に正規分布ノイズを加えたものとするモデルを仮定した。ここで、未知パラメータ α と正規ノイズの標準偏差 σ について、各信頼度に基づく予測区間を容易に算出できること等の理由から、ベイズ推論により推定を行うこととし、具体的にはMCMCの一つであるハミルトニアン・モンテカルロ法¹⁰⁾を実装したStanを用いて計算を行った。

推定値として、平均的なトレンドを把握する目的で、事後期待値(EAP)を算出し、 α は0.3497、 σ は0.0220を得た。この推定結果は図-4.2に示す。図中のy-meanは、 α を事後期待値(EAP)である0.3497とした場合の回帰モデルを示す。また、観測ノイズを含んだ各信頼度のベイズ予測区間（50%、及び95%ベイズ予測区間）も算出した（図-4.2中に示す）。95%ベイズ予測区間を示す、上端の点である97.5%点（以後、97.5%点と表記する）と下端の点である2.5%点（以後、2.5%点と表記する）に挟まれる区間に、今回の全解析結果が含まれていることが図-4.2から分かる。

4.2 実務設計での利用方法

本節では、設計実務における照査用震度の算出の際に、管内水質および付加質量の影響を考慮する際の手順について述べる。

今回、実務設計で利用する場合には、全解析結果がその区間内に含まれている95%ベイズ予測区間を用いることを提案する。実務設計（図-1.1に示した栈橋の照査用震度の設定）での具体的な利用手順は以下のとおりである。

- 管内水・付加質量を考慮しない条件での固有周期 T_1 の算出（式-4.1）
（その際、栈橋全体のバネ定数を求める際には、横抵抗地盤反力係数は、3,000Nとして地盤バネは実地表面まで設定する）
- 重量比 x の算出（本資料 2.3 の定義に従って算出）



○図-4.1 を用いて、重量比 x に対応する95%点の値（ β ）を読み取る

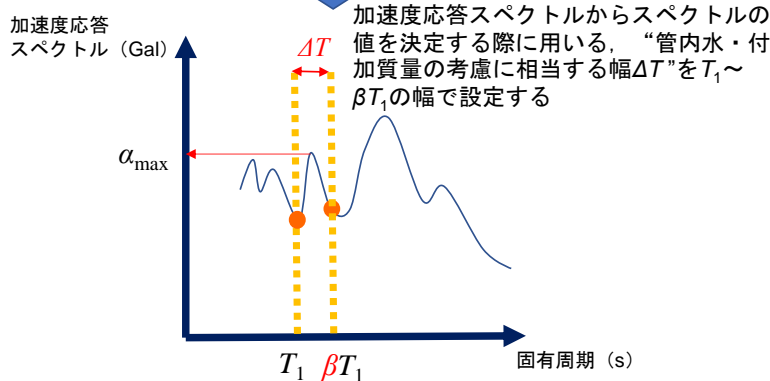
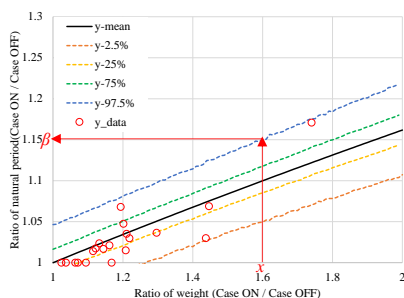


図-4.3 実務設計での利用手順のイメージ図

【実務設計での利用手順】

- ① 管内水質量および付加質量を考慮しない条件での栈橋固有周期 T_1 を（式-4.1）を用いて算出する。（栈橋全体のバネ定数を求める際には、横抵抗地盤反力係数は3,000Nとして地盤バネは実地表面まで設定する）
- ② 2.3の定義に従って、重量比 x を算出する
- ③ 重量比 x に対応する、95%ペイズ予測区間の上側の端点（97.5%点）の値（ β ）を読み取る
- ④ $T_1 \sim \beta T_1$ を、加速度応答スペクトルからスペクトルの値を決定する際に用いる、管内水質量および付加質量の考慮に相当する幅 ΔT とする

上に述べた実務設計での利用方法・手順のイメージを図-4.3に示す。

なお、本検討は、非線形化の影響が生じないことを目的とした入力（最大加速度10GalのImpulse波）を与えて、FLIPでの解析を行った。そのため、上記手順において、管内水質量および付加質量を考慮しない条件での栈橋固有周期 T_1 を（式-4.1）で算出する際には、非線形化の影響が生じないようにしたFLIPでの解析で得られた栈橋固有周期が再現性できるような地盤バネの設定方法を採用するのがよいと考える。栗原ら¹¹⁾は、横抵抗地盤反力係数 k_h は3,000Nとし地盤バネは実地表面まで設定する方法が、その場合における栈橋固有周期の再現性の高いことを確認している。そのため、上記手順の中でも、横抵抗地盤反力係数 k_h は3,000Nとし地盤バネは実地表面まで設定する方法を適用した上で、栈橋固有周期を計算するのに必要なパラメータである栈橋全体のバネ定数 K を算定するのが望ましいと考える。ここで、 N は、地盤の N 値を示す。

この方法を用いることで、「管内水質量および付加質量を考慮しない栈橋固有周期」と「重量比」から、加速度応答スペクトルからスペクトルの値を決定する際に考える、管内水質量および付加質量を考慮することに相当する幅を設定することが可能になる。

上記の利用手順中で示した幅 ΔT は、管内水質量および付加質量のみを考慮することに相当する幅である。一方で、栈橋固有周期を変化される要因としては、管内水質量および付加質量の他にも、荷役クレーンの有無や地盤バネの設定方法等の要因が考えられる。そのため、荷役クレーンの有無や地盤バネの設定方法等に起因するによるばらつきを考慮する必要がある場合は、それらに起因する栈橋固有周期の変化を定量的に評価した上で、考慮する幅を改めて適切に設定する必要がある。

5. 本研究で得られた知見・成果

本研究では、栈橋構造を有する耐震強化施設の設計事例（20 断面）を対象として、まず、管内水質量および付加質量の考慮の有無による栈橋固有周期の変化を、数値解析（FLIP を使用）に基づく検討結果を用いて考察した。その上で、設計実務で利用できるよう、栈橋固有周期の比と重量比の関係を定式化して予測モデルの構築を行った。最後に、設計実務における照査用震度の算出の際に、管内水質量および付加質量の影響を考慮する際の手順について示した。

本研究で得られた主な知見・成果は以下のとおりである。

- ・20 断面を対象とした FLIP を使用した動的解析の結果から、管内水質量および付加質量を考慮することにより、栈橋固有周期の比で 1.00~1.17 程度の範囲で変化する結果が確認された。
- ・ジャケット式栈橋は、5 施設中 3 施設において管内水質量および付加質量を考慮した場合の大きな影響が確認されたが、残り 2 施設の栈橋固有周期の比は大きくなかったことから、単に栈橋の構造形式の違いのみが栈橋固有周期の比を説明するわけではないことが明らかになった。
- ・実際の構造物では、管内水質量および付加質量の重心が、栈橋上部工の重心より低いなどの理由により、管内水質量および付加質量が栈橋固有周期を長くする影響が 1 自由度系で仮定しているとおり完全に現れるわけではないことが確認された。
- ・栈橋固有周期の比と重量比の関係を定式化し、重量比を説明変数とした予測モデルを構築した。
- ・加速度応答スペクトルからスペクトルの値を決定する際に考える、管内水質量および付加質量の考慮に相当する幅 ΔT を設定する手順を示した。

謝辞

20 断面の収集にあたっては、東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所、関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所、北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所、中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所、近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所、中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所、九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所、沖縄総合事務局等にご協力いただきました。ここに記して深く感謝の意を表します。

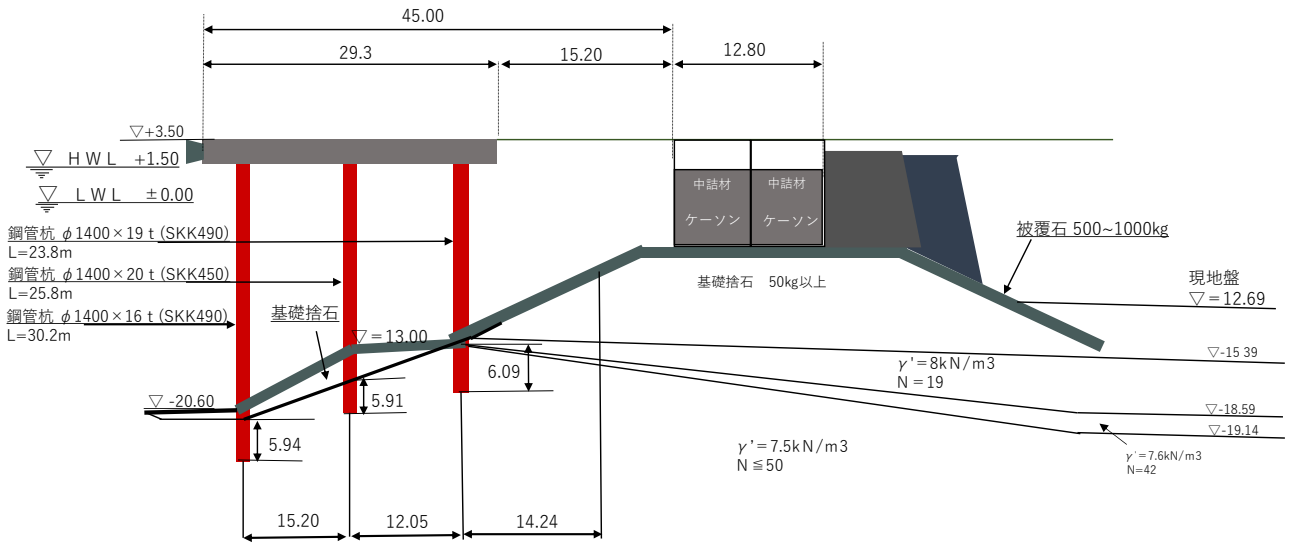
参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，（公社）日本港湾協会，2018，pp.1199~1218.
- 2) Iai,S., Matsunaga,Y. and Kameoka, T:Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, 港研報告 Vol.29,No.4,pp.27-56,1990.
- 3) 桜井彰雄:水中に立てられた構造物の振動, 土木技術 第 16 卷 6 号, 1961.
- 4) 椎貝博美:流体力学ノート 8. 付加質量, 日本流体力学会誌「ながれ」, 1994.

- 5) 土岐憲三:構造物の耐震解析, 技報堂出版, 1981.
- 6) 沿岸開発技術研究センター:ジャケット工法技術マニュアル, 2000 , pp.6~7.
- 7) 沿岸技術研究センター:ジャケット工法技術マニュアル(改訂版), 2021, p.7.
- 8) 長尾毅, 田代聡一:栈橋式岸壁の耐震性照査手法に関する解析的研究, 国土技術政策総合研究所資料 第 61 号, 2003.
- 9) 菅原法城,竹信正寛,宮田正史,福永勇介,野津厚,長坂陽介:常時微動観測による実栈橋固有周期の推定手法に関する基礎的検討, 国土技術政策総合研究所資料 第 1082 号, 2019
- 10) S. Duane, A.D. Kennedy, B. J. Pendleton, D. Roweth: Hybrid Monte Carlo, Physics Letters B(195), 1987.
- 11) 菅原法城,竹信正寛,宮田正史,福永勇介,野津厚,長坂陽介:常時微動観測による実栈橋固有周期の推定手法に関する基礎的検討, 国土技術政策総合研究所資料 第 1082 号, 2019

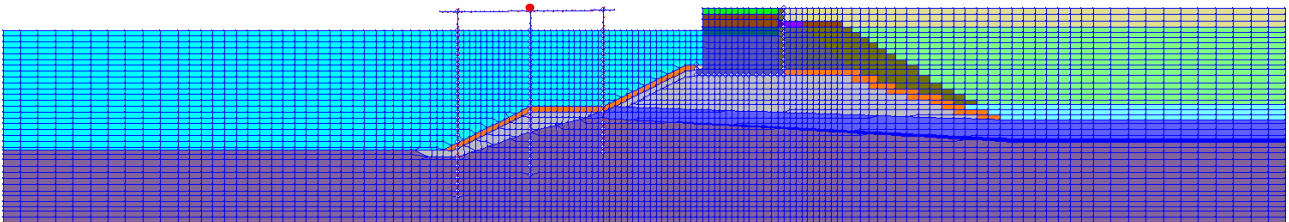
付録 A 検討対象とした栈橋の断面図および FLIP 断面 (20 断面)

動的解析に使用した 20 の断面の断面図および FLIP 断面について以下に示す。



(施設 1 については、詳細な断面図が入手できなかったため、概略図で示している)

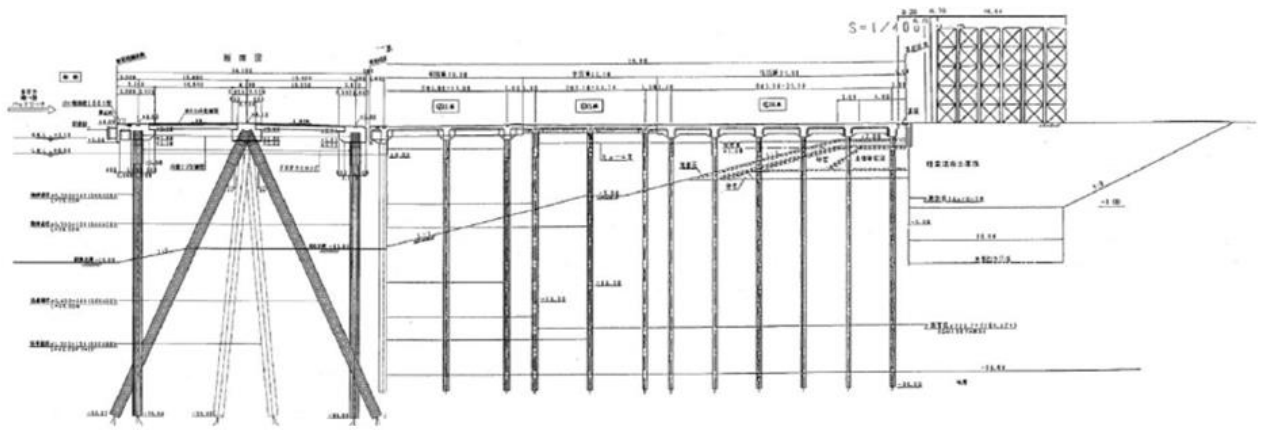
(1).1 断面図_施設 1



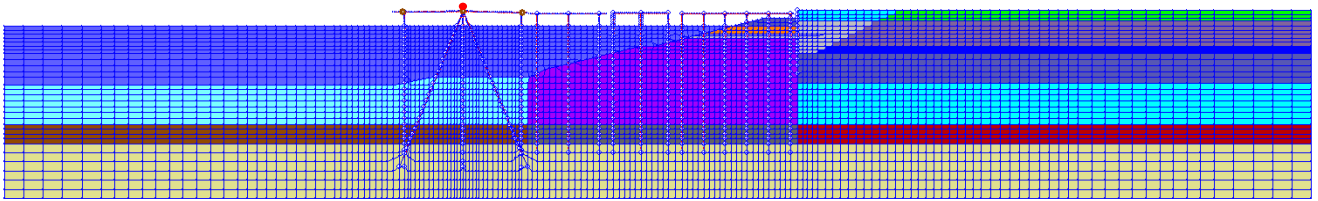
(施設 1 については、詳細な断面図が入手できなかったため、概略図で示している)

※図中の赤点が加速度時刻歴の出力位置を示す。(以下同様)

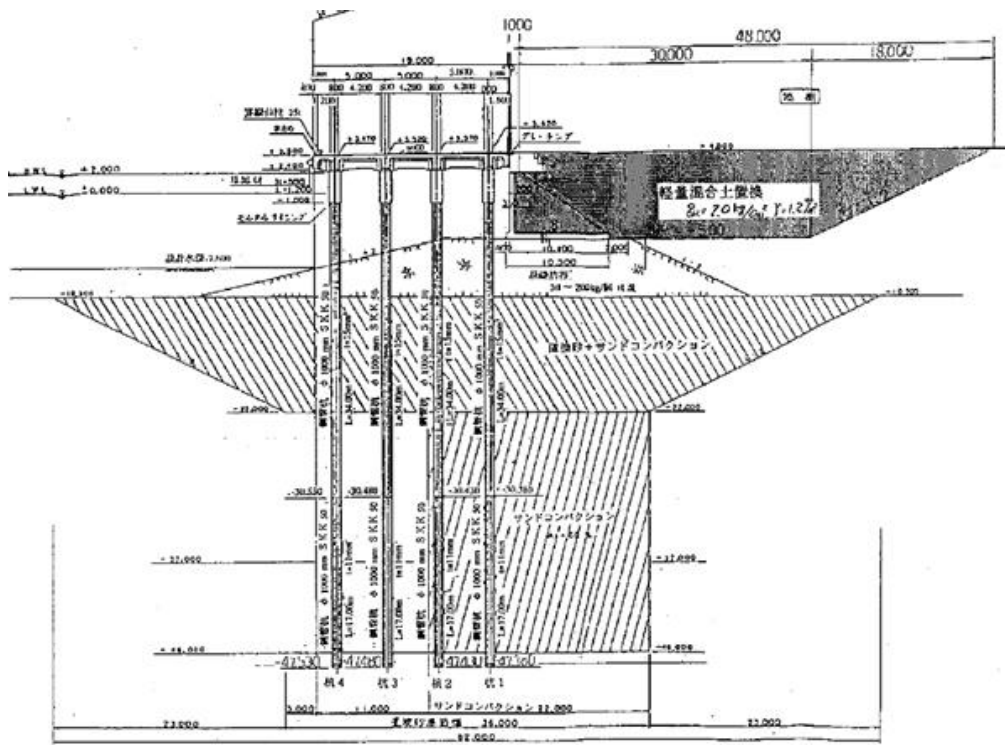
(1).2 FLIP 断面_施設 1



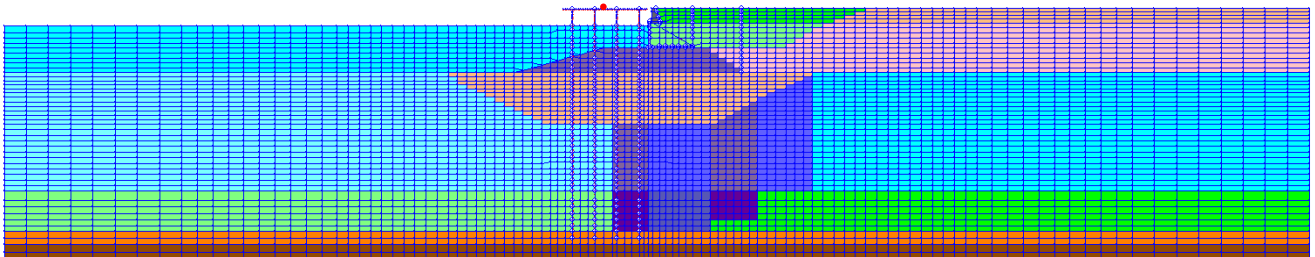
(2).1 断面図_施設 2



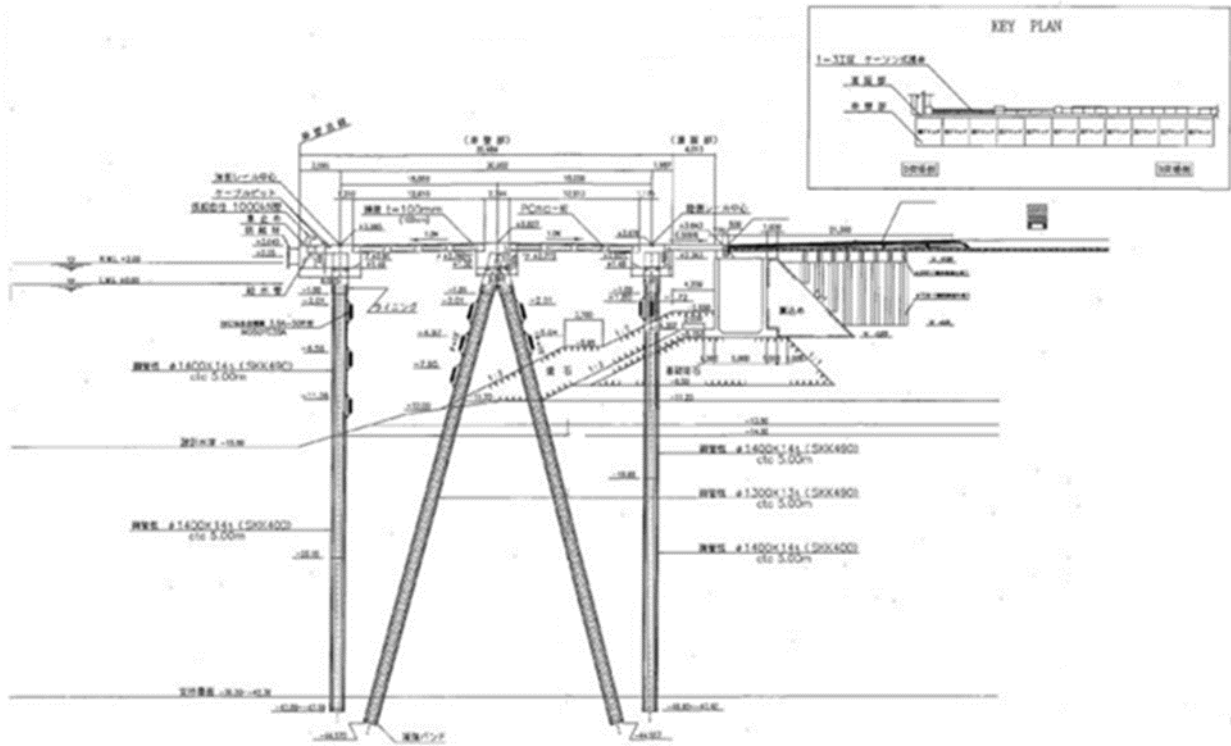
(2).2 FLIP 断面_施設 2



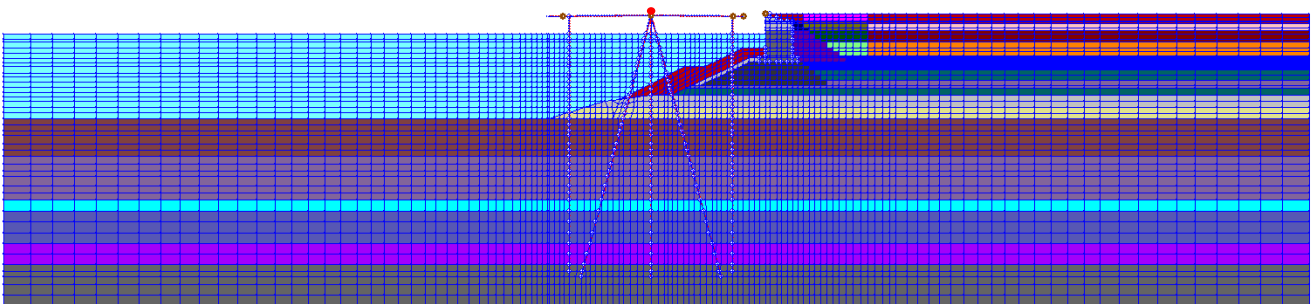
(3.1) 断面図_施設 3



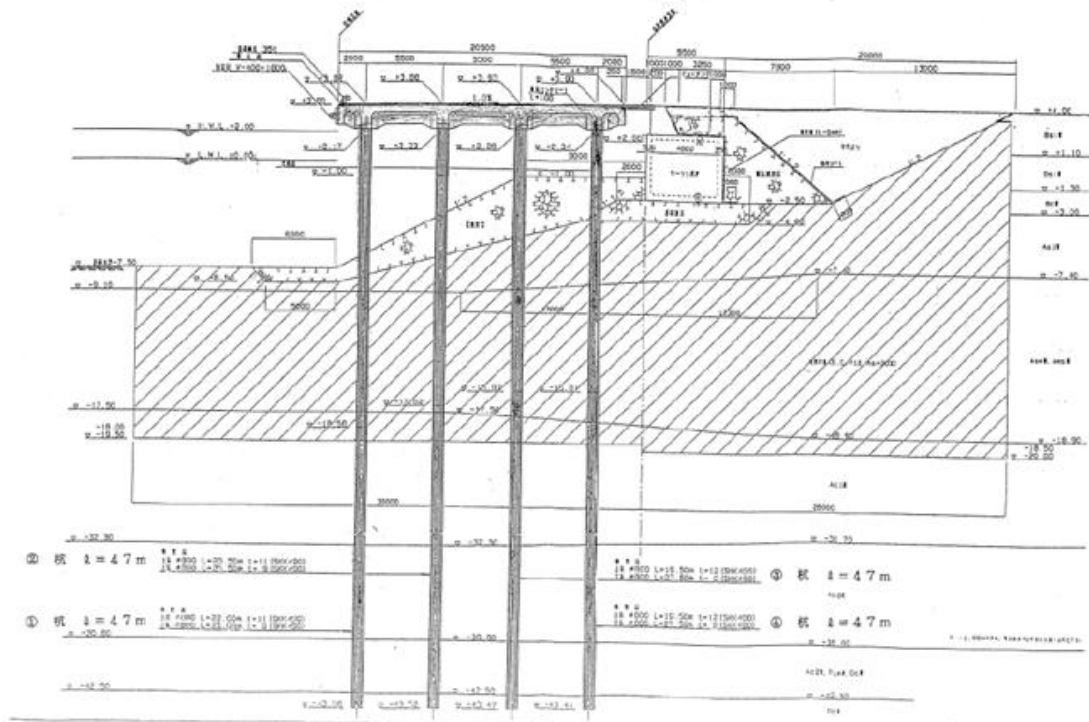
(3.2) FLIP 断面_施設 3



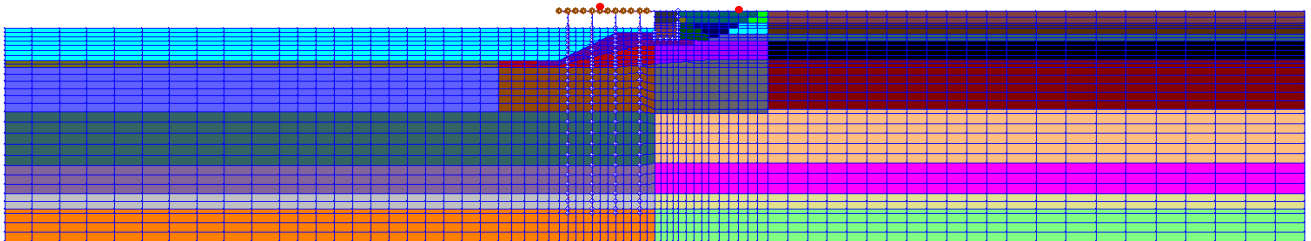
(4).1 断面図_施設 4



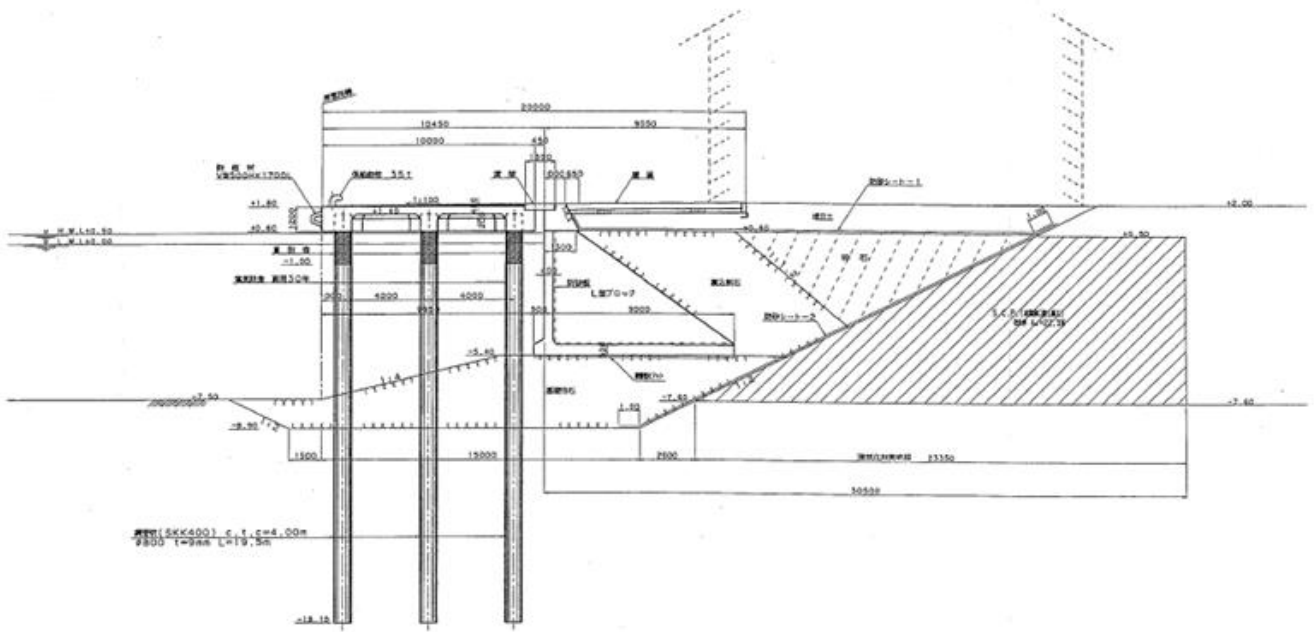
(4).2 FLIP 断面_施設 4



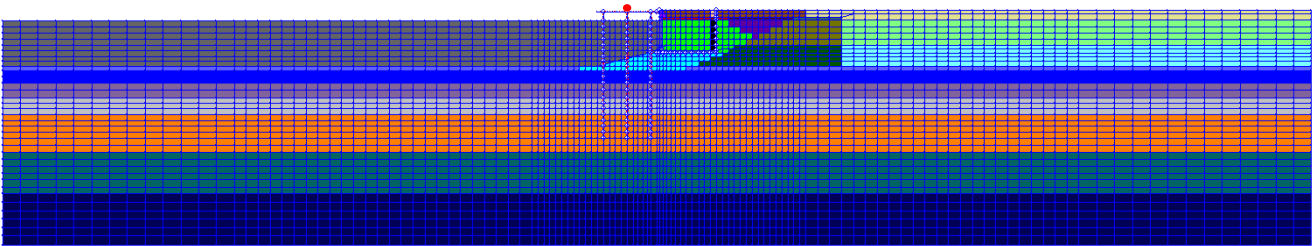
(5.1) 断面図_施設 5



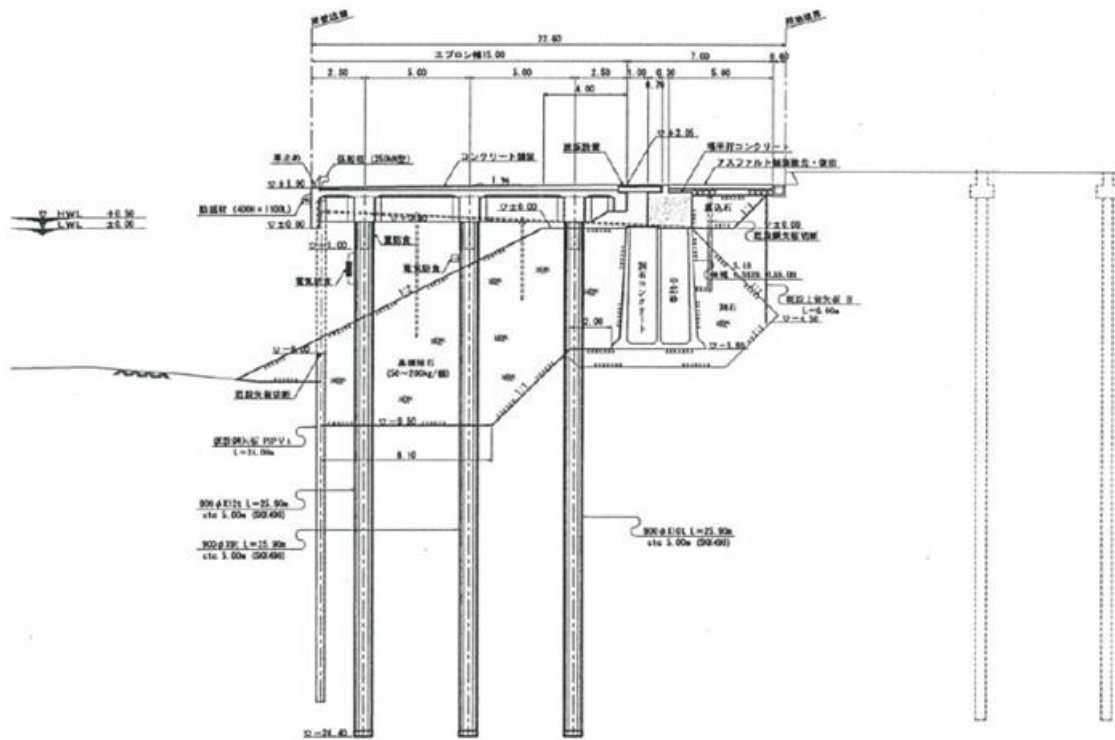
(5.2) FLIP 断面_施設 5



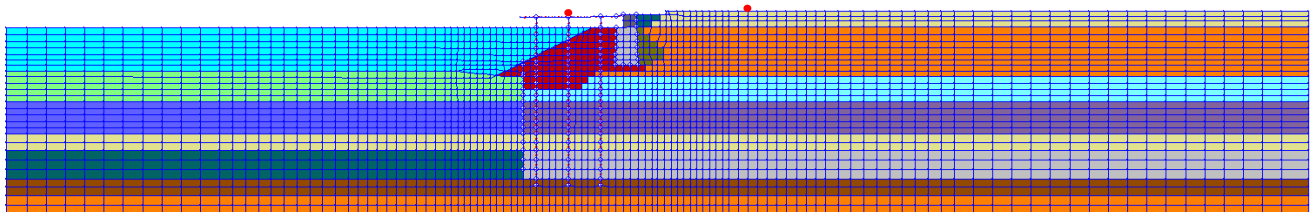
(6).1 断面図_施設 6



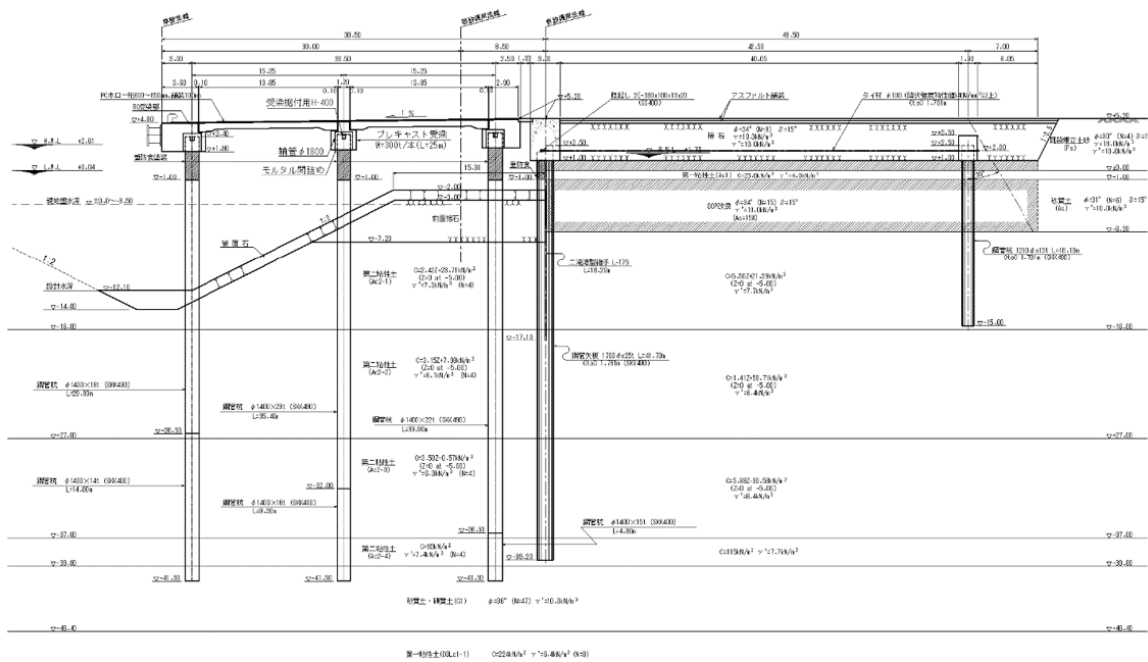
(6).2 FLIP 断面_施設 6



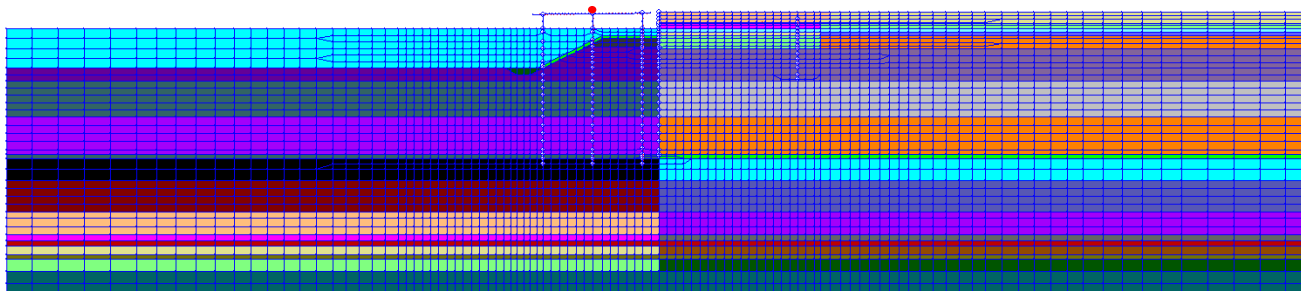
(7.1) 断面図_施設 7



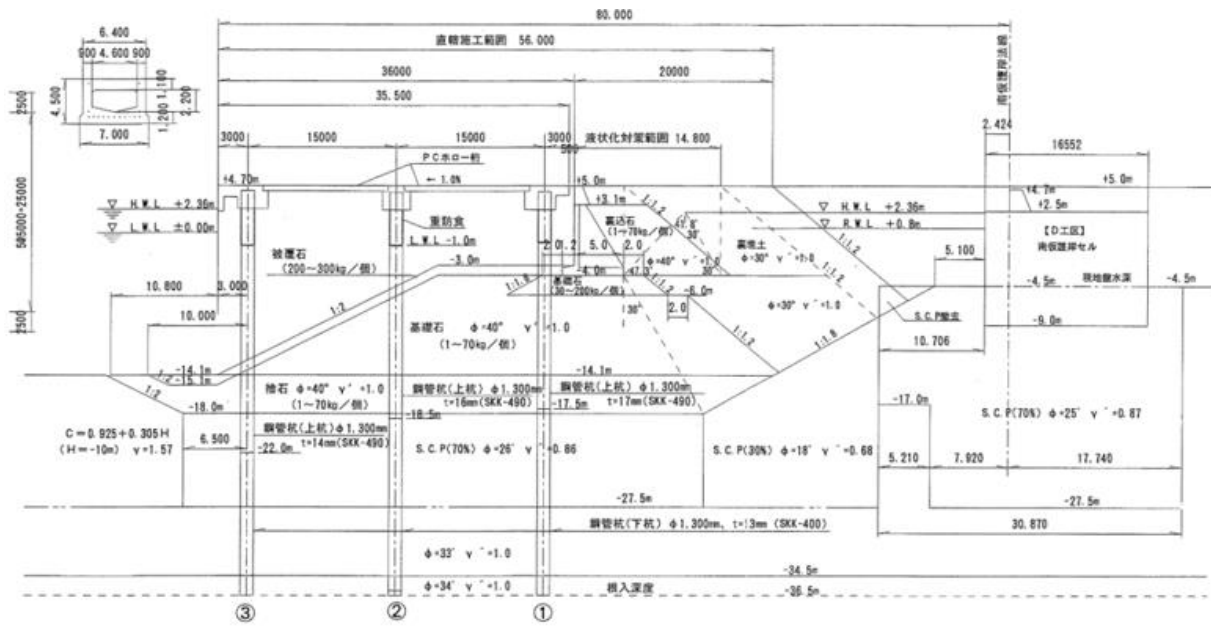
(7.2) FLIP 断面_施設 7



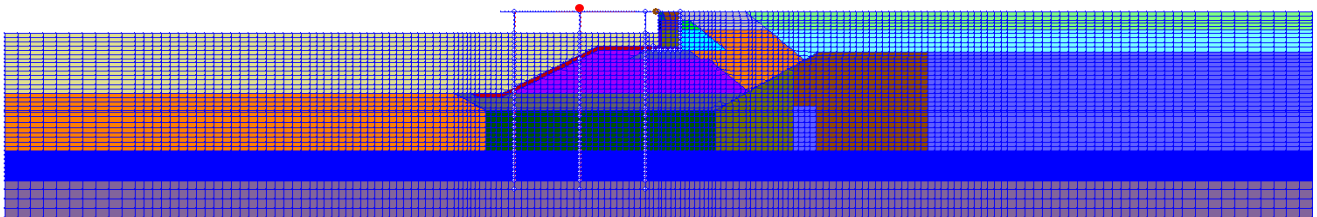
(9).1 断面図_施設 9



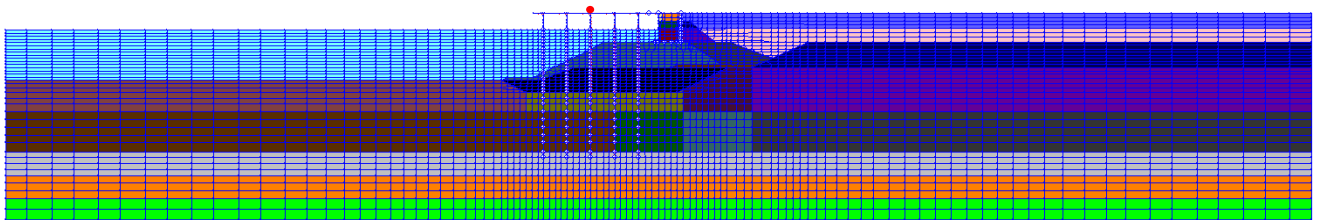
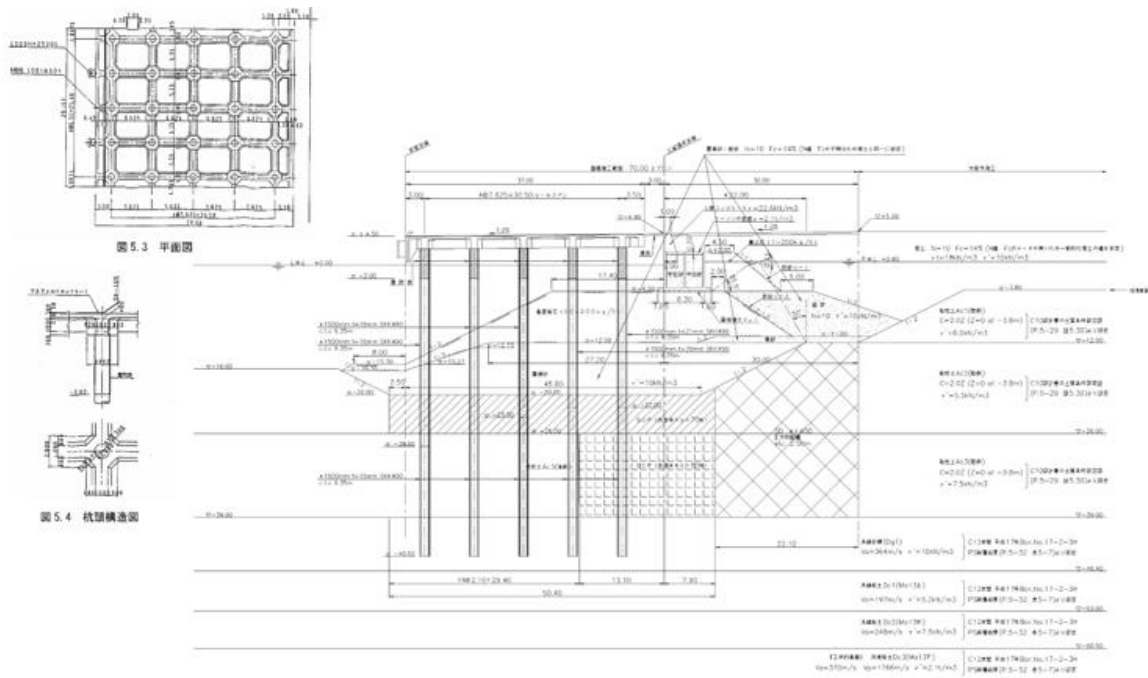
(9).2 FLIP 断面_施設 9

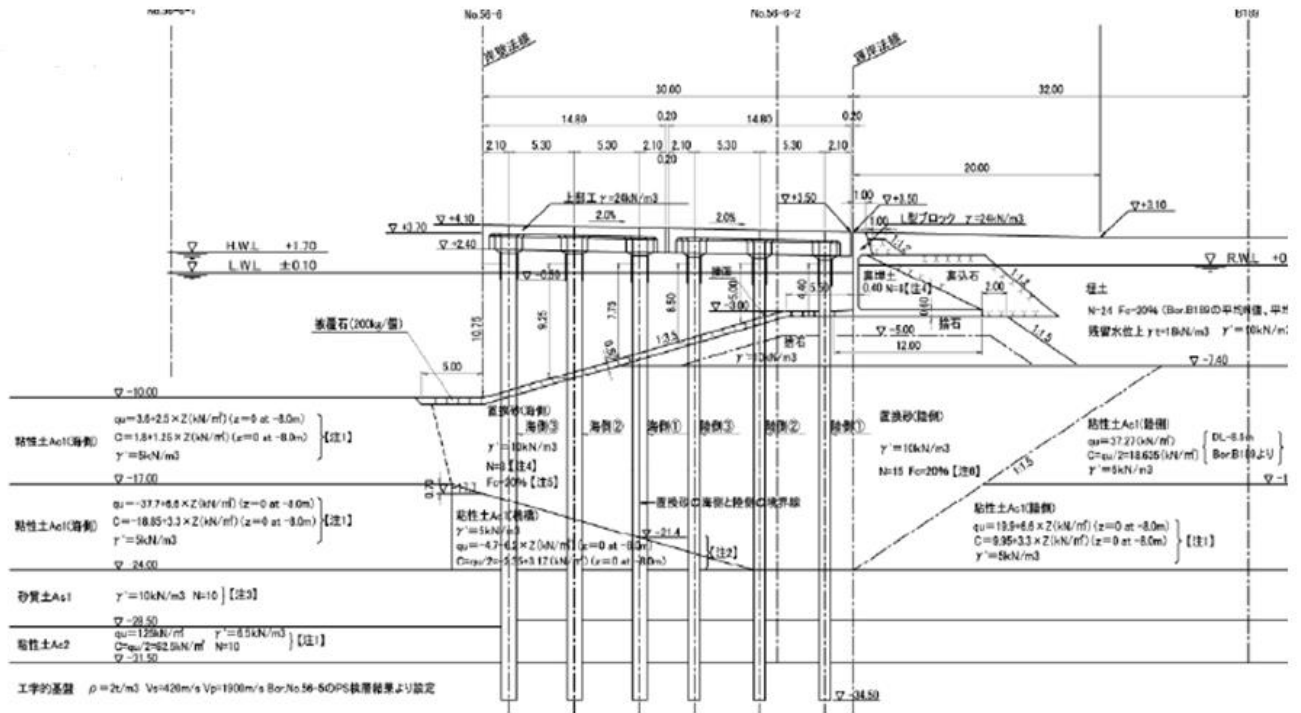


(11).1 断面図_施設 11

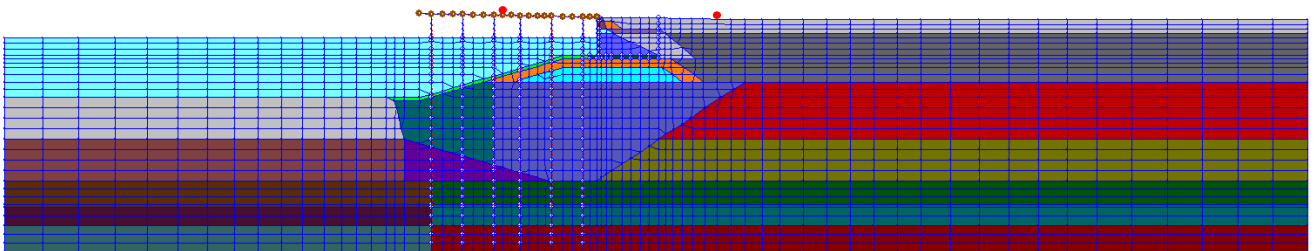


(11).2 FLIP 断面_施設 11

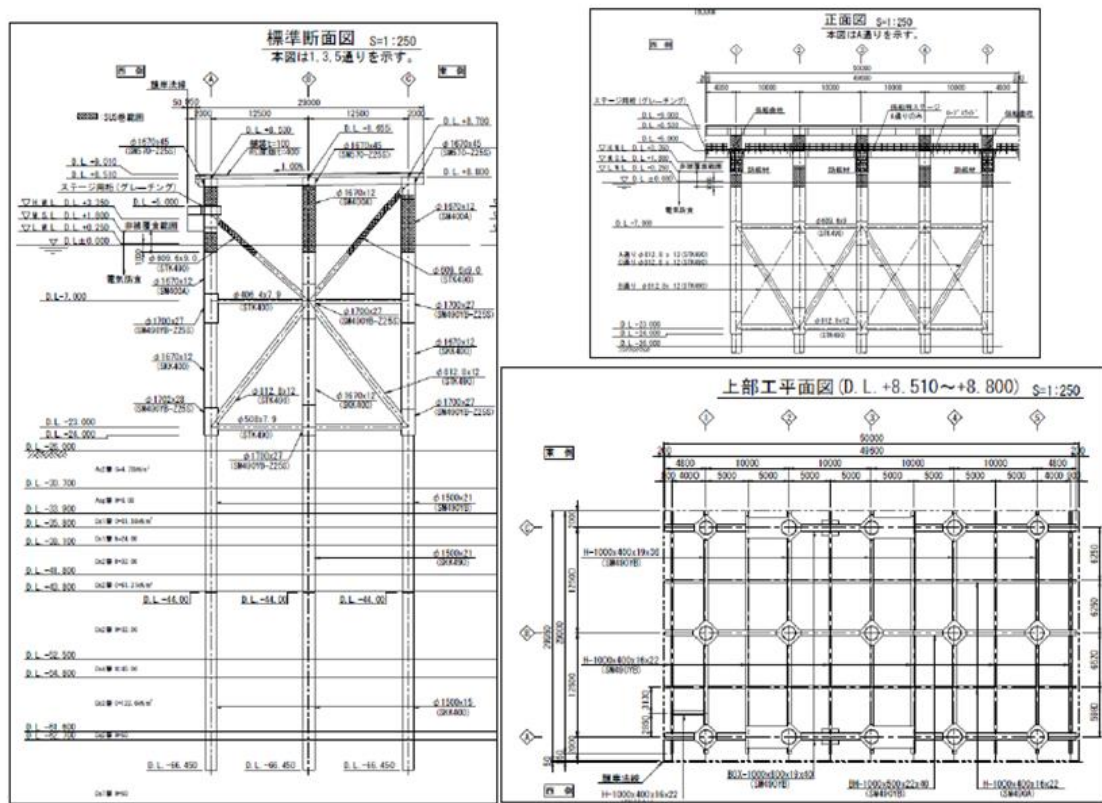




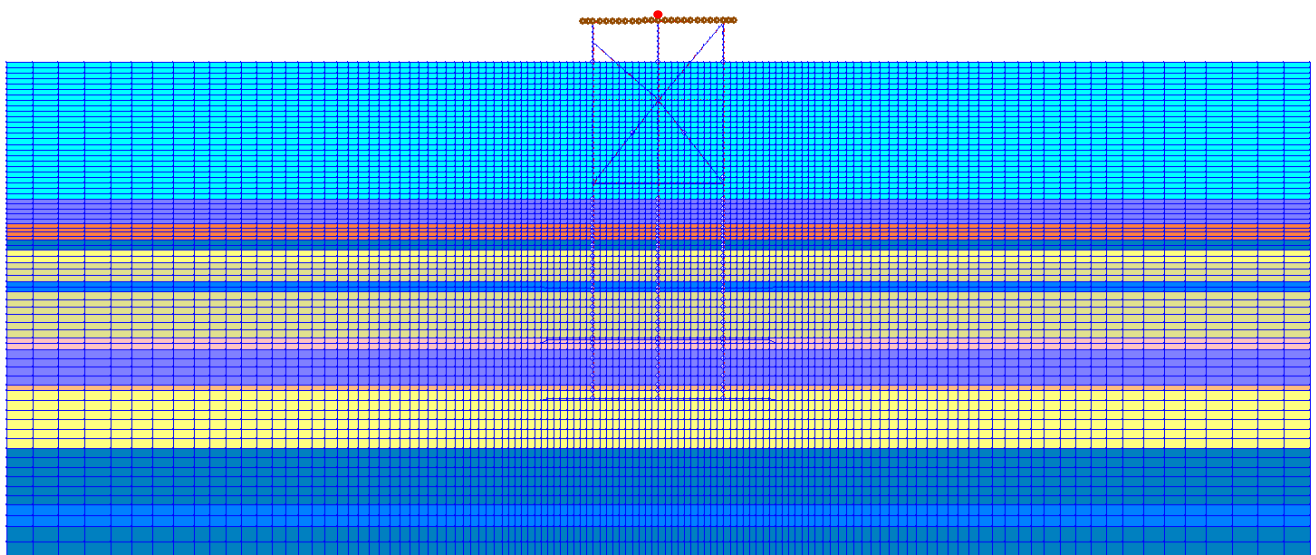
(14).1 断面図_施設 14



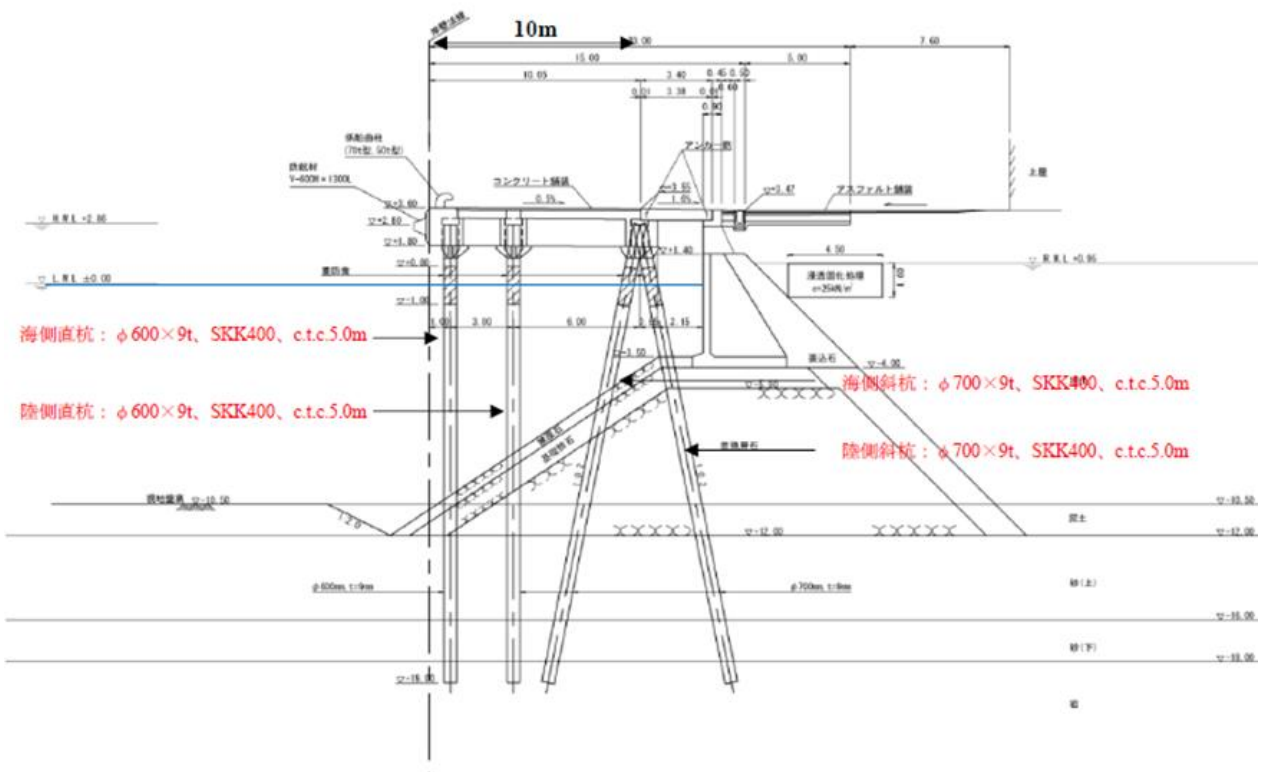
(14).2 FLIP 断面図_施設 14



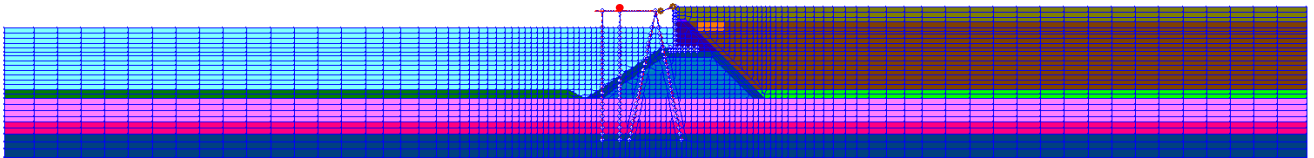
(15).1 断面図_施設 15



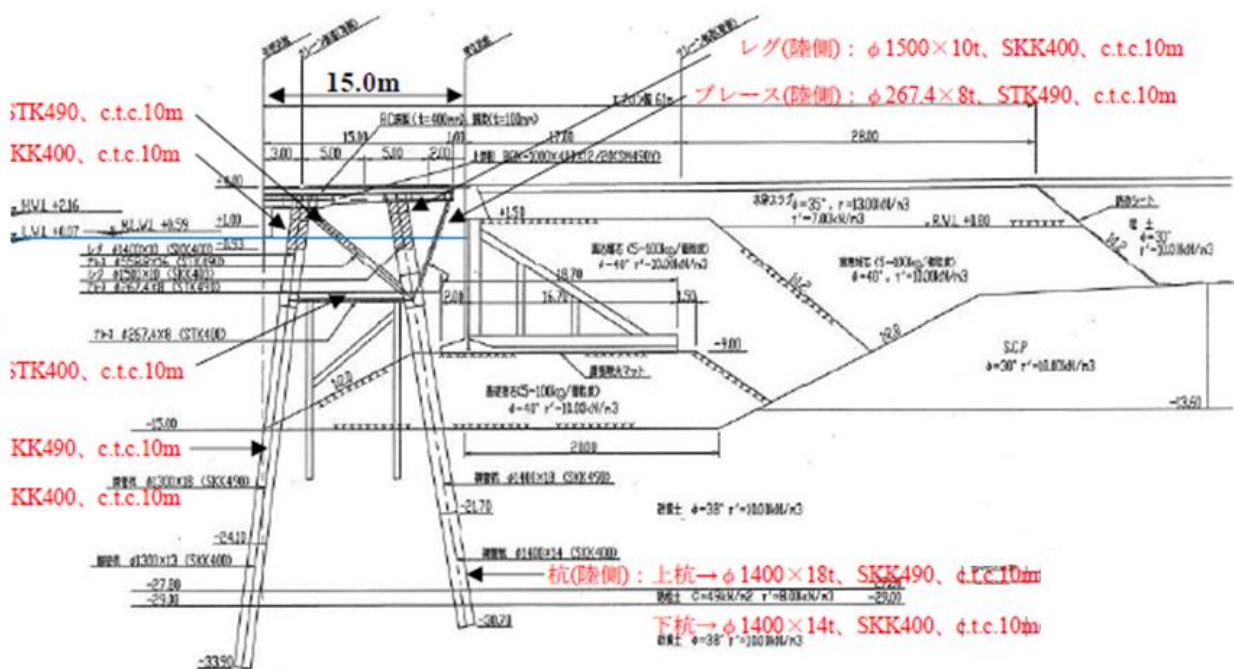
(15).2 FLIP 断面_施設 15



(16).1 断面図_施設 16

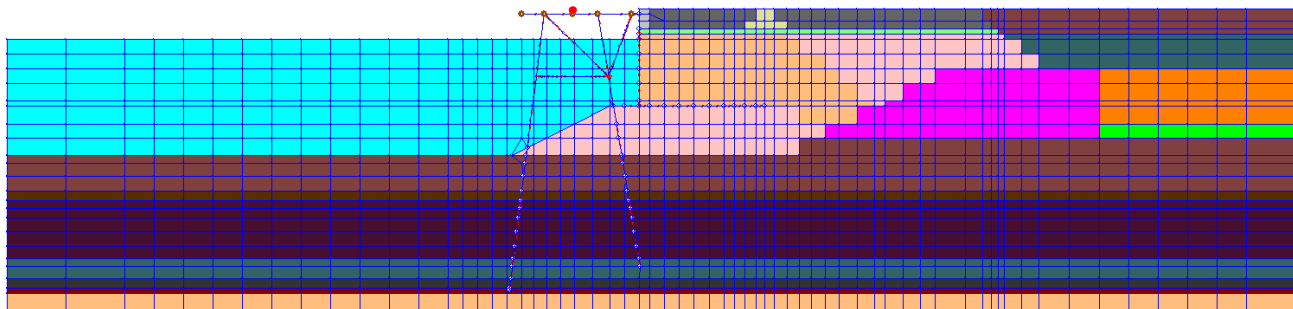


(16).2 FLIP 断面_施設 16

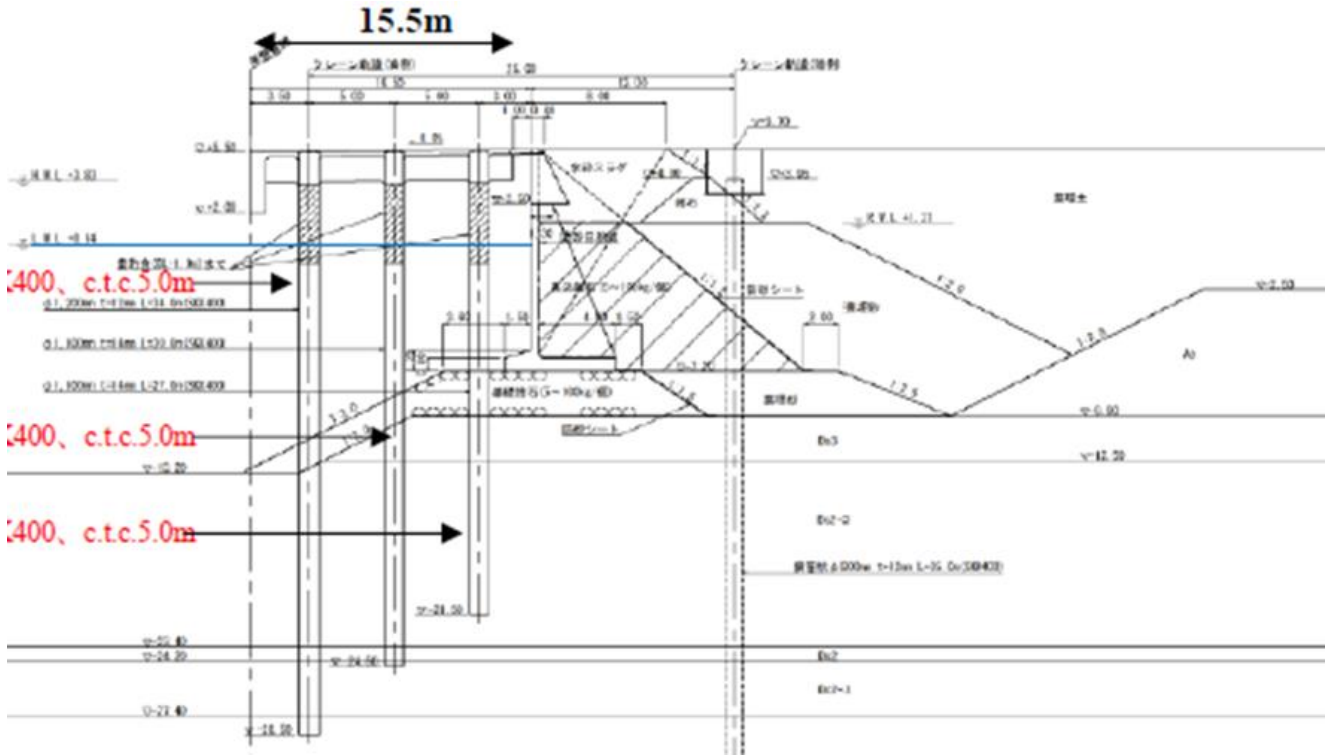


(17).1 断面図_施設 17

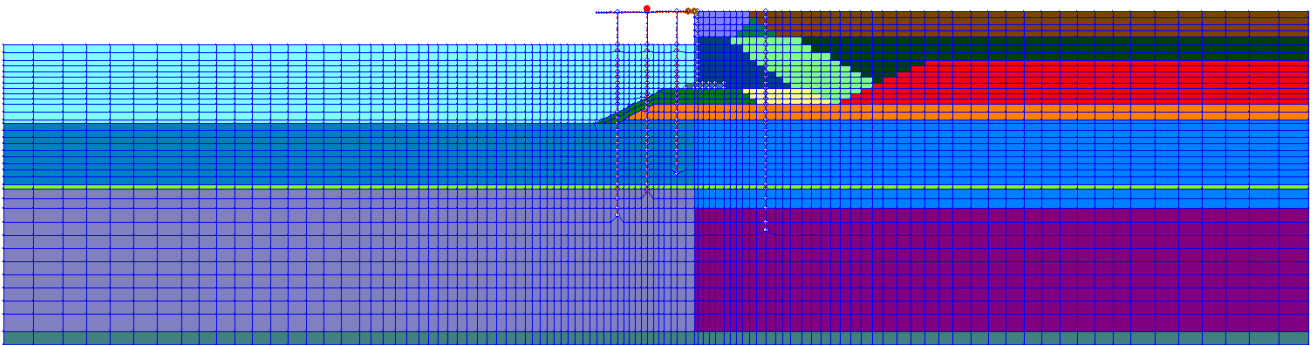
図



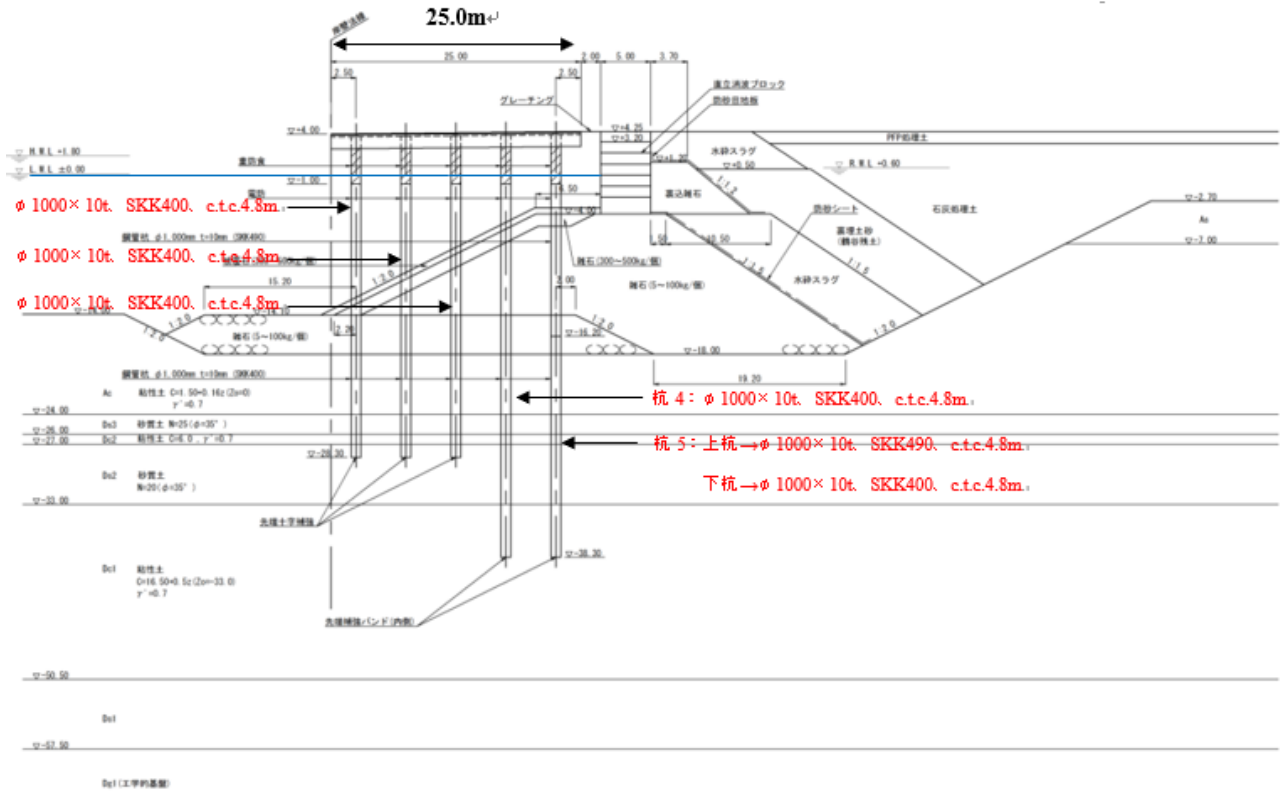
(17).2 FLIP 断面_施設 17



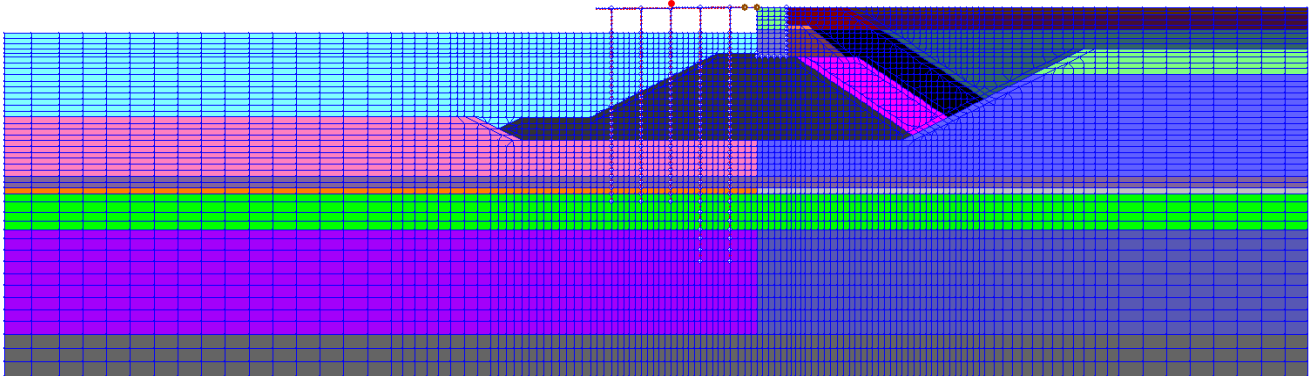
(18).1 断面図_施設 18



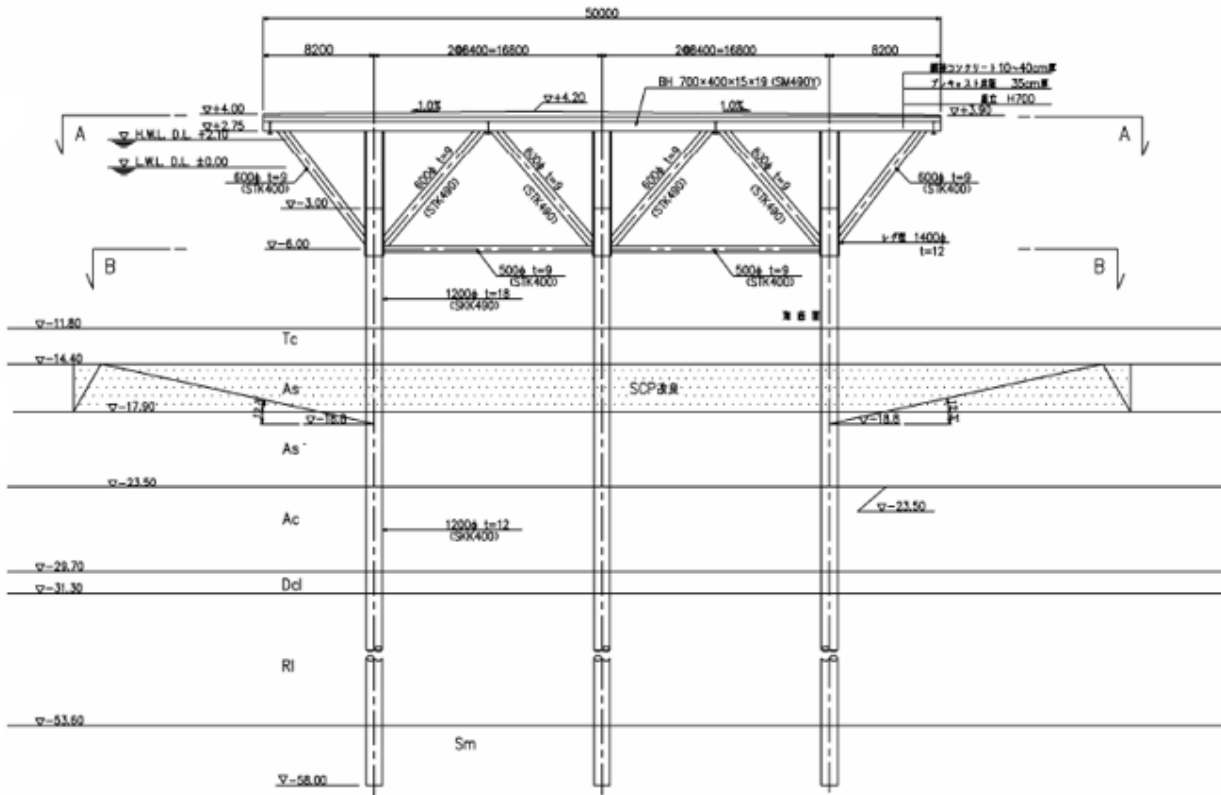
(18).2 FLIP 図_施設 18



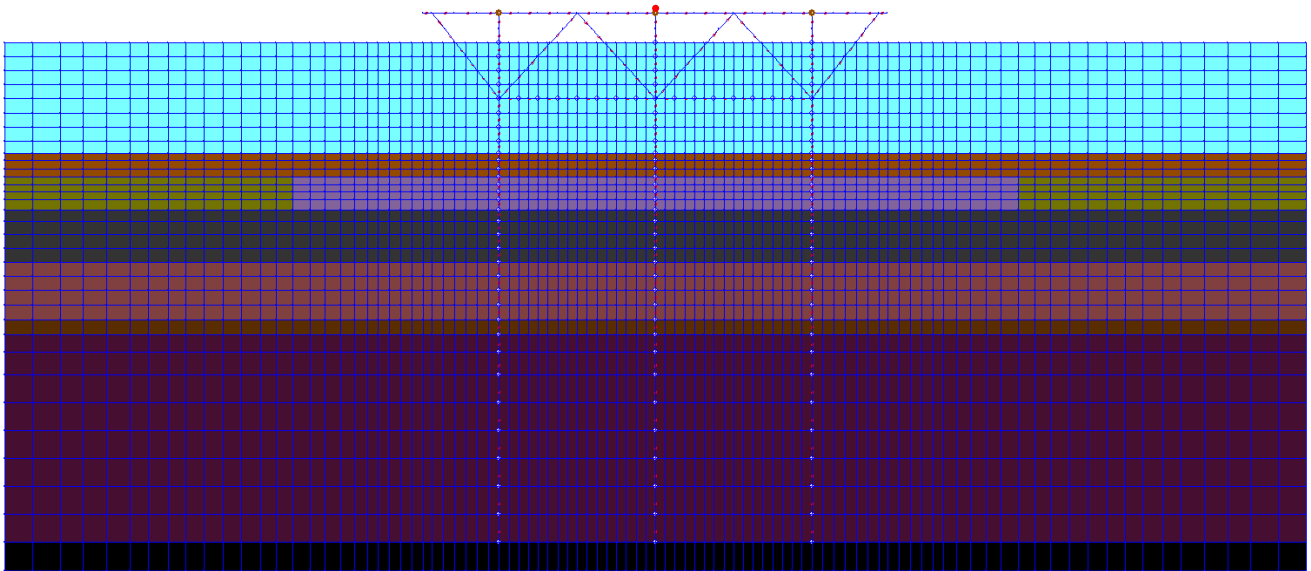
(19).1 断面図_施設 19



(19).2 FLIP 断面_施設 19

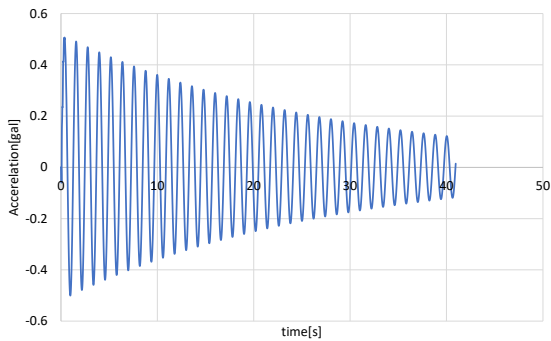


(20).1 断面図_施設 20

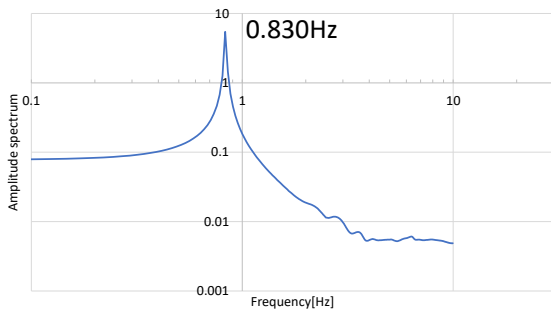


(20).2 FLIP 断面_施設 20

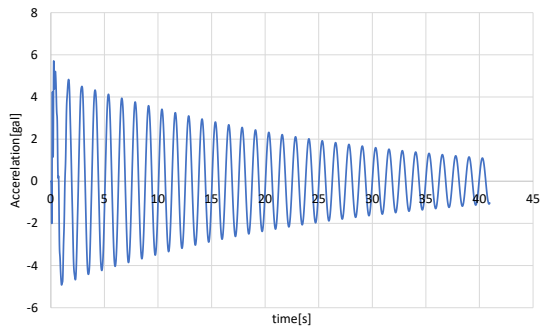
付録 B 動的解析の結果の一覧



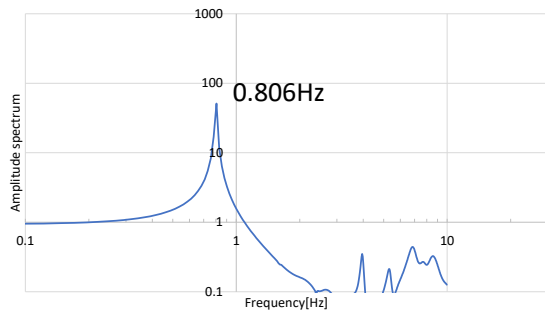
(1-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設1_Case OFF)



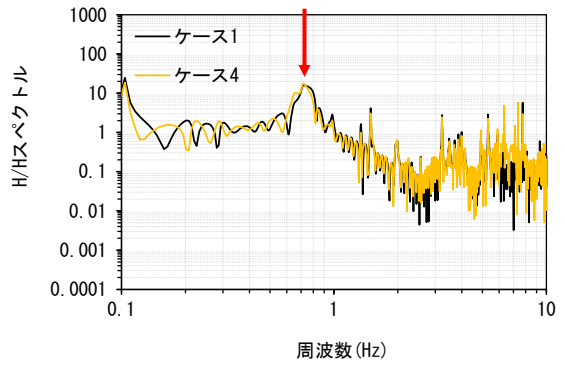
(1-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設1_Case OFF)



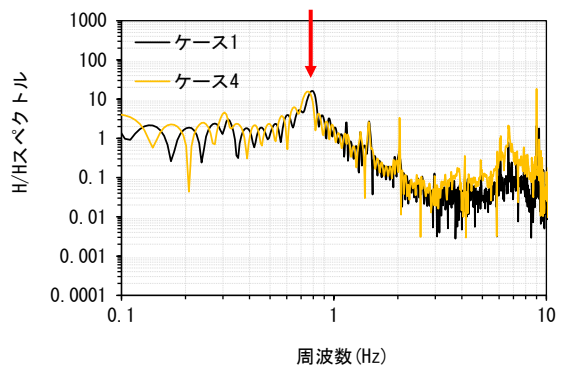
(1-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設1_Case ON)



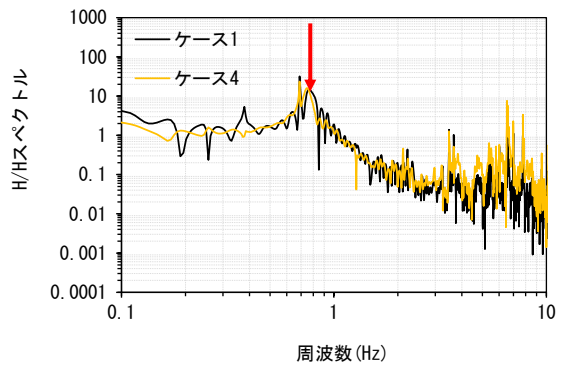
(1-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設1_Case ON)



(1-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設1港)

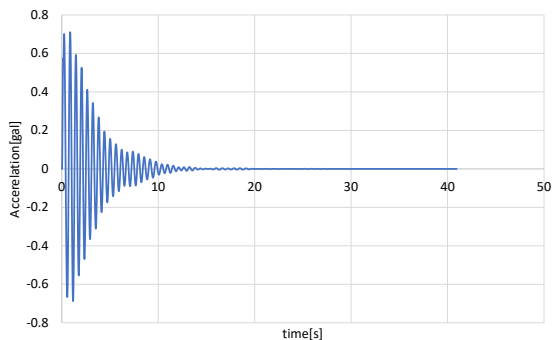


(1-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設1)

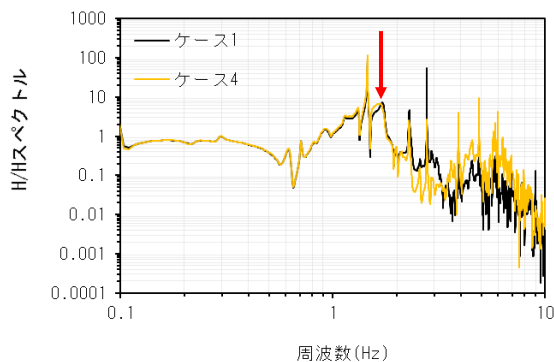


(1-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設1)

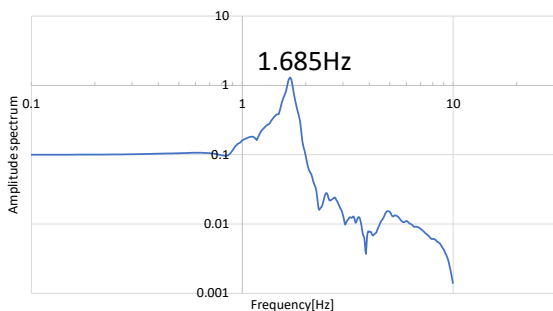
(1) 施設1の結果



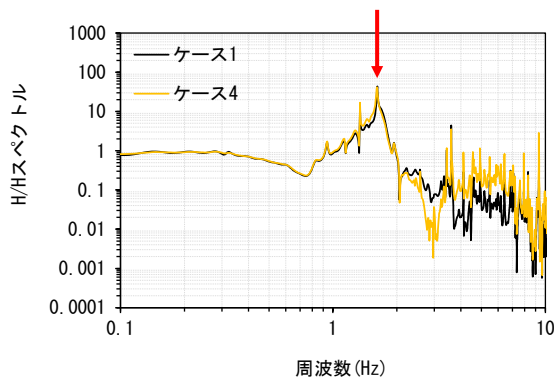
(2-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設2_Case OFF)



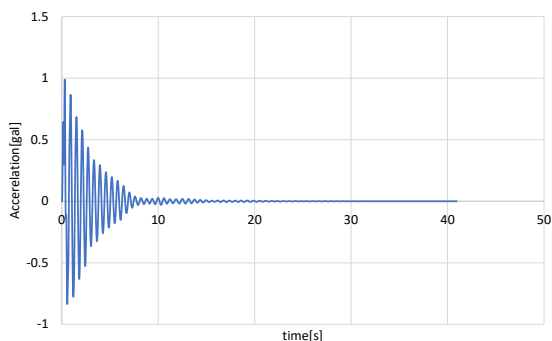
(2-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設2)



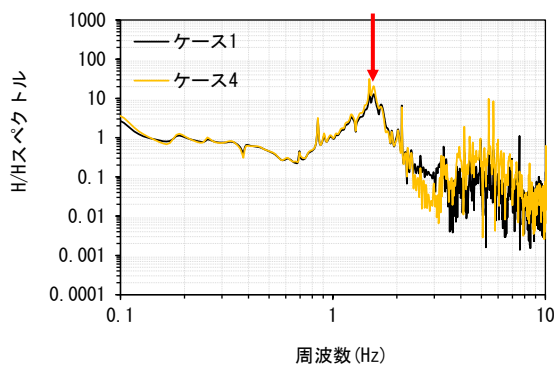
(2-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設2_Case OFF)



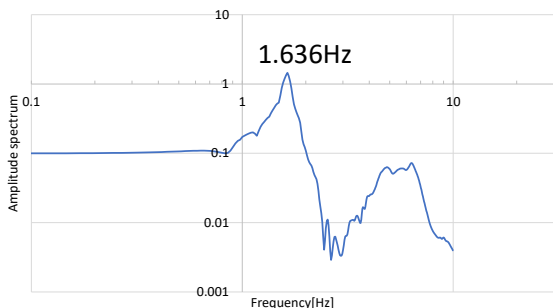
(2-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設2)



(2-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設2_Case ON)

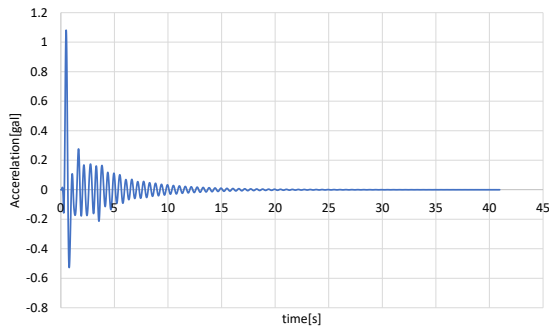


(2-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設2)

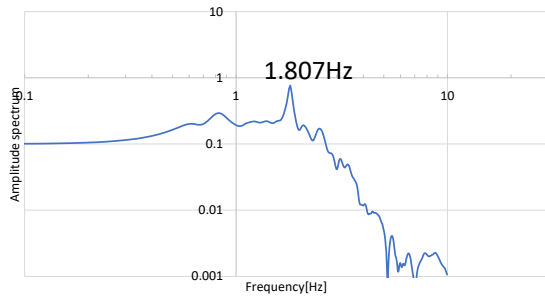


(2-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設2_Case ON)

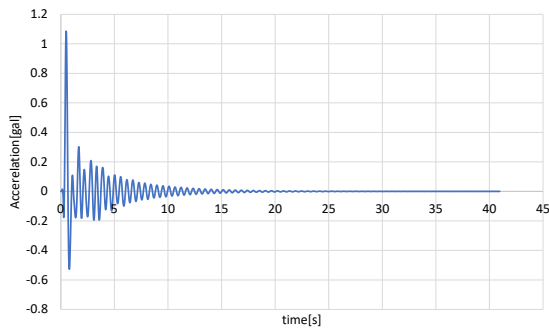
(2) 施設2の結果



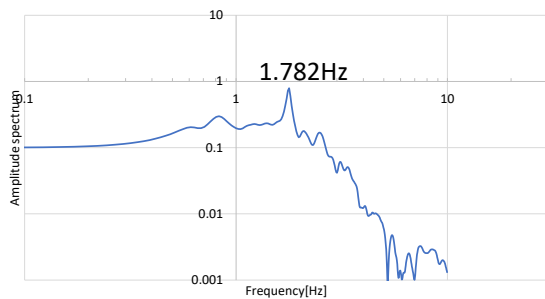
(3-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設3_Case OFF)



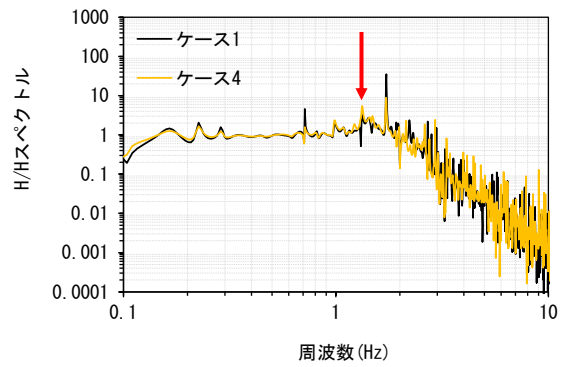
(3-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設3_Case OFF)



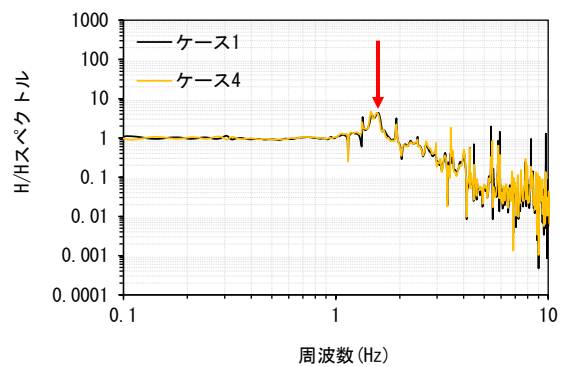
(3-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設3_Case ON)



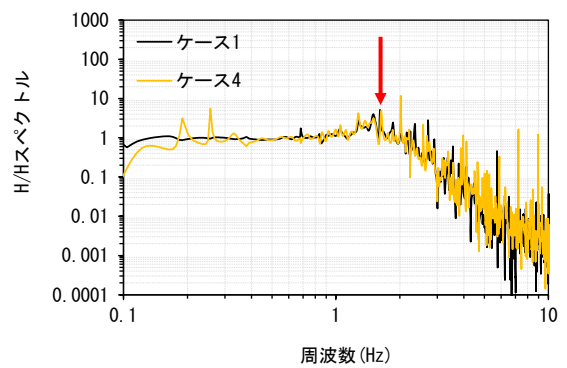
(3-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設3_Case ON)



(3-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設3)

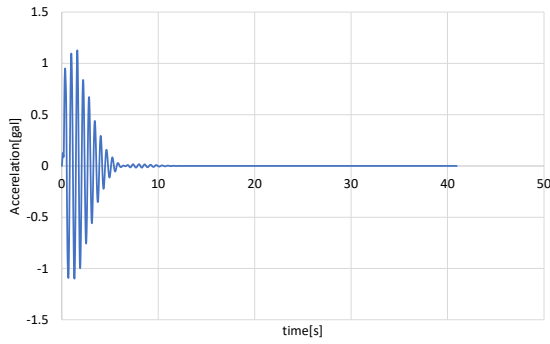


(3-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設3)

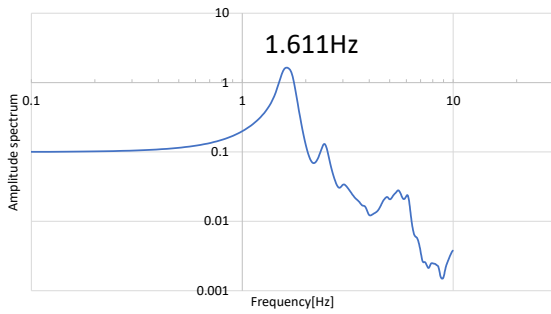


(3-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設3)

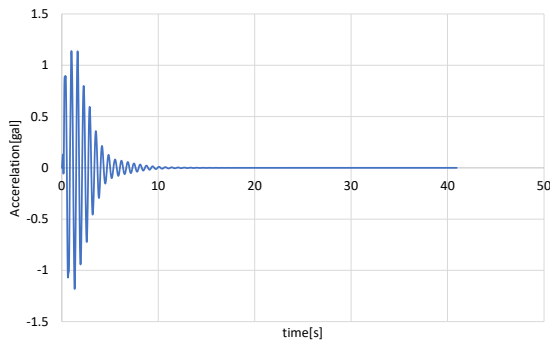
(3) 施設3の結果



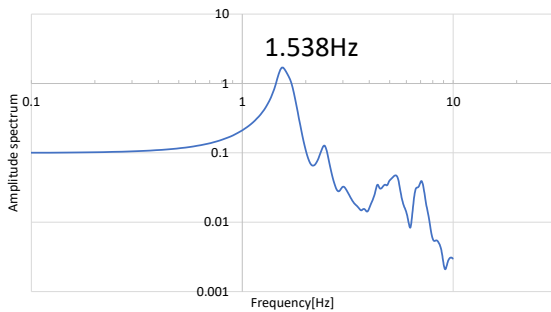
(4-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設4_Case OFF)



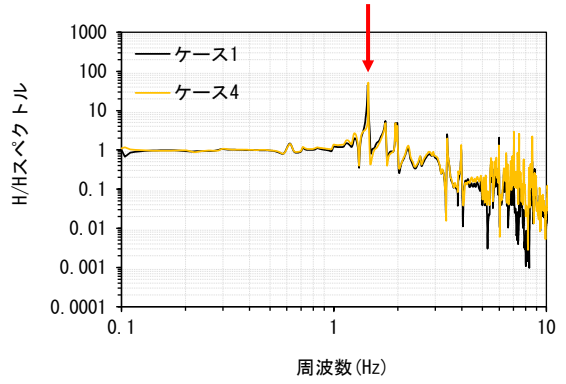
(4-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設4_Case OFF)



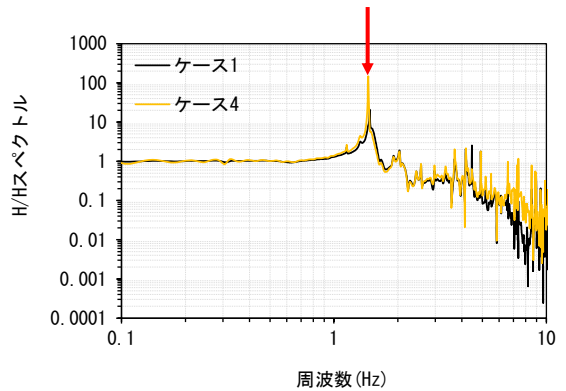
(4-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設4_Case ON)



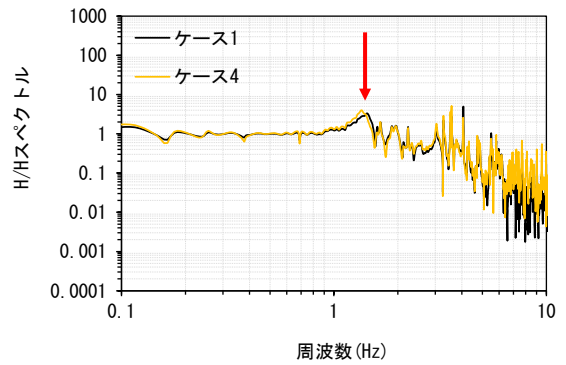
(4-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設4_Case ON)



(4-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設4)

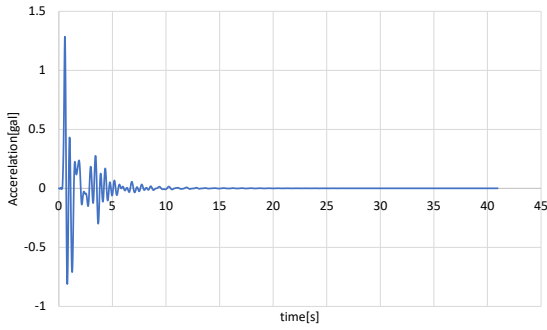


(4-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設4)

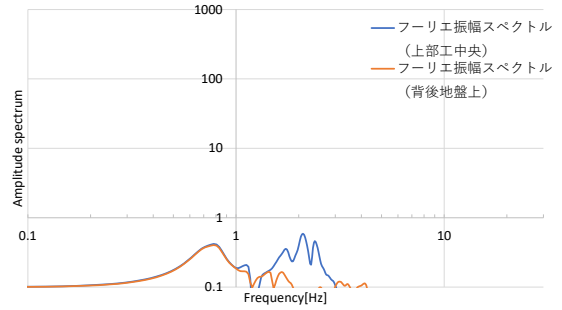


(4-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設4)

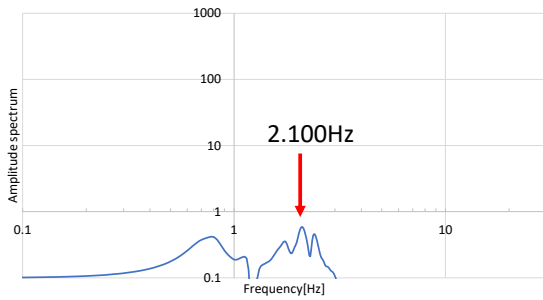
(4) 施設4の結果



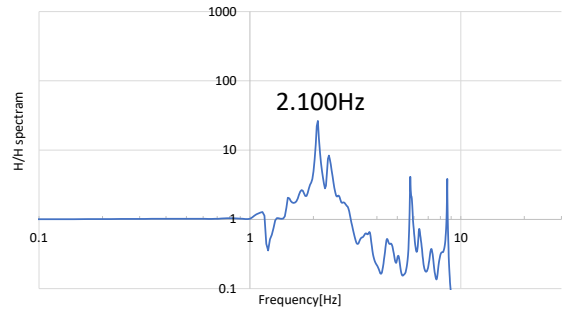
(5-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設5_Case OFF)



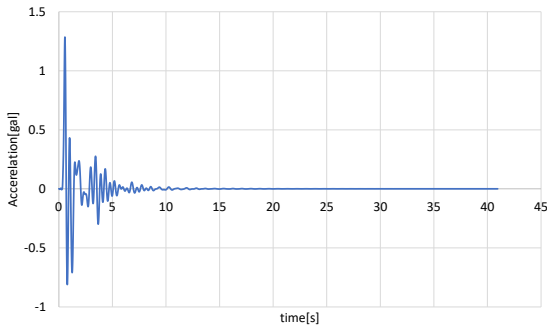
(5-e) 背後地盤上のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設5_Case ON)



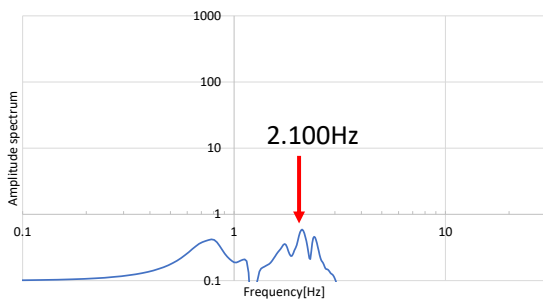
(5-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設5_Case OFF)



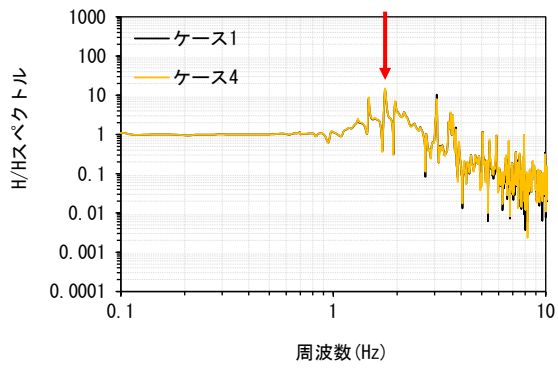
(5-f) H/H スペクトル
(Impulse波_施設5_Case ON)



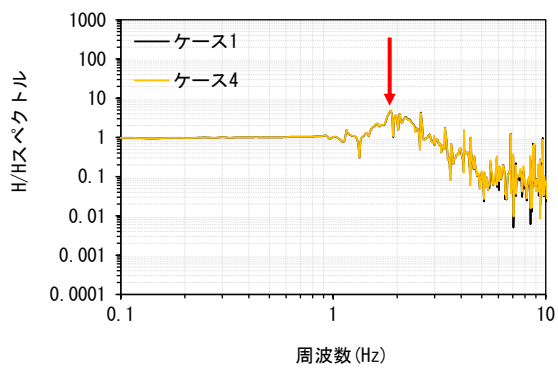
(5-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設5_Case ON)



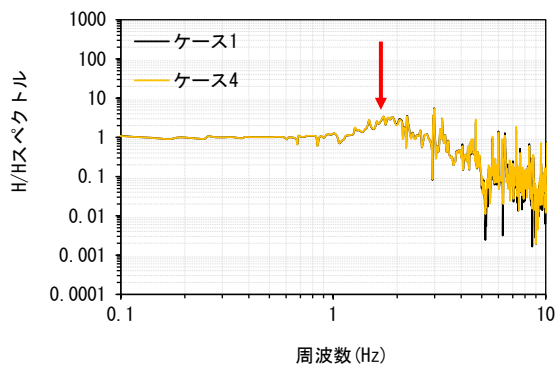
(5-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設5_Case ON)



(5-g) H/H スペクトル
(八戸波_施設 5)

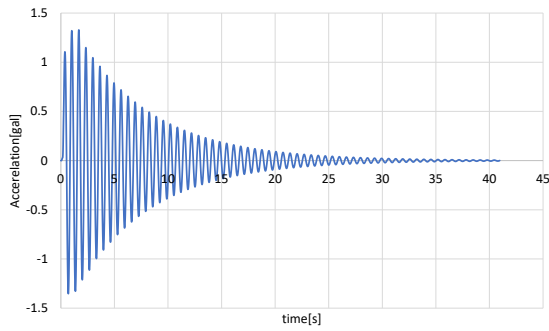


(5-h) H/H スペクトル
(大船渡波_施設 5)

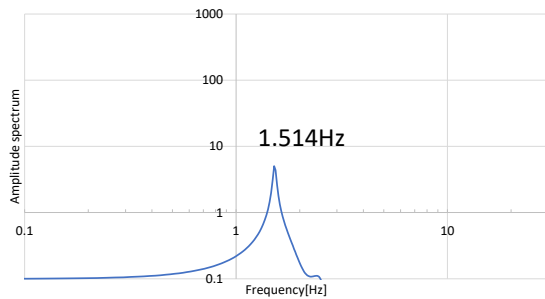


(5-i) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設 5)

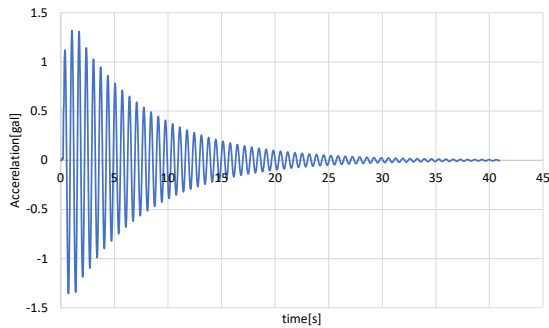
(5) 施設 5 の結果



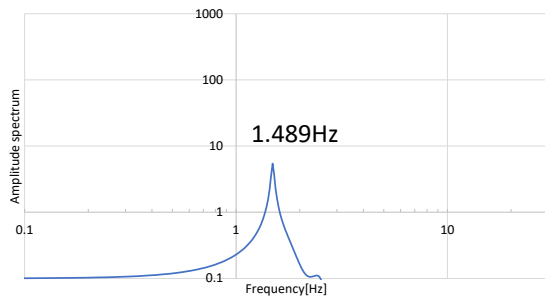
(6-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設6_Case OFF)



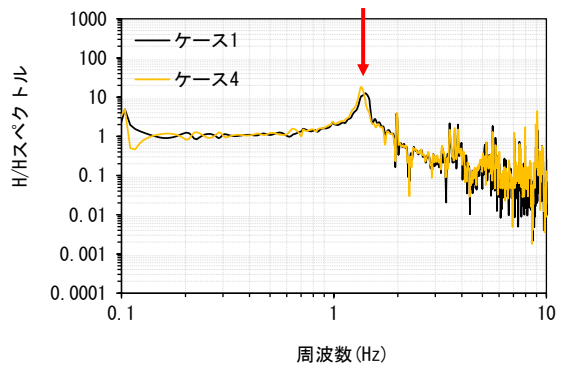
(6-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設6_Case OFF)



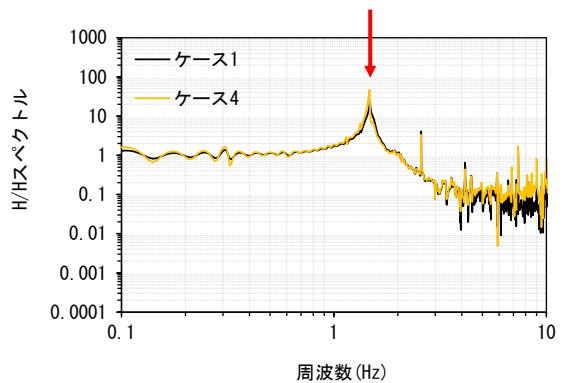
(6-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設6_Case ON)



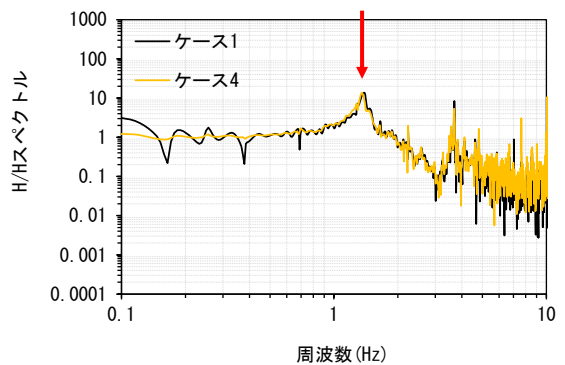
(6-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設6_Case ON)



(6-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設6)

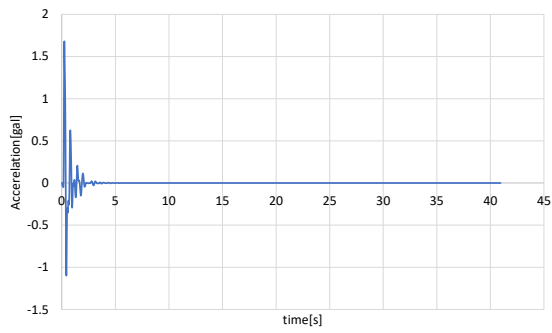


(6-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設6)

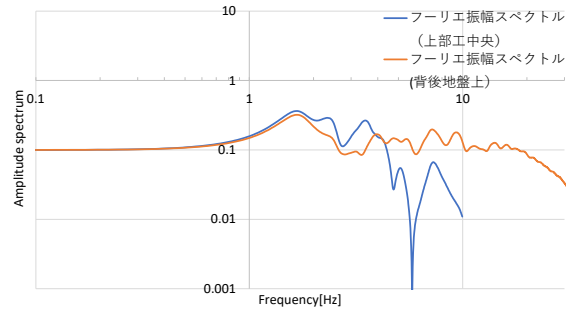


(6-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設6)

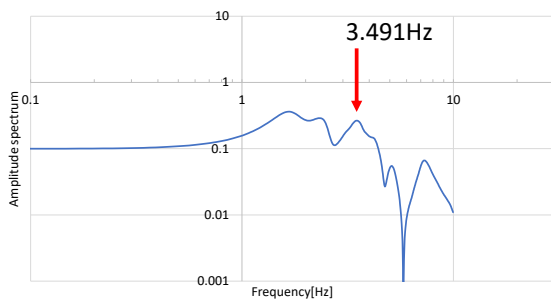
(6) 施設6の栈橋の結果



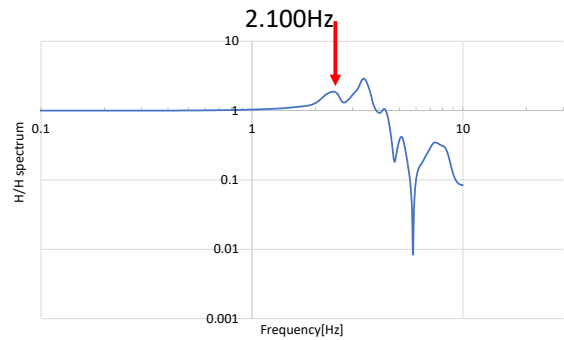
(7-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設7_Case OFF)



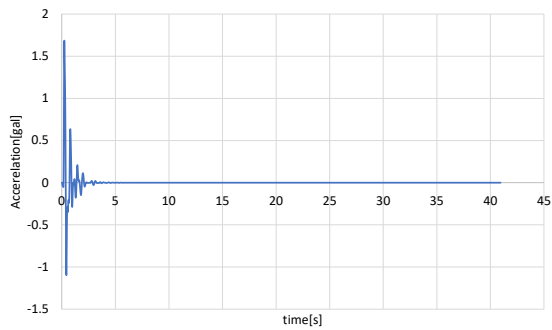
(7-e) 背後地盤上のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設7_Case ON)



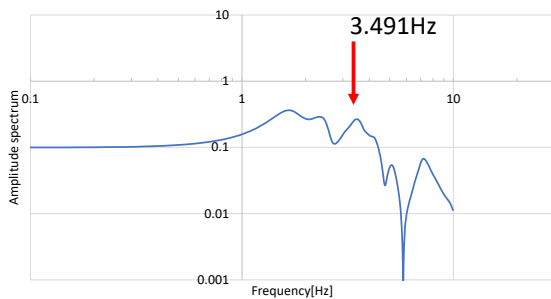
(7-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設7_Case OFF)



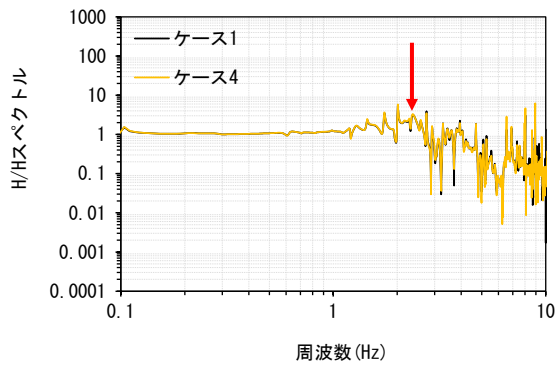
(7-f) H/H スペクトル
(Impulse波_施設7_Case ON)



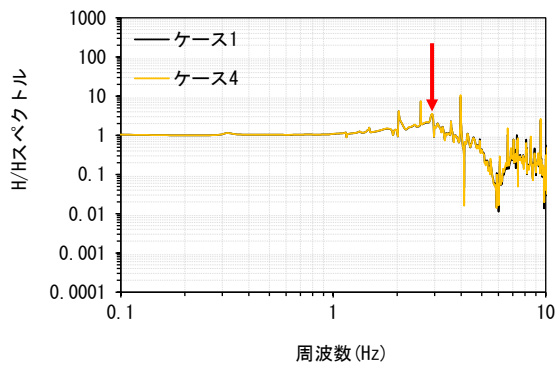
(7-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設7_Case ON)



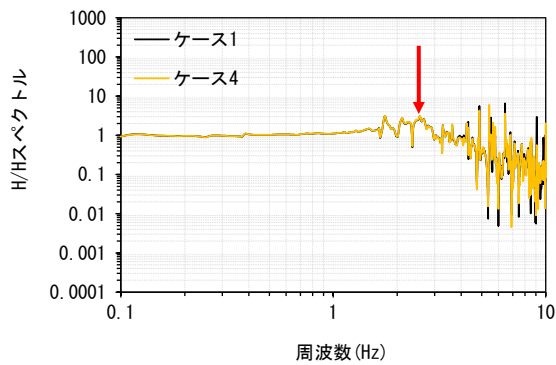
(7-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設7_Case ON)



(7-g) H/H スペクトル
(八戸波_施設 7)

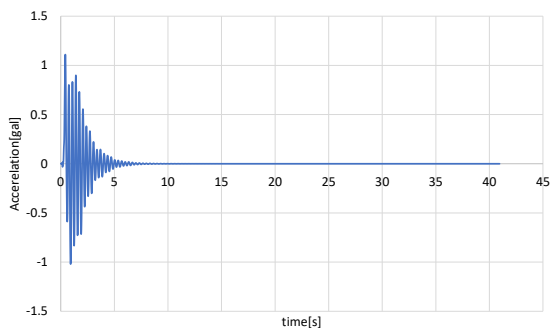


(7-h) H/H スペクトル
(大船渡波_施設 7)

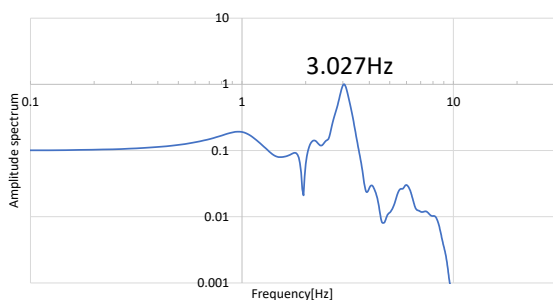


(7-i) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設 7)

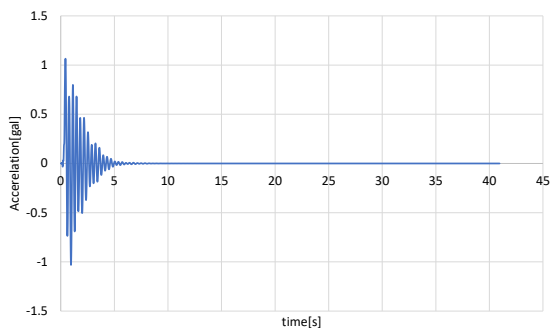
(7) 施設 7 の結果



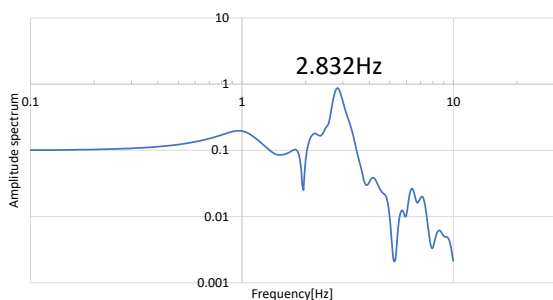
(8-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設8_Case OFF)



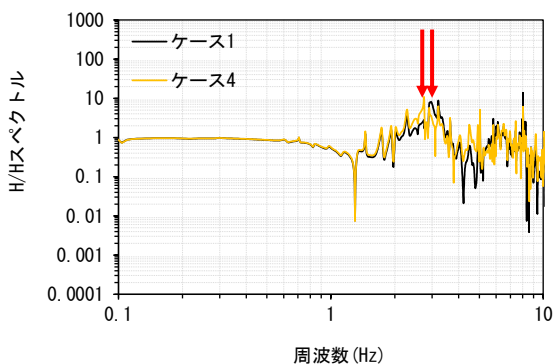
(8-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設8_Case OFF)



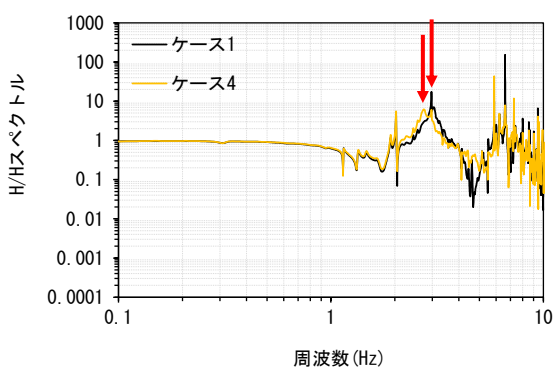
(8-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設8_Case ON)



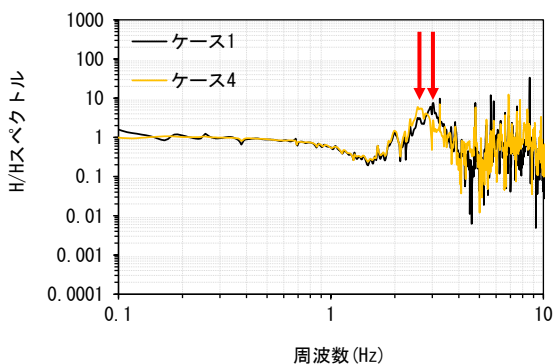
(8-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設8_Case ON)



(8-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設8)

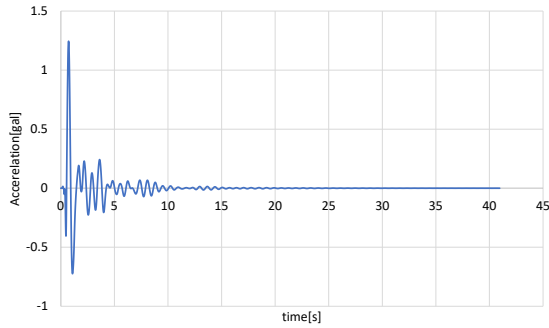


(8-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設8)

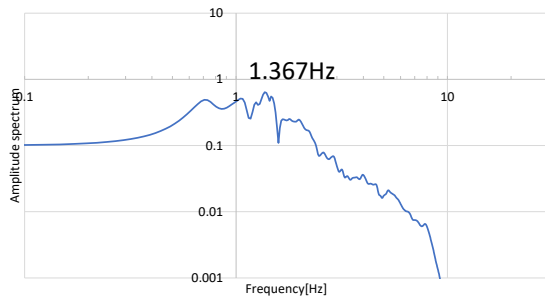


(8-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設8)

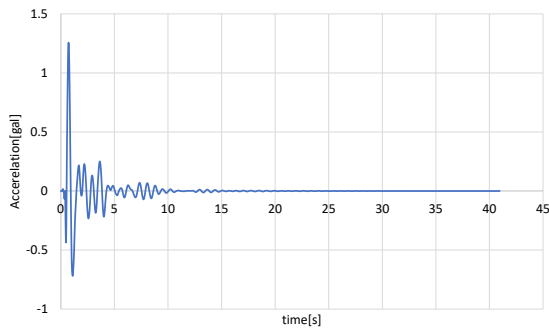
(8) 施設8の結果



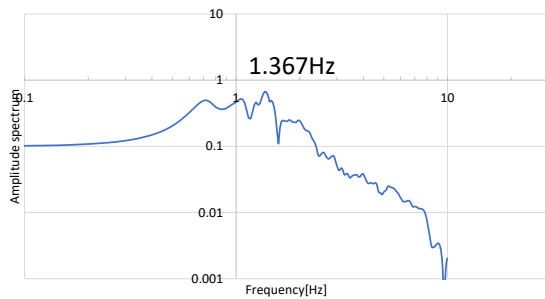
(9-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設9_Case OFF)



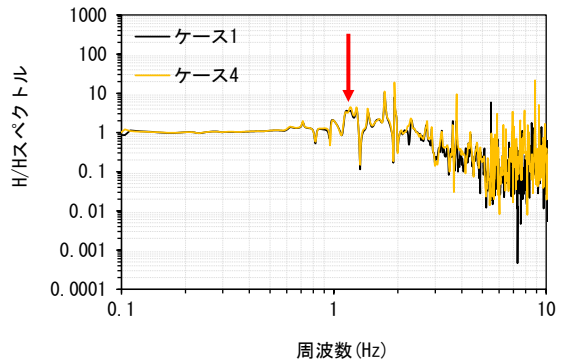
(9-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設9_Case OFF)



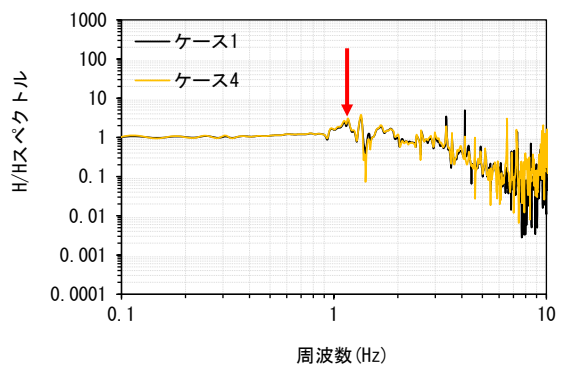
(9-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設9_Case ON)



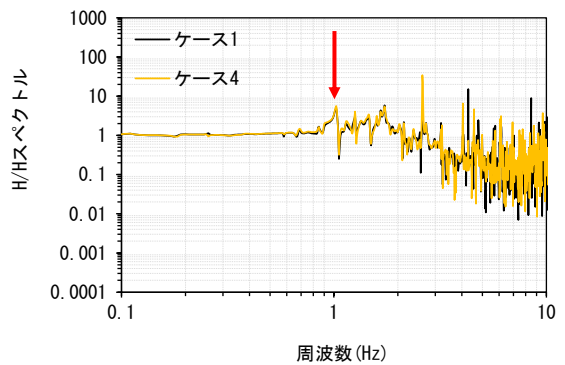
(9-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設9_Case ON)



(9-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設9)

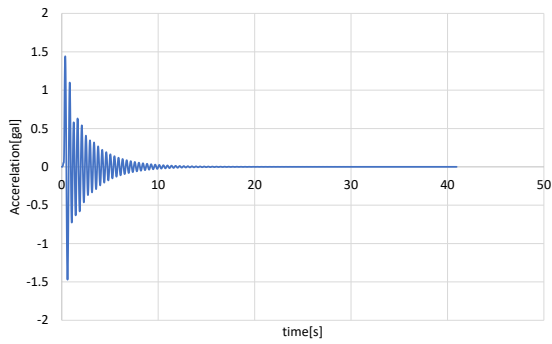


(9-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設9)

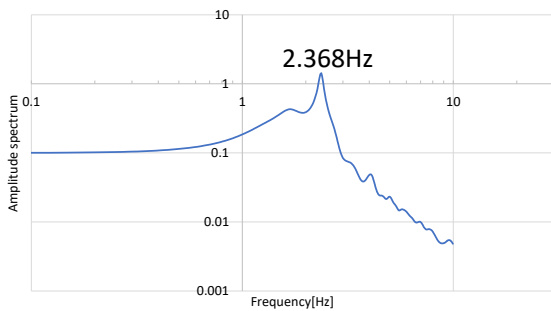


(9-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設9)

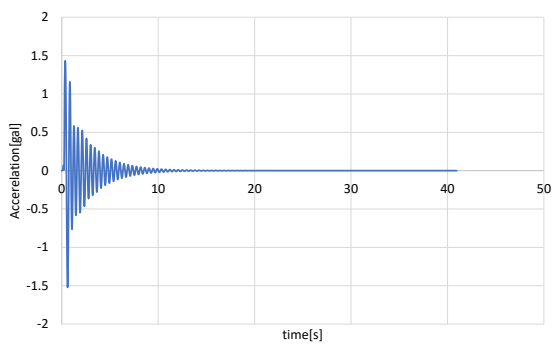
(9) 施設9の結果



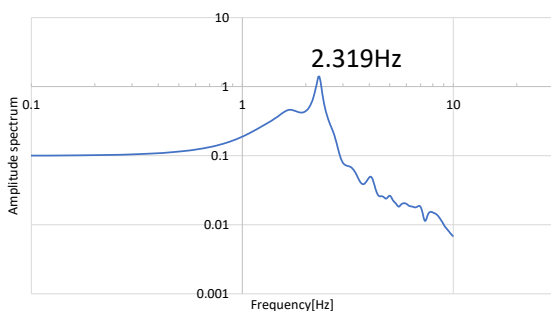
(10-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 10_Case OFF)



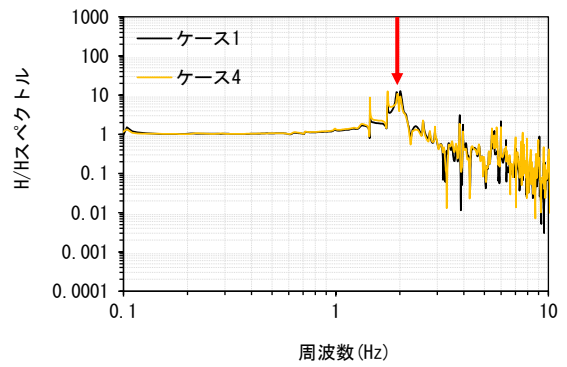
(10-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 10_Case OFF)



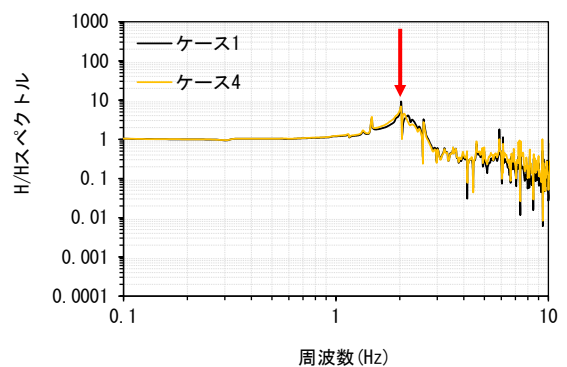
(10-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 10_Case ON)



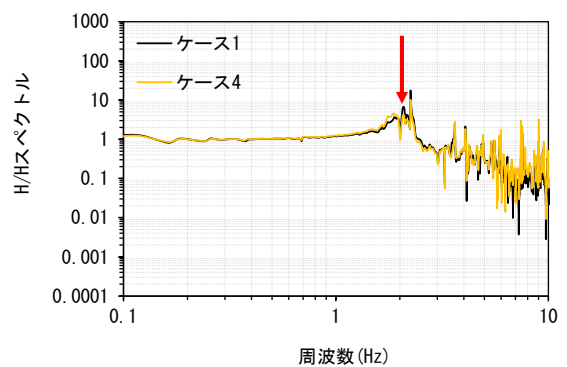
(10-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 10_Case ON)



(10-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設 10)

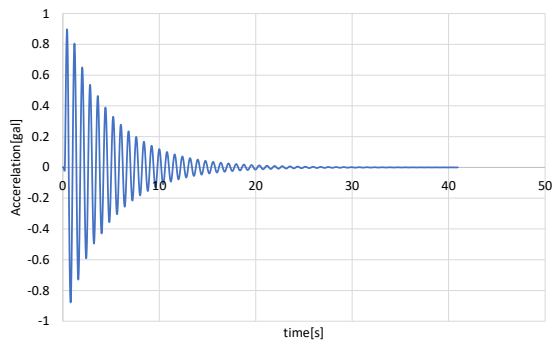


(10-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設 10)

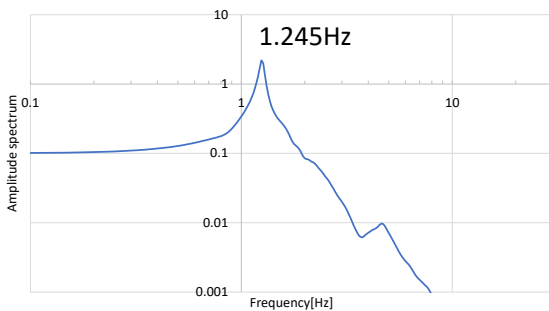


(10-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設 10)

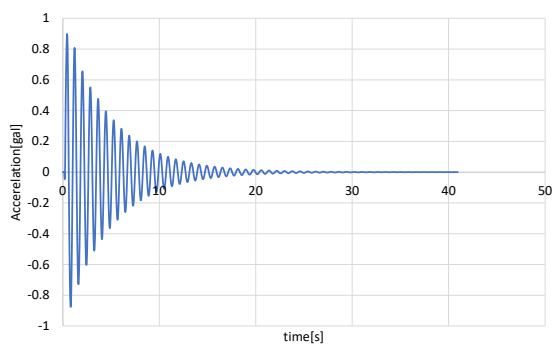
(10) 施設 10 の結果



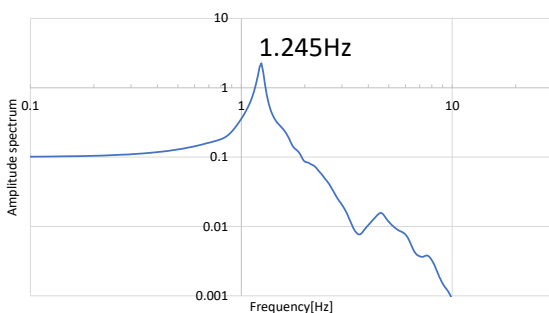
(11-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 11_Case OFF)



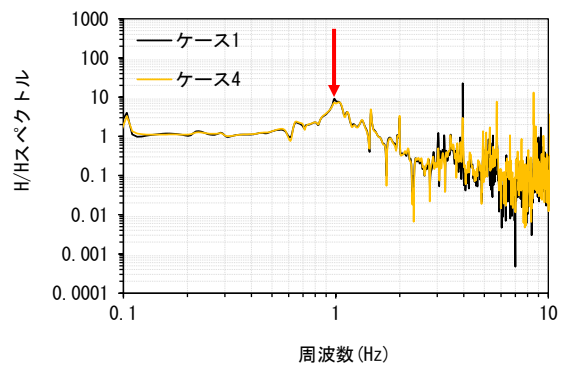
(11-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 11_Case OFF)



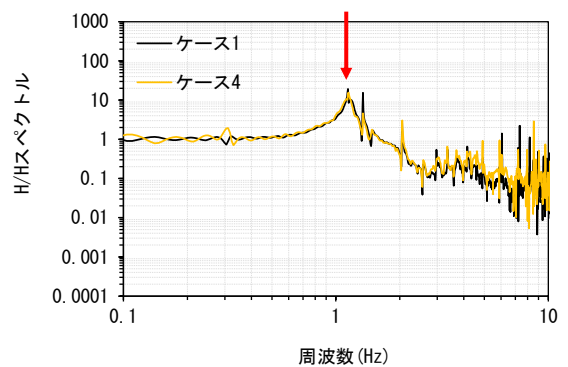
(11-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 11_Case ON)



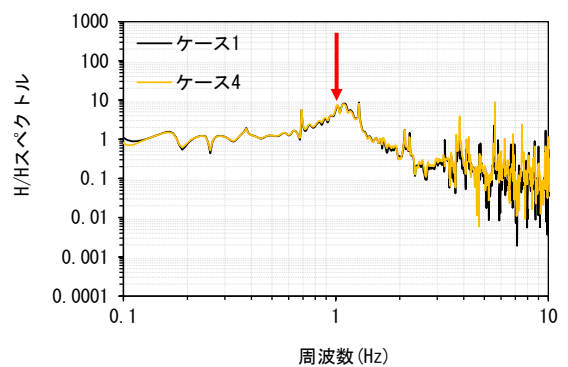
(11-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 11_Case ON)



(11-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設 11)

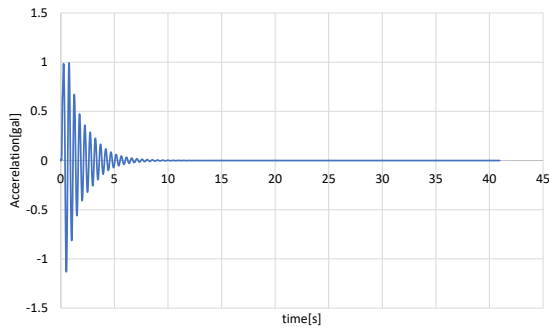


(11-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設 11)

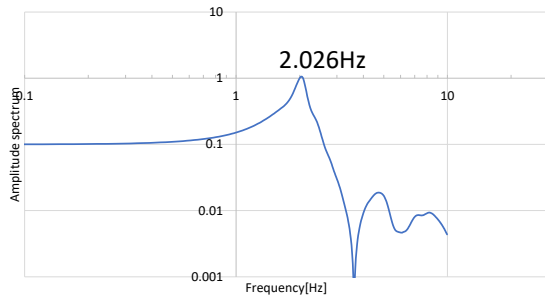


(11-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設 11)

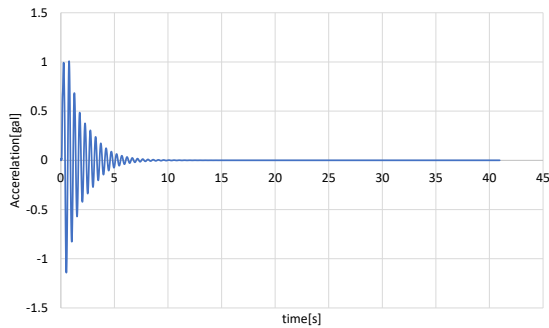
(11) 施設 11 の結果



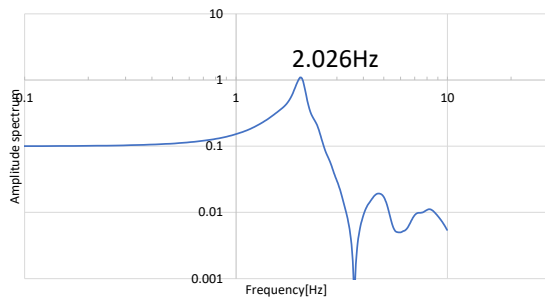
(12-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設12_Case OFF)



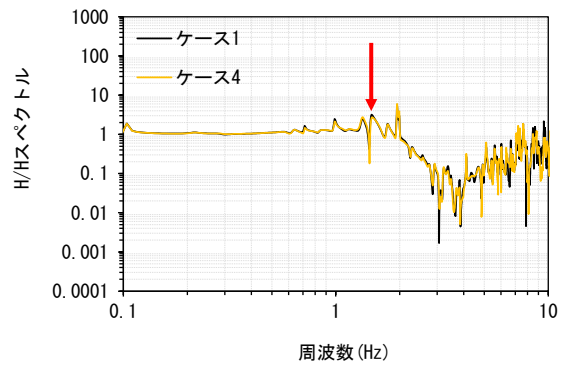
(12-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設12_Case OFF)



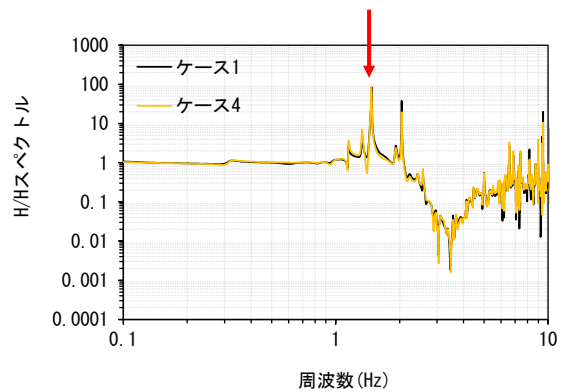
(12-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設12_Case ON)



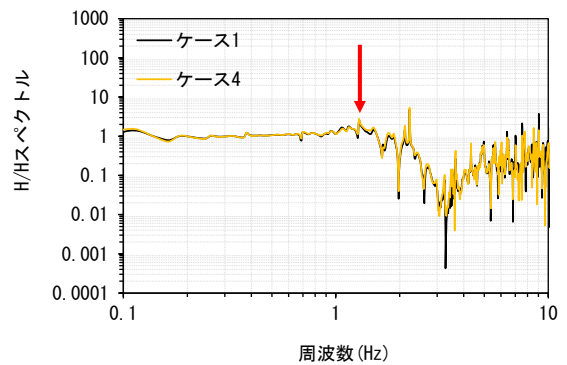
(12-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設12_Case ON)



(12-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設12)

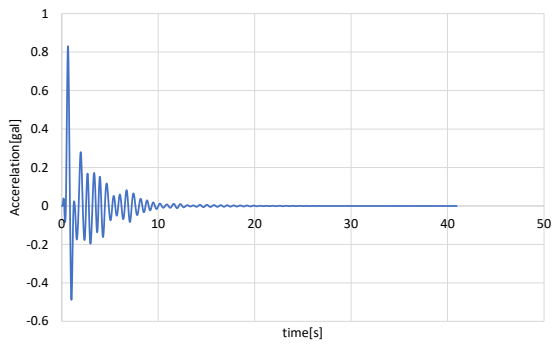


(12-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設12)

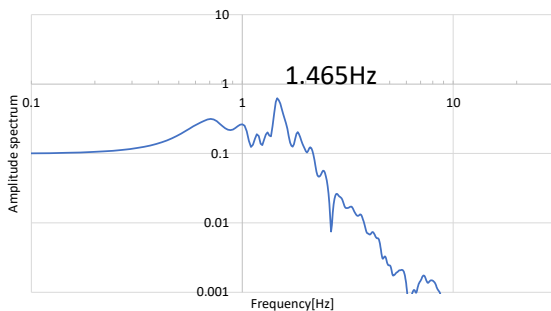


(12-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設12)

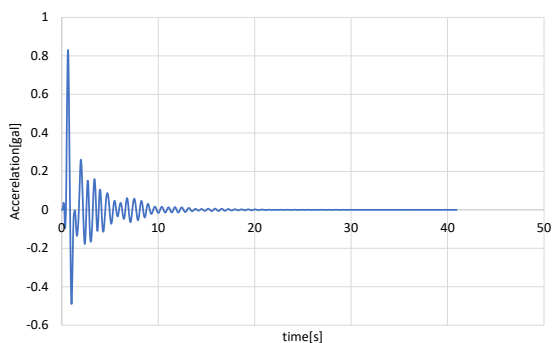
(12) 施設12の結果



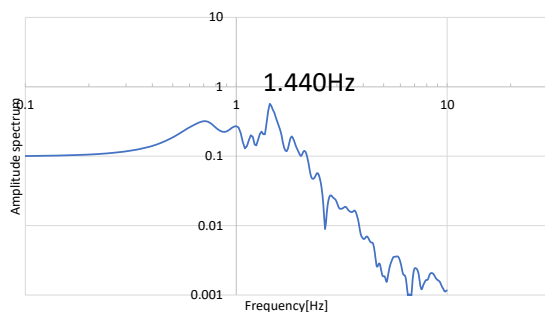
(13-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 13_Case OFF)



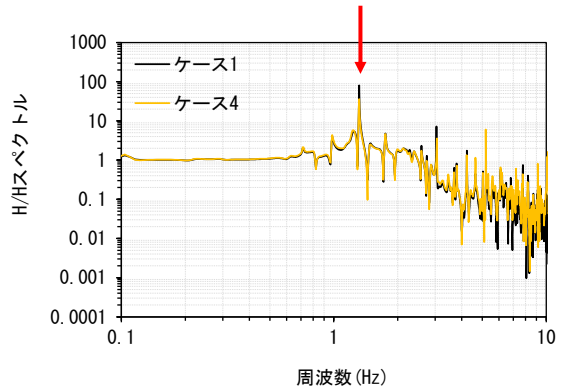
(13-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 13_Case OFF)



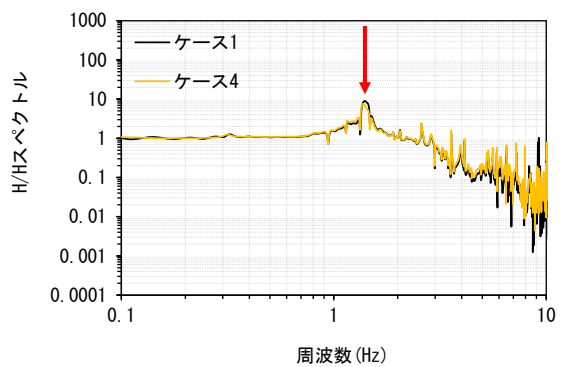
(13-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 13_Case ON)



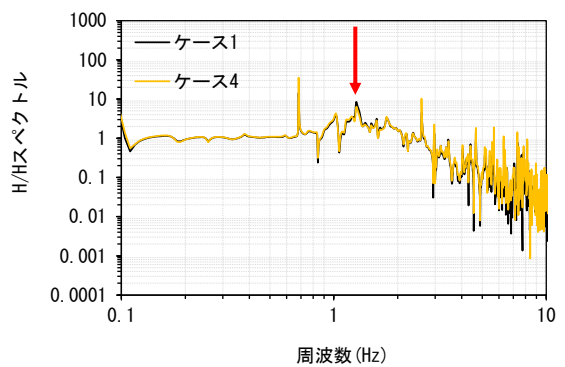
(13-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 13_Case ON)



(13-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設 13)

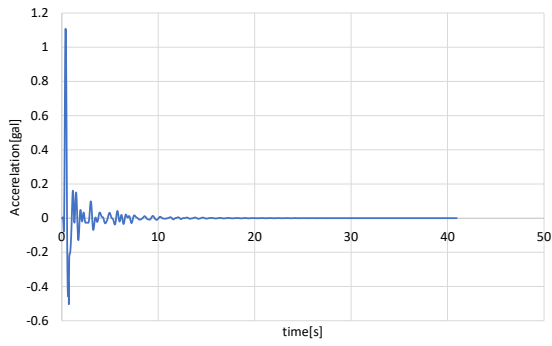


(13-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設 13)

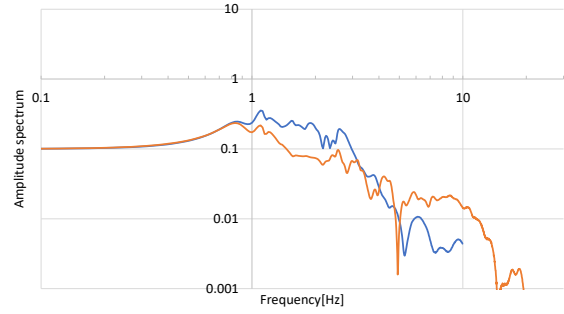


(13-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設 13)

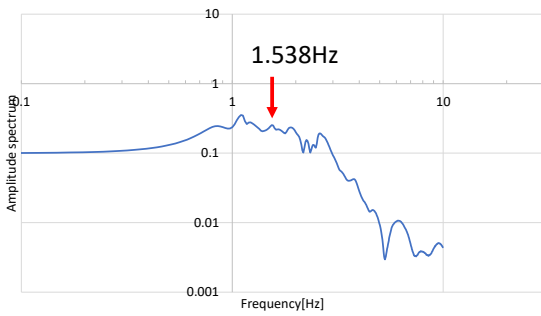
(13) 施設 13 の結果



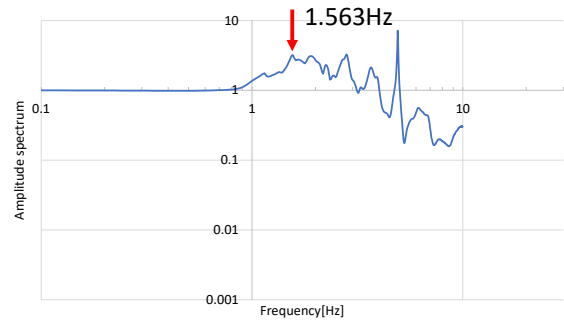
(14-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 14_Case OFF)



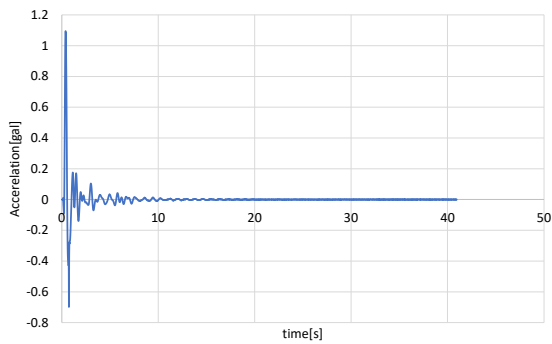
(14-e) 背後地盤上のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 14_Case OFF)



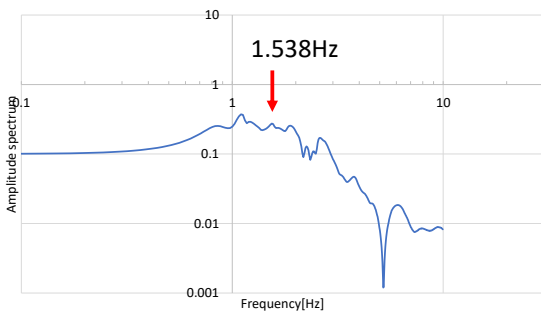
(14-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 14_Case OFF)



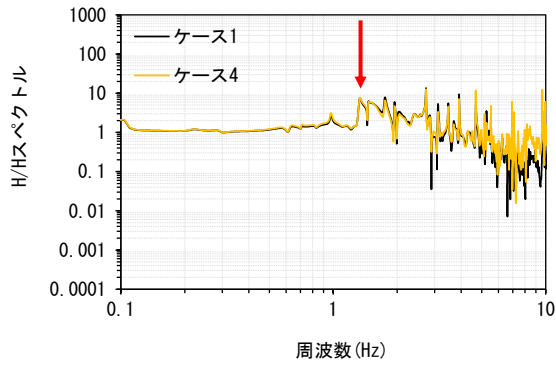
(14-f) H/H スペクトル
(Impulse波_施設 14_Case OFF)



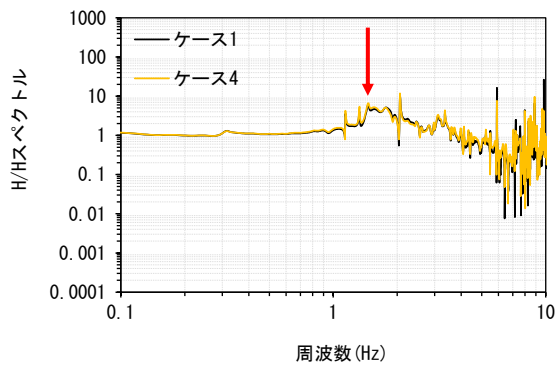
(14-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 14_Case ON)



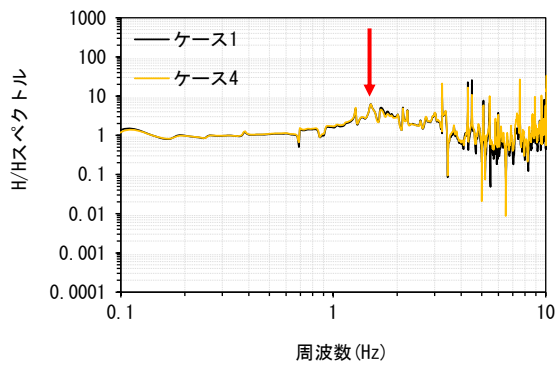
(14-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 14_Case ON)



(14-g) H/H スペクトル
(八戸波_施設 14)

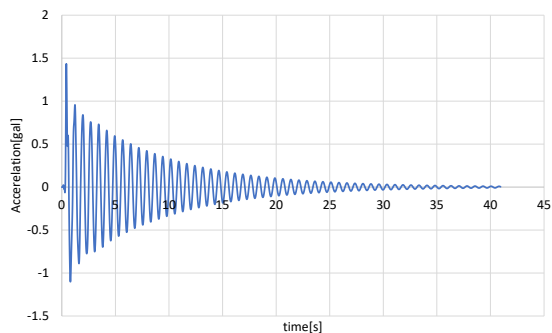


(14-h) H/H スペクトル
(大船渡波_施設 14)

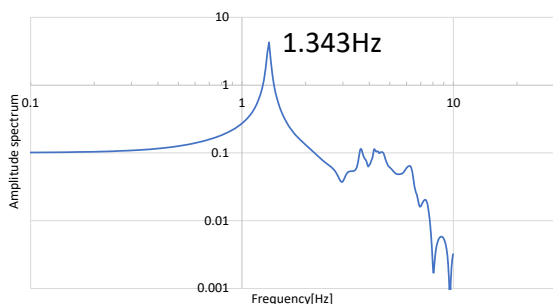


(14-i) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設 14)

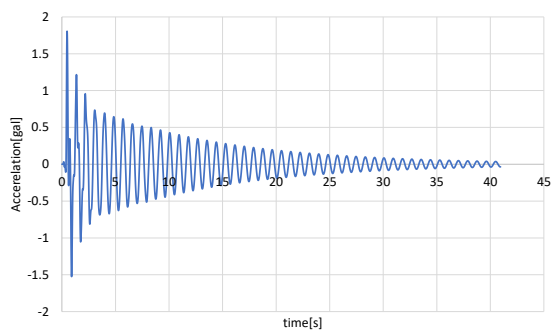
(14) 施設 14 の結果



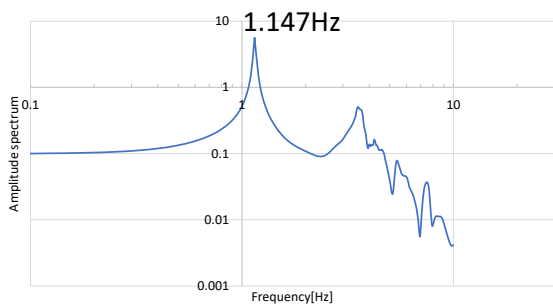
(15-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 15_Case OFF)



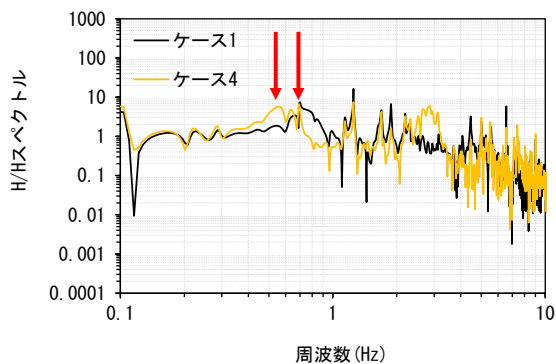
(15-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 15_Case OFF)



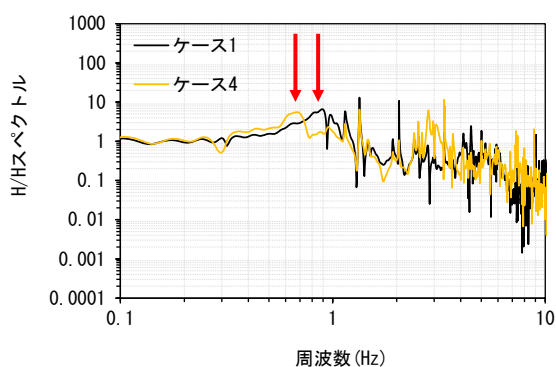
(15-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 15_Case ON)



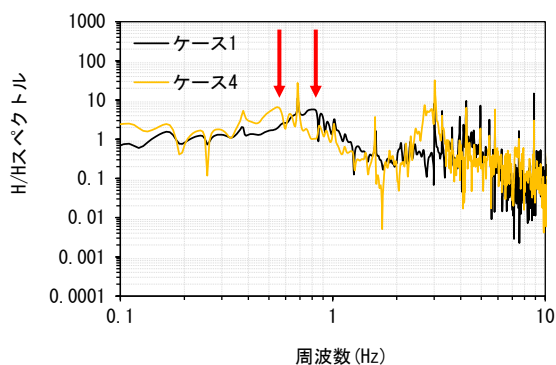
(15-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 15_Case ON)



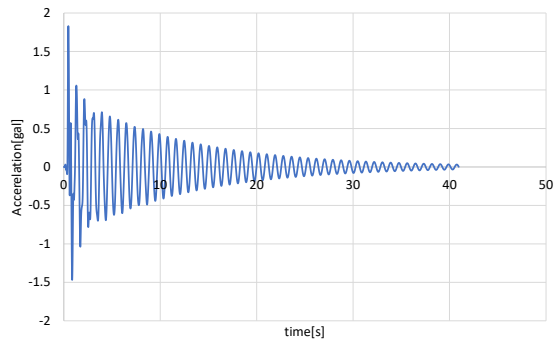
(15-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設 15)



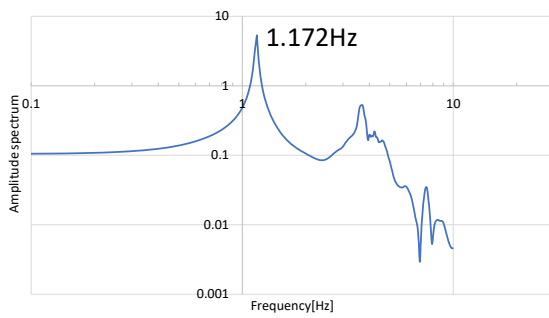
(15-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設 15)



(15-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設 15)

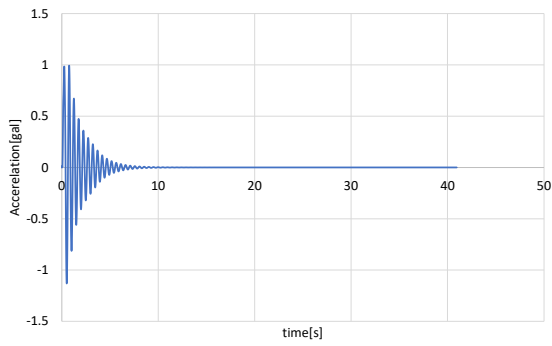


(15-h) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設15_Case ON_鋼管トラス部材の管
内水考慮なし・浮力考慮)

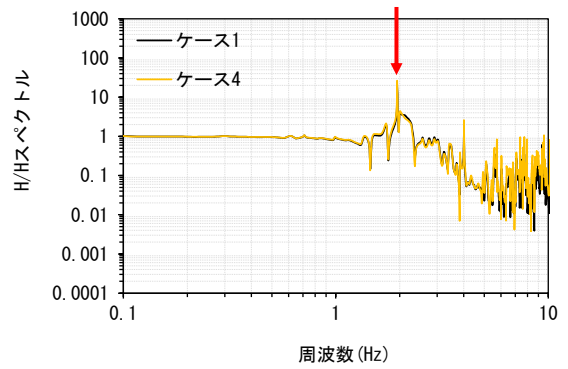


(15-f) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設15_Case ON_鋼管トラス部材の管
内水考慮なし・浮力考慮)

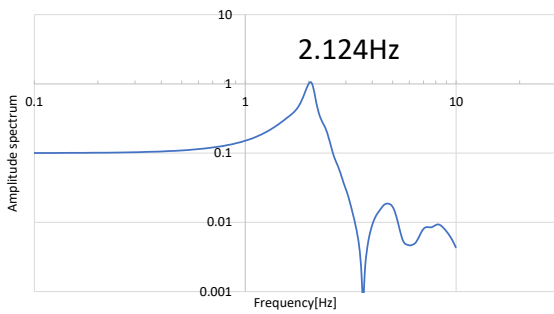
(15) 施設15の結果



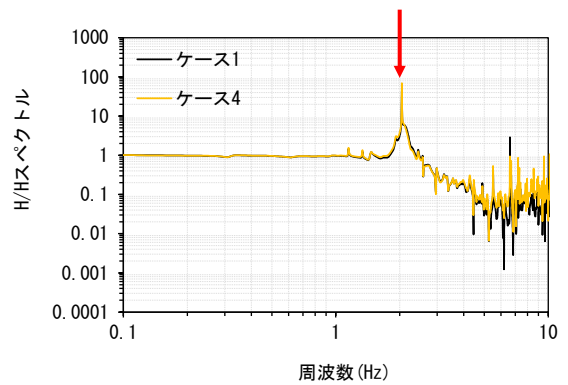
(16-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 16_Case OFF)



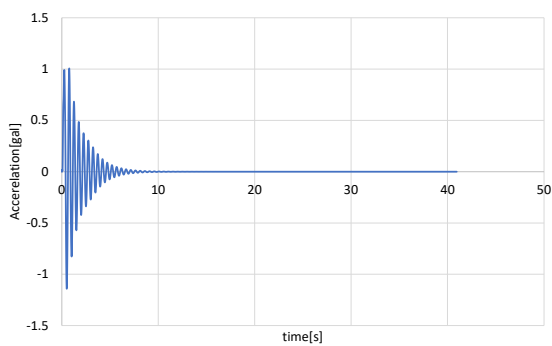
(16-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設 16)



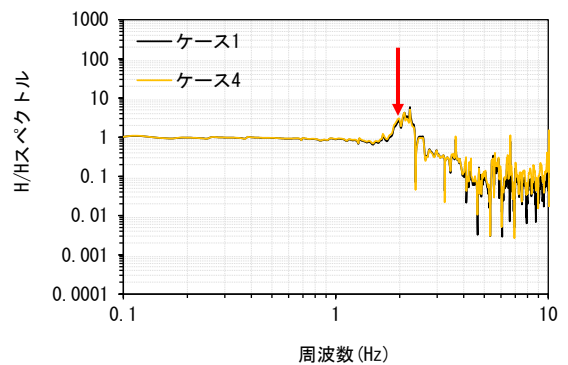
(16-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 16_Case OFF)



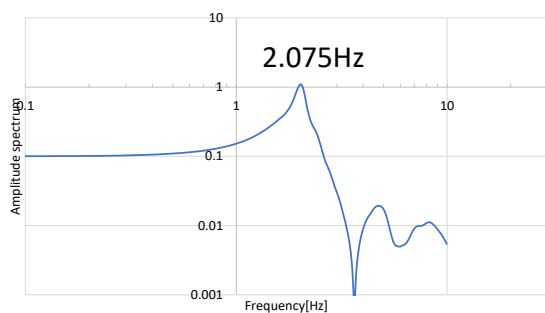
(16-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設 16)



(16-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 16_Case ON)

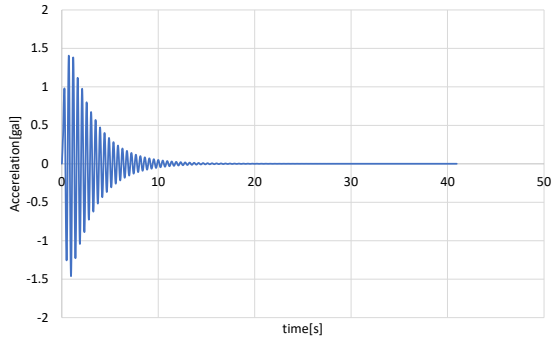


(16-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設 16)

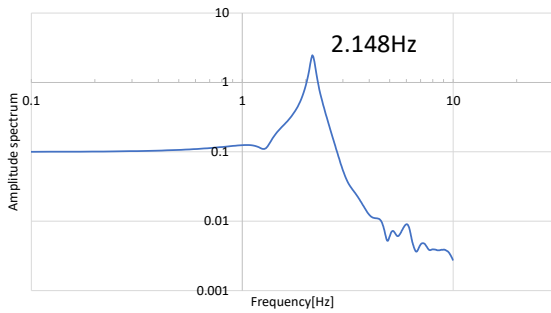


(16-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 16_Case ON)

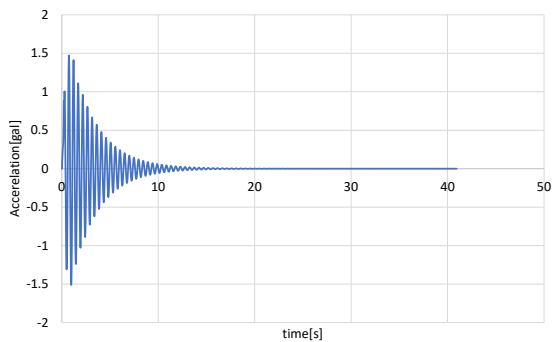
(16) 施設 16 の結果



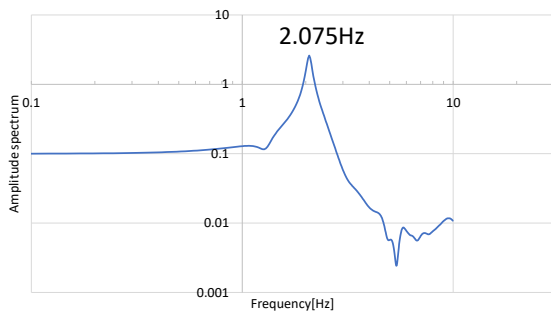
(17-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設17_Case OFF)



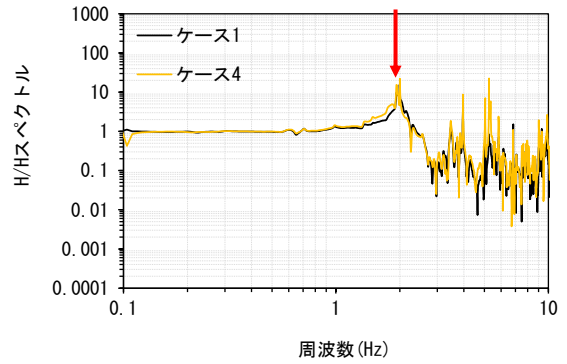
(17-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設17_Case OFF)



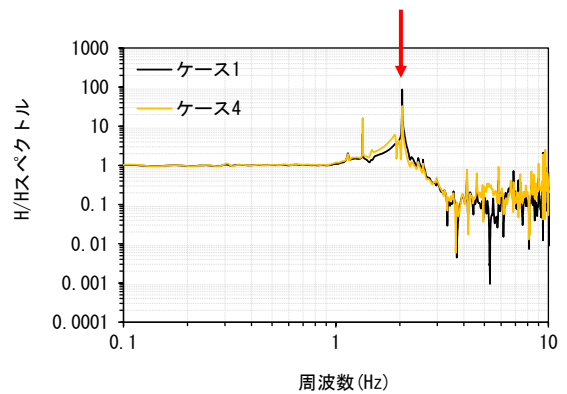
(17-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設17_Case ON)



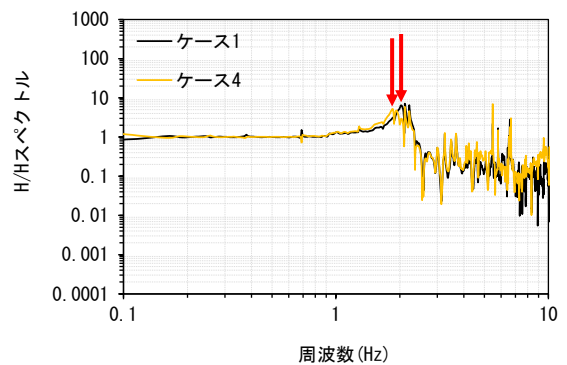
(17-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設17_Case ON)



(17-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設17)

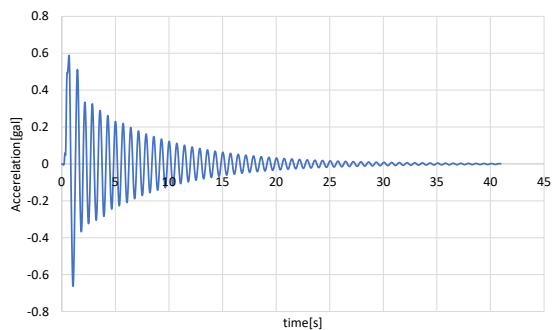


(17-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設17)

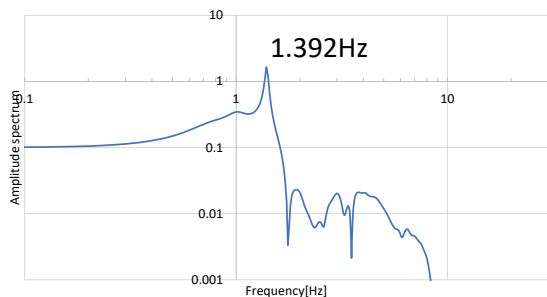


(17-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設17)

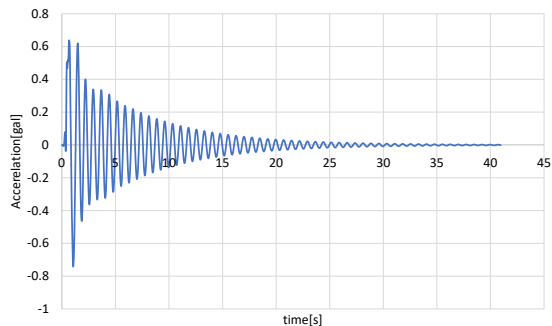
(17) 施設17の結果



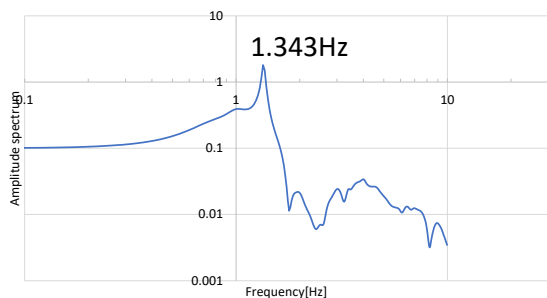
(18-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 18_Case OFF)



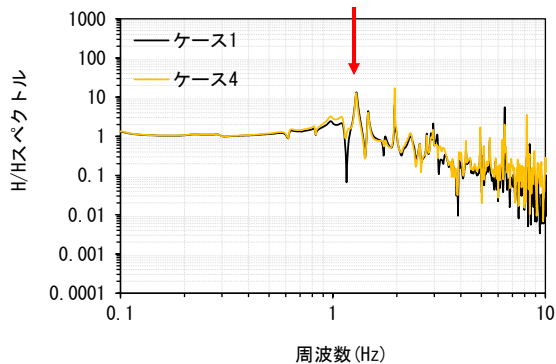
(18-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 18_Case OFF)



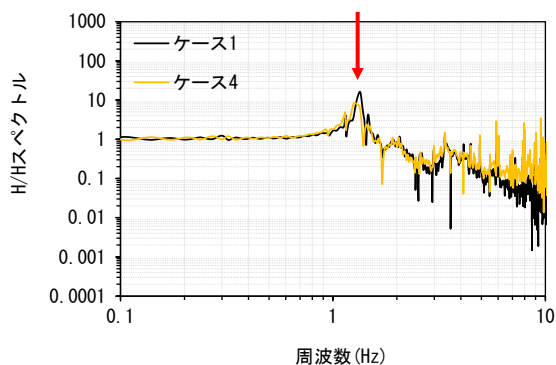
(18-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 18_Case ON)



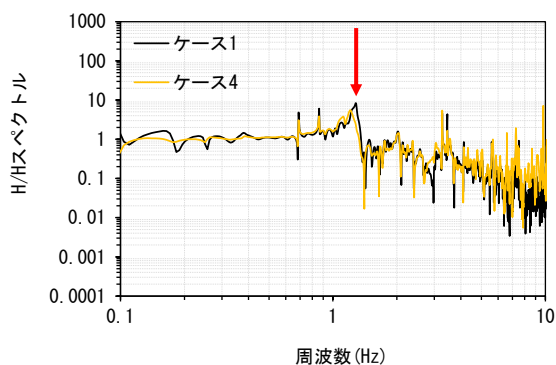
(18-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 18_Case ON)



(18-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設 18)

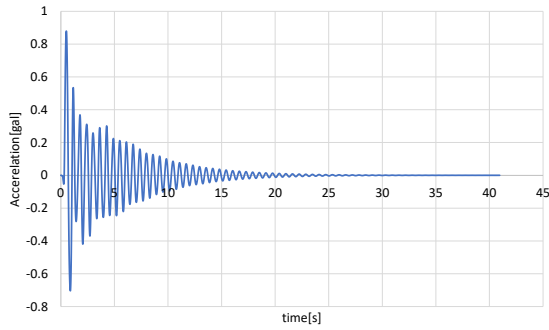


(18-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設 18)

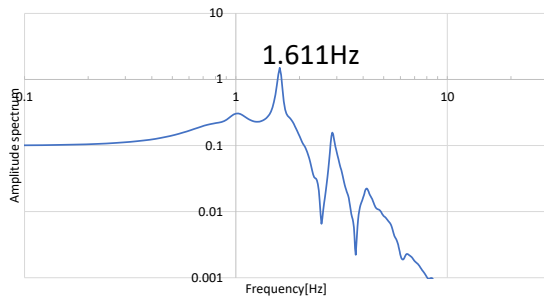


(18-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設 18)

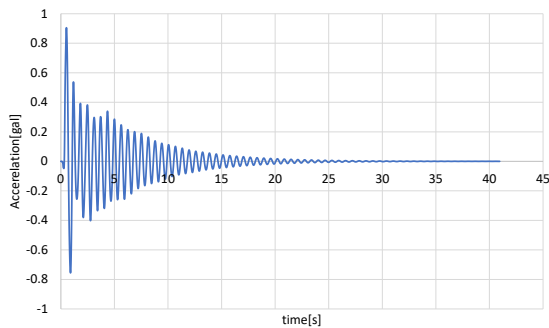
(18) 施設 18 の栈橋の結果



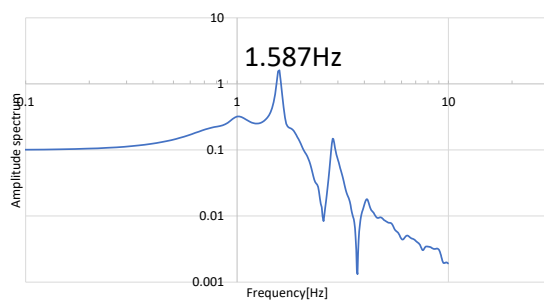
(19-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse 波_施設 19_Case OFF)



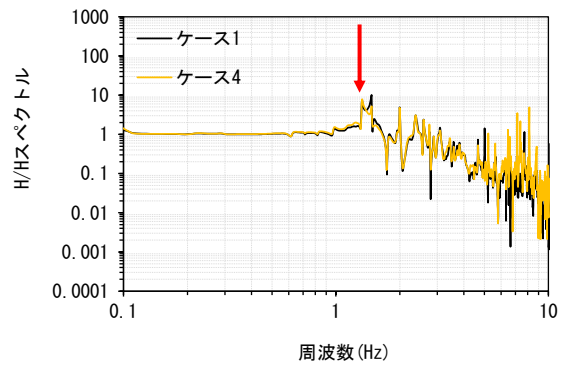
(19-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse 波_施設 19_Case OFF)



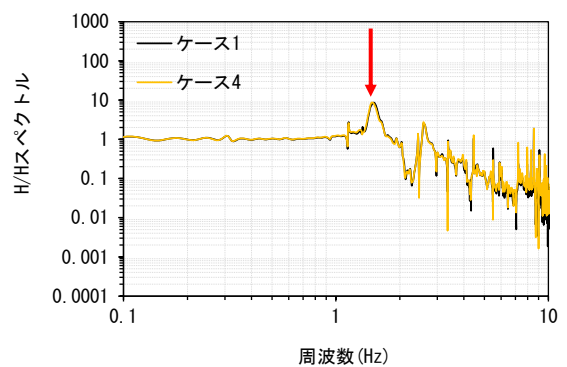
(19-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse 波_施設 19_Case ON)



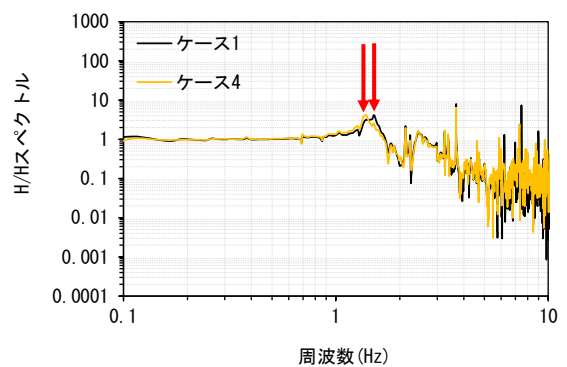
(19-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse 波_施設 19_Case ON)



(19-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設 19)

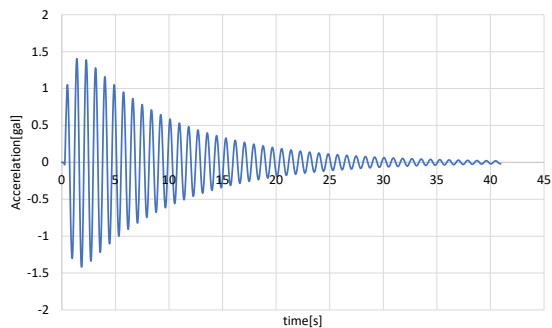


(19-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設 19)

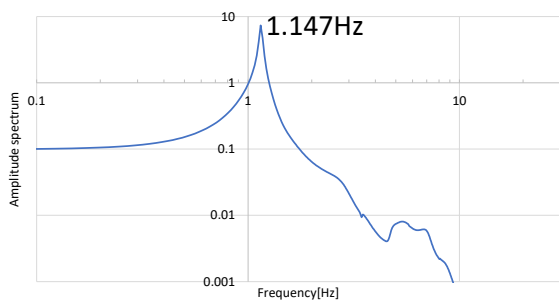


(19-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設 19)

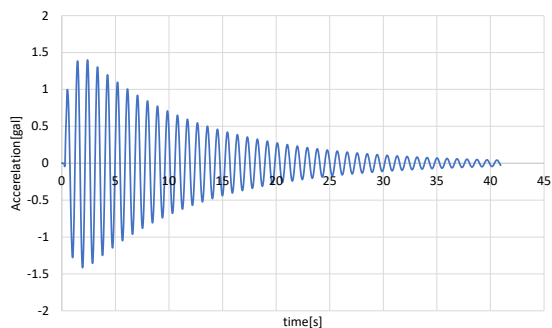
(19) 施設 19 の結果



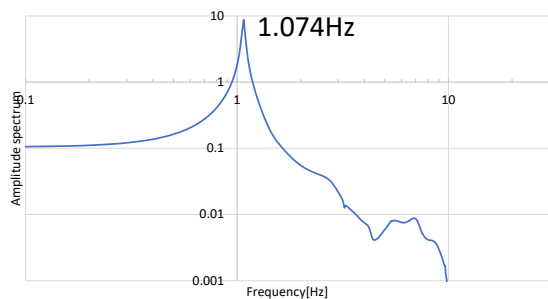
(20-a) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 20_Case OFF)



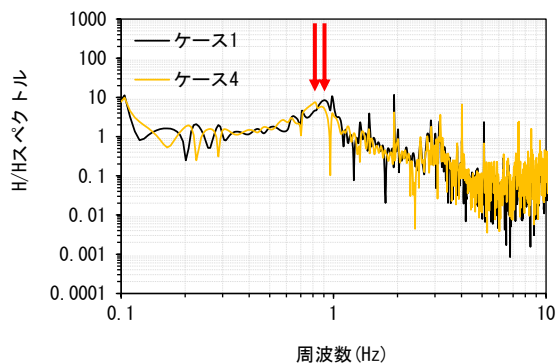
(20-b) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 20_Case OFF)



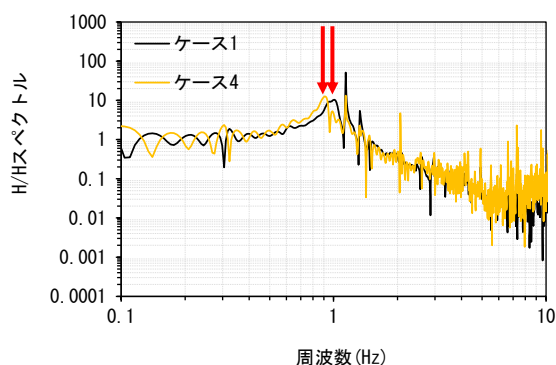
(20-c) 上部工中央位置の加速度時刻歴
(Impulse波_施設 20_Case ON)



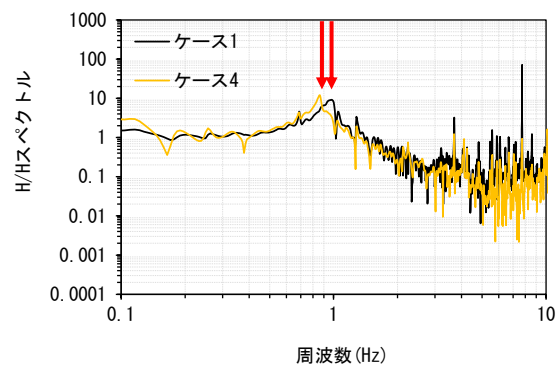
(20-d) 上部工中央位置のフーリエ振幅スペクトル
(Impulse波_施設 20_Case ON)



(20-e) H/H スペクトル
(八戸波_施設 20)



(20-f) H/H スペクトル
(大船渡波_施設 20)



(20-g) H/H スペクトル
(ポートアイランド波_施設 20)

(20) 施設 20 の結果

図には、固有周期を示すと考えられたピーク位置を矢印で示している。一方で、地震動を入力した結果については、ピーク位置そのものが不明瞭な場合（詳細は以後の施設毎の結果の説明（付録C）の中で示す）が少なくなく、その場合は Impulse 波を入力して特定した栈橋固有周期を参考にして、それらしいピーク位置に定めて図中に示している。そのため、地震動を入力した結果で、ピークが明瞭でない場合において、矢印で図中に示したピーク位置の信頼性は高くないと考えられる。

付録 C 断面毎の結果の説明

断面毎の結果について記述する。なお、付録 B で示したフーリエ振幅スペクトルや H/H スペクトルの横軸は周波数[Hz]であることから、付録 B の図と対応付けて説明するため、固有周期[s]ではなく、周波数[Hz]で、本付録では説明する。なお、本付録以外では、基本的に固有周期[s]で説明をしている。固有周期[s]と固有振動数[Hz]は、互いに逆数の関係にあり、固有振動数[Hz]が小さくなることは、固有周期[s]が長くなることを意味する。

(1) 施設 1 の結果

付録 B の (1) に施設 1 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、徐々に減衰する、正弦波に近い規則的な振動をしている。また、フーリエ振幅スペクトルについてもそのピークが明瞭である。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果が Case OFF の結果に比べ少し小さくなる結果となった。

地震動を入力した結果についても、3 波とも明瞭なピークが見られ、それぞれ Impulse 波の結果より少し小さい振動数の位置にピークが得られた。

(2) 施設 2 の結果

付録 B の (2) に施設 2 の栈橋の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、徐々に減衰する、正弦波に近い規則的な振動をしている。また、フーリエ振幅スペクトルについてもピークが明瞭である。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果が Case OFF の結果に比べ少し小さくなる結果となった。

地震動を入力した結果についても、3 波ともある程度明瞭なピークが見られ、それぞれ Impulse 波の結果より少し小さい振動数の位置にピークが得られた。

(3) 施設 3 の結果

付録 B の (3) に施設 3 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、減衰は早い、初期の数秒を除いて正弦波に近い規則的な振動をしている。また、フーリエ振幅スペクトルについてもピーク位置を特定することができた。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果が Case OFF の結果に比べ少し小さくなる結果となった。

地震動の結果については、3 波ともピークが不明瞭であった。

(4) 施設 4 の結果

付録 B の (4) に施設 4 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、減衰は早い、正弦波に近い規則的な振動をしている。また、フーリエ振幅スペクトルについてもピークが明瞭である。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果が Case OFF の結果に比べ少し小さくなる結果となった。

地震動の結果についても、3 波ともある程度明瞭なピークが見られ、それぞれ Impulse 波の結果より少し小さい振動数の位置にピークが得られた。

(5) 施設 5 の結果

付録 B の (5) に施設 5 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、減衰が早く、正弦波に近い規則的な振動にはなっていない。また、フーリエ振幅スペクトルについても固有振動数の可能性のあるピークが複数みられ、栈橋上部工中央位置でのフーリエ振幅スペクトルのみからは、固有振動数を特定することが難しかった。また、背後地盤のフーリエ振幅スペクトルを確認することで、地盤の固有周期を示すピーク位置を特定できた。さらに、H/H スペクトルでは、ピークが明瞭であり、H/H スペクトルのピーク位置と同じ位置のフーリエ振幅スペクトルのピーク位置を、栈橋の固有振動数として特定した。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果と Case OFF の結果が同程度となった。

地震動の結果については、3 波ともピークが不明瞭であった。

(6) 施設 6 の結果

付録 B の (6) に施設 6 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、徐々に減衰する、正弦波に近い規則的な振動をしている。また、フーリエ振幅スペクトルについてもピークが明瞭である。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果が Case OFF の結果に比べ少し小さくなる結果となった。

地震動の結果についても、3 波とも明瞭なピークが見られ、それぞれ Impulse 波の結果より少し小さい振動数の位置にピークが得られた。

(7) 施設 7 の結果

付録 B の (7) に施設 7 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、減衰が早く、正弦波に近い規則的な振動にはなっていない。また、フーリエ振幅スペクトルについても固有振動数の可能性のあるピークが複数みられ、栈橋上部工中央位置でのフーリエ振幅スペクトルのみからは、固有振動数を特定することが難しかった。また、背後地盤のフーリエ振幅スペクトルを確認することで、地盤の固有周期を示すピーク位置を特定できた。さらに、H/H スペクトルでは、ピークが明瞭であり、H/H スペクトルのピーク位置と近い位置のフーリエ振幅スペクトルのピーク位置を、栈橋の固有振動数として特定した。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果と Case OFF の結果が同程度となる結果となった。

地震動の結果については、3 波ともピークが不明瞭であった。

(8) 施設 8 の結果

付録 B の (8) に施設 8 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、徐々に減衰する、正弦波に近い規則的な振動をしている。また、フーリエ振幅スペクトルについてもピークが明瞭であった。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果が Case OFF の結果に比べ少し小さくなる結果となった。

地震動の結果についても、3 波ともある程度明瞭なピークが見られ、それぞれ Impulse 波の結果と同程度の位置にピークが得られた。

(9) 施設 9 の結果

付録 B の (9) に施設 9 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、減衰が早く、正弦波に近い規則的な振動にはなっていない。また、フーリエ振幅スペクトルについてはピーク位置を特定することができた。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果と Case OFF の結果が同程度となった。

地震動の結果については、3 波ともピークが不明瞭であった。

(10) 施設 10 の結果

付録 B の (10) に施設 10 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、減衰は早いですが、正弦波に近い規則的な振動をしている。また、フーリエ振幅スペクトルについてもピークが明瞭であった。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果が Case OFF の結果に比べ少し小さくなる結果となった。

地震動の結果についても、3 波ともある程度明瞭なピークが見られ、それぞれ Impulse 波の結果より少し小さい振動数の位置にピークが得られた。

(11) 施設 11 の結果

付録 B の (11) に施設 11 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、減衰は早いですが、正弦波に近い規則的な振動をしている。また、フーリエ振幅スペクトルについてもピークが明瞭であった。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果と Case OFF の結果が同程度となった。

地震動の結果については、3 波とも明瞭なピークが見られ、それぞれ Impulse 波の結果より少し小さい振動数の位置にピークが得られた。

(12) 施設 12 の結果

付録 B の (12)に施設 12 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、減衰は早いですが、正弦波に近い規則的な振動をしている。また、フーリエ振幅スペクトルについてもピークが明瞭であった。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果と Case OFF の結果が同程度となった。

地震動の結果についても、八戸波、ポートアイランド波の結果ではピークが不明瞭であった。大船渡波の結果については、Impulse 波の結果より少し小さい振動数の位置にピークが得られた。

(13) 施設 13 の結果

付録 B の (13)に施設 13 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、減衰は早く振幅が不規則に変化している時刻もあるが、正弦波に近い規則的な振動をしているように見える時刻もある。また、フーリエ振幅スペクトルについてもピーク位置を特定することができた。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果が Case OFF の結果に比べ少し小さくなる結果となった。

地震動の結果については、ポートアイランド波の結果においてピークが不明瞭であった。八戸波、大船渡波の結果については、Impulse 波の結果より少し小さい振動数の位置にピークが得られた。

(14) 施設 14 の結果

付録 B の (14)に施設 14 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、減衰が早く、正弦波に近い規則的な振動にはなっていない。また、フーリエ振幅スペクトルについても固有振動数の可能性のあるピークが複数みられ、栈橋上部工中央位置でのフーリエ振幅スペクトルのみからは、固有振動数を特定することが難しかった。また、背後地盤のフーリエ振幅スペクトルを確認することで、地盤の固有周期を示すピーク位置を特定できた。さらに、H/H スペクトルでは、栈橋の固有振動数を示すと考えられるピーク位置を選ぶことができ、H/H スペクトルのピーク位置と近い位置のフーリエ振幅スペクトルのピーク位置を、栈橋の固有振動数として特定した。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果と Case OFF の結果が同程度となる結果となった。

地震動の結果については、3 波ともピークが不明瞭であった。

(15) 施設 15 の結果

付録 B の (15)に施設 15 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、徐々に減衰する、正弦波に近い規則的な振動をしている。また、フーリエ振幅スペクトルについてもピークが明瞭であった。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果が Case OFF の結果に比べ小さくなる結果となった。

地震動の結果についても、3 波ともピークを特定することができ、それぞれ Impulse 波の結果より小さい振動数の位置にピークが得られた。

なお、徳山下松港の栈橋では、トラス部分について、管内水を考慮せず、付加質量のみ考慮し、かつ浮力についても考慮した条件でも試行的に解析を行ったが、固有周期については、Case ON と比較してほとんど変化しない結果となった。

(16) 施設 16 の結果

付録 B の (16)に施設 16 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、減衰は早いですが、正弦波に近い規則的な振動をしている。また、フーリエ振幅スペクトルについてもピークが明瞭であった。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果と Case OFF の結果に比べ少し小さくなる結果となった。

地震動の結果については、ポートアイランド波の結果ではピークが不明瞭であった。八戸波、大船渡波の結果については、Impulse 波の結果と同程度の位置にピークが得られた。

(17) 施設 17 の結果

付録 B の (17)に施設 17 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、減衰は早いですが、正弦波に近い規則的な振動をしている。また、フーリエ振幅スペクトルについてもピークが明瞭であった。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果が Case OFF の結果に比べ少し小さくなる結果となった。

地震動の結果についても、3 波とも明瞭なピークが見られ、それぞれ Impulse 波の結果より少し小さい振動数の位置にピ

ークが得られた。

(18) 施設 18 の結果

付録 B の (18) に施設 18 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、徐々に減衰する、正弦波に近い規則的な振動をしている。また、フーリエ振幅スペクトルについてもピークが明瞭であった。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果が Case OFF の結果に比べ少し小さくなる結果となった。

地震動の結果についても、3 波とも明瞭なピークが見られ、それぞれ Impulse 波の結果より少し小さい振動数の位置にピークが得られた。

(19) 施設 19 の結果

付録 B の (19) に施設 19 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、徐々に減衰する、正弦波に近い規則的な振動をしている。また、フーリエ振幅スペクトルについてもピークが明瞭であった。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果が Case OFF の結果に比べ少し小さくなる結果となった。

地震動の結果についても、3 波ともピークを特定することができ、それぞれ Impulse 波の結果より少し小さい振動数の位置にピークが得られた。

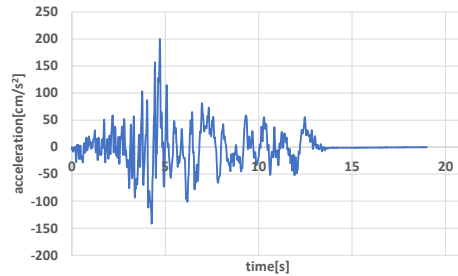
(20) 施設 20 の結果

付録 B の (20) に施設 20 の結果を示している。Impulse 波の結果について、栈橋上部工中央位置の加速度時刻歴については、正弦波に近い規則的な振動をしている。また、フーリエ振幅スペクトルについてもピークが明瞭であった。特定した固有振動数をみると、Case ON の結果が Case OFF の結果に比べ少し小さくなる結果となった。

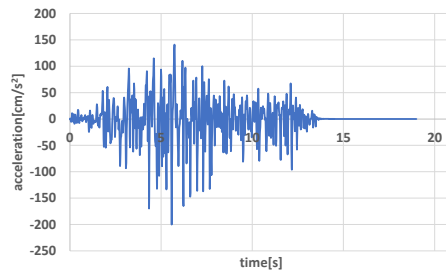
地震動の結果についても、3 波とも明瞭なピークが見られ、それぞれ Impulse 波の結果より少し小さい振動数の位置にピークが得られた。

付録 D 地震動 3 波の加速度時刻歴, およびフーリエ振幅スペクトル

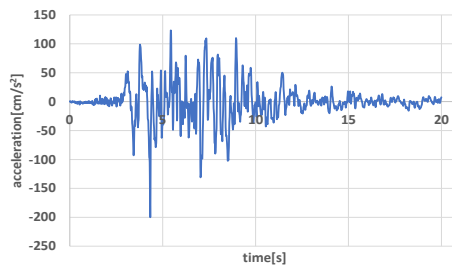
本検討では, L1 地震動相当の地震動として, 八戸波, 大船渡波, ポートアイランド波 (神戸波) の 3 波を使用した. この地震動 3 波の加速度時刻歴, 及びフーリエ振幅スペクトルについて以下に示す.



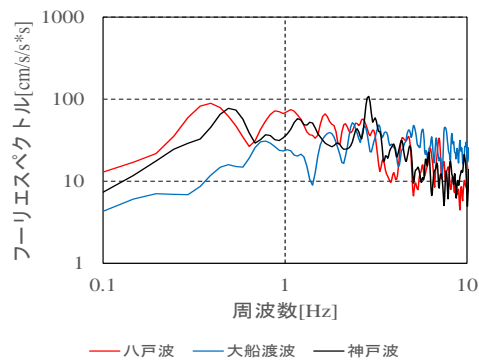
(a) 加速度時刻歴(八戸波)



(b) 加速度時刻歴(大船渡波)



(c) 加速度時刻歴(ポートアイランド波)



(d) フーリエ振幅スペクトル (地震動 3 波)

図-D.1 使用した地震動 3 波の加速度時刻歴とフーリエ振幅スペクトル