

【公開版】

令和5年6月8日 R1

日本原燃株式会社

岩盤部分の減衰定数に係る検討について

目 次

	ページ
1. はじめに	1
2. 地盤の減衰定数に係る一般的・標準的な設定手法の整理	2
2.1 既認可時点における設定の考え方	2
2.2 JEAG4601-2015 における設定方法	4
2.3 JEAG4601-1987 における設定方法	4
3. 減衰定数の評価手法	5
3.1 JEAG4601-1987 に示される評価方法	5
3.1.1 三軸圧縮試験による評価	7
3.1.2 S波検層による評価	7
3.1.3 地震観測記録による評価	8
3.2 敷地における減衰定数の評価に用いる手法の選定	9
4. 地震観測記録を用いた減衰定数の評価	11
4.1 敷地における地震観測の概要	12
4.2 評価に用いる地震観測記録	15
4.3 評価方法	17
4.3.1 初期モデルの設定及び探索範囲	17
4.3.2 目的関数の設定	20
4.3.3 評価方法及び条件	23
4.4 評価結果	24
5. S波検層による評価結果	32
6. 評価結果に対する考察	35
6.1 既往知見等または評価手法間の整合性	35
6.2 事業変更許可申請におけるはぎとり地盤モデルとの関係	37
6.3 シミュレーション解析結果における観測記録との差に関する分析 ..	39
6.4 Ss地震時における非線形性を考慮した減衰定数に係る考察	40
7. まとめ	42

1. はじめに

本資料は、地盤モデルの設定パラメータとなる4因子のうち、岩盤部分の減衰定数について、既認可時の地盤モデルを踏襲した地盤モデル（以下、「申請地盤モデル」という。）との差分を確認するために、一般的・標準的な地盤物性値の設定手法に基づくデータの整理結果を示すものである。

申請地盤モデルでは、岩盤部分の減衰定数について、既認可における基準地震動 S2 時の設定値である 3% を踏襲して用いているが、今回設工認申請時点にあたっては、既認可時と比較して、地盤の検討に関する知見や、近年発生した地震の観測記録が得られていることを踏まえ、一般的かつ標準的な減衰定数の設定の考え方として、JEAG4601-1987 に示される複数の設定手法から、適切な手法を選定して検討を実施した。

また、申請地盤モデルでは、岩盤部分の減衰定数については、非線形性を考慮せず、地盤のひずみによらず一定の値を設定しているが、既認可時と比較して基準地震動 S_s が増大しており、岩盤部分についても非線形性により入力地震動の算定への影響が考えられることから、「岩盤部分の非線形性に係る検討について」において整理している S_s 地震時の岩盤部分のせん断ひずみレベルに対応する減衰定数を確認し、本資料において評価した敷地地盤における減衰定数との関係性について考察を行った。

2. 地盤の減衰定数に係る一般的・標準的な設定手法の整理

「1. はじめに」に示したとおり、「申請地盤モデル」において考慮している岩盤部分の減衰定数については、既認可時点において用いている入力地震動算定用の地盤モデルに設定している基準地震動 S2 に対する地盤の減衰定数を踏襲し、岩盤に対して全層一律に、3%として設定している。

このことから、まずは「2.1 既認可時点における設定の考え方」にて、既認可時点における上記設定の根拠を示した上で、一般的・標準的な設定手法として、JEAG4601-2015 及び JEAG4601-1987 に示される設定手法を整理する。

2.1 既認可時点における設定の考え方

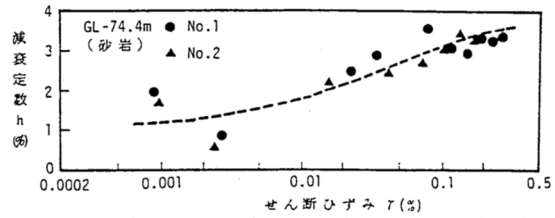
既認可時点においては、以下の文献調査並びに検討に基づいて地盤の減衰定数を設定している。

- ・ 嶋ほか(1983)の知見において、いわき地点の砂岩における減衰定数の評価結果として、第 2.1-1 図に示すとおり、高圧動的三軸圧縮試験結果より、低ひずみ領域では減衰定数が1~2%、ひずみ0.1%付近では3%となっていること、また、S波検層や地震観測記録に基づく減衰定数の評価手法によっては、それよりも大きな値(最大8%程度)として評価されていること。
- ・ 中村他(1990)において、富岡地点における泥岩層でのQ値の検討が行われており、下式に示すQ値の周波数依存性の関係に対し、 $n=1.0$ 、 $\alpha=200$ とした場合に、地震観測記録と整合することが示されていることから、敷地における泥岩層($V_s=800\text{m/s}$)の減衰定数を算定した結果、建屋の固有振動数(2.5Hz~5Hz)の領域では $h=2\%$ を上回る値となること。

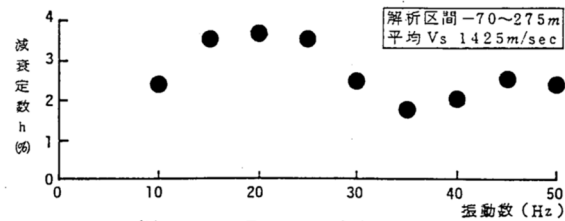
$$Q = V_s \cdot f^n / \alpha \quad (h = 1/2Q)$$

$$\left(\begin{array}{l} Q : Q \text{ 値} \\ h : \text{減衰定数} \\ V_s : S \text{ 波速度} \\ f : \text{周波数} \\ n, \alpha : \text{係数} \end{array} \right)$$

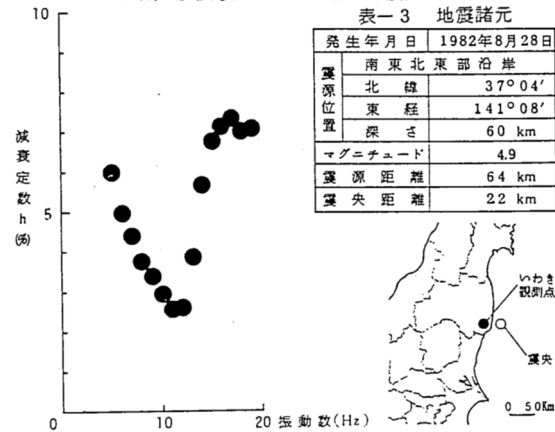
以上を踏まえ、既認可時点においては、敷地や施設の特徴に配慮した考え方に基づき設定を行っており、設計上考慮する地震動レベル及び建屋の固有振動数を考慮すると、基準地震動 S1 に対しては2%、基準地震動 S2 で3%とすることは妥当としている。



(a) 高圧動的三軸圧縮試験による減衰定数



(b) S波検層による減衰定数



(c) 観測地震による減衰定数

震央位置

第 2.1-1 図 嶋ほか (1983) におけるいわき地点の減衰定数の評価結果
(嶋ほか (1983) より抜粋)

2.2 JEAG4601-2015 における設定方法

JEAG4601-2015 では、地盤の減衰定数の設定について、既設発電所における減衰定数の設定に係る調査に基づく慣用値が示されており、「硬岩では減衰定数として 2～3%，軟岩では 3～5% の範囲の値が用いられている」とされている。

2.3 JEAG4601-1987 における設定方法

JEAG4601-1987 では、動的解析用の地盤の物性値を定める上で、地震観測や振動試験などの動的な実現象と整合することの観点で、地盤の物性値を定めるための試験または評価手法が複数示されている。

このうち、地盤の減衰定数については、高圧動的三軸圧縮試験、S 波検層、地震観測記録の基づく 3 手法が示されており、それぞれの手法において着目される地盤減衰の因子（材料減衰と散乱減衰）の違いや、既往知見における評価例があわせて示されている。

また、JEAG4601-2015 においても、建物・構築物の耐震設計における地震応答解析に用いる地盤の物性値の設定手法について、JEAG4601-1987 と同様の 3 手法が示された上で、地盤の応答解析においては、材料減衰と散乱減衰を含んだものを用いるとされており、また、地震観測結果により減衰定数が算定されている場合には、その減衰定数を参考にすることができるとされている。

3. 減衰定数の評価手法

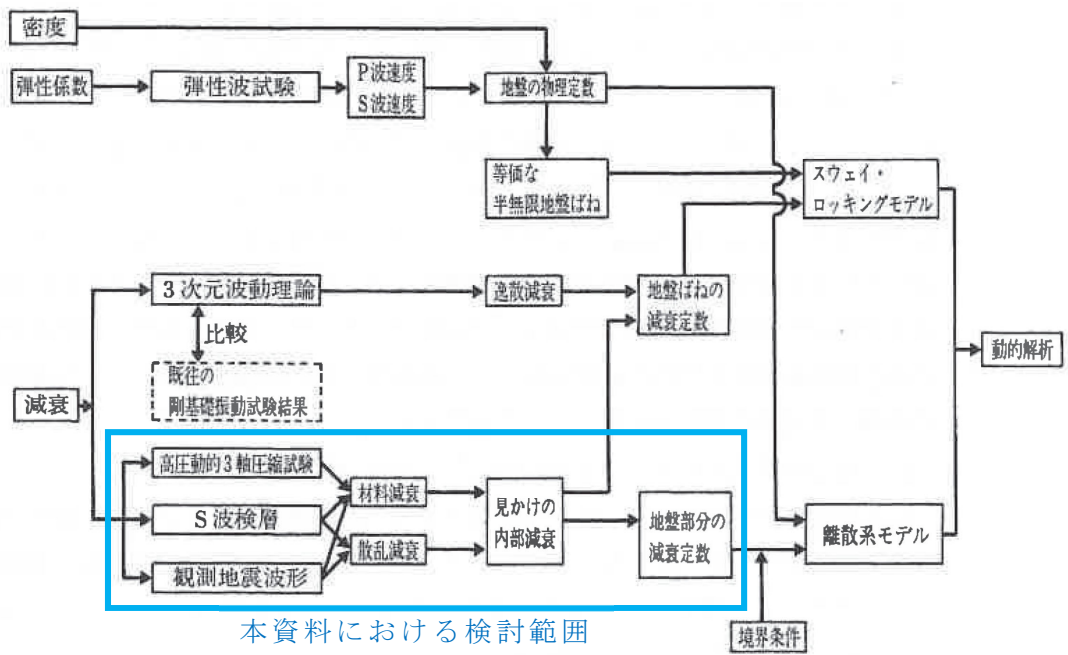
「2. 地盤の減衰定数に係る一般的・標準的な設定手法の整理」を踏まえ、一般的・標準的な手法として、JEAG4601-1987に示される手法に従い、敷地における減衰定数を評価する。

3.1 JEAG4601-1987に示される評価方法

第 3.1-1 図に、JEAG4601-1987 に記載の地盤の物性値評価のフローを示す。JEAG4601-1987 では、地震応答解析において検討の対象となる地盤の減衰としては、以下の 2 要因が挙げられており、地盤の減衰はこれらが組み合わされたものであるとされている。

- ・材料減衰：地盤内部の非弾性的性質によるもの（ひずみ依存特性に対応）
- ・散乱減衰：地盤の不均質，不連続による境界面での反射などによる波動の逸散によるもの

あわせて、JEAG4601-1987 では、3.1.1～3.1.3 に示すとおり、減衰定数の評価手法についても示されており、地盤の減衰定数を評価する手法ごとに、考慮可能な地盤減衰の因子（材料減衰と散乱減衰）が異なるとされている。



第 3.1-1 図 地盤の物性値評価のフロー（JEAG4601-1987 に加筆）

3.1.1 三軸圧縮試験による評価

JEAG4601-1987において、本手法は、繰返し三軸圧縮試験により、せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性を把握するものとされている。

本手法は、振動1サイクル中の最大ひずみエネルギーとその間に消費されるエネルギー、すなわち履歴減衰を評価しているものであり、上述の材料減衰に相当していることになる。また、ボーリングコアから得られた供試体を用いた試験によるものであることから、原位置における地盤の不均質・不連続による散乱減衰は考慮されていない。

なお、この手法により評価された減衰定数は、添付書類「Ⅳ-1-1-2 地盤の支持性能に係る基本方針」及び「Ⅱ-1-1-2 地盤の支持性能に係る基本方針」に示している、敷地における三軸圧縮試験結果に基づく岩種ごとのひずみ依存特性に対応するものである。

3.1.2 S波検層による評価

JEAG4601-1987において、本手法は、ボーリング孔において実施したS波検層の記録波形のうち、直達波と判断される部分の振幅の変化率に基づき、振動数ごとに求めた見かけ上の減衰から、地盤のモデルより求めた幾何減衰及び境界面での反射等による影響を差し引くことで、地盤のモデル上寄与しない薄層や亀裂の影響も含まれた減衰量を評価するものとされている。

このことから、S波検層による評価は、材料減衰と散乱減衰の両方が含まれた減衰定数を評価可能な手法である。

ただし、石田他(1987)*によれば、S波検層による評価は、一般に地震時に比べて、検層時の地盤のひずみレベルが小さく、ターゲットとなる卓越振動数が数十～百数十Hzレベルであるとされている。

注記 * : 石田他「室内試験, S波検層および観測地震動に基づく地盤の減衰評価」

第15回地盤振動シンポジウム, 日本建築学会, 1987. 8. 27

3.1.3 地震観測記録による評価

JEAG4601-1987において、本手法は、観測された地震動波形について、「3.1.2 S波検層による評価」と同様、直達波と判断される部分を取り出し、応答波の入射波に対する比から減衰評価を行うものとされている。また、各種の複雑な波動現象（上述のS波検層にて述べた地盤のモデル上寄与しない薄層や亀裂の影響を含む）を含んだ状態における等価な減衰定数を評価可能とされている。

このことから、地震観測記録による評価は、材料減衰と散乱減衰の両方が含まれ、さらに、実地震の複雑な伝播経路等を踏まえた、実態に近い減衰定数を評価可能な手法である。

石田他（1987）によれば、地震観測記録による評価は、上述のS波検層による評価と比較してターゲットとなる卓越振動数が低周波側にあり、数～数十 Hz レベルとされている。

なお、地震観測記録を用い、その位置ごとの比率を用いて減衰定数を含む地盤のパラメータを評価する手法については、基準地震動 S_s の策定に係る検討において、敷地における地震観測記録を一次元波動論に基づく基盤波を計算するための地盤モデル（以下、「はぎとり地盤モデル」という。）の作成を行う上で、当社事業変更許可及び他原子力事業者における実績が多数存在する。

3.2 敷地における減衰定数の評価に用いる手法の選定

「3.1 JEAG4601-1987に示される評価手法」に示したとおり、JEAG4601-1987には、3種類の減衰定数の評価手法が示されている。

三軸圧縮試験による評価結果については、前述のとおり、添付書類「Ⅳ-1-1-2 地盤の支持性能に係る基本方針」及び「Ⅱ-1-1-2 地盤の支持性能に係る基本方針」における岩種ごとのひずみ依存特性として既に整理されている。このことから、本資料における検討においては、材料減衰と散乱減衰の両方が含まれた、地震波が地盤を伝播する際の減衰の全量を評価可能な手法を選定する。

散乱減衰も含めた減衰定数の評価が可能な手法としては、S波検層による手法及び地震観測記録を用いた手法が挙げられるが、これらの両手法については、いずれも原位置において測定あるいは観測された実態波データを用いて、材料減衰及び散乱減衰を含めた減衰量の総和を算定する手法である。

このことから、建物・構築物の入力地震動を算定するための減衰定数を求めるにあたって、S波検層及び地震観測記録のいずれの手法を用いるかについて検討を実施し、敷地において得られているデータや、建物・構築物の入力地震動を算定するとの目的に照らした以下の根拠により、地震観測記録を用いた評価を選定することとした。

- ・ 敷地においては、長期間の地震観測を実施しており、十分な数の地震観測記録が得られていること。（敷地において得られている地震観測記録の詳細は「4. 地震観測記録を用いた減衰定数の評価」に示す。）
- ・ 両手法においてターゲットとなる周波数レンジを踏まえると、建物・構築物の主要固有周波数帯（数 Hz オーダー）に対しては、地震観測記録を用いた手法の方がより適合すること。

なお、一般的に、地盤の減衰定数については周波数依存性を有しており、高振動数側で減衰定数が小さくなる傾向であることから、S波検層のように、高振動数側をターゲットとした場合には、地盤全体の減衰定数を小さく評価する可能性があること。

- ・ 地震観測記録を用いた手法は、上述のとおり、当社事業変更許可及び他原子力事業者におけるはぎとり地盤モデルの作成において適用実績のある手法であること。
- ・ 敷地における地震観測記録では、S波検層において一般的に得られる振幅レンジよりも大振幅の波形が得られており、振幅の比率を評価する上

で、ノイズによる影響が小さく抑えられると考えられること。

以上のことから、今回検討にあたっては、地震観測記録を用い、当社敷地における実現象を最もよく説明する減衰定数の評価を行うことを主軸とする。

ただし、敷地において過去に実施しているボーリング調査の際、敷地内の複数地点において、S波検層に基づく減衰定数の評価を実施していることから、その測定条件及び結果を「5. S波検層による評価結果」に示す。その上で、「3.1.2 S波検層による評価」に示した本手法の周波数レンジの特徴との整合性や、今回検討において地震観測記録を用いて評価した減衰定数との関係性について、「6. 評価結果に対する考察」に示す。

4. 地震観測記録を用いた減衰定数の評価

敷地において実現象を最もよく説明する減衰定数として、材料減衰及び散乱減衰の両方が含まれた値を、敷地において得られている地震観測記録を用いて評価する。

検討に当たっては、本資料における目的が岩盤部分の減衰定数に対する確認であることを踏まえ、表層地盤と岩盤部分を個別に評価する。

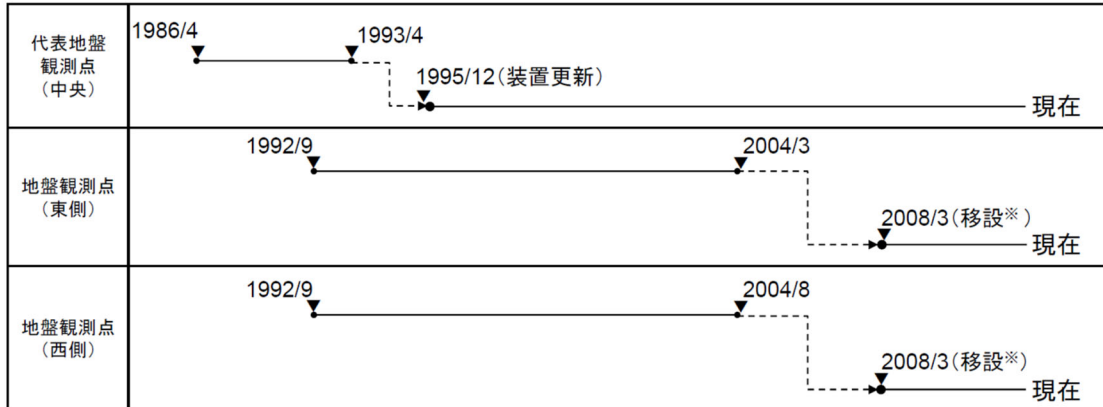
また、地震計を設置している敷地内の中央地盤、西側地盤、東側地盤の3地点のそれぞれに対して評価を実施することで、大局的な地下構造の違いによる減衰定数の違いについても確認する。

4.1 敷地における地震観測の概要

敷地では、中央、西側、東側地盤の3地点において地震観測記録の収集を行っている。また、第4.1-1図～第4.1-3図に示すとおり、地震観測位置のうち、西側及び東側地盤観測点については、2008年を境に移設を行っている。

西側及び東側地盤観測点における地震観測位置の移設については、事業変更許可において説明を実施しており、移設前後において地下構造が大きく変わらないことを、移設前後のPS検層結果及びはぎとり地盤モデルの速度構造との比較により示している。

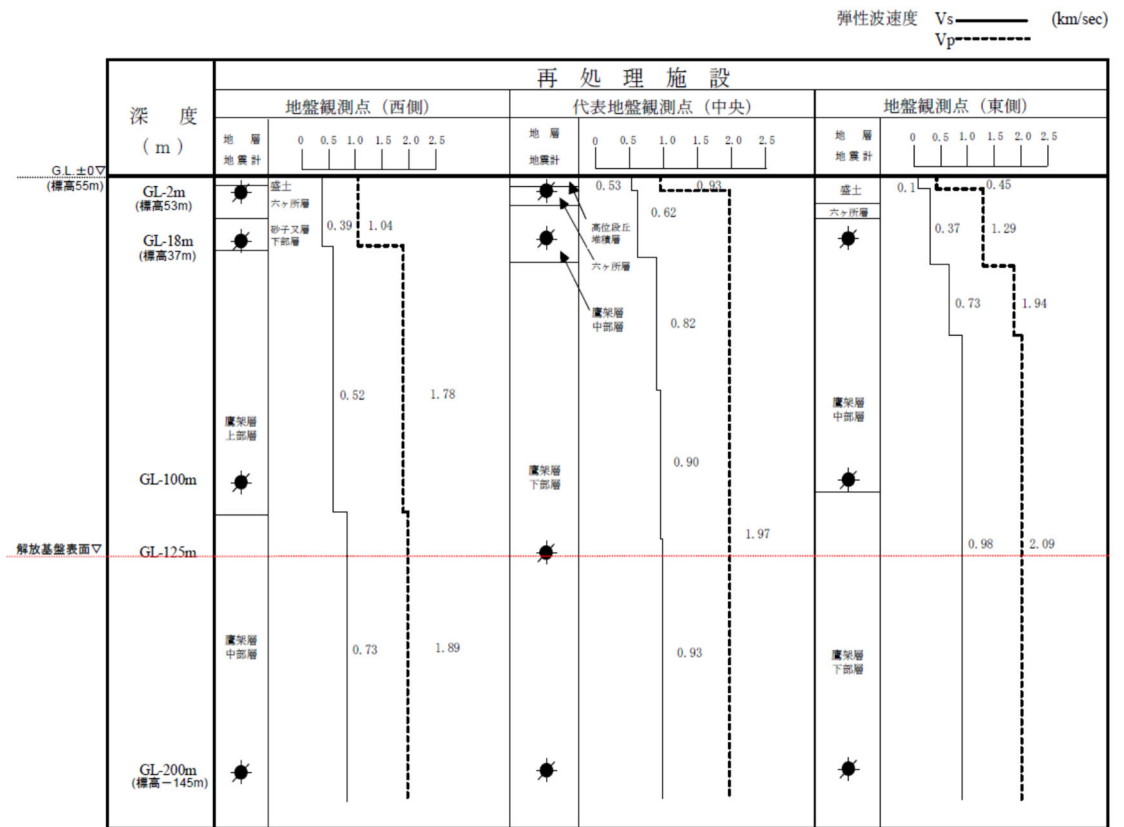
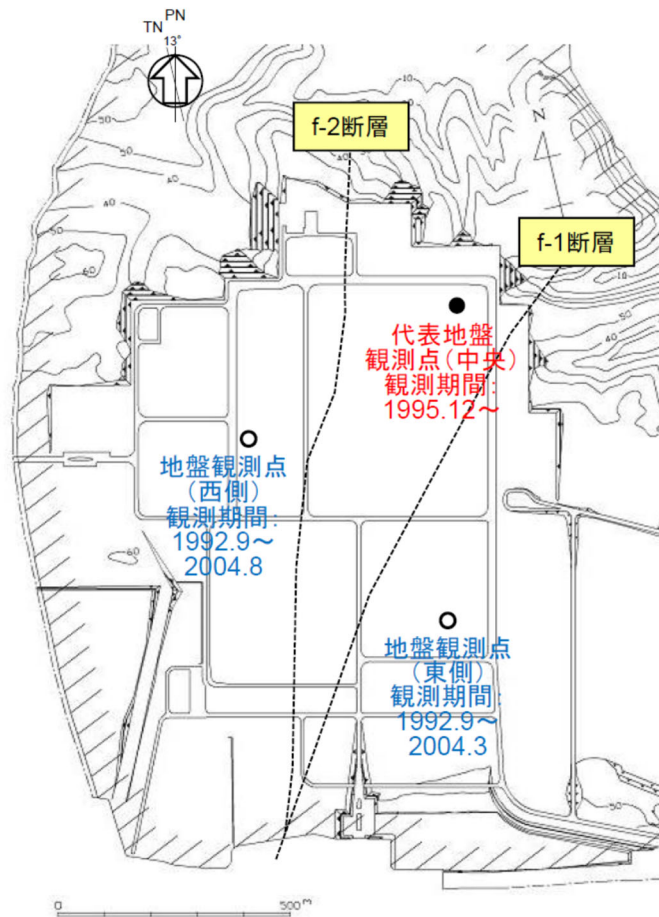
本資料においては、後述のとおり、はぎとり地盤モデルの作成と同様の手法により減衰定数を評価する際、S波速度についても、周波数特性の適合度を向上させる観点で変動させていることから、変動後の速度構造との評価結果との関係性について、「6.2 事業変更許可申請におけるはぎとり地盤モデルとの関係」にて事業変更許可申請と同様に速度構造の比較を行う。



※G.L.-100m地震観測点を、G.L.-125mに移設

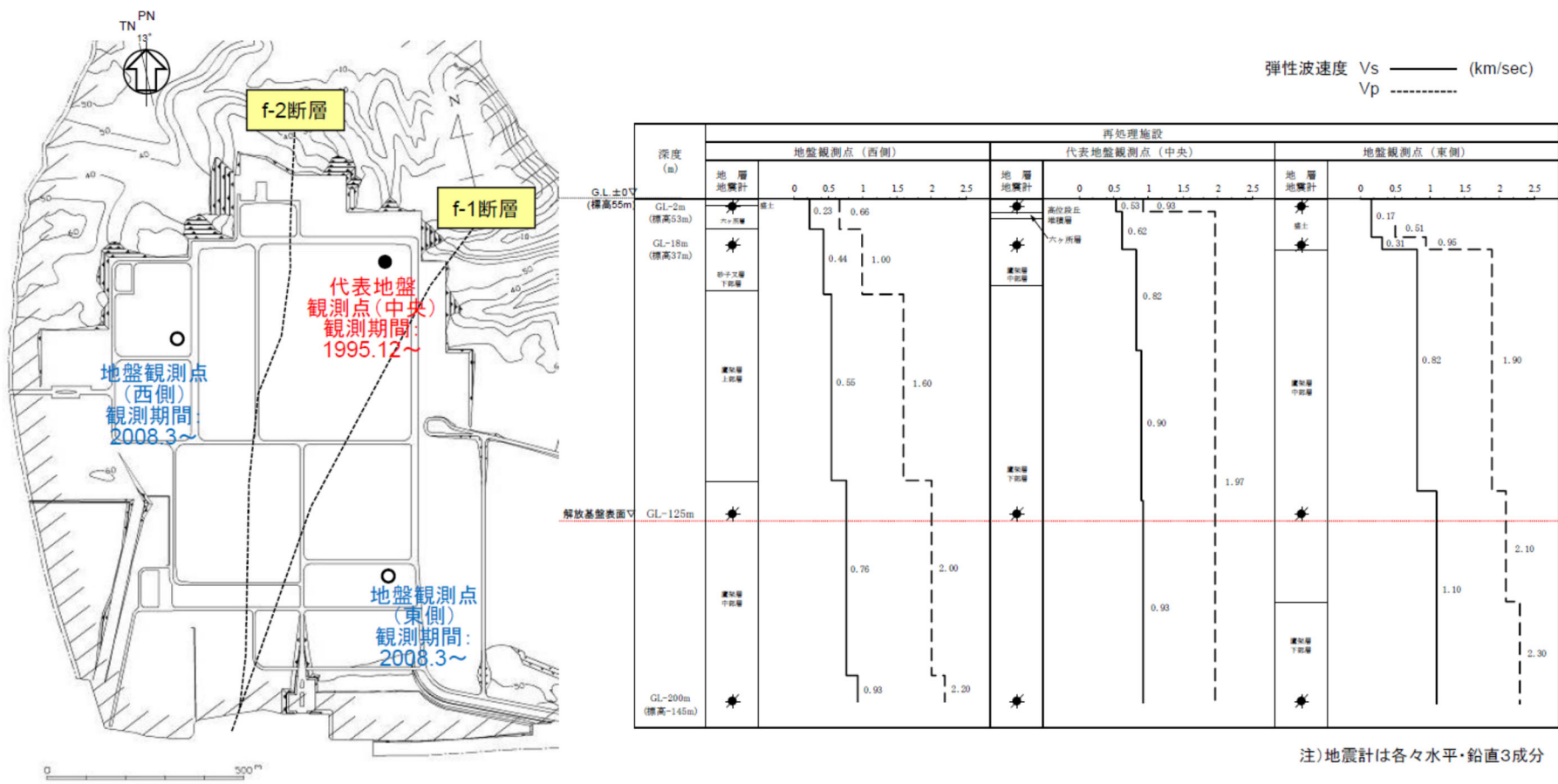
第4.1-1図 敷地内各位置における地震観測期間

(2020年2月21日第339回審査会合 資料1-4-1 p38より抜粋)



注)地震計は各々水平・鉛直3成分

第 4.1-2 図 2004 年以前の地震観測位置
(2020 年 2 月 21 日第 339 回審査会合 資料 1-4-2 p9 より抜粋)



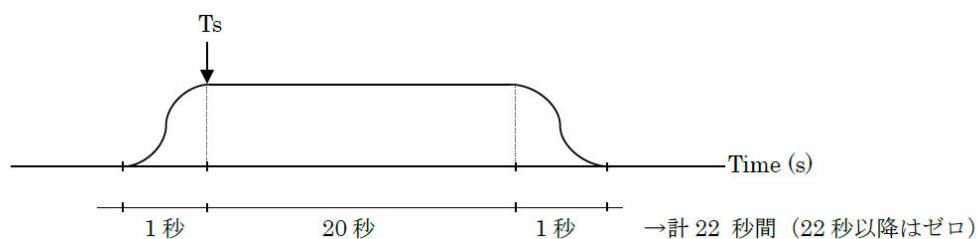
第 4.1-3 図 2008 年以降の地震観測位置(本資料における評価に用いる地震観測位置)
(2020 年 2 月 21 日第 339 回審査会合 資料 1-4-2 p10 より抜粋)

4.2 評価に用いる地震観測記録

評価に用いる地震観測記録について、当社敷地では 2011 年以降に比較的大加速度の地震観測記録が多く得られていることを踏まえ、中央、西側及び東側地震観測点において、現在の地震観測位置における地震観測記録から選定する。中央、西側及び東側地盤観測点のそれぞれについて、第 4.1-1 図に示した移設後の地震観測期間内で、最深部 (GL-200m) において 10Gal 以上の最大加速度が得られている地震を選定することを基本とし、10Gal 以上の地震を選定した結果、その数が 10 地震に満たない場合は、選定基準を 5 Gal 以上に拡大し、10 地震以上のサンプルが得られるよう配慮した。

また、地震観測記録の波形に対する処理としては、直達波による影響を適切に考慮するため、TR 成分 (各地震の震央方向に直行する方向の成分) に変換した後、第 4.2-1 図に示すように、S 波の初動以降を約 20 秒間切り出したものを用いた。

各地震観測点において評価に用いた地震の選定の考え方及び結果について、以下(1)～(3)に示す。



第 4.2-1 図 時刻歴波形の処理概要

(1) 中央地盤観測点

中央地盤観測点においては、最深部 (GL-200m) で 10Gal 以上の記録が得られている地震である 14 地震を選定し、各観測深さ (GL-200m, GL-125m, GL-18m 及び GL-2m) の地震観測記録を評価に用いた。

選定した地震を第 4.2-1 表に示す。

(2) 西側地盤観測点

次回提出時に観測位置の移設も踏まえた選定の考え方も含め追記する。

(3) 東側地盤観測点

次回提出時に観測位置の移設も踏まえた選定の考え方も含め追記する。

第 4.2-1 表(1) 評価に用いる地震の選定結果 (中央地盤観測点)

No.	年	月	日	時	分	震源地名	東経		北緯		M	深さ	震央距離	震源距離	GL-200m		
															NS	EW	UD
1	2001	12	2	22	1	SOUTHERN IWATE PREF	141	15.79	39	23.9	6.4	121.5	174	212	10.10	11.60	6.10
2	2002	10	14	23	12	E OFF AOMORI PREF	142	16.85	41	9.11	6.1	52.71	83	98	12.20	10.60	8.86
3	2003	5	26	18	24	NORTHERN MIYAGI PREF	141	39.04	38	49.26	7.1	72.03	239	250	12.50	12.40	10.50
4	2003	9	26	4	50	SE OFF TOKACHI	144	4.71	41	46.71	8.0	45.07	247	251	18.60	20.20	13.00
5	2003	9	26	6	8	SE OFF ERIMOMISAKI	143	41.49	41	42.59	7.1	21.41	215	216	21.30	17.00	13.20
6	2008	7	24	0	26	NORTHERN IWATE PREF	141	38.12	39	43.92	6.8	108.08	139	176	39.10	33.90	23.44
7	2011	3	11	14	46	FAR E OFF MIYAGI PREF	142	51.66	38	6.21	9.0	23.74	344	345	28.99	21.46	17.77
8	2011	3	11	15	8	E OFF IWATE PREF	142	46.01	39	49.24	7.4	32.02	176	179	17.93	18.83	11.97
9	2011	6	23	6	50	E OFF IWATE PREF	142	35.45	39	56.87	6.9	36.4	155	159	23.85	14.72	9.22
10	2012	5	24	0	2	E OFF AOMORI PREF	142	7.4	41	20.6	6.1	60	79	99	37.98	24.62	16.13
11	2012	12	7	17	18	OFF SANRIKU	143	52	38	1.1	7.3	49	393	396	11.17	11.14	10.32
12	2013	2	2	23	17	SOUTHERN TOKACHI REGION	143	13.6	42	42.1	6.5	102	249	269	10.48	12.00	5.61
13	2015	7	10	3	32	NORTHERN INLAND OF IWATE PREF	141	33.5	40	21.2	5.7	88	70	112	12.41	10.50	5.81
14	2016	1	14	12	25	OFF URAKAWA	142	41	48	58.2	6.7	52	166	174	12.07	13.32	8.62

第 4.2-1 表(2) 評価に用いる地震の選定結果 (西側地盤観測点)

次回提出時に追記する。

第 4.2-1 表(3) 評価に用いる地震の選定結果 (東側地盤観測点)

次回提出時に追記する。

4.3 評価方法

4.3.1 初期モデルの設定及び探索範囲

評価にあたっては、事業許可における基準地震動の策定において、各地震観測点の地震観測記録を再現するように作成しているはぎとり地盤モデルと同様に、第 4.1-2 図及び第 4.1-3 図に示した当該地震観測点における PS 検層結果から得られている密度及び S 波速度を、初期モデルとして設定した。

事業許可におけるはぎとり地盤モデルは、当該観測点の PS 検層結果から得られている密度及び S 波速度を初期モデルとして設定し、地震観測記録の伝達関数を再現するよう S 波速度及び減衰定数を変数として同定を行っている。減衰定数については、地震動評価において一般的に用いられている Takemura et al. (1993)*等の知見に基づき、周波数依存特性を考慮して同定を行っている。

本評価における減衰定数の評価にあたっては、減衰定数を変数とした収束計算を行うことにより、観測記録に適合する減衰定数を評価する。評価を行う上で設定する減衰定数の探索範囲は、建物・構築物の入力地震動を算定する上で用いる設定方法にならない、モデル底面から地表面の全層に対し、全周波数帯において一定値となる条件として、探索範囲を 0～10%の範囲で設定した。

今回評価に用いた初期モデル及び減衰定数の探索範囲を、第 4.3.1-1 表に示す。

ここで、中央地盤観測点については、事業変更許可にてはぎとり地盤モデルを策定する際に、地震観測記録における振動特性を再現するよう、既に現在の地震観測位置における PS 検層データから S 波速度をチューニングしていることから、チューニング後のはぎとり地盤モデルに設定している S 波速度を採用し、減衰定数のみを変数として設定することとした。

また、西側地盤及び東側地盤観測点については、事業変更許可における西側及び東側地盤のはぎとり地盤モデルを作成する際、移設前の地震観測位置の情報に基づいて S 波速度をチューニングしており、移設後の位置における S 波速度のチューニングは実施していない。「4.1 敷地における地震観測の概要」及び「4.2 評価に用いる地震観測記録」に示したとおり、西側地盤及び東側地盤観測点における評価では、近

年得られた地震観測記録を用いるために、2008年以降の移設後の地震観測点における地震観測記録を用いたことから、本評価にあたっては、移設後の地震観測点におけるPS検層結果（第4.1-3図）におけるS波速度を初期モデルとして設定し、減衰定数に加え、S波速度についても変数として設定することとした。

注記 *：武村 雅之，池浦 友則，高橋 克也，石田 寛，大島 豊，：堆積地盤における地震波減衰特性と地震動評価，日本建築学会構造系論文報告集，446，pp. 1-11，1993.

第 4.3.1-1 表 初期モデル及び減衰定数の探索範囲

(1) 中央地盤観測点

	深度 (m)	層厚 (m)	密度 ρ (g/cm ³)	S波速度 V_s (m/s)	減衰定数 h	
地震観測位置	GL 0m	2	1.94	470	表層 1	0~0.2
	-2.0	1.5				
	-3.5	1.5			表層 2	
地震観測位置	-5	13	1.64	720	岩盤 1	0~0.15
	-18	2				
	-20	40				
-60	60	830	0~0.1			
地震観測位置	-120	5	1.85	930	基盤	0~0.1
	-125	75				
地震観測位置	-200					

(2) 西側地盤観測点

次回提出時に追記する。

(3) 東側地盤観測点

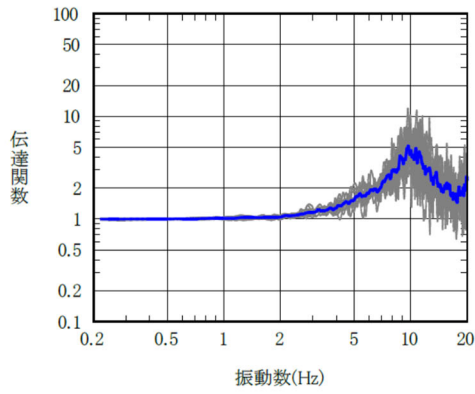
次回提出時に追記する。

4.3.2 目的関数の設定

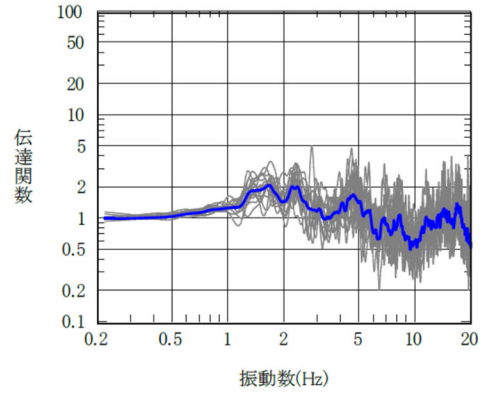
評価にあたっては、当社事業変更許可において実績のある、はざとり地盤モデルと同様に、収束計算に用いる目的関数を以下のとおり設定した。

目的関数は、「4.2 評価に用いた地震観測記録」に示した各地盤観測点において得られている地震観測記録に基づき算定した、各観測深さ間の伝達関数の平均値とする。

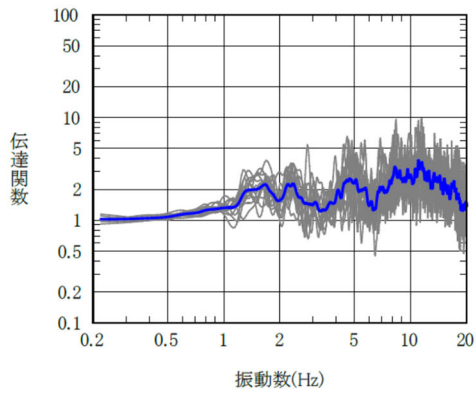
伝達関数は、表層地盤と岩盤部分を個別に評価するために、各観測深さ（GL-200m, GL-125m, GL-18m 及び GL-2m）間のフーリエスペクトル比（全6組合せ）として算定した。第4.3.2-1図に、地震観測記録に基づく、各深さ間の伝達関数の作成結果を示す。



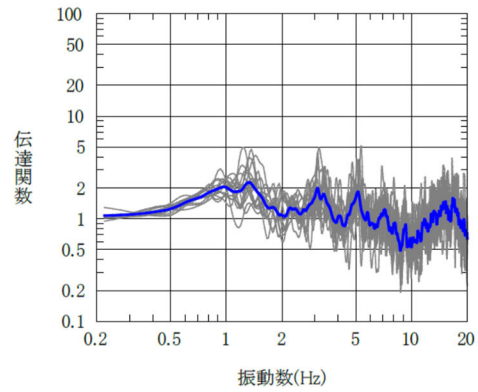
① GL-2m/GL-18m



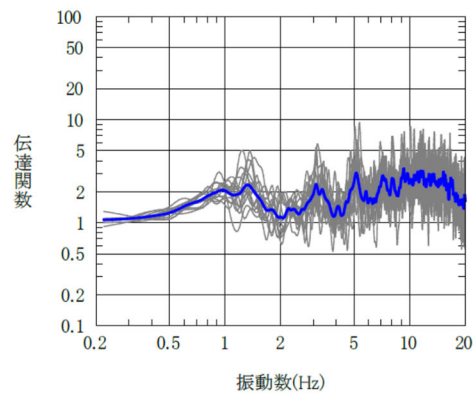
④ GL-18m/GL-125m



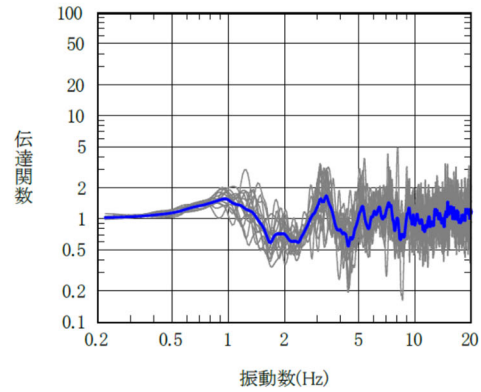
② GL-2m/GL-125m



⑤ GL-18m/GL-200m



③ GL-2m/GL-200m



⑥ GL-125m/GL-200m

第 4.3.2-1 図(1) 評価に用いた地震観測記録の伝達関数と目的関数
(中央地盤観測点, 灰色線: 個別地震, 青線: 目的関数)

次回提出時に追記する。

第 4.3.2-1 図(2) 評価に用いた地震観測記録の伝達関数と目的関数
(中央地盤観測点, 灰色線: 個別地震, 青線: 目的関数)

次回提出時に追記する。

第 4.3.2-1 図(3) 評価に用いた地震観測記録の伝達関数と目的関数
(中央地盤観測点, 灰色線: 個別地震, 青線: 目的関数)

4.3.3 評価方法及び条件

評価としては、各深さ（GL-200m, GL-125m, GL-18m 及び GL-2m）間の地震動の増幅特性を最もよく説明する減衰定数を、地震観測点ごとに遺伝的アルゴリズム法により同定し、その値が地震観測記録の応答スペクトルを再現可能であることを確認する。評価条件を第 4.3.3-1 表に示す。

ここで、評価対象とする減衰定数については、本検討の目的が、建物・構築物の入力地震動を算定する上で地盤モデルに設定する減衰定数を評価するものであることを踏まえ、周波数依存性を考慮しない条件とした。

第 4.3.3-1 表 遺伝的アルゴリズム法による評価条件

未知数	減衰定数 (h) (周波数依存性なし)
世代交代数	30 世代
個体数	30 固体
突然変異率	2 %
交差率	70%
未知変数のビット長	8 ビット
対象とする周波数範囲	0 ~ 20Hz

4.4 評価結果

「2. 減衰定数の評価手法」に示した手法に従い、減衰定数を評価した結果及び伝達関数の適合状況を第 4.4-1 表及び第 4.4-1 図に示す。地震観測記録を用いた減衰定数の評価の結果、解放基盤表面～基礎底面レベルの岩盤部分に相当する層の減衰定数として、中央地盤観測点においては 6.7%の減衰定数が得られた。

次回改訂にて、西側地盤及び東側地盤観測点における減衰定数の評価結果を追記。

あわせて、「4.3.2 目的関数の設定」に示した目的関数に対する同定後の伝達関数の比較を示す。評価結果としては、高振動数成分において乖離が見られるものの、建物・構築物の固有振動数帯である 2～3 Hz においては良好な対応を示している。

また、評価された減衰定数が妥当であることの確認として、地震観測記録を用いたシミュレーション解析を実施した。

シミュレーション解析は、評価された減衰定数を反映した地盤モデルに対し、最新最深部 (GL-200m) にて観測された地震観測記録 (地中波) を入力し、建物・構築物の基礎底面相当レベル (GL-18m) における地盤応答 (地中波) を算出し、同レベルにおける地震観測記録 (地中波) との比較を行うことで実施した。

シミュレーション解析に用いる地盤モデルは、「4.3.1 初期モデルの設定及び探索範囲」に示した各地震観測位置における初期モデルに対して第 4.4-1 表に示した減衰定数の評価結果を反映したものとする。また、用いる地震は、各地震観測点において、大きな観測記録が得られている 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震の NS 成分及び EW 成分において得られている地震観測記録とした。

シミュレーション解析の結果を第 4.4-2 図に示す。観測記録と解析結果は、全周期帯において、概ね同等またはシミュレーション解析結果が観測記録に対して大きな地盤応答を与える結果となった。

以上のことから、今回検討において評価された、地震観測記録に基づく減衰定数は、敷地における地震観測記録をよく再現する値として評価されていることを確認した。

第 4.4-1 表 (1) 地震観測記録により評価された減衰定数 (中央地盤観測点)

深度 (m)	層厚 (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	減衰定数 h
0	2	1.94	470	0.166
-2	1.5	1.94	470	
-3.5	1.5	1.94	560	0.160
-5	13	1.64	720	0.111
-18	2	1.64	720	
-20	40	1.75	760	0.067
-60	60	1.85	830	
-120	5	1.85	950	0.055
-125	75	1.85	950	
-200	—	1.85	950	

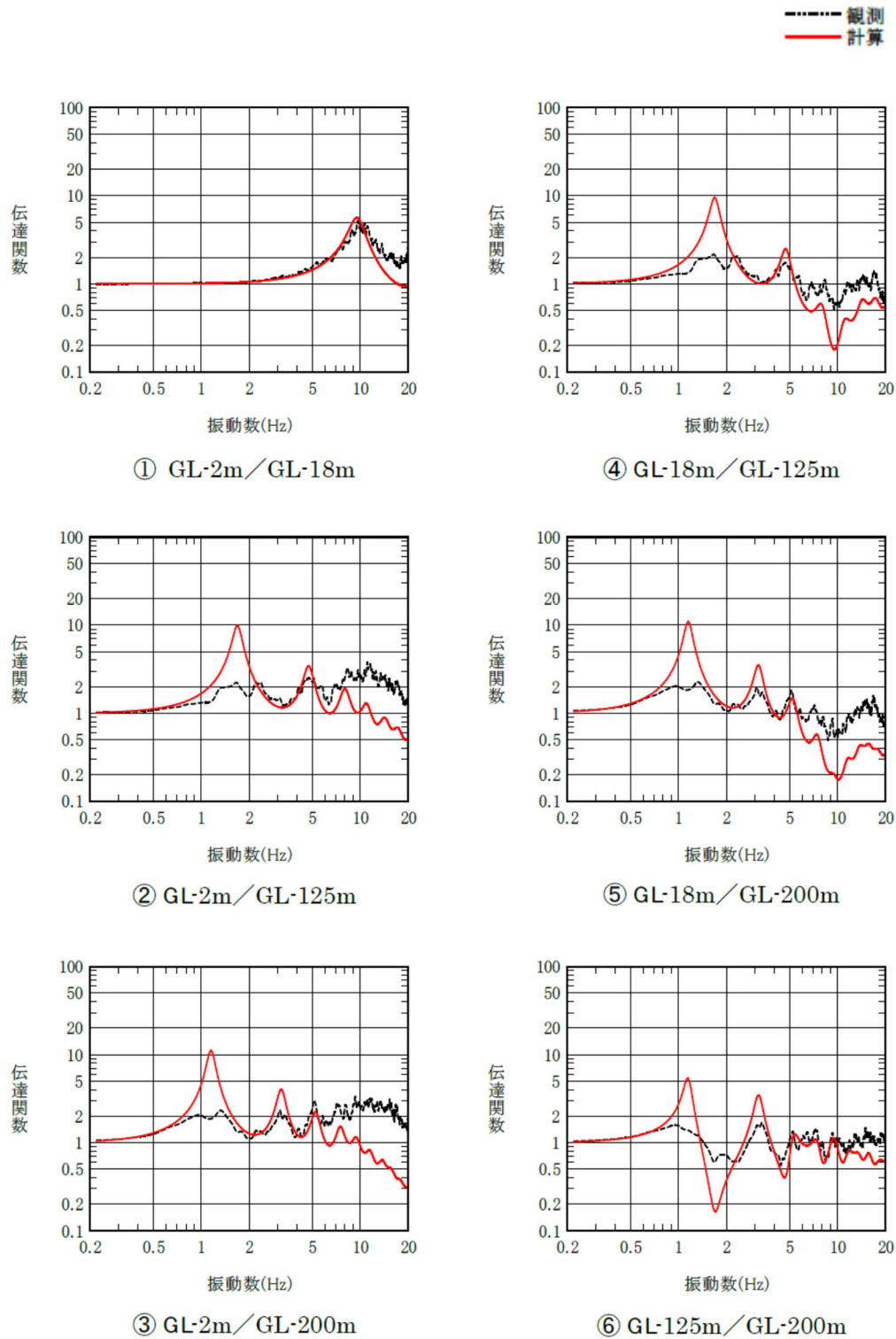
解放基盤表面～
建屋基礎底面相当
レベルの岩盤部分
に相当

第 4.4-1 表(2) 地震観測記録により評価された減衰定数 (西側地盤観測点)

次回提出時に追記する。

第 4.4-1 表(3) 地震観測記録により評価された減衰定数 (東側地盤観測点)

次回提出時に追記する。



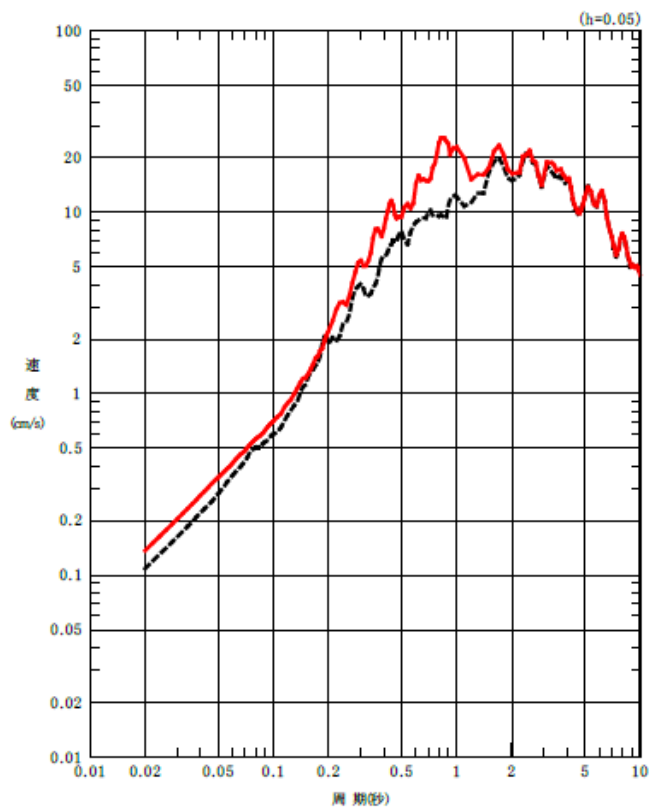
第 4.4-1 図(1) 評価結果 (伝達関数フィッティング結果, 中央地盤観測点)

次回提出時に追記する。

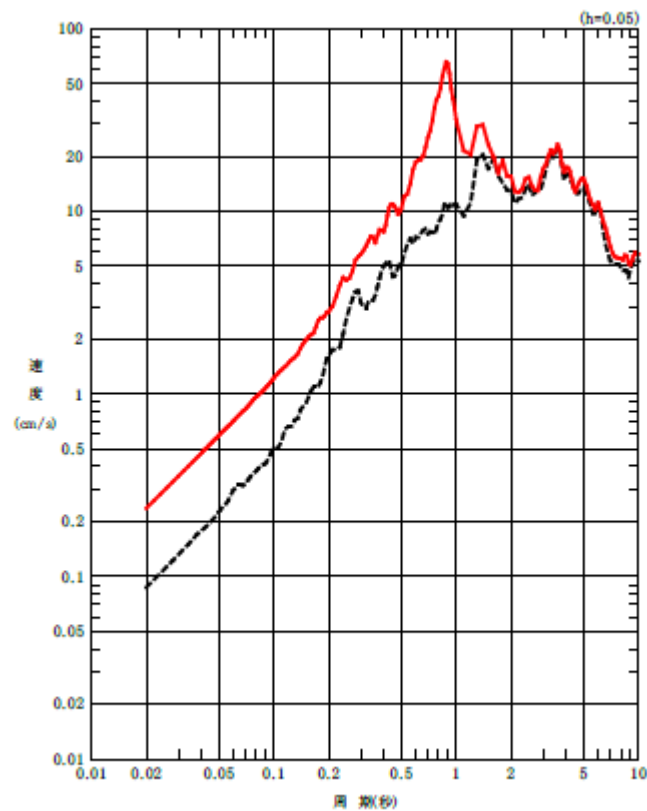
第 4.4-1 図(3) 評価結果（伝達関数フィッティング結果，西側地盤観測点）

次回提出時に追記する。

第 4.4-1 図(3) 評価結果（伝達関数フィッティング結果，東側地盤観測点）



(a) NS 成分



(b) EW 成分

第 4.4-2 図(1) 同定された減衰定数による観測記録の再現確認結果

(中央地盤観測点, 2011.3.11 東北地方太平洋沖地震 NS 成分)

(黒：建屋基礎底面相当レベル (GL-18m) における観測記録, 赤：同定された減衰定数を用いた GL-18m における解析結果)

西側地盤観測点におけるシミュレーション結果を次回追記

(a) NS 成分

(b) EW 成分

第 4.4-2 図(2) 同定された減衰定数による観測記録の再現確認結果

(西側地盤観測点, 2011. 3. 11 東北地方太平洋沖地震 NS 成分)

(黒: 建屋基礎底面相当レベル (GL-18m) における観測記録, 赤: 同定された減衰定数を用いた GL-18m における解析結果)

東側地盤観測点におけるシミュレーション結果を次回追記

(a) NS 成分

(b) EW 成分

第 4.4-2 図(3) 同定された減衰定数による観測記録の再現確認結果

(東側地盤観測点, 2011. 3. 11 東北地方太平洋沖地震 NS 成分)

(黒 : 建屋基礎底面相当レベル (GL-18m) における観測記録, 赤 : 同定された減衰定数を用いた GL-18m における解析結果)

5. S波検層による評価結果

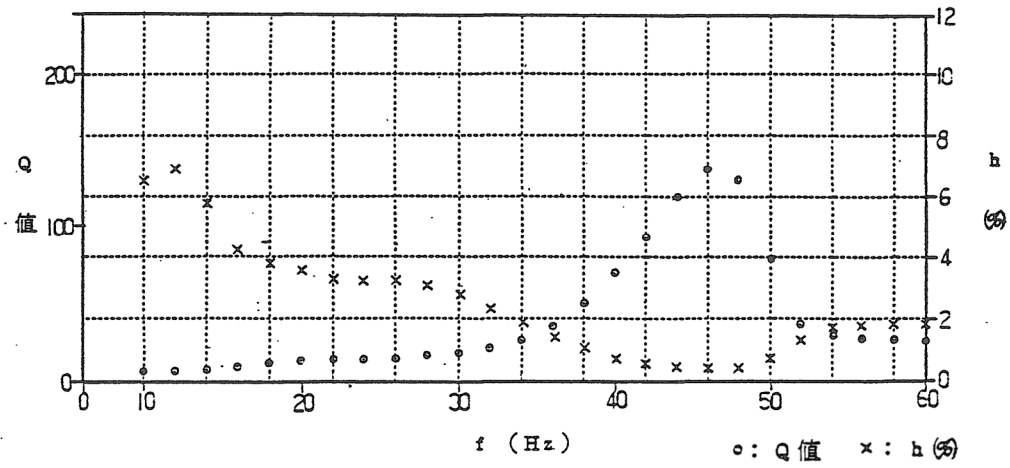
「3.2 敷地における評価に用いる手法の選定」に示したとおり、本検討においては、建物・構築物の入力地震動の算定に用いる減衰定数を評価することを目的としていることから、評価手法ごとにターゲットとなる周波数レンジに着目し、地震応答解析による評価を採用した。

一方で、敷地においては、過去のボーリング調査時に、第 5.-1 図に示す敷地内の 3 地点（J-T 孔，L-T 孔，E-T 孔）において、PS 検層に基づく減衰定数の評価が行われていることから、当該評価結果についても整理した上で、「6.1 既往知見等または評価手法間の比較」にて、今回評価に採用した地震観測記録を用いた手法による評価結果との比較を行うこととする。

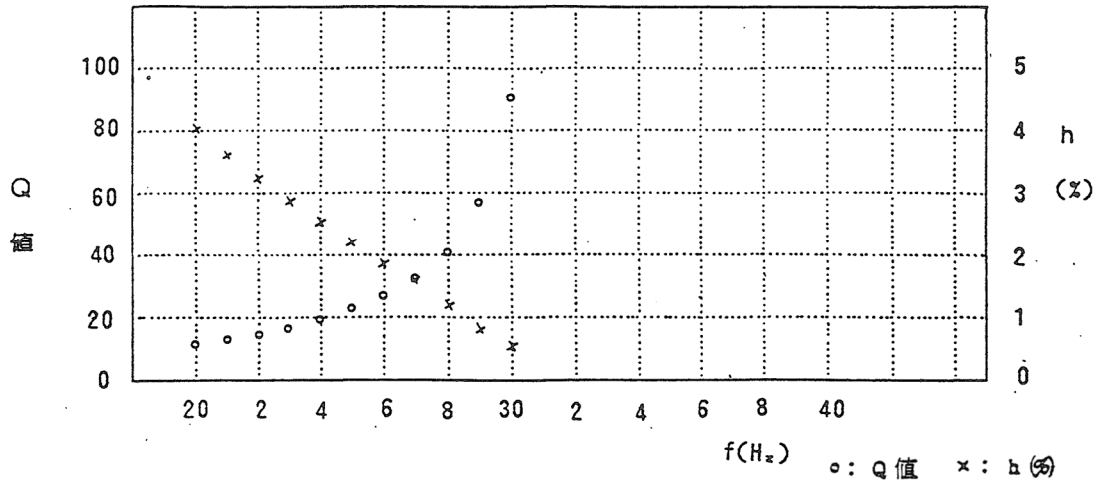
敷地における PS 検層に基づく減衰定数の評価にあたっては、加振波とボーリング孔内観測波の応答スペクトルの振幅比に基づき、当該地点の減衰定数として周波数ごとに評価している。

第 5.-2 図に、PS 検層に基づく減衰定数について、J-T 孔，L-T 孔，E-T 孔における主要な岩盤部分に対応する評価結果を示す。PS 検層に基づく減衰定数は、いずれの孔においても、高振動数成分に着目した評価を行っており、ターゲットとしている周波数レンジは 10Hz 又は 20Hz よりも高振動数側の領域としている。

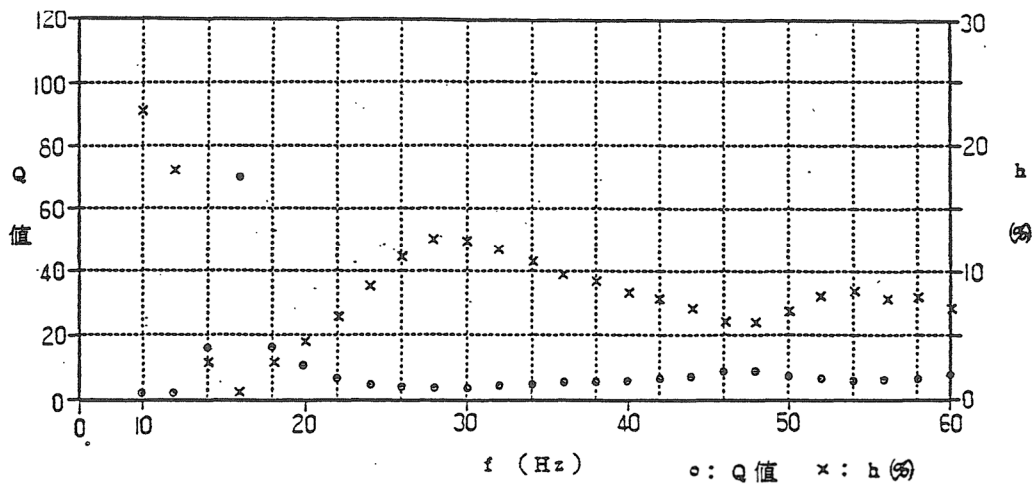
また、減衰定数の大きさの傾向として、振動数に反比例する傾向の周波数依存性を有していることが確認でき、高振動数側では 1%未満の非常に小さい減衰定数が得られているが、低振動数側では、西側地盤に対応する J-T 孔で約 6%、中央地盤に対応する L-T 孔で約 4%の値が得られている。一方で東側地盤に対応する E-T 孔では 20%以上の減衰定数が得られており、ばらつきの大きい結果になっていると考えられる。



(a) J-T 孔 (西側地盤の泥岩上部層に対応)



(b) L-T 孔 (中央地盤の細粒砂岩及び泥岩下部層に対応)



(c) E-T 孔 (東側地盤の軽石質砂岩に対応)

第 5.-2 図 S 波検層による減衰定数の評価結果

6. 評価結果に対する考察

6.1 既往知見等または評価手法間の整合性

本章に示す考察のうち、西側地震観測点及び東側地盤観測点における評価結果に関する考察について、次回追記する。

「4.4 評価結果」に示した、地震観測記録に基づく手法による各地震観測点における解放基盤表面～基礎底面レベルの岩盤部分に相当する層の減衰定数の評価結果について、JEAG4601-1987に示される他の評価手法や、既往知見における値との比較を行う。

地震観測記録を用いた評価結果によれば、解放基盤表面～基礎底面レベルの岩盤部分に相当する層の減衰定数として、中央地盤観測点においては6.7%の減衰定数が得られている。この値は、JEAG4601-2015に示される、既設発電所における減衰定数の設定に係る調査に基づく設計上の慣用値のうち、軟岩サイトにおける範囲（3～5%）よりも大きい値となっている。

一方、今回実施した地震観測記録を用いた減衰定数の評価における知見として、嶋ほか（1983）におけるいわき地点の検討が挙げられるが、当該地点における地震観測記録に基づき定めた減衰定数（第2.1-1図）については、最大8%程度の値が得られており、また、建物・構築物の固有振動数帯（2～3Hz）における値を読み取れば、約6%の減衰定数が得られていることから、本検討において評価した中央地盤観測点における岩盤部分の減衰定数は、実現象をよく説明する減衰定数の値としては、既往の知見から乖離したものとはなっておらず、適切に評価されていると考えられる。

また、JEAG4601-1987にて示される減衰定数の評価手法のうち、S波検層による評価については、「5. S波検層による評価結果」に示したとおりの敷地におけるデータが得られていることから、その結果との比較を行った。

「3.1.2 S波検層による評価」に示したとおり、S波検層による評価は、地震観測記録による評価と同様に、材料減衰と散乱減衰の両方が含まれた減衰定数を評価可能であるが、「5. S波検層による評価結果」に示したとおりターゲットとしている周波数レンジは10Hz又は20Hzよりも高振動数側の領域となっている。また、第5.-2図に示したとおり、敷地におけるS波検層による評価結果としては、周波数依存性を有し、低周波になるほど減衰定数は大きな値となっており、評価対象周波数のうち最低周

波数（10Hz または 20Hz）においては，4%～6%を上回る減衰定数が得られている。このことから，建物・構築物の固有振動数帯（2～3 Hz）に着目した減衰定数を鑑みると，上記値よりも大きな値が地震観測記録による評価結果として得られていることは，特異な結果ではないと考えられる。

6.2 事業変更許可申請におけるはぎとり地盤モデルとの関係

本資料における減衰定数の評価にあたって用いる初期地盤モデルについては、中央地盤観測点位置においては、事業変更許可にて示したはぎとり地盤モデルの速度構造を用いている。すなわち、地震観測記録の振動特性を説明できるようにチューニングが行われている速度構造を用いている。

このことから、中央地盤観測点については、本資料における検討結果とはぎとり地盤モデルの差異は、「4.3.1 初期モデルの設定及び探索範囲」に示した、減衰定数に対する周波数特性の考慮の有無の違いのみとなる。

一方で、西側地盤観測点及び東側地盤観測点位置においては、事業変更許可にて示しているはぎとり地盤モデルについては、「4.1 敷地における地震観測の概要」に示した 2004 年以前の地震観測位置の地盤データ及び地震観測記録に基づいて作成しているが、本資料における評価にあたっては、比較的大振幅の地震観測記録が得られている 2008 年以降の地震観測位置における地盤データを初期地盤モデルとして用い、減衰定数の評価とあわせて、地震観測記録の振動特性を説明できるように速度構造のチューニングを今回行っている。

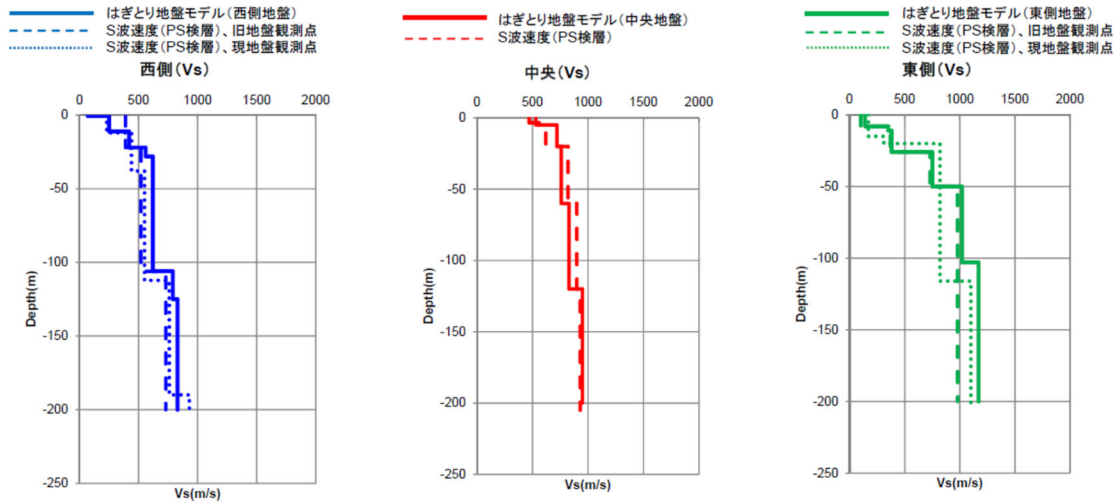
このことから、西側地盤観測点及び東側地盤観測点については、本資料における検討結果とはぎとり地盤モデルの差異は、「4.3 評価方法」に示した、減衰定数の周波数特性の考え方の違いに加え、速度構造も異なる。

事業変更許可においては、地震観測位置の移設前後で、PS 検層結果に大きな差異は認められず、また、推定されたはぎとり地盤モデルとも概ね整合していることを説明している。今回評価を行った 2008 年以降の地震観測位置についてチューニングされた速度構造についても同様の比較を行った結果を第 5.2-1 図に示す。

次回以降、以下の記載については、西側及び東側地盤観測点における S 波速度構造のチューニング結果を踏まえた記載に修正。

結果として、今回評価を行った 2008 年以降の地震観測位置についてチューニングされた速度構造についても、地震観測位置の移設前後における PS 検層結果及び事業変更許可にて示した 2004 年以前の地震観測位置におけるはぎとり地盤モデルと概ね同等となっていることを確認した。

以上のことから、本資料において、2008 年以降の地震観測位置における地盤データに基づいて速度構造をチューニングした結果については、事業変更許可における説明とも整合していることを確認した。



第 4.4-1 図 今回評価した地震観測点における PS 検層結果
及びはぎとり地盤モデルの速度構造の比較

(2020 年 2 月 21 日第 339 回審査会合 資料 1-4-1 p48 より抜粋)

次回以降、本図に、西側及び東側地盤観測点における今回評価におけるチューニング後の S 波速度を重ね書き、既に記載している移設前後の地震観測位置の PS 検層データ並びに事業変更許可申請において示しているはぎとり地盤モデルにおける速度構造との比較を行う。

6.3 シミュレーション解析結果における観測記録との差に関する分析

本章に、「4.4 評価結果」に示したシミュレーション解析において、一部周期帯や方向において、観測記録と解析結果に乖離が生じている部分に対する考察を行う。

考察にあたっては、中央、西側、東側地盤観測点における地盤の特徴やフィッティング時の誤差の相対的な関係性も踏まえて行うこととする予定であるため、次回以降、西側及び東側地盤観測点における減衰定数の評価結果並びにシミュレーション結果を示すこととあわせて考察を行い、本章の記載を行う。

6.4 Ss 地震時における非線形性を考慮した減衰定数に係る考察

本資料における減衰定数の評価結果との関係の確認として、「岩盤部分の非線形性に係る検討について」に示す、ひずみ依存特性（ $h - \gamma$ 曲線）に基づく Ss 地震時の岩盤部分のせん断ひずみに対応した減衰定数に基づく考察を以下に示す。

今回、減衰定数の評価に用いた 19 地震の観測記録のうち、最大の加速度を有する地震は、最深部（GL-200m）において 30Gal 程度のものであることから、今回実施した評価では、地盤が線形状態であるときの減衰定数を評価していると考えられる。

中央地盤の各岩種におけるひずみ依存特性により求めた減衰定数は以下のとおりであり、地盤の非線形化が進行することで、地盤の減衰定数が大きくなることを確認した。

なお、地盤のせん断ひずみに対応する減衰定数については、添付書類「IV-1-1-2 地盤の支持性能に係る基本方針」及び「II-1-1-2 地盤の支持性能に係る基本方針」に示す各岩種のひずみ依存特性（ $h - \gamma$ 曲線）を用いて算定した。

- ・細粒砂岩：線形条件：約 1.3%，非線形条件：約 2.3%
- ・泥岩（下部層）：線形条件：約 1.3%，非線形条件：約 1.6%
- ・粗粒砂岩：線形条件：約 1.6%，非線形条件：約 2.7%

ひずみ依存特性により求めた減衰定数については、JEAG 4601-1987 に記載のとおり、地盤の非弾性的性質による材料減衰として示される。

しかし、JEAG4601-1987 においては、地盤の減衰定数について、材料減衰、散乱減衰及び各種波動現象を含んだ減衰定数となっていると言われており、評価手法ごとに、以下の関係性となっている。

$$h_{\text{室内試験}} (\text{材料減衰}) < h_{\text{弾性波探査}} (= \text{材料} + \text{散乱}) < h_{\text{地震観測}}$$

本資料において観測記録により評価した減衰定数は、線形条件における材料減衰、散乱減衰及び各種波動現象を含んだ値として評価されているものであり、Ss 地震時には、上記のうち材料減衰が、線形条件における値（約 1.3%～約 1.6%）から大きくなる（約 1.6%～約 2.7%）ことを踏まえると、非線形状態が見込まれる Ss 地震時においては、地震観測により評価した減衰定数は、さらに大きい値となると考えられる。

なお、第1回申請（PA, A4B）において考慮した地盤の減衰定数については、三軸圧縮試験に基づく材料減衰のみを考慮した減衰定数を設定した。

本来であれば、「1. はじめに」に示した本資料における検討の位置付けと同様に、まずは一般的・標準的な地盤物性値の設定方法に基づき、敷地における岩盤部分の減衰定数として、材料減衰と散乱減衰を含めた減衰定数を把握した上で、パラメータの設定を行う必要があったが、第1回申請においては、本資料に示すような検討までは行わずに、上記の設定結果を示したものである。

ただし、材料減衰のみを考慮することにより、結果的に小さい値の減衰定数を採用していることになるため、一般的・標準的な減衰定数の方法に従った設定を考慮したとしても、第1回申請において算定した入力地震動が非安全側となることはない。

7. まとめ

本資料においては、一般的・標準的な手法による岩盤部分の減衰定数の設定に係る検討を実施した。

今後、基本地盤モデルの設定にあたっては、上記に示す検討結果を踏まえ、岩盤部分の減衰定数の設定を行う。