

2025 年の万博会場予定地における設計用地震荷重に関しては、その供用期間を工事期間・撤去期間を含めて最大 2 年間と想定した場合、その供用期間に応じた適切なレベルおよび設計クライテリアを設定することが合理的である。その観点から、(一財) 日本建築総合試験所では万博会場予定地点における供用期間を考慮した設計用入力地震動の策定に取り組んできた。今回その方針を以下のように策定した。

1. 設計用入力地震動の策定方針

上記のような供用期間を考慮した設計用入力地震動を策定するに際して、以下のように考え方を整理した。

- 1) 想定する地震像としては発生確率が相対的に高い南海トラフ沿いの巨大海溝型地震とし、それ以外はハザードに対する寄与が無視できるほど小さいので、巨大海溝型地震の発生のみ考慮する。その際の設計クライテリアとしては、その低い発生確率に鑑み、人命に損傷を及ぼさないレベル 2 のクライテリアを適用する。
- 2) 標準波は過去の設計との評価の連続性を確保するために残されているものであり、今回限りの万博会場予定地点の評価には適用しない。
- 3) 基整促波は最悪想定として M8.7 クラスの 3 連動地震を想定したもので、供用期間内におけるその発生確率は無視できるほど小さいので適用しない。
- 4) 告示スペクトルに基づく告示波は、極めて稀に発生する地震の地震動レベルについては、通常の供用期間の構造物に対して設定されているので、上記想定地震が 2 年間に発生する確率と通常の供用期間に発生する確率に基づき、低減係数を考慮する。また位相特性については巨大海溝型地震の発生のみを想定しているので八戸波の位相とする。
- 5) サイト波は南海トラフ沿いの巨大海溝型地震を想定して、最新の技術を用いて計算する。その想定断層は 1946 年南海地震相当の相対的に発生確率の高い M8 クラスの断層とする。
- 6) サイトの地盤構造調査結果に基づき、工学的基盤波と工学的基盤から上の地盤構造の非線形（等価線形）増幅特性を考慮した地表面波を準備する。
- 7) 上下動については告示波は水平動の 1/2、サイト波については計算値とする。

2. 告示スペクトルに基づく入力地震動の策定（水平動）

告示波は、振幅特性が建基法施行令第 88 条の地震力と同等となる様に、平 12 年建告第 1461 号で定義した加速度応答スペクトルに対応する模擬地震波で、地盤のせん断波速度が概ね 400m/s 以上となる工学的基盤上で定義することとなっている。しかし当該サイトでは 100m 以上の深度になっても 350m/s にしか達しなかったためそれを工学的基盤と見なし

た。

告示波の作成は「限界状態設計法の計算例とその解説」（国土交通省）に記載された方法により繰り返し計算で行い、計算に必要な位相特性は Hachinohe NS を使用した。上述のように、施工期間も含め供用期間を 2 年間で設定したことから、防災科学技術研究所の J-SHIS サイトでの確率論的地震動評価の結果 (<https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>) に基づいて、低減率を考慮してもなお十分な安全性を確保できることを根拠に、告示スペクトルのレベルをその 80% と設定した。作成した加速度波形・速度波形とその加速度応答スペクトルを図 1 に示す。またその相対速度応答スペクトル SV および加速度応答スペクトルを円振動数 $\omega=2\pi/T$ (T は周期) で割って速度応答に換算した擬似速度応答スペクトル pSv を図 2 に示す。最大加速度は 317 cm/s^2 で、フラットな加速度応答レベルは 600 cm/s^2 を超えており、速度応答スペクトル・擬似速度応答スペクトルのフラットなレベルは約 80 cm/s と 60 cm/s で、加速度波形を積分して得られた最大速度は 42 cm/s であった。このレベルの地震動の発生確率は 300 年に 1 回と推算される。

3. 波形合成法によるサイト波の策定と評価（水平動）

次に、南海トラフ沿いの想定断層によるサイト波の生成プロセスの概要と得られたサイト波について提示する。

ここで用いた手法は、最新の地震動特性分離手法を用いて観測地震動の平均的性質を反映した小地震（これを要素波という）を面積と滑り継続時間の違いを反映して大地震の波形を合成する、いわゆる統計的グリーン関数を用いた波形合成法（簡単に統計的グリーン関数法とも呼ばれる）である。手法の詳細は仲野・川瀬（2021）を参照されたい。

図 3 には想定した 1946 年南海地震（昭和南海地震）相当の断層モデルを示す。また、そのパラメータを表 1 に示す。想定した地震のモーメント・マグニチュード M_w は 8.04 であり、これは宇津（1982）の推定値 8.0 に一致している。またこのモーメント・マグニチュード $M_w=8.04$ に対応する地震モーメント推定値 $1.45 \times 10^{21} \text{ N} \cdot \text{m}$ は Kanamori（1972）の推定値 $1.5 \times 10^{21} \text{ N} \cdot \text{m}$ とほぼ一致している。但し、今回の想定断層面積は Kanamori（1972）の推定値である長さ $L=120 \text{ km}$ 、幅 $W=80 \text{ km}$ から推定された総面積 $S=$ 約 $10,000 \text{ km}^2$ に比べ大きく、図 3 に示したように $L=$ 約 270 km 、 $W=80 \text{ km}$ から $S=20,000 \text{ km}^2$ と設定している。断層面の位置や走向・滑り角等、巨視的断層パラメータについては内閣府（2015）で公開されている宝永型の南海トラフ地震の断層モデルを参照して設定した。

地震本部の強震動予測レシピ (https://www.jishin.go.jp/main/chousa/17_yosokuchizu/recipe.pdf) や建築学会地盤震動小委員会（2009）の「最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法」に則り、断層面積と平均滑り量、断層面積とアスペリティ（強震動生成領域 SMGA）およびアスペリティ（SMGA）内の滑り量の関係をレシピ記載のスケールリング則に基づいて決定した。なお応力降下量については、Kanamori（1972）や内閣府（2015）の情報等を参考に、断層面全体の平均応力降下量を 3 MPa 、アスペリティ（SMGA）のそれを

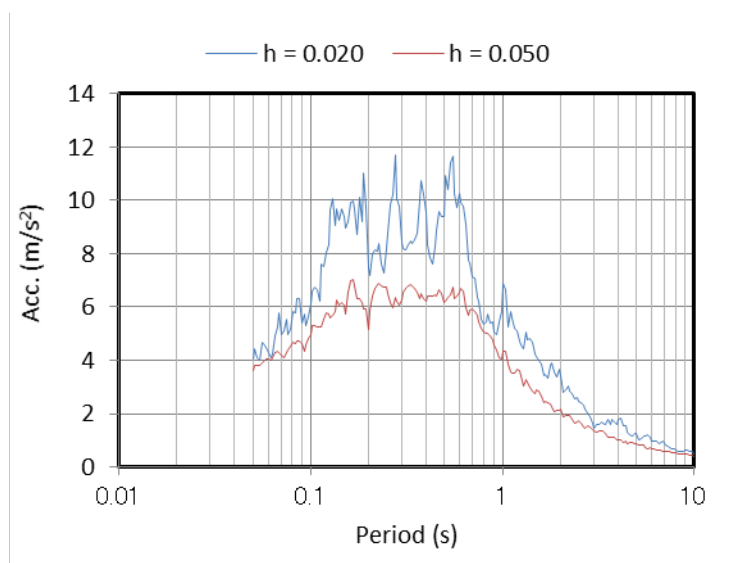
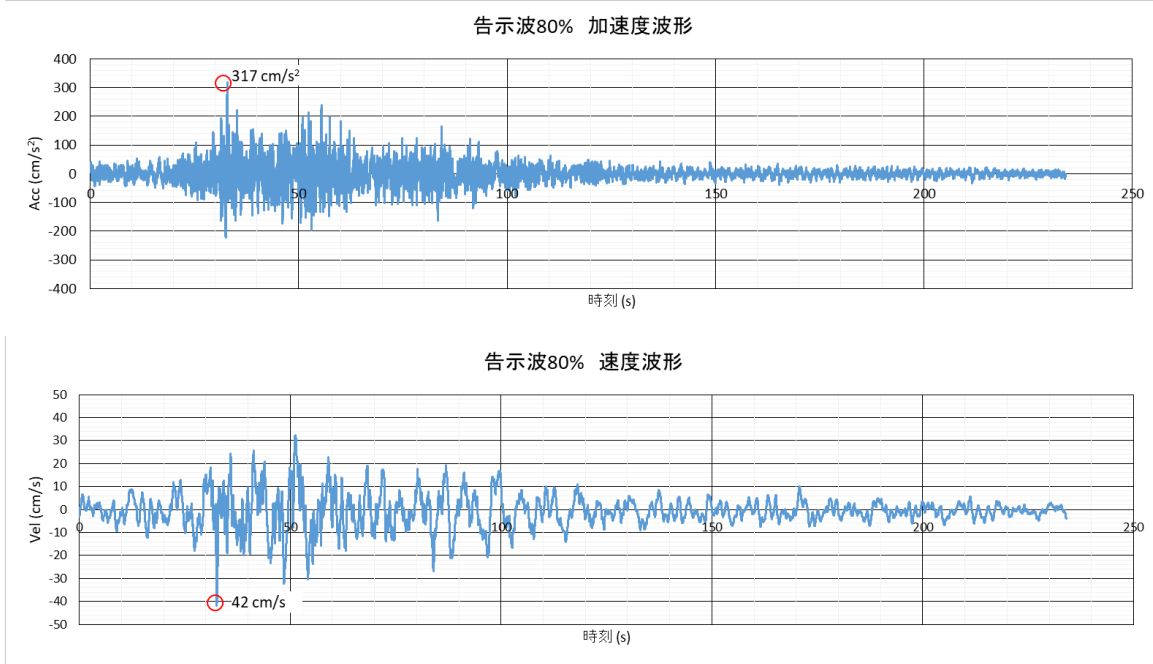


図1 告示スペクトルの80%で作成した告示波（位相特性：Hachinohe NS）の加速度波形・積分して得た速度波形とその加速度応答スペクトル（減衰2%と5%）

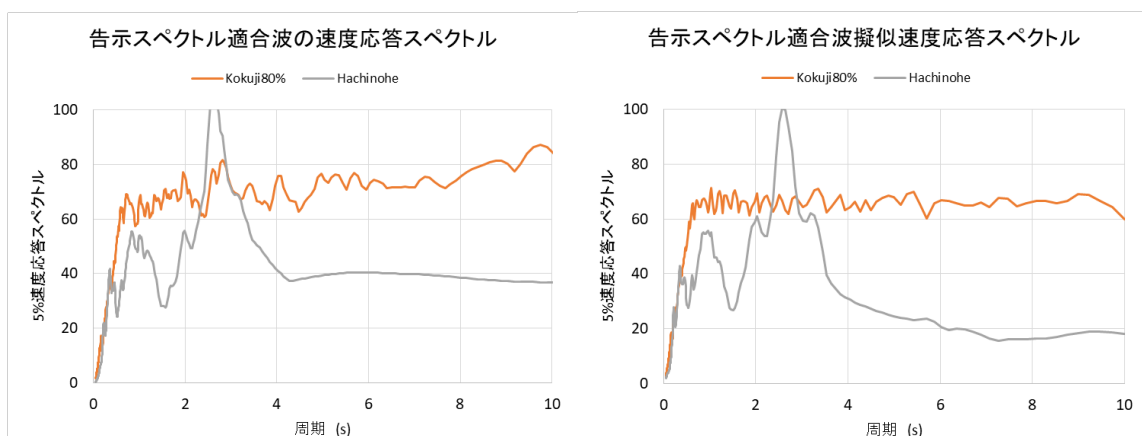


図2 告示スペクトルの80%で作成した告示波の速度応答スペクトル SV (左) と擬似速度応答スペクトル pSv (右)

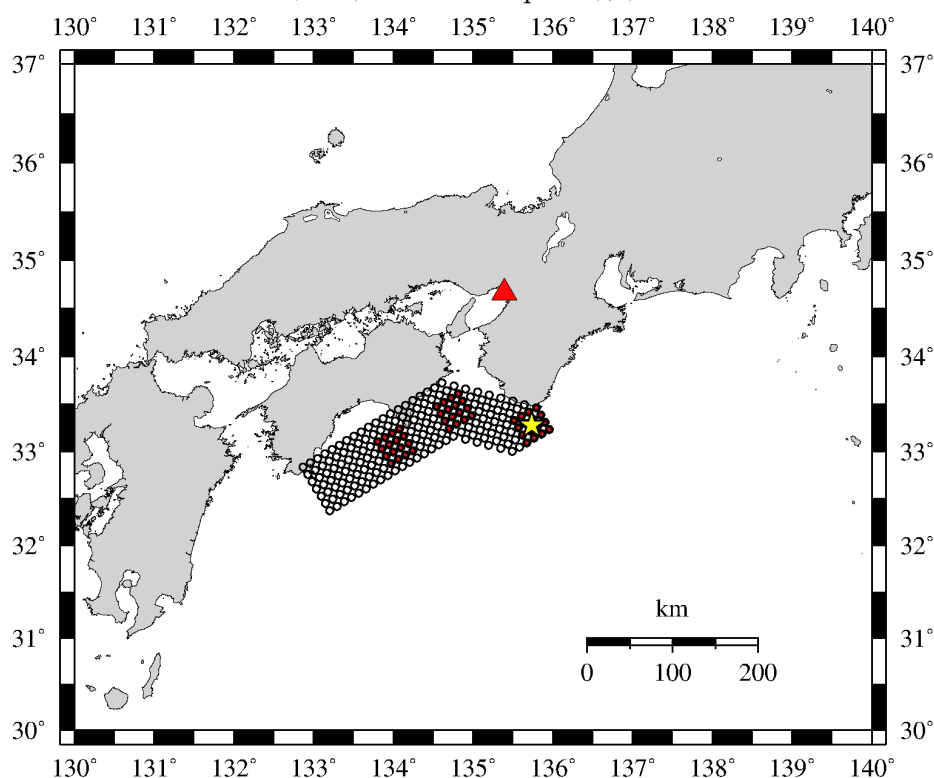


図3 想定した1946年南海地震相当の断層モデル

(▲は対象地点、○は通常の要素断層、●はSMGAの要素断層、★は破壊開始点)

15MPa と設定した。これは内閣府 (2015) の資料にある既往研究の SMGA 内推定応力降下量の 15 MPa~30 MPa の下限値に相当する。以上のような想定断層モデルにより仲野・川瀬 (2021) の方法で昭和南海地震相当の地震動を計算した。その際、舞洲南部地点に防災科学研究所が設置した KiK-net サイトの一つである OSKH02 地点で観測された中小地震

記録から求めた線形サイト増幅特性を利用して最初に地表面での加速度波形を計算した。
なおこの OSKH02 地点は万博会場サイトから北北東に約 1.7 km 離れている。

表 1 サイト波の計算条件

計算手法	仲野・川瀬(2021)で提案している統計的グリーン関数法
断層モデル	内閣府(2015)で公開されている宝永型の南海トラフ地震の断層モデルを参照した。
破壊開始点	緯度 : 33.2745 経度 : 135.7335 深さ : 16.05 km
要素断層	10km×10km×200 個
全断層面積 S(km ²)	20,000
SMGA 面積 Sa(km ²): Sa=S×0.24	4,800 (SMGA 当り 1,600=40×40)
平均すべり量 m	1.5
SMGA すべり量 m	3
平均応力降下量 MPa	3
SMGA 応力降下量 MPa	15
密度 kg/m ³	2.7
震源域の平均 S 波速度 (Vs) m/s	3,800
破壊伝播速度 Vr (=0.72*Vs) m/s	2,736
Vr の揺らぎ	Vr=Vr ± (Vr × 0.15) の範囲でばらつかせる。
破壊伝播の形式	破壊開始点から同心円状に伝播
地震モーメント Mo N.m	1.45 × 10 ²¹
モーメント・マグニチュード Mw	8.04
Q(Nakano et al., 2015; プレート境界_領域 4)	70.2 × f ^{0.72}
位相モデル	群遅延時間に基づく位相スペクトルを利用して波形を作成

図 4 には得られた地表面での加速度波形 (全層を線形仮定で計算したもの) とそれを積分して得た速度波形を示す。地表面での最大加速度は NS 方向で 66 cm/s² で震度 5 弱レベルである。最大速度も同じく NS 方向で 20 cm/s である。加速度の割に速度の大きい波形となっているが、それは図 5 の速度応答スペクトルが示しているように、このサイトでは 1.5 秒～2.5 秒が卓越する増幅特性を有しており、それが影響しているものと推察される。NS 方向の方が EW 方向よりも大きくなっているが、これは震源からの放射された地震動の性質 (放射特性と破壊指向性) を反映したものと考えられる。

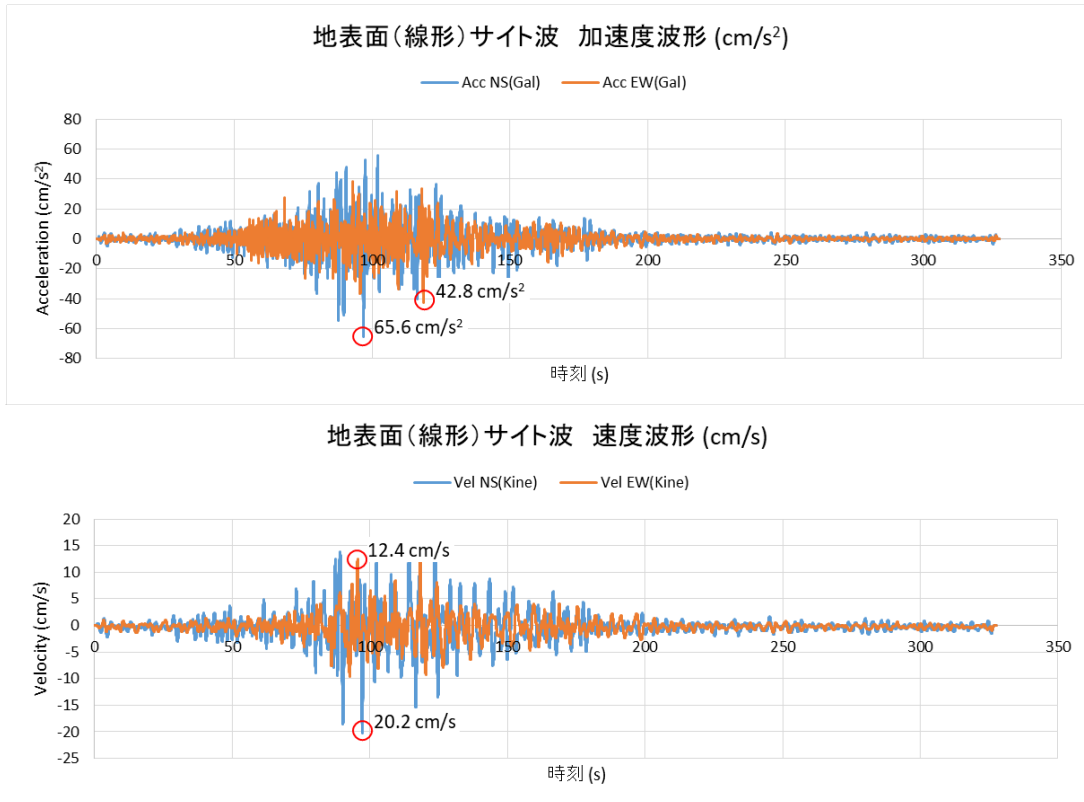


図4 地表面で計算されたサイト波（上：加速度、下：速度）

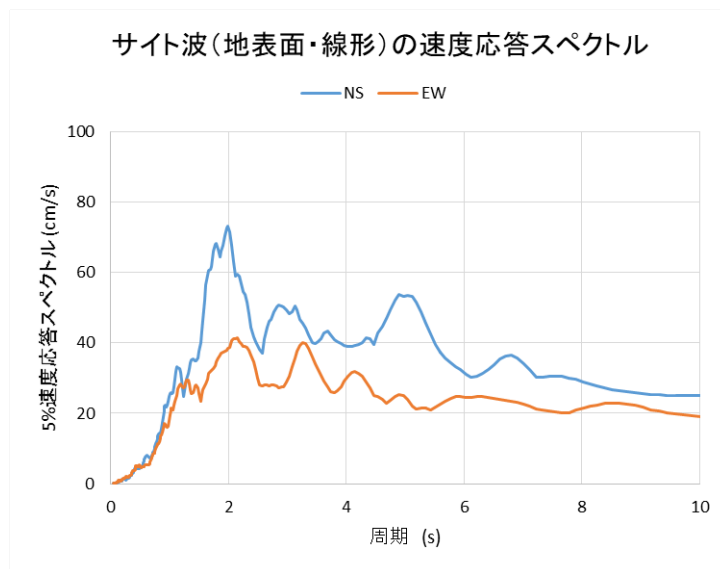


図5 地表面（線形）サイト波の速度応答スペクトル

図6には表層剥ぎ取り解析の結果得られた工学的基盤面での加速度波形とそれを積分して得た速度波形を示す。工学的基盤面での最大加速度はNS方向で55 cm/s²で、地表面の

最大加速度の84%となっている。最大速度も同じくNS方向で16 cm/sであり、地表面の最大速度の79%となっている。理論増幅率が1 Hzで最大1.4倍になっているのでこの程度の最大値の減少率は妥当と考えられる。図7にはその速度応答スペクトルを示す。

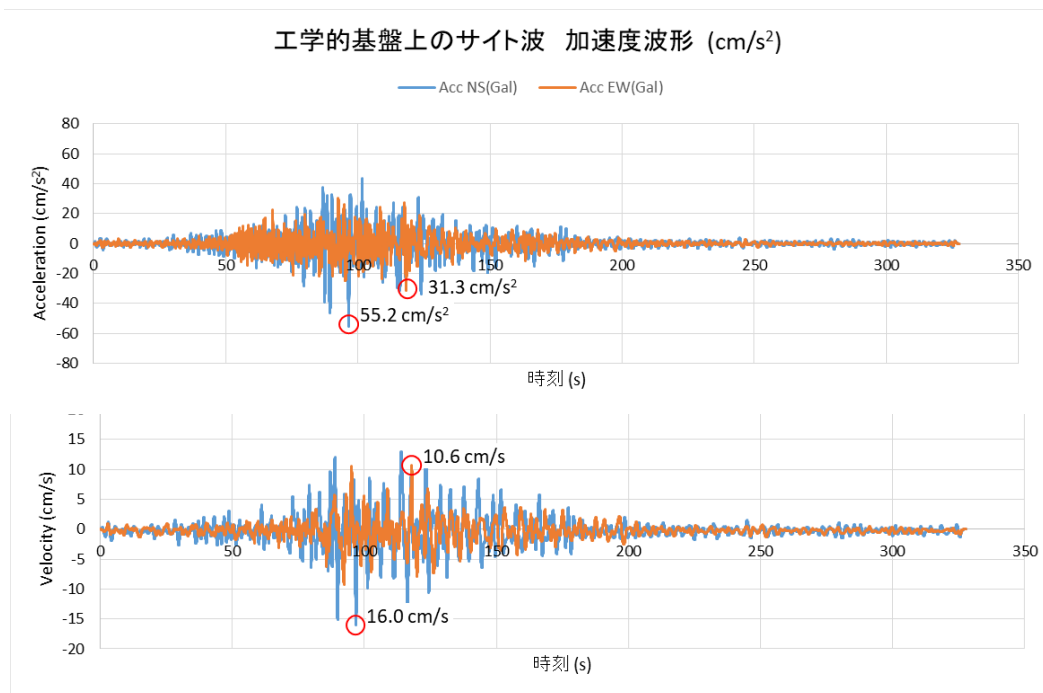


図6 工学的基盤面で計算されたサイト波（上：加速度、下：速度）

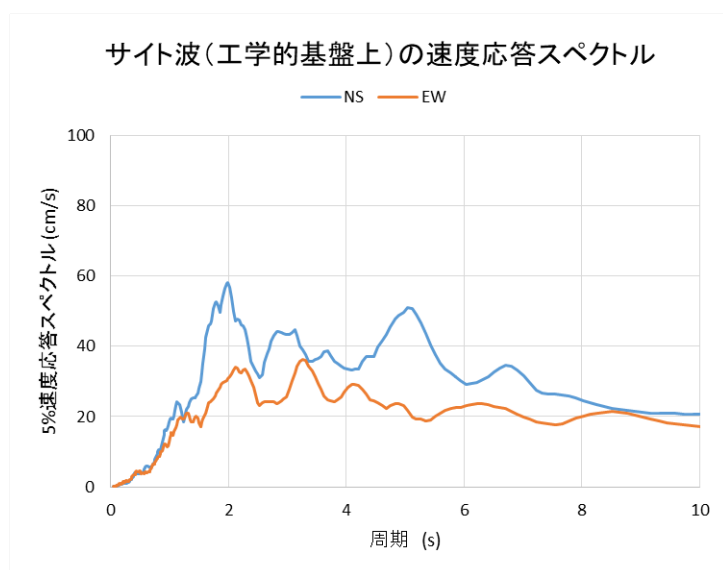


図7 工学的基盤面でのサイト波の速度応答スペクトル

4. 表層地盤の非線形性を考慮した地表面波の評価

以上の準備のもとで、これまで示してきた告示スペクトル 80%模擬波とサイト波に対して、我々が独自に実施したアレイ微動から求めた万博会場サイトでの地盤構造（別冊概要を参照のこと）を用いて一次元の非線形解析（等価線形解析）を行った。表2に工学的基盤における検討用地震動一覧を示す。kokuji-L2 (HC)×0.8 と表記したものがこれまで示してきた 80%に低減した地震波に付けた名称で、当該敷地での設計用入力地震動として提案するものである。一方サイト波は mihm (NS)と mihm (EW)と名付けた。既に指摘したように80%告示波に比べて加速度では約 1/5、速度では約 1/2.5 程度となっている。なおこれ以降加速度・速度における長さの単位が配布波形では m となっていることに注意されたい。

表2 検討用地震動一覧（工学的基盤）

種別	名称	最大加速度 (m/s ²)	最大速度 (m/s)	継続時間 (s)	計測震度
告示波	Kokuji-L2 (HC)	3.961	0.536	234.000	5.637 震度6弱
	Kokuji-L2 (HC)x0.8	3.169	0.429	234.000	
サイト波	mihm (NS)	0.552	0.160	327.680	4.282 震度4
	mihm (EW)	0.313	0.106	327.680	

表3に設定した万博会場サイトにおける地盤の諸元を示す。S波速度は微動のアレイ観測結果から同定した結果をそのまま用い、単位体積重量は近傍のボーリング調査結果を参照して定めた。地盤の非線形特性はS庁舎の室内試験結果を参照して双曲線モデルにフィッティングして作成した。

表3 地盤の諸元

土質	記号	下端レベル (GL+m)	層厚 (m)	P波速度 V _p (m/s)	S波速度 V _s (m/s)	単位重量 ρ (t/m ³)	非線形 特性
埋土	B	-9.211	9.211	659	199	1.800	砂質土
		-19.444	10.233	574	173	1.800	砂質土
シルト質粘土	Ac1	-30.702	11.258	586	177	1.650	Ac1
		-42.982	12.280	725	219	1.650	Ac1
砂レキ	Dg1	-56.287	13.305	829	250	2.100	Dg1
シルト質粘土	Dc1	-70.614	14.327	900	271	1.550	Dc1
砂レキ	Dg2	-85.965	15.351	953	287	2.100	Dg2
シルト質粘土	Dc2	-102.339	16.374	986	297	1.700	Dc2
砂	Ds2	-	-	1,151	347	2.000	-

注:根切り底 GL-9.44m、地下水位 GL-2.50m (GL=OP+4.19m=SGL+0.14m)

このようにしてパラメータを設定した工学的基盤以浅の表層地盤の一次元せん断波応答解析は、古典的な等価線形解析プログラムである SHAKE により行った。

表4に等価線形解析の結果得られた地表面波の諸元、図8・図9には地表面と工学的基盤の加速度応答スペクトルを告示80%適合波とサイト波について示す。等価線形解析で得られた最大のせん断歪は告示波80%の場合で0.4%、サイト波(NS)の場合で0.1%となっており、等価線形解析の適用範囲内である。またこの程度のせん断歪で液状化に至る可能性は低いと考えられる。

最後に、本検討の結果得られた設計用入力地震動としての波形リストを表5に示す。wveフォーマットは冒頭に3行ヘッダーがあるtxt形式のファイルである。それぞれのファイルに各1成分ずつの時刻歴波形データが収められている。

表4 等価線形解析で得られた地表面地震動の諸元

種別	名称	最大加速度 (m/s ²)	最大速度 (m/s)	継続時間 (s)	計測震度
告示波	Kokuji-L2 (HC)	2.890	0.514	234.000	5.755 震度6弱
	Kokuji-L2 (HC)x0.8	2.567	0.432	234.000	
サイト波	mihm (NS)	0.690	0.234	327.680	4.618 震度5弱
	mihm (EW)	0.491	0.131	327.680	

表5 波形データのファイル (水平動)

種別	名称	ファイル名	ステップ数	刻み時間 (s)	最大加速度 (m/s ²)
工学的基盤	Kokuji-L2 (HC)	kokuji_L2hcb.wve	23,400	0.01	3.961
	Kokuji-L2 (HC)×0.8	kokuji_L2hc08b.wve	23,400	0.01	3.169
	mihm (NS)	mihm_nsb.wve	16,384	0.02	0.552
	mihm (EW)	mihm_ewb.wve	16,384	0.02	0.313
地表面 (SHAKE)	Kokuji-L2 (HC)	kokujis_L2hcs.wve	23,400	0.01	2.890
	Kokuji-L2 (HC)×0.8	kokujis_L2hc08s.wve	23,400	0.01	2.567
	mihm (NS)	mihms_nssurface.wve	16,384	0.02	0.690
	mihm (EW)	mihms_ewsurface.wve	16,384	0.02	0.491

5. 波形合成法によるサイト波の策定と評価 (上下動)

告示スペクトルによる上下動の入力地震動については、振幅は水平動の50%とすればよいと考え、そのように振幅補正する。経時特性についても水平動と相似でよいと考えられるが、S波の到達時刻が地震基盤からS波の伝播速度で上昇してくるのに対して、同じ時刻のS波が地震基盤でP波に変換され、P波として上昇伝播してくるものと考え、そこには到達時間差が生じる。それを水平動の際に設定した102.3mまでの表層地盤と文部科学省の地震本部が公表している一次地下構造モデルJIVSMを接続したS波速度構造で地震基盤から地表面までのS波伝播時間を求めると2.985秒と得られた。一方同様にP波の伝

播時間を各層の P 波速度 V_p と層厚から求めると 0.902 秒と得られ、その差は 2.08 秒となった。これにより告示スペクトルに基づき設定する上下動は、告示レベルの 80%とした告示スペクトル 80%波を 1/2 にしたものを工学的基盤上でも地表面上でも同様に用いることとし、時間だけ 2.08 秒早めた（前にシフトさせた）波形とする。

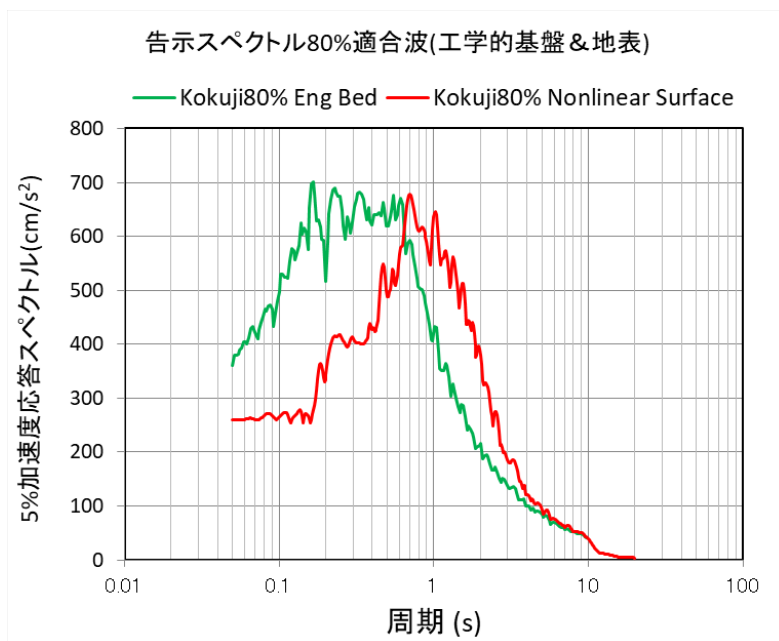


図 8 告示波(80%)の等価線形解析で得られた非線形性を考慮した地表面波（赤）および入力した工学的基盤面波の加速度応答スペクトル（緑）(cm/s²)

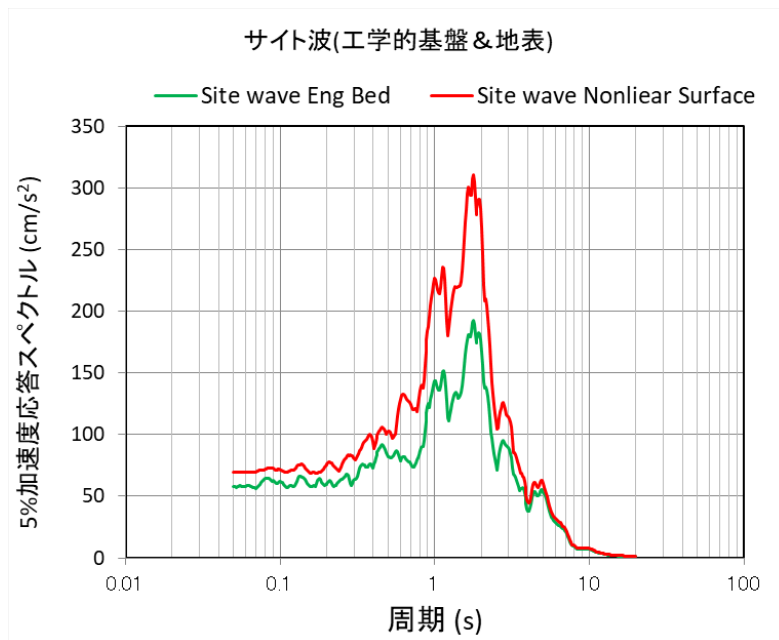


図 9 サイト波の等価線形解析で得られた非線形性を考慮した地表面波（赤）および入力した工学的基盤面波の加速度応答スペクトル（緑）(NS 成分)

一方、波形合成法によるサイト波の評価では、対象地点の経験的上下動増幅特性が求められているので、合成時には3成分が同時に合成される。但し告示スペクトルによる上下動の評価と同様に、評価されているのは震源からS波として放射された波形部分である。

水平動のサイト波の部分で述べたように、波形合成法ではそのサイト増幅特性は地震基盤を基準に、弱小地震の増幅特性の平均値として得られているので、工学的基盤から上の浅い部分においても線形の増幅特性が仮定されている。しかし告示スペクトルを用いた場合と同様に、工学的基盤から地表面までの増幅特性は無視できるほど小さいと考えられるので、工学的基盤波も同じものを用いる。

得られた告示スペクトルの80%で作成した告示波80%（位相特性：Hachinohe NS）を1/2にした上下動の加速度波形、および加速度波形から求めた加速度応答スペクトル（減衰2%と5%）を図10に示す。一方サイト波として計算した上下動の加速度波形を図11に、その速度応答スペクトルを図12に示した。図13は参考までに地表面（線形）サイト波の速度応答スペクトルを3成分重ねがいて比較したものである。水平動のサイト増幅が1秒から2秒で顕著であることがわかる。

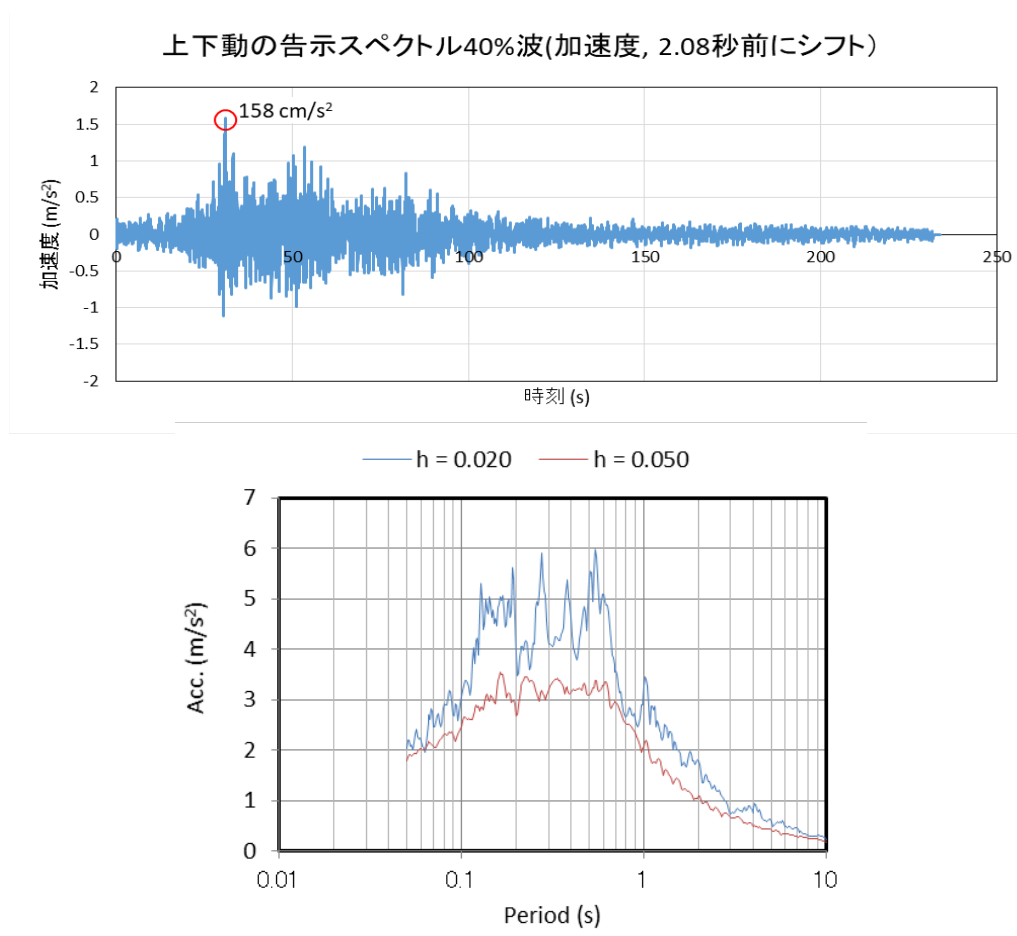


図10 告示スペクトルの40%で作成した上下動告示波（位相特性：Hachinohe NS）の加速度波形と加速度応答スペクトル（減衰2%と5%）

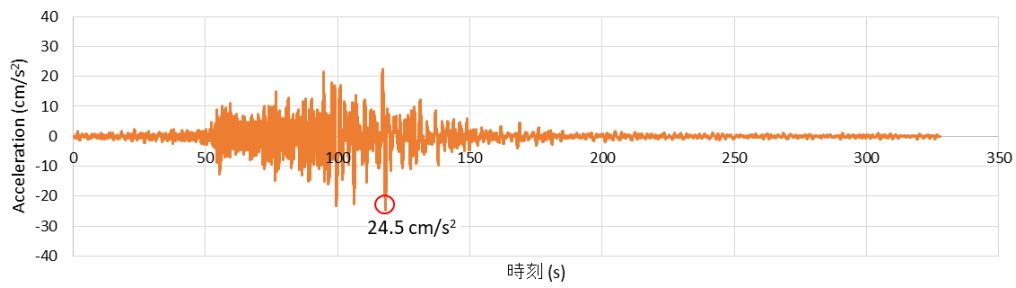


図 1.1 地表面で計算された上下動サイト波（加速度波形）
（表層の地盤増幅を無視してこれを工学的基盤波とも見なす）



図 1.2 地表面（線形）サイト波の上下動の速度応答スペクトル

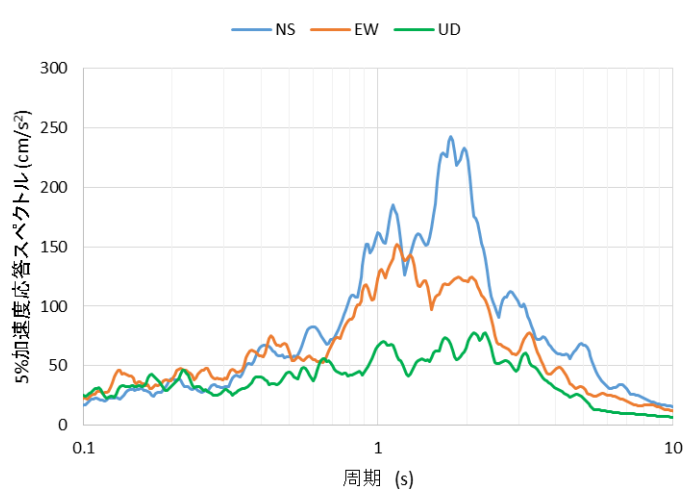


図 1.3 地表面（線形）サイト波の 3 成分の擬似加速度応答スペクトル

最後に、こうして得られた上下動成分の波形ファイルを表 6 にまとめておく。ただし、すでに述べたように、工学的基盤上も地表面上も UD 成分については、中身は全く同一である。

表6 波形データのファイル（上下動）

種 別	名 称	ファイル名	ステップ数	刻み時間 (s)	最大加速度 (m/s ²)
工学的基盤	Kokuji-L2 (HC)×0.8	kokuji_L2hc08bUD.wve	23,400	0.01	3.169
	mihm (UD)	mihm_udb.wve	16,384	0.02	0.552
地表面	Kokuji-L2 (HC)×0.8	kokujis_L2hc08surfaceUD.wve	23,400	0.01	2.567
	mihm (UD)	mihms_udsurface.wve	16,384	0.02	0.690

参考文献

内閣府：「南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告」について、
https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_report.html, あるいは
https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/jishinnankai20151217_04.pdf, 2015.

仲野健一，川瀬博：経験的に得られたフーリエ振幅・経時特性モデルに基づく統計的グリーン関数を用いた強震動予測手法の提案と適用性の検証，日本地震工学会論文集，第21巻，第2号，130-153，2021.5.

日本建築学会地盤震動小委員会：最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法，pp.164，2009.03，ISBN978-4-8189-0583-2.

日本建築総合試験所：時刻歴応答解析建築物構造安全性能評価業務方法書，2021.

宇津徳治：日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表：1885年～1980年 東京大学地震研究所彙報 第57冊第3号，401-463，1982.

Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE - A computer program for earthquake analysis of horizontally layered sites, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report No. EERC 72-12, 1972.