



地盤の堆積構造が地震動増幅特性に及ぼす影響

長尾, 毅

Ma, Xiao

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 29:70-80

(Issue Date)

2025-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100496654>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100496654>



地盤の堆積構造が地震動増幅特性に及ぼす影響

Impact of sedimentary structure on the ground motion amplification characteristics

長尾 毅¹⁾

Takashi

Nagao

Xiao Ma²⁾

概要: 地震動の増幅特性は地盤構造によって決定される。現実の地盤構造は水平成層の状態ではなく、不整形な堆積構造を成しているため、地震動の伝播方向は土中で複雑に変化するため地震動の実際の増幅倍率は水平成層を仮定して算出される理論的倍率とは大きく異なる。これは多次元効果と呼ばれる現象である。本研究では、日本の鳥取県における地震観測地点を対象に、地震観測記録を用いてサイト増幅特性を算出するとともに、常時微動観測結果をもとに不整形な地盤構造を推定した。その地盤構造モデルを対象に有限要素解析(FEA)を実施して、多次元効果が地震動の増幅倍率に及ぼす影響を議論した。

キーワード: 地震動、増幅特性、地震応答解析

1. はじめに

地震動は震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性によって決定される。サイト増幅特性は、地震動が堆積地盤を伝播する過程で増幅する特性を表し、その増幅倍率は周波数ごとに異なる値を持つ。地盤が水平成層状態で、地震動が鉛直に入射する場合は、対象地点の各土層の層厚やせん断剛性などのパラメータをもとに、サイト増幅特性を理論的に計算することが可能である。設計実務ではより簡略化された取り扱いがなされ、表層 30m の平均 S 波速度(V_{s30})¹⁾²⁾³⁾や、表層地盤の固有周期⁴⁾によって地盤種別が分類され、地盤種別ごとの概略の増幅倍率が考慮される。

このようなサイト増幅特性の簡易評価の考え方には大別すると 2 つの問題がある。まず、地盤は表層地盤と深層地盤より構成され、簡易評価法では表層地盤の影響のみが考慮される。ここで、両者の違いは地盤剛性の違いであり、深層地盤は巨大地震動作用時にも非線形化の影響を受けない、剛性の大きな地盤である。一方、表層地盤は比較的剛性の低い地盤であり、巨大地震作用時には非線形化の影響を受ける。両者の境界が工学的基盤であり、S 波速度が 300m/s 以上の地盤である。地震動の増幅倍率としては表層地盤によるよりも深層地盤によるものの方がはるかに大きい⁵⁾⁶⁾⁷⁾。設計実務で同じ地盤種別に分類される地点であっても地震動の増幅倍率にはばらつきが大きい。深層地盤による増幅特性の観点から分類するとそのばらつきは小さい⁸⁾。次に、たとえ深層地盤を考慮したとしても、水平成層条件を仮定して算出される理論増幅倍率は、地震記録を用いてスペクトルインバージョン⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾によって評価された増幅倍率と比較すると非常に小さい⁶⁾⁷⁾。現実の地盤構造は水平成層の状態ではなく、各土層の層厚は場所ごとに複雑に変化している。このため、地震動の伝播方向は土中で複雑に変化し、複雑に波動が重ね合わされることなどにより、地表で観測される増幅倍率は水平成層を仮定して算出される理論的倍率とは大きく異なる。このような現象は多次元効果と呼ばれ、水平成層構造をもとにした 1 次元(1D)モデルで地震応答を評価すると、観測地震動に対して誤差が大きい場合があることは指摘されてきたが¹²⁾、実際に地盤の多次元効果が地震動の増幅倍率に及ぼす影

響について検討された研究事例は少ない。例えば、地盤を簡単な 2 層条件として基盤を傾斜させ、地表の地震応答の違いを 2 次元(2D)モデルを用いて調べた例¹³⁾¹⁴⁾や、多層系の不整形地盤を対象に 2D モデルを作成し、増幅特性の違いを調べた例¹⁵⁾がある。サイト増幅特性は場所ごとに大きく異なるため¹⁶⁾、正確に地点ごとのサイト増幅特性を評価する必要がある。

本研究では、日本の鳥取県における地震観測地点を対象に、対象地点とその近傍で観測された地震記録を用いて対象地点の深層地盤の影響を考慮したサイト増幅特性を算出した。対象地点周辺で常時微動観測を実施して対象地点近傍の地盤構造を推定し、推定された地盤構造を対象に 2D の有限要素解析 (FEA) を実施して、不整形な地盤堆積構造が地震動の増幅倍率に及ぼす影響について議論した。

2. 対象地点とその地盤構造

本日本の強震観測ネットワーク K-NET¹⁷⁾の鳥取県の地点 TTR004 周辺を対象にした(図 1)。K-NET では PS 検層によって地震観測地点の地下 20m までの S 波速度構造が求められている¹⁸⁾。TTR004 は 2003 年に地震観測場所が移設されており、現在の観測地点のサイト増幅特性はこれまでに求められていない。このため、TTR004 周辺の K-NET 観測地点で、スペクトルインバージョンによってサイト増幅特性が算出されている 3 地点(TTR002, TTR005, TTR006)と TTR004 における地震記録を用いて、TTR004 のサイト増幅特性の評価を行った。マグニチュード(M)が大きい地震では震源特性が複雑になることから、M が 4.2 以上 6.0 未満の地震のみを対象にした。表層地盤の非線形応答の影響を避けるため、加速度最大値(PGA)は 1m/s/s 以下の記録を用いた。逆に加速度の小さい地震記録は SN 比が悪い場合があるため、 ω^2 則¹⁹⁾をもとに、0.2Hz 以上の範囲で SN 比が良好な記録を選んだ。以上の条件から、10 の地震に対する記録セットを作成した。TTR004 におけるサイト増幅特性は、地震記録のスペクトル比をもとに、式(1)を用いて算出した²⁰⁾。

$$G_T(f) = G_R(f) \cdot \frac{O_T(f)}{O_R(f)} \cdot \frac{r_T}{r_R} \cdot \frac{\exp\left\{-\left(\pi f r_R\right) / (Q(f) V_s)\right\}}{\exp\left\{-\left(\pi f r_T\right) / (Q(f) V_s)\right\}} \quad (1)$$

ここで $G(f)$ はサイト増幅特性、 $O(f)$ は観測地震動、 r は震源距離、 $Q(f)$ は Q 値、 V_s は伝播経路の S 波速度(本研究では[21]をもとに 3.55km/s)、 f は周波数である。添え字 R, T はそれぞれ参照地点、対象地点(TTR004)である。 Q 値は非弾性減衰を表す指標で、周波数依存性を有し、地域ごとに異なる²²⁾²³⁾。本研究では、 Q 値は以下により算出した²⁴⁾。

$$Q(f) = 152 f^{0.38} \quad (2)$$

図 2 に算出されたサイト増幅特性を示す。灰色細線が個々の記録によるサイト増幅特性、赤線が平均値である。参考のため、移設前の地点における地震観測記録からスペクトルインバージョンによって求められた TTR004 のサイト増幅特性を青線で示している。移設前の地点では増幅倍率が 1~4 程度で、周波数毎に大きく異なることはないが、現在の地点では 1.3Hz において 22.7 と大きな増幅倍率を示している。移設前後の地震観測地点の距離は 1.3km でしかないが、サイト増幅特性は大きく異なっており、site specific な増幅倍率の評価が非常に重要である。

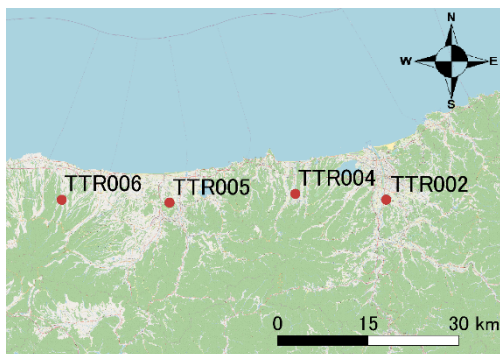


図 1 対象地点

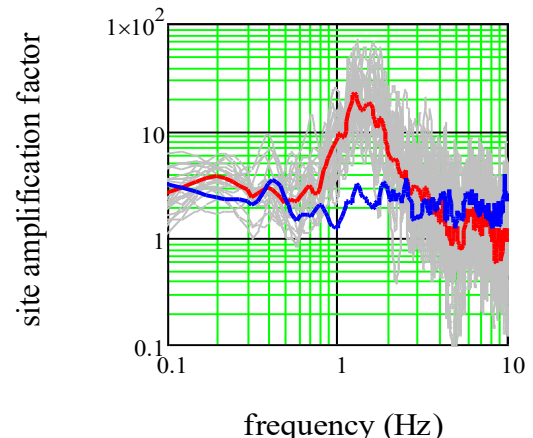


図 2 TTR004 のサイト増幅特性

2.2 常時微動観測による地盤構造の推定

TTR004 周辺地点で常時微動観測を行った。観測結果から常時微動の水平成分と鉛直成分のスペクトル比(H/V スペクトル)を算出した。常時微動に表面波が卓越している場合、H/V スペクトルは表面波の H/V ス

ペクトルと見なすことができ、鉛直成分を持つ表面波はレイリー波であることから、H/V スペクトルはレイリー波の H/V スペクトルと見なすことができる²⁵⁾。レイリー波の H/V スペクトルのピーク周波数は地震動の増幅特性の 1 次のピーク周波数と良く一致することから²⁶⁾、H/V スペクトルは、常時微動観測地点の地盤構造の推定根拠として有効である。地盤の S 波速度構造を仮定することで基本モードレイリー波の理論 H/V スペクトルを算出することができるため²⁷⁾、H/V スペクトルと基本モードレイリー波の H/V スペクトルの残差を最小にする観点から各地点の S 波速度構造を推定することが可能である。

図 3 に観測地点位置を示す。図には H/V スペクトルのピーク周波数をあわせて示している。常時微動観測は東西 2.0km、南北 1.5km のエリア内で行ったが、H/V スペクトルのピーク周波数は 1.0Hz から 6.5Hz の範囲にあり、地点による違いが大きい。地盤構造が場所によって大きく異なっていることが示唆される。図 4 に FEA の対象測線を H/V スペクトルのピーク周波数とともに示す。図中の A から H の記号は後述する FEA の解析対象地点であり、TTR004 は地点 D である。測線は幅 600m であり、1.2~3.0Hz の広い帯域にピーク周波数が分布していた。これは、TTR004 地点近傍の狭い範囲においても、地盤構造が急激に変化していることを示している。

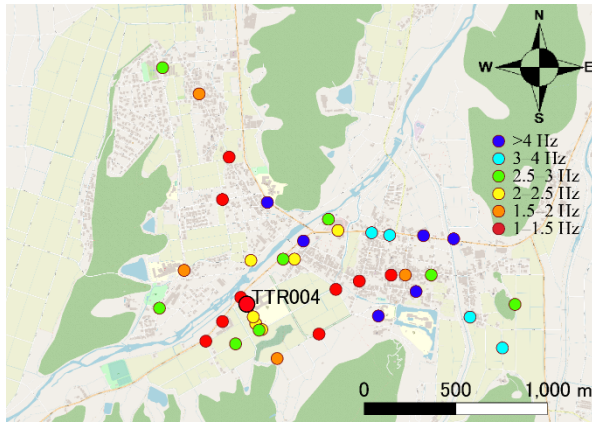


図 3 常時微動観測地点

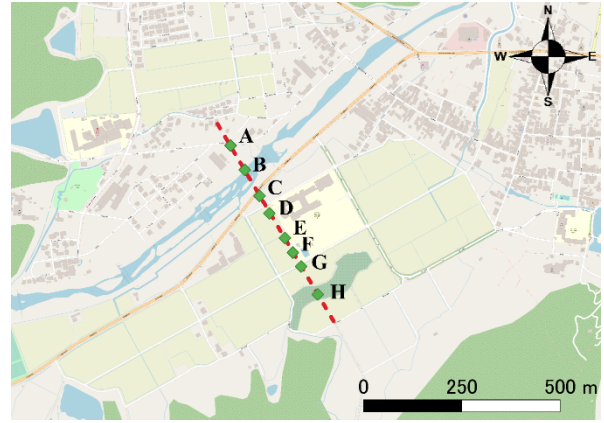


図 4 FEA 対象測線

レイリー波の H/V スペクトルを算出するためには、各土層の層厚、S 波速度、P 波速度、密度が必要である。K-NET により公開されている TTR004 地点の表層 20m と J-SHIS²⁸⁾による深部の S 波速度分布を組み合わせることで深層地盤までの S 波速度構造を設定することができる。P 波速度および密度は以下により算出できる²⁹⁾。

$$\rho = 1.7 + 0.32 \times 10^{-3} V_S \quad (3)$$

$$V_P = 100 \sqrt{V_S} \quad (4)$$

ここに、 ρ :密度(t/m³)、 V_S :S 波速度(m/s)、 V_P :P 波速度(m/s)である。

地盤モデルをもとに算出される基本モードレイリー波の H/V スペクトルと常時微動による H/V スペクトルが整合するように地盤モデルを調整して、この地点の S 波速度構造を設定した(表 1)。その際、表層 20m の S 波速度は N 値から推定された値³⁰⁾も参照した。FEA の対象測線上の他の 4 つの常時微動観測地点についても、常時微動とレイリー波の H/V スペクトルのピーク周波数が一致するように、TTR004 の S 波速度構造をもとに各層の層厚を変化させて、S 波速度構造を推定した。各地点の常時微動とレイリー波の H/V スペクトルの例を図 5 に示す。赤線が常時微動、青線がレイリー波の H/V スペクトルである。FEA 測線の北側端部については、常時微動観測を行うことができなかったため、近隣の 2 地点の H/V スペクトルのピーク周波数の平均値として 1.9Hz のピーク周波数と仮定した。S 波速度構造推定地点以外の地点については、層厚が線形に変形すると仮定して FEA の対象測線の地盤構造を推定した。図 6 に得られた地盤構造を示す。 $V_S=800$ m/s の土層以深の土層の層厚は一定とし、 $V_S=400$ m/s の土層の層厚が場所によって大きく変化している。さらに、 $V_S=190$ m/s の軟弱層は測線の北側の地点 A から D の範囲にのみ存在すると推定された。図 7 には FE メッシュもあわせて示している。地点 C が堆積層厚が最大の地点であり、地点 G が堆積層厚が最小の地点である。2 地点の基盤深さの違いは 14m である。

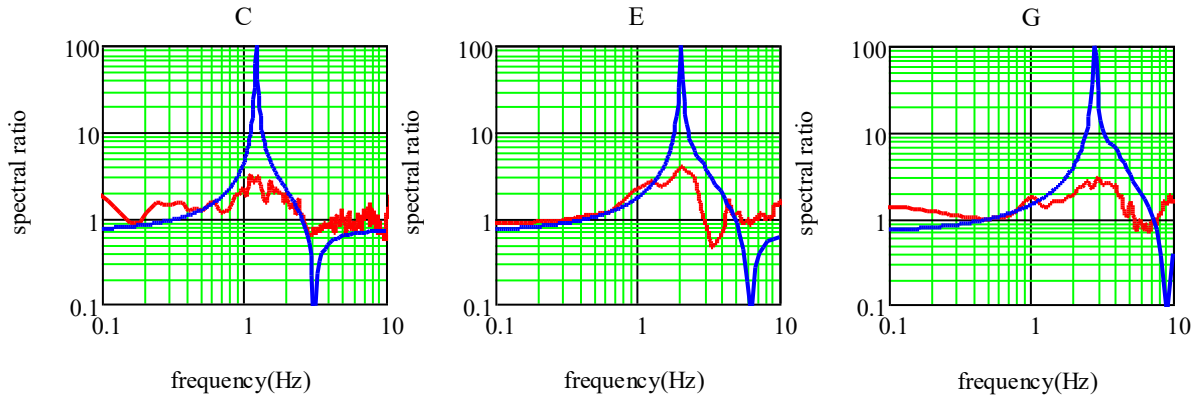


図5 H/V スペクトル

表 1 TTR004 地点の S 波速度構造

No.	Vs	A	B	C	D	E	F	G	H
1	180	1							
2	270	4.6	5.4	6	6	5	4	4	4.5
3	200	1							
4	280	9.3	9.6	10	10	9	8	8	9.5
5	190	5.3	7.8	10	6	0.5	0		
6	400	16	19.2	22	20	11	10	2	7.8
7	800	10							
8	1100	32							
9	1400	45							
10	1700	37							
11	2100	46							
12	2700	88							
13	3100	—							

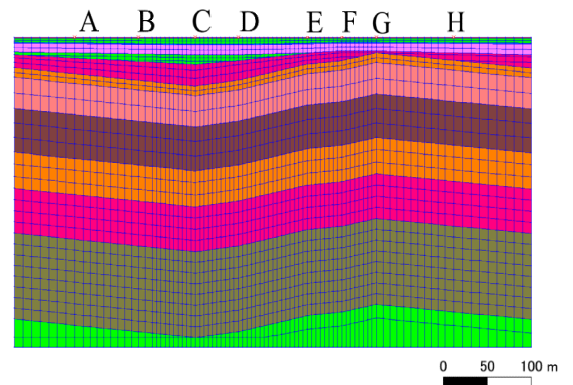


図6 地盤構造と FE メッシュ

2.3 地震応答解析

多次元効果を検証するため、図6に示した地盤を対象に2D FEAを行った。FEのメッシュ高は、最大10Hzまでの波動が伝播されるように設定している。境界条件は、自重解析時は底面境界は固定境界、側方境界は水平方向固定、鉛直方向は自由とし、動的解析時は側方・底面境界ともに粘性境界とした。表層地盤と深層地盤のうち、表層地盤は小地震時には線形で応答するが、巨大地震動作用時には非線形化する可能性がある。図2で示したサイト増幅特性は地盤の非線形化の影響がない条件における増幅特性である。一方、深層地盤は巨大地震作用時も非線形化しない。そこで、深層地盤については線形平面要素でモデル化し、表層地盤は線形平面要素を用いるケースと、地盤の非線形性を考慮できる要素を用いるケースの2種類を設定した。線形平面要素を用いる場合、ヤング係数は以下により算出した。

$$G = \rho V_s^2 \quad (5)$$

$$E = 2(1 + \nu)G \quad (6)$$

ここに、 G :せん断剛性(kPa)、 ρ :密度(t/m^3)、 V_s :S波速度(m/s)、 E :ヤング係数(kPa)、 ν :ポアソン比($=0.33$)である。

履歴減衰は文献[31]を参照して各層に対して式(7)のように設定し、これをレーレー減衰で表現した。レーレー減衰は式(8)で表現される。本研究では増幅特性のピーク周波数が存在する1Hzから5Hzまでの範囲で、式(7)と式(8)の残差二乗和が最小となるようにパラメータ α 、 β を設定した。

$$\xi = \frac{5.333}{V_s + 66.77} \quad (7)$$

ここに、 ξ :減衰定数、 V_s :S波速度(m/s)である。

$$\xi = \frac{\alpha}{2\omega} + \frac{\beta\omega}{2} \quad (8)$$

ここに、 α, β :それぞれ質量マトリックス、剛性マトリックスに乗じるパラメータ、 ω :角周波数($=2\pi f$)である。

一方、地盤の非線形性を考慮する場合、主軸回転時の応答を評価できるマルチスプリング要素³²⁾を適用した。地盤の非線形性は以下に示す双曲線モデル³³⁾を適用した。

$$\frac{G_m}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{G_0\gamma}{\tau_m}} \quad (9)$$

ここに、 G_m :せん断剛性、 G_0 :初期せん断剛性、 γ :せん断ひずみ、 τ_m :せん断強度であり、せん断強度はせん断抵抗角 ϕ と平均有効拘束圧 σ_m' を用いて式(10)により計算される³⁴⁾。

$$\tau_m = \sigma_m' \sin \phi \quad (10)$$

各深さの地盤のせん断剛性 G_m は基準有効拘束圧依存性を考慮して算出した³⁵⁾。表 2 に FEA で用いた地盤パラメータを示す。

表 2 地盤パラメータ

stratum No.	Vs (m/s)	ρ (t/m ³)	E (kPa)	α	β
1	180	1.8	152089	0.1	0.002
2	270	1.8	361212	0.1	0.001
3	200	1.8	198196	0.1	0.002
4	280	1.8	408910	0.1	0.001
5	190	1.8	178872	0.1	0.002
6	400	1.8	834510	0.098	0.001
7	800	2.0	3264600	0.1	0
8	1100	2.1	6475050	0.1	0
9	1400	2.2	10979200	0.089	0
10	1700	2.4	16912300	0.073	0
11	2100	2.4	27279400	0.06	0
12	2700	2.6	48744500	0.043	0
13	3100	2.7	67465200	0.041	0

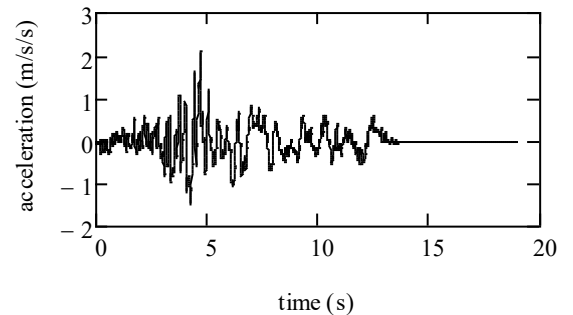


図7 地震波形

地震波形は、1968 年十勝沖地震で八戸港において観測された地震波形をもとに deconvolution によって工学的基盤の入射波形としたものを用いた。図7に地震波形を示す。PGAは 2.1m/s/s であり、他の巨大地震と比較すると必ずしも大きくはないが、卓越周波数は 0.4Hz および 1.0Hz であり、地盤非線形性に大きな影響を及ぼす特性を有する波形である。本研究では、図に示した地震波形と、地盤非線形性の影響を除く観点から PGA を 0.1m/s/s とした 2 種類の波形を用いて FE モデルの下端から入射した。

2D FEA による増幅特性(以下、2D 増幅特性)は、地表の地震動と入力地震動のスペクトル比として評価した。スペクトル比を求めるにあたり、入力地震動、地表の地震動ともにバンド幅 0.2Hz の Parzen ウィンドウで平滑化を行った。FEA の出力点は、図6に示す A から H の 8 点である。地盤の多次元効果を議論するため、地盤が水平成層構造の条件における増幅特性(以下、1D 増幅特性)を評価した。表層地盤の非線形性を考慮しないケースでは重複反射理論に基づいて評価を行い、一方、表層地盤の非線形性を考慮する場合は 2D FEA と同じ地盤パラメータを設定した 1D FEA を用いた。重複反射理論による増幅特性評価において用いる減衰はレーレー減衰で表現し、FEA の線形平面要素の減衰と同じ値とした。

3. 解析結果と議論

まず入力地震動の PGA が 0.1m/s/s の、地盤非線形の影響がない条件について議論する。図8に、堆積層厚が最大の地点 C を対象に、加速度時刻歴を示す。1D の応答を青線、2D の応答を赤線として示している。1D 解析と2D 解析の地表の PGA はそれぞれ $0.27, 0.62\text{m/s/s}$ であり、2D 解析の PGA は1D 解析の値の2.3 倍となり、多次元効果が現れている。加速度の envelope については、1D の応答は入力波形と類似であるが2D の応答は入力波形とは異なり、最大応答は 6.94 秒で現れ、かつ地震動の継続時間も長い。地震波が各層に複雑に入射と反射を繰り返した結果である。

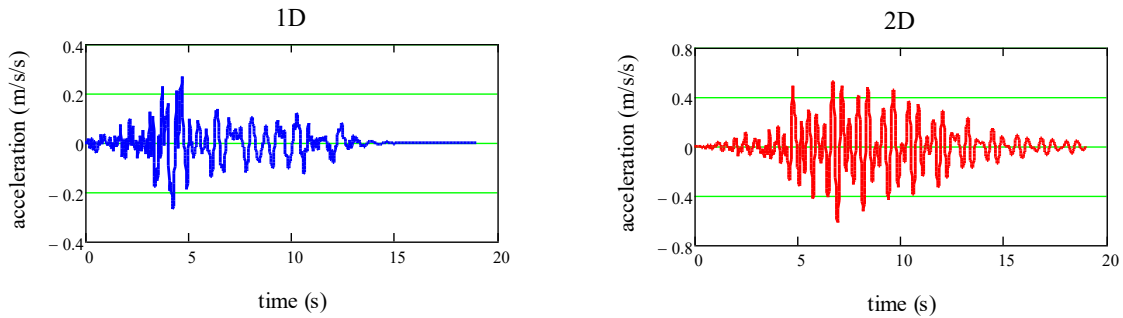


図8 地点 C における応答(線形応答)

図9に各地点における増幅特性を、1D 増幅特性を青線、2D 増幅特性を赤線として示す。堆積層厚の厚い地点 A～D において、2D 増幅特性と1D 増幅特性の違いが顕著である。ピーク倍率は2D 増幅特性が $14.9 \sim 35.8$ の範囲にあり、1D 増幅特性では $7.8 \sim 10.0$ であり、両者の倍率比は $1.9 \sim 3.6$ の範囲にある。ピーク倍率比が最大となるのは堆積層厚が最大の地点 C であった。TTR004 に相当する地点 D では2D 増幅特性のピーク倍率は 17.6 であり、図 2 に示したサイト増幅特性のピーク倍率(22.7)を概ね再現できている。一方1D 増幅特性ではピーク倍率は 8.9 であり、実際の増幅倍率を再現できない。ピーク周波数についても1D 増幅特性と2D 増幅特性には違いがみられ、2D 増幅特性では1次ピーク周波数は $1.6 \sim 1.7\text{Hz}$ の範囲にあるが、1D 増幅特性では $1.4 \sim 1.8\text{Hz}$ の範囲にあり、2D 増幅特性では1D 増幅特性よりも高い周波数において1次ピーク周波数が出現する。これは、各地点の地震応答が、その地点直下の地盤構造のみならず、周辺の地盤構造の影響も受けているためである。ただし、地点 A では、2D 増幅特性と1D 増幅特性で1次ピーク周波数はほぼ一致している。

次に堆積層厚の薄い地点 E～H については、多次元効果は認められるものの、地点 A～D と比較すると、2D 増幅特性と1D 増幅特性の違いは小さい。すなわち、ピーク倍率は1D 増幅特性では $5.4 \sim 7.3$ の範囲であり、2D 増幅特性では $12.0 \sim 17.5$ の範囲にあり、両者の倍率比としては $2.1 \sim 2.4$ の範囲である。1次ピーク周波数は、1D 増幅特性の場合、地点 E はあまり明瞭ではないが $2.2 \sim 3.4\text{Hz}$ の範囲にあり、2D 増幅特性では $1.6 \sim 2.5\text{Hz}$ の範囲であり、2D 増幅特性の1次ピーク周波数は1D 増幅特性の値よりも低い。これも、多次元効果によって各地点の地震動増幅特性が周辺の地盤構造の影響を受けた結果である。

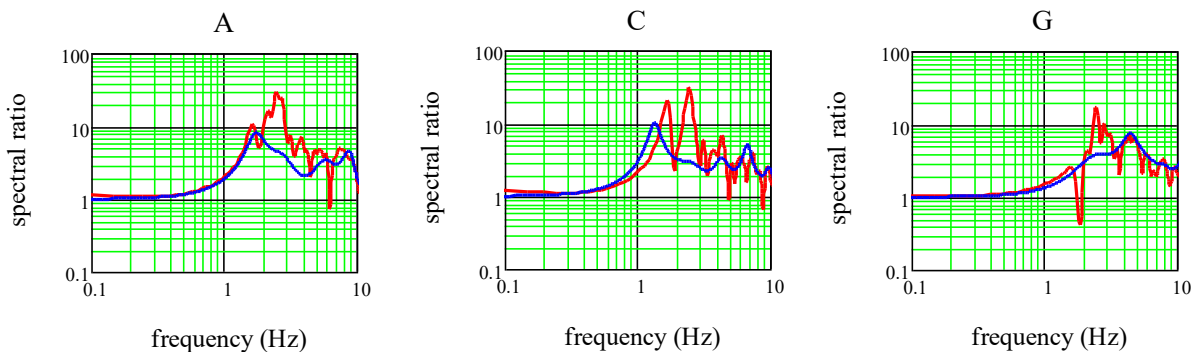


図9 増幅特性の比較(線形応答)

次に入力地震動の PGA が 2.1m/s/s の、地盤の非線形性の影響がある場合について議論する。図 10に、堆積層厚が最大の地点 C を対象に、加速度時刻歴を示す。1D 応答を青線、2D 応答を赤線として示してい

る。表層地盤は強震動の作用を受けて地盤が非線形化するとき、剛性が低下するとともに減衰が増加する。このため、増幅特性としては、1 次ピーク周波数は低下し、増幅倍率も低下することから、各増幅特性は線形応答時とは異なる。まず地表の PGA は、1D 応答が 9.92m/s^2 であるのに対して、2D 応答はそれよりも小さい 4.95m/s^2 となった。1D 応答の加速度は 4.2 秒で最大値を示し、高周波数の応答となっている。これに対して 2D 応答では応答が最大となる時刻は 5.9 秒であり、線形応答時と同様に、多次元効果によって地表の加速度応答が最大となる時刻は異なる結果となった。さらに、1D 応答では入力地震動の振幅が減少するに伴って地表の応答も振幅が減少し、5 秒以降は振幅が急激に減少する。これに対して 2D 応答では入力地震動の振幅が減少しても大きな応答を示し、継続時間も長い。これも線形応答時と同様である。

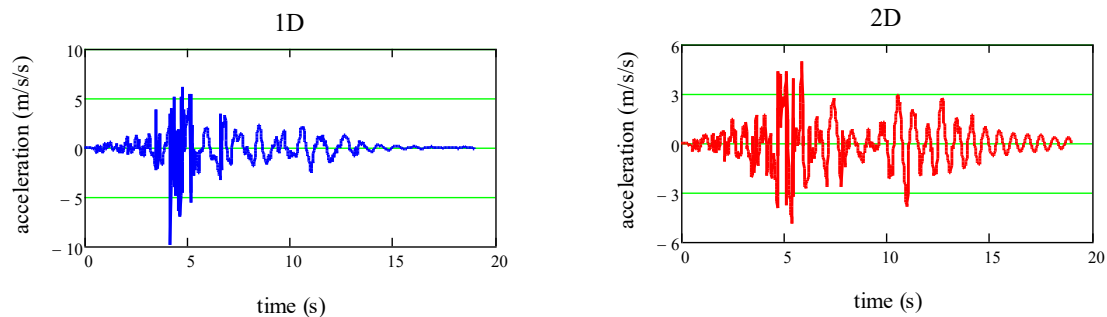


図 10 地点 C における応答(非線形応答)

図 11 に各増幅特性を、1D 増幅特性を青線、2D 増幅特性を赤線として示す。ピーク倍率については、2D 増幅特性と 1D 増幅特性の差は地盤非線形性の影響がない場合と比較すると減少する。これは各地点に共通する傾向である。2D 増幅特性は 1D 増幅特性に対してピーク倍率として 1.4~2.3 倍であった。地盤が線形応答する場合と同様に、堆積層厚が最大の地点 C がピーク倍率比が最も大きい地点であった。1 次ピーク周波数については、堆積層厚の厚い地点 A~D では 2D 増幅特性と 1D 増幅特性の差は線形応答時よりも減少する結果となった。

以上のように、何れの地点においても 2D 増幅特性と 1D 増幅特性のピーク倍率は大きく異なり、多次元効果がある場合の地震動の増幅特性は設計実務で通常仮定される水平成層状態では説明できず、設計実務の簡略化した取り扱いには危険側の判断となる可能性がある。この傾向は特に堆積層厚の厚い地点において顕著である。

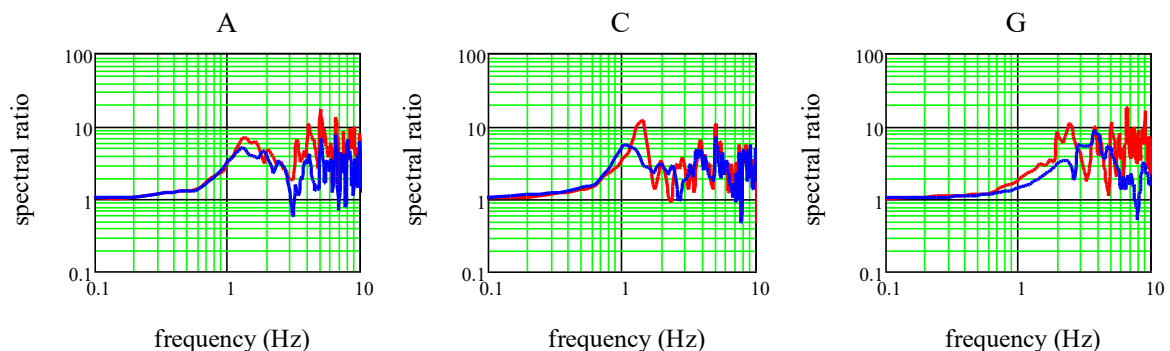


図 11 増幅特性の比較(非線形応答)

本研究の結果を、多次元効果を取り扱った既往の研究¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾の結果と比較する。考慮している基盤の S 波速度としては、本研究の 3100m/s に対して、既往の研究では $800\text{m/s} \sim 2000\text{m/s}$ であることから、既往の研究は深層地盤構造の全てを対象として多次元効果を議論したものではない。一方、基盤傾斜角は本研究では 20° であるが、既往の研究では 30° 以上までの傾斜を考慮しており、既往の研究の方が多次元効果が表れやすい条件を扱っている。表層地盤の非線形性については、本研究のように線形と非線形の 2 つの条件を考慮した例は存在しない。以上のような条件の違いがあるが、地盤の不整形堆積を考慮した 2D 増幅特性と 1D 増幅特性のピーク倍率の比としては、既往の研究では 0.7~1.9 倍の範囲となっているが、本研究では地盤の非線形性を考慮しない場合、最大で 3.6 倍、非線形性を考慮する場合は最大で 2.3 倍であり、既往の研究結果よりも地盤の多次元効果により大きな倍率比が得られた。この理由は、上述のように、本研究では最大の S 波速度で 3100m/s の地盤までを考慮しているためである。なお、2D 増幅特性と 1D 増幅特性によ

るピークの周波数の違いについては既往の研究でも示されているが、具体的な周波数の差は地盤条件によって様々に異なる。

4. 結論

本研究では、地盤構造が狭い範囲で急激に変化している日本の鳥取県の地震観測地点を対象に、地震動の増幅特性を FEA によって解析し、設計実務で考慮される水平成層の地盤構造の状態に対する増幅特性との比較検討を行った。本研究による主要な結論は以下の通りである。

1. 地盤構造が不整形構造を示す地点においては、地震記録を用いて評価されたサイト増幅特性は、水平成層状態を仮定した場合と比較すると大きなピーク倍率となる。このため、設計実務で通常仮定される水平成層状態では実際の地震動の増幅特性を説明できない。地盤の不整形構造を考慮した FEA では、地震記録によるサイト増幅特性のピーク倍率を概ね評価できる。
2. 地盤の非線形性が現れない場合、堆積層厚の厚い地点では多次元効果は大きく、2D 増幅特性は 1D 増幅特性に対してピーク倍率として 1.9～3.6 倍の違いがあった。一方、堆積層厚の薄い地点では、両者の違いは 2.1～2.4 倍と比較的小さかった。1 次ピーク周波数については、不整形な地盤構造においては、周辺の地盤構造の影響を受けるため、水平成層状態を仮定した場合とは異なる周波数となる。
3. 地盤の非線形性が現れる場合は、サイト増幅特性のピーク倍率における多次元効果は、地盤が線形挙動する場合と比較すると顕著ではない。ただし、堆積層厚が厚い地点では、2D 増幅特性は 1D 増幅特性に対してピーク倍率として 2.3 倍の違いがあった。

参考文献

- 1) Eurocode8, Design of structures for earthquake resistance, Part1: general rules, seismic actions and rules for buildings, Final draft pr EN1998, European Committee for Standardization, Brussels, 2003.
- 2) *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures*, 2000 edition, Part 1, FEMA 368, Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2001.
- 3) *Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design*, Second Edition with 2014 Interim, AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), Washington, D.C., 2014.
- 4) *Specifications for highway bridges, part5, Seismic design*, ver. 2012, Japan Road Association, Maruzen Co., Ltd., 2016.
- 5) T. Nagao, "Seismic amplification by deep subsurface and proposal of a new proxy," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 5157-5163, 2020.
- 6) T. Nagao and Y. Fukushima, "Source- and Site-Specific Earthquake Ground Motions: Application of a State-of-the-Art Evaluation Method," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 10, No. 4, pp. 5882-5888, 2020.
- 7) Y. Fukushima, T. Nagao, J. Oshige, and I. Suetomi, "Ground motion evaluation for intra-plate earthquake by different site amplification factors and source models," *7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, pp.2484-2492, Roma, Italy, June 17-20, 2019.
- 8) T. Nagao, "Maximum Credible Earthquake Ground Motions with Focus on Site Amplification due to Deep Subsurface," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 11, No. 2, pp. 6873-6881, 2021.
- 9) D. J. Andrews, "Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size," *Earthquake Source Mechanics*, S. Das, J. Boatwright, and C. H. Scholz (Editors), American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 259-268, 1986.
- 10) T. Iwata and K. Irikura, "Source parameters of the 1983 Japan sea earthquake sequence," *Journal of Physics of the Earth*, Vol. 36, pp. 155-184, 1988.
- 11) J. Boatwright, J. B. Fletcher and T. E. Fumal, "A general inversion scheme for source, site and propagation characteristics using multiply recorded sets of moderate-sized earthquakes," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 81, No. 5, pp. 1754-1782, 1991.

- 12) E. M. Thompson, L. G. Baise, Y. Tanaka, and R. E. Kayen, "A taxonomy of site response complexity," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41, pp.32–43, 2012.
- 13) P. P. Bruno, E. Carrara, V. D. Fiore, A. Rapolla, and N. Roberti, "Seismic site amplification factor (DAF): Geometrical limits of 1D modelling," *4th EEGS Meeting*, Barcelona, Spain, 1998.
- 14) K. Pitilakis, E. Riga, A. Anastasiadis, and K. Makra, "New Elastic Spectra, Site Amplification Factors and Aggravation Factors for Complex Subsurface Geometry Towards the Improvement of EC8," *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Christchurch, New Zealand, 1-4 November, 2015.
- 15) O. J. Ktenidou, D. Raptakis, P. Apostolidis, and K. Pitilakis, "Aspects of Surface Topography and Site Effects - Experimental and Numerical Studies at Aegion, Greece," *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Paper No. 1656, Thessaloniki, Greece, June 25-28, 2007.
- 16) T. Nagao, "Variation Evaluation of Path Characteristic and Site Amplification Factor of Earthquake Ground Motion at Four Sites in Central Japan," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 11, No. 5, pp. 7658-7664, 2021.
- 17) S. Kinoshita, "Kyoshin net (K-NET)," *Seismological Research Letters*, Vol. 69, No.4, pp. 309-332, 1998.
- 18) <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> assessed on Oct. 30, 2022
- 19) K. Aki, "Scaling law of seismic spectrum," *J. Geophys. Res.*, Vol.72, pp. 1217-1231, 1967.
- 20) Y. Fukushima and T. Nagao, "Variation of earthquake ground motions with focus on site amplification factors: a case study," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 9, No. 4, pp. 4355-4360, 2019.
- 21) K. Kato, "Evaluation of source, path, and site amplification factors from the K-NET strong motion records of the 1997 Kagoshima-ken-hokuseibu earthquakes," *Journal of Structural and Construction Engineering*, Architectural Institute of Japan, No. 543, pp. 61–68, May, 2001.
- 22) A. Petukhin, K. Irikura, S. Ohmi, and T. Kagawa, "Estimation of Q-Values in the Seismogenic and Aseismic Layers in the Kinki Region, Japan, by Elimination of the Geometrical Spreading Effect Using Ray Approximation," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 93, No. 4, pp. 1498-1515, 2003.
- 23) T. Satoh, H. Kawase, and T. Sato, "Statistical Spectral Model of Earthquakes in the Eastern Tohoku District, Japan, Based on the Surface and Borehole Records Observed in Sendai," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 87, No. 2, pp. 446-462, 1997.
- 24) T. Satoh and Y. Tatsumi, "Source, path, and site effects for crustal and subduction earthquakes inferred from strong motion records in Japan," *Journal of Structural and Construction Engineering*, Architectural Institute of Japan, No. 556, pp. 15–24, Jun, 2002.
- 25) Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations Measurements, Processing and Interpretation, SESAME European research project WP12 – Deliverable D23.12, European Commission – Research General Directorate Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME, December 2004.
- 26) T. Satoh, H. Kawase, and S. Matsushima, "Differences Between Site Characteristics Obtained from Microtremors, S-waves, P-waves, and Cudas," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, 2, pp. 313–334, April 2001.
- 27) N. A. Haskell, "The dispersion of surface waves on multi-layered media," *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 43, No. 1, pp. 17-34, 1953.
- 28) H. Fujiwara, S. Kawai, K. X. S. Hao, N. Morikawa, and H. Azuma, "J-SHIS - An integrated system for sharing information on national seismic hazard maps for Japan," *16th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No.0372, Santiago Chile, Jan. 9-13, 2017.
- 29) T. Nagao, M. Yamada and A. Nozu, "A study on the interpretation of wave components in microtremor H/V spectrum," *Journal of JSCE*, Vol. 68, no. 1, pp. 48-62, 2012, DOI <https://doi.org/10.2208/jscejseee.68.48>
- 30) T. Imai and K. Tonouchi, "Correlation of N-value with S-wave Velocity and Shear Modulus," *Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing*, Rotterdam, pp. 67-72, Netherlands, 27 May 1982.

- 31) J. Bielak, O. Ghattas, and E. J. Kim, "Parallel Octree-Based Finite Element Method for Large-Scale Earthquake Ground Motion Simulation," *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol.10, no.2, pp.99-112, 2005.
- 32) I. Towhata and K. Ishihara, "Modelling soil behavior under principal stress axes rotation," *International conference on numerical methods in geomechanics*, pp. 523-530, Apr. 1985.
- 33) B. O. Hardin and V. P. Drnevich, "Shear modulus and damping in soils: design equations and curves", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 98, no. 7, pp. 667–692, Jul. 1972, <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001760>.
- 34) T. Morita, S. Iai, H. Liu, K. Ichii, and Y. Sato, "Simplified method to determine parameter of FLIP", *Technical note of the port and harbour research Institute*, No. 869, 1997.
- 35) I. Suetomi and N. Yoshida, "Nonlinear Behaviour of Surface Deposit During the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake", *Special issue of Soils and Foundations*, pp. 11-22, Sep. 1998, https://doi.org/10.3208/sandf.38.Special_11.

筆者:1) 長尾 毅、都市安全研究センター、教授;2) Xiao Ma, 元工学研究科市民工学専攻, 学生

Impact of sedimentary structure of the ground motion amplification characteristics

Takashi Nagao
Xiao Ma

Abstract

The amplification characteristics of seismic motion are determined by the ground structure. The actual ground structure is not in a state of horizontal stratification but forms irregular sedimentary structures; therefore, changes in the propagation direction of seismic motion in the soil are complex. Thus, the actual amplification factor of seismic motion is dramatically different from the theoretical value calculated by assuming horizontal stratification. This phenomenon is called the multidimensional effect. The present study targeted at a seismic observation point in Tottori Prefecture, Japan, calculated its site amplification characteristics by using seismic observation records, and estimated the irregular ground structures based on the microtremor observation results. With this ground structure model, we conducted a finite element analysis (FEA) and discussed the impact of the multidimensional effect on the amplification factor of seismic motion. The site amplification characteristics assessed from the seismic records had a larger peak magnification than when horizontal stratification was assumed. In the FEA that took the irregular ground structures into account, the peak magnification was reproduced. When there is no ground nonlinearity, the multidimensional effect of the ground was more notable in points with thick sedimentary strata, where peak amplification factor according to the FEA was 1.9 to 3.6 times larger than when horizontal stratification was assumed. Primary peak frequency was different between cases with irregular ground structures and with horizontal stratification. Furthermore, when the nonlinearity of the ground was evident, the multidimensional effect on the peak magnification of amplification characteristics was not as noticeable as when the ground behaved linearly. The peak magnification due to the multidimensional effect was found to be 2.3.

©2025 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.