

## 地盤の非線形地震応答に影響を及ぼす周波数成分に関する検討

A study on frequency component dominating over the nonlinear seismic response of ground

森 伸一郎\*, 阿部 雅弘\*\*, 西垣 好彦\*\*\*, 亀井 祐聡\*\*\*\*  
 Shin'ichiro Mori, Masahiro Abe, Yoshihiko Nishigaki and Masa'aki Kamei

\*工博, 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3)

\*\*愛媛大学大学院学生 理工学研究科環境建設工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3)

\*\*\*基礎地盤コンサルタント 岩盤工学センター (〒636-0822 奈良県生駒郡三郷町立野南 3-12-21)

\*\*\*\*基礎地盤コンサルタント 技術開発部 (〒102-0073 東京都千代田区九段北 1-11-5)

Frequency component dominating over the nonlinear seismic response of layered ground was studied by a series of equivalent linear analysis using program SHAKE for the level-2 motions. Responses of acceleration, displacement, and shear strain of a hard ground and a soft one under six kinds of input seismic motion were analyzed. Six motions consisted of three typical theoretical motions and three observed near-fault motions. Magnitude-adjusted motions and low-pass-filtered motions were applied to seismic response analyses and their results indicate that the theoretical motions are appropriate for the level-2 motions. Moreover, it is clarified that components around the first predominant frequency of ground when moderate motion incidents dominate over the nonlinear seismic response of ground under the level-2 motions.

**Key Words :** level-2 motion, seismic response, nonlinearity, equivalent linear analysis, filtered wave

## 1. はじめに

各種構造物の耐震設計を行う際にはその周辺地盤の地震時挙動を想定することが必要である。レベル2地震動といった極めて強い地震動に対しては、土構造物や地盤の地震応答は強い非線形挙動になることが想定される。強い非線形挙動の予測には非線形地震応答解析が必要になるが、非線形応答に対する地震動のスペクトル特性の影響についての研究は少ない。たとえば、1), 2)。したがって、これを明らかにすることは、適切なレベル2地震動の設定や非線形応答の事前評価などに有意義であると考えられる。

そこで、地盤の非線形地震応答に影響を及ぼす周波数成分の寄与を明らかにすることを目的として、硬軟2種類の地盤に対するレベル2地震動の等価線形解析を行った。解析に使用したのは、一次元重複反射理論による周波数領域の等価線形応答解析プログラム SHAKE<sup>3)</sup>である。入力地震動には、3種類の試算された半経験的計算地震動と3種類の断層近傍の観測地震動を用いて、これらを入力したときの地盤の加速度、変位、せん断ひずみの応答に着目して検討した<sup>4)</sup>。

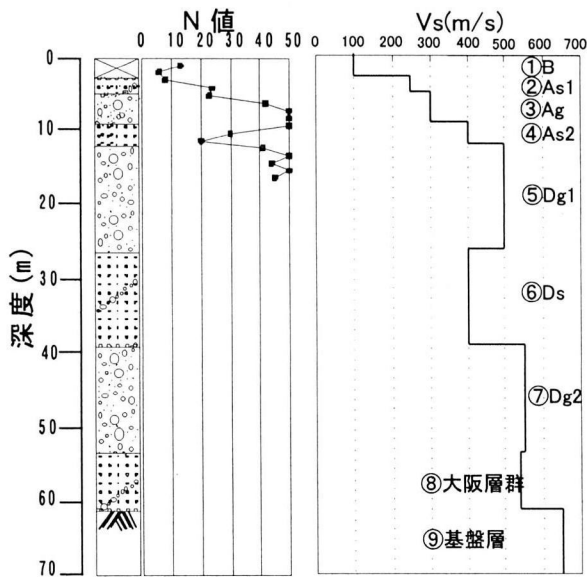
検討および議論の内容は以下の3項目である。

- ①半経験的計算地震動と断層近傍観測波の地震応答比較
- ②最大加速度の違いによる応答の非線形性の比較
- ③非線形挙動に支配的な地震動の周波数成分の把握

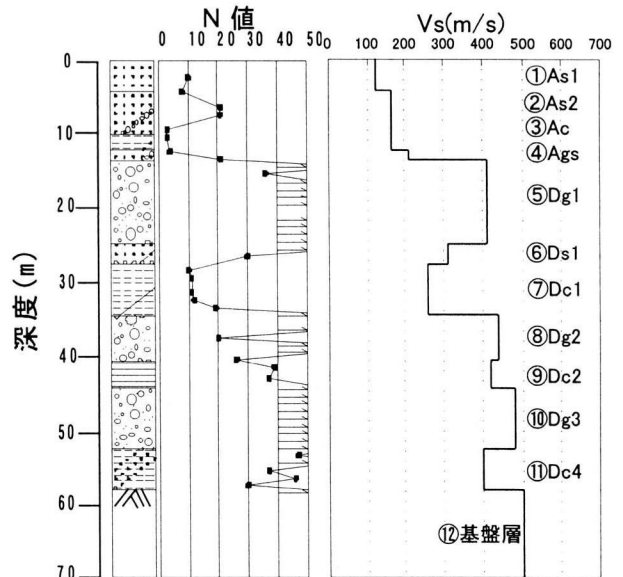
## 2. 解析条件

## 2.1 解析対象地盤

解析対象地盤は、A地盤とB地盤という2種類の地盤である。図-1に解析に用いた2つの地盤の柱状図および標準貫入試験N値とPS検層によるせん断波速度( $V_s$ )の分布を示す。A地盤は、せん断波速度 $V_s$ が300 cm/sを下回る地層として埋土層(B)と沖積砂層( $As_1$ )が地表付近に5m程度存在する比較的良好な地盤である。一方、B地盤は、 $V_s$ が300 cm/sを下回る地層として、沖積層が地表下約14mにわたり、さらに深さ30m前後にせん断波速度 $V_s$ の低い洪積シルト層( $Dc_1$ )が出現するなど相対的に軟らかい地盤であるが、いわゆる軟弱地盤ではない。表-1に解析に用いた地盤の構造と物性を示す。地震波を入力する基盤層は両者とも深さ約60mに位置する。図-2に



(a) A 地盤



(b) B 地盤

図-1 解析に用いた2つの地盤モデル

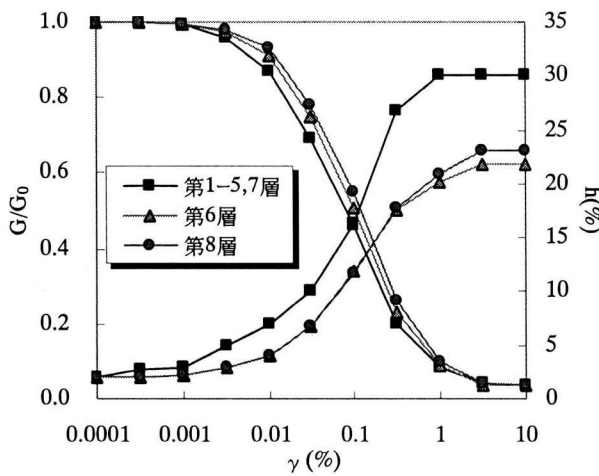
表-1 地盤モデルのパラメータ

(a) A 地盤

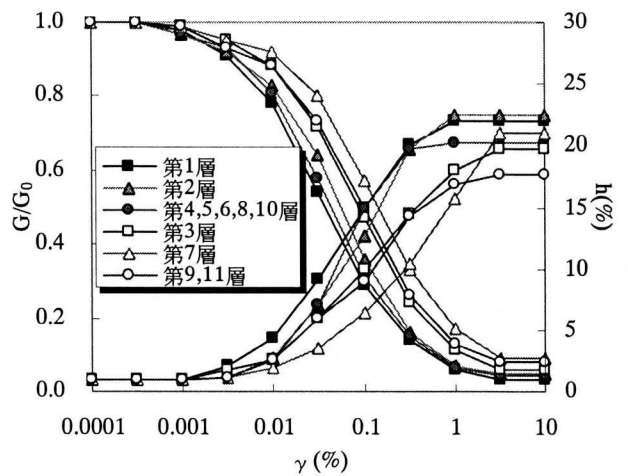
	層底部の 深度(m)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	せん断波 速度(m/s)	層分割数
① B(表土)	2.80	1.80	100	4
② As	5.00	1.90	250	2
③ Ag	8.90	1.90	300	2
④ As	12.00	2.00	400	1
⑤ Dg	26.30	2.10	500	4
⑥ Ds	39.00	2.10	400	4
⑦ Dg	53.50	2.15	550	4
⑧大阪層群	61.20	2.10	540	2
⑨基盤層	-	2.20	650	-

(b) B 地盤

	層底部の 深度(m)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	せん断波 速度(m/s)	層分割数
① As1	4.30	1.80	120	4
② As2	10.00	1.98	160	5
③ Ac	12.15	1.87	160	2
④ Ags	13.65	2.08	210	1
⑤ Dg1	24.80	2.08	410	3
⑥ Ds1	27.50	2.08	310	2
⑦ Dc1	34.50	1.77	260	4
⑧ Dg2	40.70	2.07	440	2
⑨ Dc2	44.20	1.95	420	1
⑩ Dg3	52.45	2.07	480	2
⑪ Dc4	58.00	1.95	400	2
⑫基盤層	-	2.20	500	-



(a) A 地盤



(b) B 地盤

図-2 解析に使用した G/G<sub>0</sub> ~ γ, h-γ 曲線

動的変形特性  $G/G_0 \sim \gamma$ ,  $h-\gamma$  曲線を示す。ここで,  $G/G_0$  はせん断剛性の低下率,  $h$  は減衰定数 (%),  $\gamma$  はせん断ひずみ (%) であり,  $\gamma=10^{-6}$  では  $h=1\%$  である。これら A, B の地盤モデルは実在の地盤であり, モデル定数は調査, 試験に基づいている。

## 2.2 地盤のモデル化と動特性

解析は 25 Hz までの周波数成分を考慮するとともに, せん断波速度  $V_s$  が線形時の 1/2 になったときでも, 構造物に重要と考えられる 10 Hz まで有限要素モデルなどで考慮できるように各層を分割した。表-1 には各層の分割数を示している。それぞれ, 深さ 60m 前後の層を基盤層とする。

地盤の基本的な動特性を知るために, 図-3 に (a) A 地盤と (b) B 地盤の PS 検層による  $V_s$  を用いたときの伝達関数を示す。この伝達関数は, 入射波に対する地表面の伝達関数である。地盤の卓越周波数は, A 地盤では 1 次が 2.4Hz,

2 次が 7.4Hz, B 地盤では 1 次が 1.9Hz, 2 次が 4.1Hz である。しかし, 伝達関数における増幅倍率はそれぞれ 2 次が卓越している。

## 2.3 入力地震動

解析に用いた地震動は, 半経験的計算地震動 3 波と断層

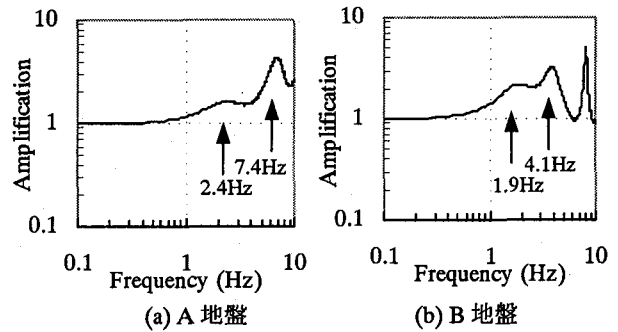


図-3 伝達関数

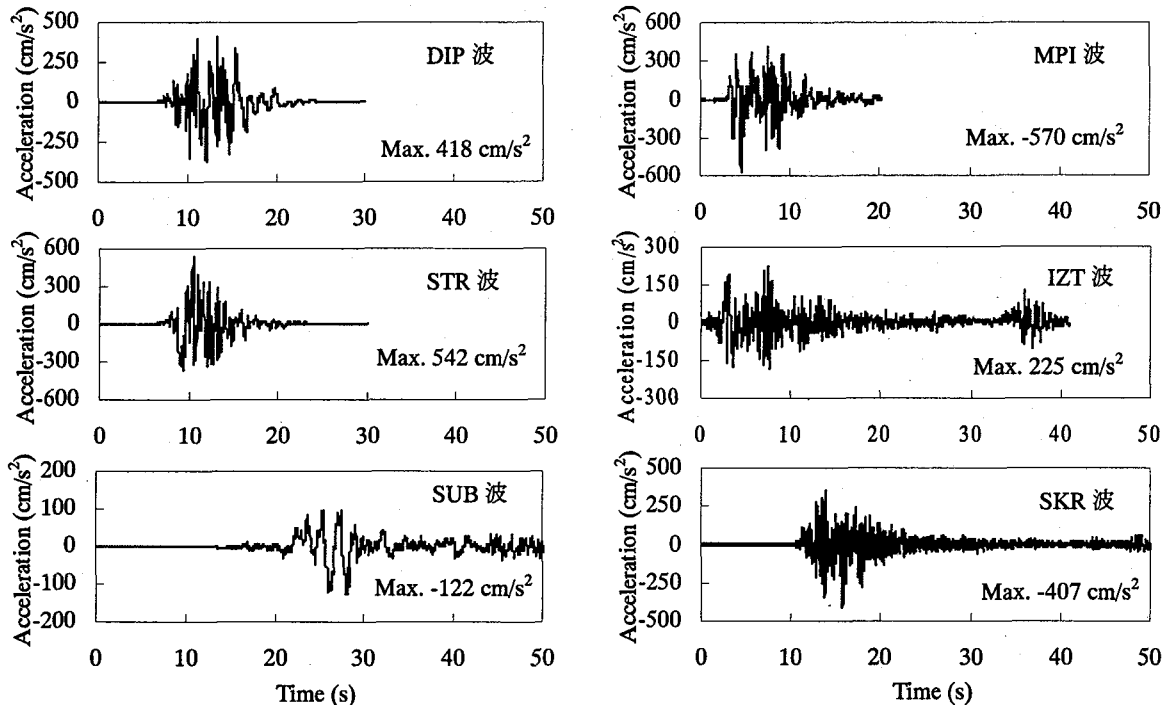


図-4 解析に用いた試算波と断層近傍観測波の加速度時刻歴

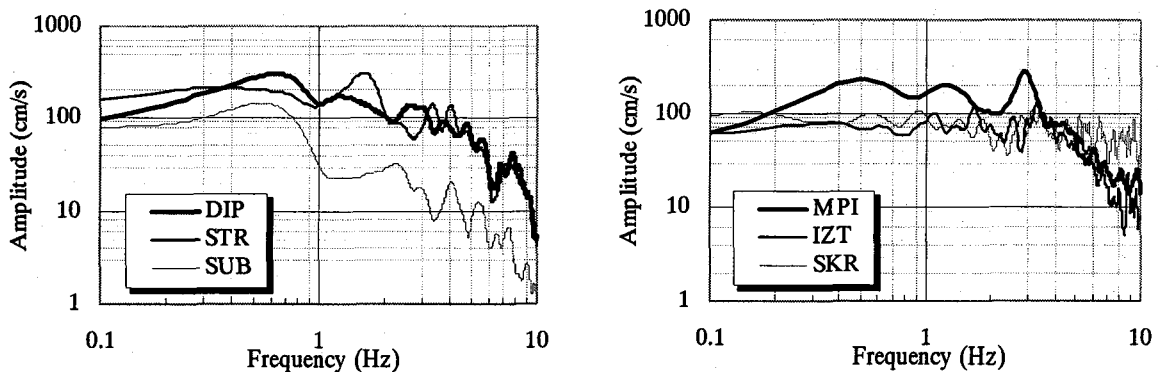


図-5 加速度フーリエスペクトル

近傍観測地震動3波である。半経験的計算地震動は、香川・江尻<sup>5)</sup>によって統計的グリーン関数合成法を用いて試算された内陸地震の逆断層地震動(DIP波)、横ずれ断層地震動(STR波)、海溝型地震動(SUB波)の3波である。3波ともNS, EW, UDの3成分が求められているが、計算に用いたのはすべて断層直交成分のEW成分である。断層近傍観測波は、1995年兵庫県南部地震の際に神戸ポートアイランドの地中(標高-79m)で観測された地震波(NS成分)を基に計算された基盤入射波<sup>6)</sup>(MPI波)および内陸横ずれ断層による1999年8月17日トルコ地震(Kocaeli地震)の際に被害の著しい断層近傍で観測された波形<sup>7)</sup>としてSKR波(サカリヤ)、IZT波(イズミット)の3波である。SKR波は水平成分の観測されたEW成分であり、IZT波はより卓越した水平成分であるEW成分である。

解析では、これらの地震波をそのまま(オリジナル波)、もしくは任意の最大加速度に振幅調整したり(振幅調整波)、ローパスフィルターを施したり(フィルター波)して、モデル地盤の基盤に入射波として入力した。振幅調整をしていないオリジナルの加速度について、図-4に加速度時刻歴を、図-5にフーリエスペクトルを示す。各地震

波の特徴をしてみる。DIP波、STR波、MPI波の3波が時刻歴とスペクトルともに他の地震波より大きく、概ね同じ大きさである。また、これら3波は、時刻歴では継続時間や波形の包絡形状が似ており、スペクトルでは0.5~2 Hzの成分が大きく、それより高周波数領域では小さくなってゆく。半経験的計算地震動の逆断層DIP波と横ずれ断層STR波がMPI波と類似のスペクトル特性を有しているのが特徴的である。

6波の中で、SUB波は時刻歴では継続時間が長く(図では50秒まで表示)、0.5 Hz近傍のやや低周波数成分が卓越して1 Hz以上の成分が相対的に小さいことが特徴である。また、SKR波とIZT波は0.1~10 Hzの広い周波数範囲で振幅が平坦であるという特徴を持ったスペクトル特性である。

### 3. 解析結果とその考察

#### 3.1 半経験的計算地震動と断層近傍観測地震動の地震応答

試算された半経験的計算地震動(DIP, STR, SUB波)および、断層近傍観測地震動(MPI, SKR, IZT波)のオリジ

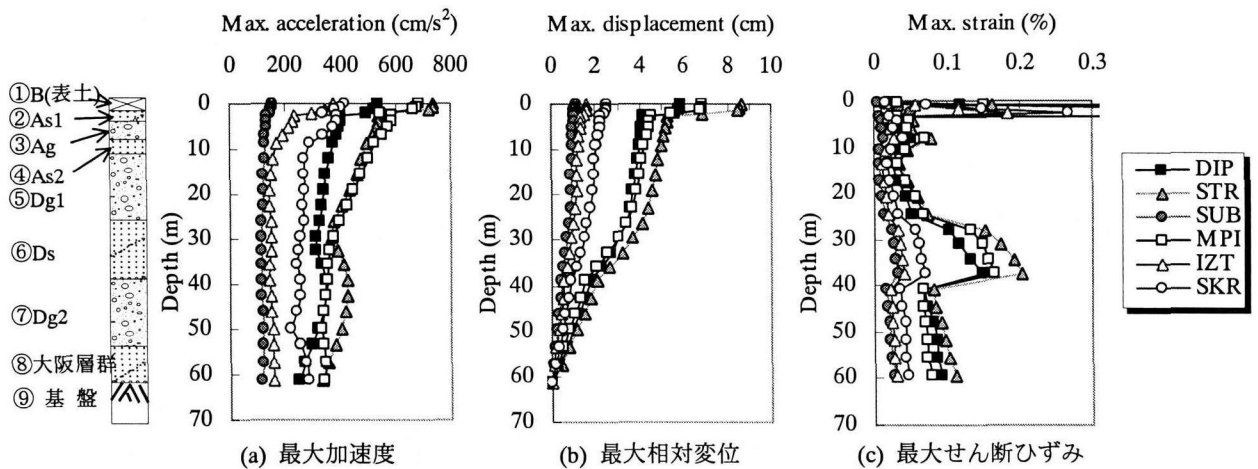


図-6 波形による地震応答の違い (A地盤)

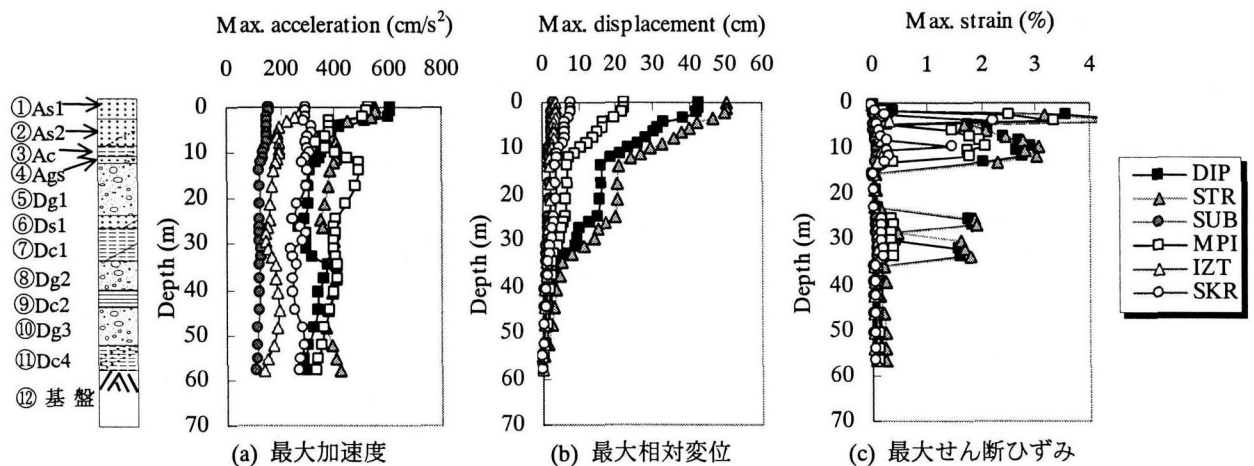


図-7 波形による地震応答の違い (B地盤)

ナルの地震波を用いて、両地盤モデルの波形による地震応答の違いについて検討する。

図-6と図-7にA地盤及びB地盤についてそれぞれ最大応答値(最大加速度, 最大相対変位, 最大せん断ひずみ)の深度分布を示す。はじめに, 最大応答の大きさについて考察し, 続いて応答の深さ分布とその関連を考察する。

A地盤では, 加速度, 変位, ひずみの応答はおおよそ入力加速度の大きさにほぼ従い, STR, MPI, DIP, SKR, IZT, SUBの順であるが, B地盤ではSTR, DIP, MPI, SKR, IZT, SUBの順である。横ずれ断層タイプのSTR波, 逆断層タイプのDIP波が最大の応答を生じさせる地震波であり, 逆断層成分のある横ずれ断層の観測波であるMPI波を上回っている。試算された半経験的計算地震動が, レベル2地震動の一例であると捉えられているMPI波より安全側に評価されている。トルコ地震の観測波は, これらの激烈な地震動に比べて相対的に小さいが, SUB波を大きく上回っている。

A地盤において加速度応答は, ほとんど増幅のないSUB波を除くと他の5波はいずれも8m以上の沖積層で急激な増幅を呈し, それらはほぼ入力加速度の大きさに比例していると見ることができる。変位とひずみの応答は, DIP, STR, MPI波で第6層(Ds)と表層(B)のひずみが $10^{-3}$ に達するほど大きく, それに伴い地表面の変位も大きくなっている。これらは, 入力加速度が大きいためである。入力加速度が同程度のDIP波とSKR波を比べるとSKR波の応答が小さいのは, この地盤で励起されやすい5~6Hzの周波数成分が少ないためであろう。

一方B地盤では, 加速度応答の深度分布をみると, A地盤に比べ波形により様々なパターンを呈している。SUB, IZT, SKR波は加速度分布が異なるものの最大変位, ひずみ分布は入力加速度の大きさの順に似た分布形状を示している。また, DIP, STR, MPI波では沖積層がひずみも1%を超え大きく非線形化し, これに伴い地表面での変位も数十cmに達している。入力加速度がほぼ同程度のSKR波と比べるとかなり異なった応答を示し, スペクトル特性の違いが大きく影響することがわかる。

以上の考察から, 本研究の事例では, 波形による地震応答の違いは, 相対的に軟弱層の厚いB地盤の方が生じやすいと言える。特に, ひずみ応答および変位応答はDIP, STR, MPI波でかなり大きくなり, 入力加速度の大きさの違い以上の差が現れたと考えられる。以下の考察では, 必要な場合にはDIP波の場合を例にとって詳細な検討を行う。

### 3.2 半経験的計算地震動の最大加速度の違いによる応答

#### (1) 最大応答に見られる地震波の特性

入力加速度の大きさの変化に対する加速度, 変位, せん断ひずみの変化について検討する。全6波形について最大加速度を100から500 cm/s<sup>2</sup>まで100 cm/s<sup>2</sup>間隔で調整した

波を入力した。図-8と図-9に例としてDIP波を入力した場合のA地盤とB地盤における加速度, 変位, せん断ひずみの最大値分布を示す。

地盤の非線形化は, せん断ひずみの増大が比例成分以上にあること, その結果として相対変位の増大に現れることで判断できる。A地盤では, はじめ300 cm/s<sup>2</sup>以上で深さ3m前後でのひずみが成長し, 次いで400 cm/s<sup>2</sup>以上で深さ30m前後の洪積砂層が徐々に非線形化する様子がわかる。B地盤でも, はじめに200 cm/s<sup>2</sup>以上で14m以浅の沖積層が非線形化して, 300 cm/s<sup>2</sup>で急にひずみが伸びるが400 cm/s<sup>2</sup>ではひずみが頭打ちになるのに対して, 30m前後の洪積粘性土層が400 cm/s<sup>2</sup>以上で非線形化し始める様子がわかる。

以上のことから, 次の2つが指摘できる。まず1つは, せん断ひずみの増大に見られる非線形化は, 200もしくは300 cm/s<sup>2</sup>以上で最初に表層の埋土層, 沖積層に現れることである。もう1つは400 cm/s<sup>2</sup>以上で沖積層で非線形化が頭打ちになり, 洪積層の砂層や粘性土層に非線形化が現れることである。したがって, 入力加速度が400 cm/s<sup>2</sup>以上になるような大きなレベルの地震動に対しては, 洪積層の非線形挙動が重要となると考えられる。これまであまり研究の行われていなかった洪積層の非線形特性の調査研究の推進が期待されるとともに, この観点から地震入力動を規定する工学的基盤に関する研究が必要である。

以上の深度分布の考察から, 入力加速度の大きさに対する最大応答値の変化を考察するのが効果的である。そこで, 図-10と図-11にA地盤とB地盤における入力加速度に対する最大加速度(地表), 最大変位(地表), 沖積層における最大せん断ひずみの変化を示す。

A地盤では, IZT波を除き100から500 cm/s<sup>2</sup>まで入力加速度に対して地表の最大加速度は徐々にその倍率が低下して非線形化の影響が少しずつ現れている。変位は, 加速度とは逆に徐々にその倍率が大きくなっており非線形化の影響が徐々に現れる。応答の大きいものほど非線形化の度合いが大きい。沖積層のせん断ひずみは, DIP波やMPI波などでは400から500 cm/s<sup>2</sup>にかけて急増して頭打ち状態になっているのがわかる。また, 同じ入力加速度ではSUB波, DIP波, STR波の順で相対変位は大きい。加速度ではどのレベルでもDIP波が大きいようである。

一方, B地盤では100から200 cm/s<sup>2</sup>まではA地盤と同様であるが, 300 cm/s<sup>2</sup>以上で急変する。加速度ではSUB波の応答が急激に増大すること, DIP波がどのレベルでも大きいこと, SKR波で頭打ち状態を呈することが特徴的である。変位についてはSUB, DIP, STR波で増大する割合が大きく非線形化の影響が如実に現れている。

#### (2) 伝達関数と卓越振動数の変化

次に, 非線形化の進展を伝達関数の観点から見てみる。図-12と図-13にそれぞれA地盤とB地盤における入力レベルを変えた特徴的な3つの地震動(DIP, SUB, SKR)

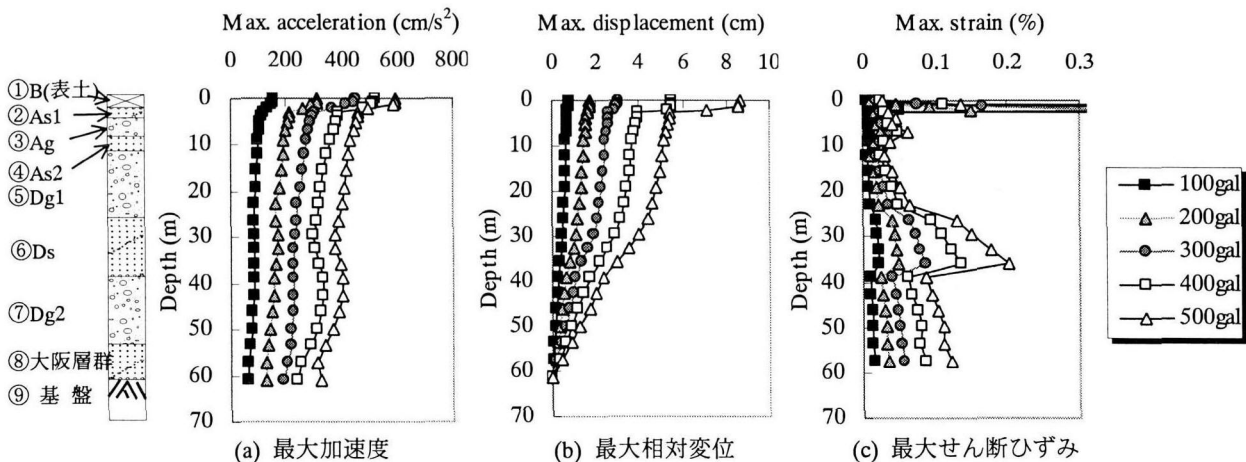


図-8 DIP 波を入力した場合の入力加速度による地震応答の違い (A 地盤)

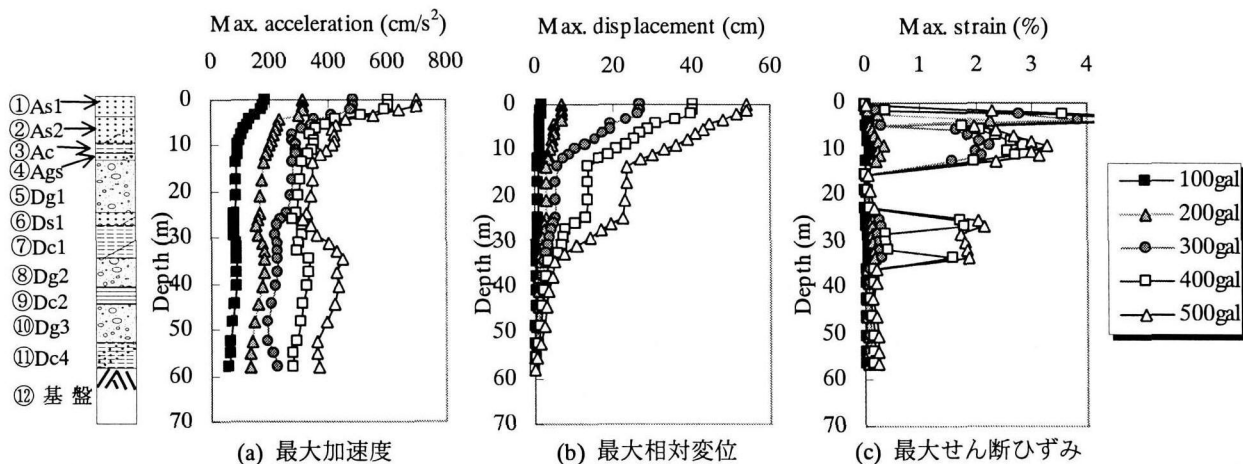


図-9 DIP 波を入力した場合の入力加速度による地震応答の違い (B 地盤)

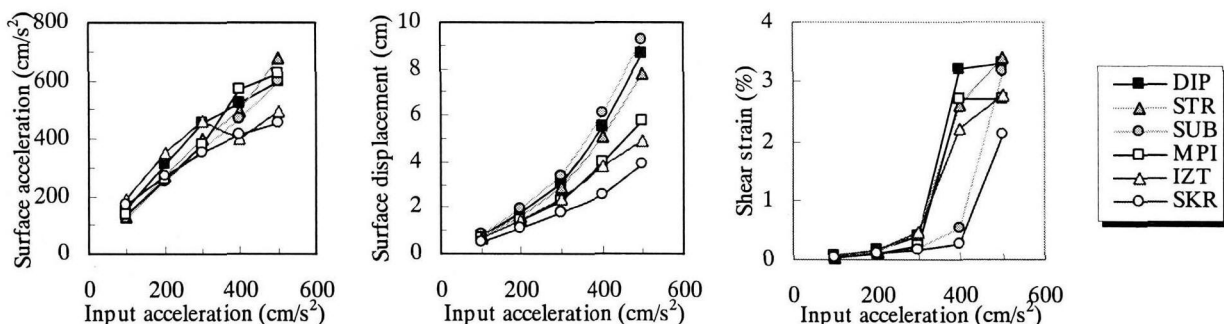


図-10 入力加速度に対する地表最大加速度・最大相対変位と沖積層最大せん断ひずみの変化 (A 地盤)

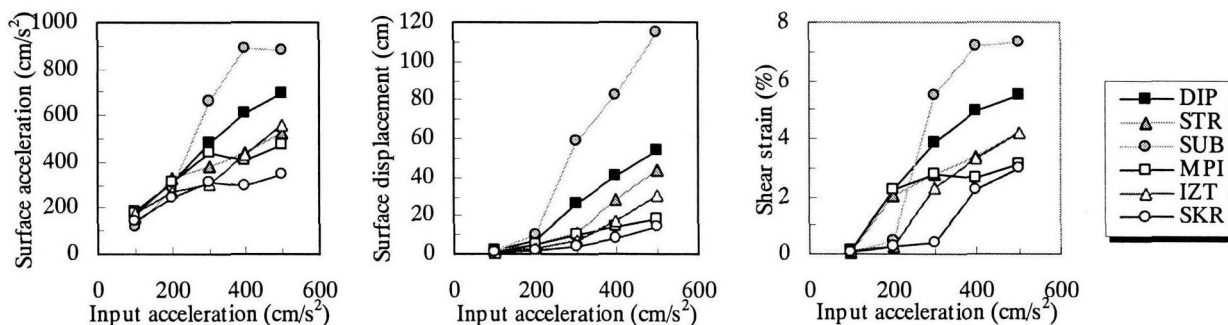


図-11 入力加速度に対する地表最大加速度・最大相対変位と沖積層最大せん断ひずみの変化 (B 地盤)

を入力したときの伝達関数を示す。STR 波, MPI 波の伝達関数の形状とその変化は DIP 波のそれに類似しており, IZT 波は DIP 波と SUB 波の場合の中間的な変化であるため省略する。

A 地盤では, SUB 波と DIP 波は 300 から 400  $\text{cm/s}^2$  にかけて, SKR 波は 400 から 500  $\text{cm/s}^2$  にかけて特に非線形化が進み, 6 Hz 付近にあった増幅のピーク (卓越周波数) が 1~2 Hz に移動している。詳細に見ると, DIP 波は 100 から 300  $\text{cm/s}^2$  まで徐々に非線形化が進み, 300 から 400  $\text{cm/s}^2$  にかけて一気に非線形化が進んでいるのに対して, SUB 波では 300  $\text{cm/s}^2$  まではほとんど非線形化が進まず, 300 から 400  $\text{cm/s}^2$  にかけて一気に非線形化が進んでいるのが特徴的である。これは, DIP 波と STR 波に 1~6 Hz に万遍なく勢力があるのに対して, SUB 波ではそのような高周波数成分が相対的に小さいためであると考えられ

る。また, SKR 波は非線形化が進むのが最も遅く 400  $\text{cm/s}^2$  以上で急に進むのが特徴的である。これは, SKR 波は広い周波数領域で平坦で特に卓越した勢力が無いためだと考えられる。

同様に B 地盤でも 1~2 Hz にあった増幅の膨らみが 0.4 ~ 0.8 Hz を中心とする低周波数側に移動している。しかし, A 地盤とは非線形化の進み方が異なり, DIP 波, SUB 波では 100 から 300  $\text{cm/s}^2$  まで一気に非線形化が進み, 300  $\text{cm/s}^2$  以上ではその進み方は小さく頭打ち状態になる。一方, SKR 波は 300  $\text{cm/s}^2$  以上で非線形化が進むのが特徴的である。

以上の考察から, 最も卓越する周波数の変化が非線形化の指標として重要であると考えられるので, 図-14 に (a) A 地盤と (b) B 地盤の入力加速度に対する卓越周波数の変化を示す。以上の考察が, この図に纏められており, 卓越周

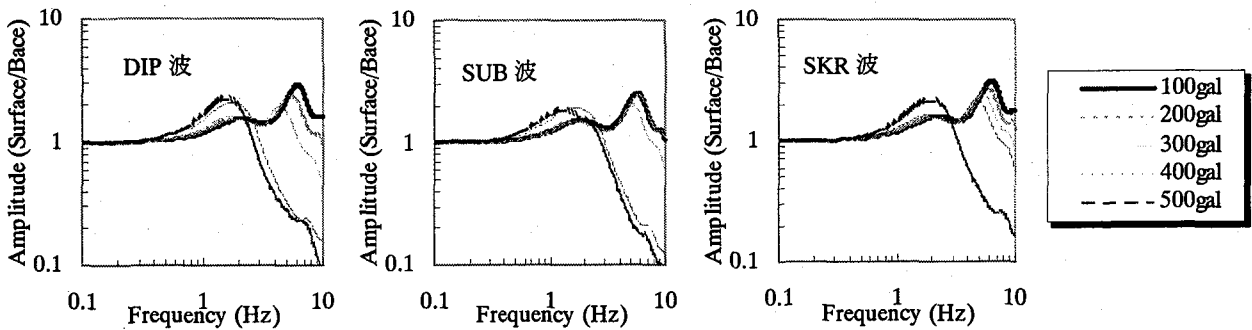


図-12 入力レベルを変えた波形入力時の伝達関数 (A 地盤)

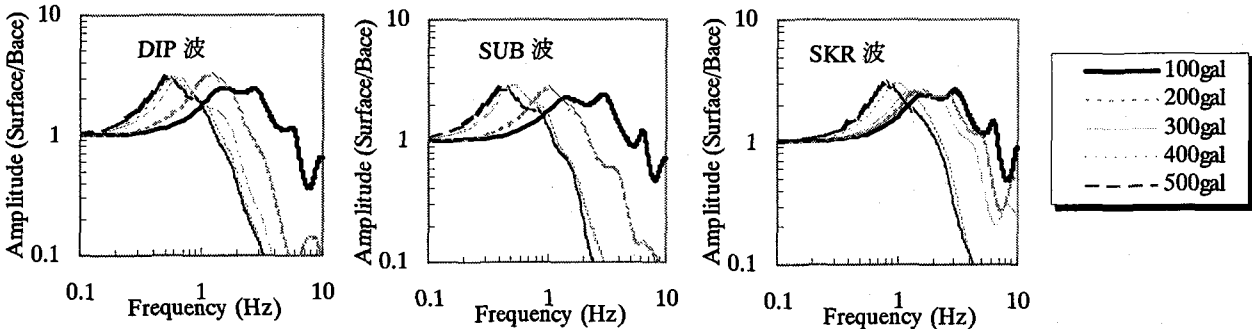
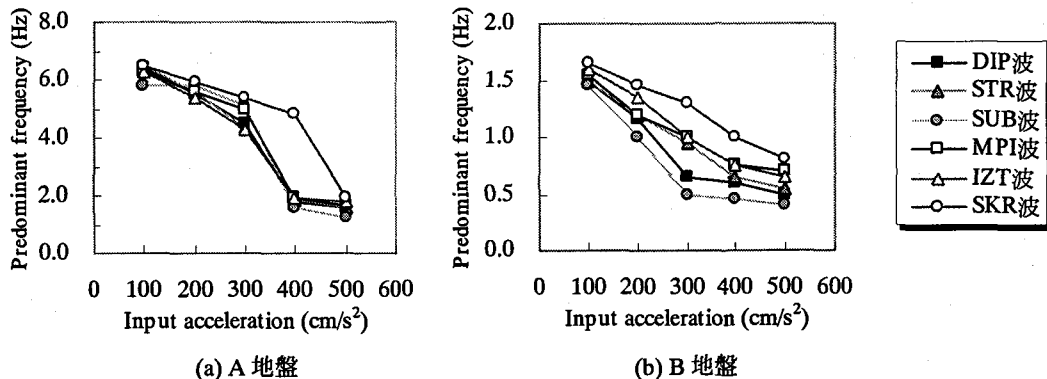


図-13 入力レベルを変えた波形入力時の伝達関数 (B 地盤)



(a) A 地盤

(b) B 地盤

図-14 入力加速度に対する卓越周波数の変化



波数の移動に見られる非線形化は、半経験的計算地震動では、低周波数成分の卓越する SUB 波は硬い A 地盤で遅く相対的に軟らかい地盤では早い。また、高周波数成分から低周波数成分まで万遍なく含まれる DIP 波と STR 波では軟らかい地盤で傾向が顕著なもの硬い地盤においても小さい加速度レベルから非線形化が進むのがわかる。一方観測波は、DIP 波に似ているが、それぞれ非線形化が進む加速度に違いが見られるものの、3 波とも硬い A 地盤より比較的軟らかい B 地盤で小さい加速度レベルから非線形化が進む。また以上の考察を総合すると、この 2 つの地盤では、 $300 \text{ cm/s}^2$  を超えるような強震動では  $0.5 \sim 3 \text{ Hz}$  の周波数成分が非線形挙動に支配的であることがわかる。

### (3) 同レベル入力での各地震波の応答比較

波形だけの特徴を見るために、図-15 と図-16 に A 地盤と B 地盤における全て入力加速度が  $300 \text{ cm/s}^2$  の場合の応答の深さ方向分布を示す。A 地盤では地表の最大加速度は  $400 \text{ cm/s}^2$  前後であり大きく違わないが、変位では最大と最小で 2 倍違う。これは含まれる低周波数成分の違いであ

ろう。SUB 波が最も大きいのは肯首できるが、DIP、STR 波に比べて観測波の IZT、SKR 波が小さいのが特徴的である。また、最大加速度と変位の大小関係は合っていない。一方、B 地盤では最大加速度と最大変位の大小関係は合っており、SUB、DIP、STR などの順で大きくそれらは地盤の 1 次卓越周波数に対応する成分の勢力の差と非線形化による効果により説明できる。

すなわち、相対的に軟らかい地盤では応答に対して非線形化の影響を大きく受けることがわかる。

### 3.3 地盤の非線形挙動に支配的な地震動の周波数成分

前節で  $0.5 \sim 3 \text{ Hz}$  の周波数成分が非線形挙動に支配的であることがわかったが、ここではさらに地盤の非線形挙動に支配的な周波数成分を明らかにするために、2 つの地盤モデルに対して、半経験的計算地震動のフィルター波により地震応答解析を行った。フィルター波とはオリジナルの半経験的計算地震動をカットオフ周波数が  $0.1, 0.178, 0.316, 0.562, 1.0, 3.16 \text{ Hz}$  のローパスフィルターで処理

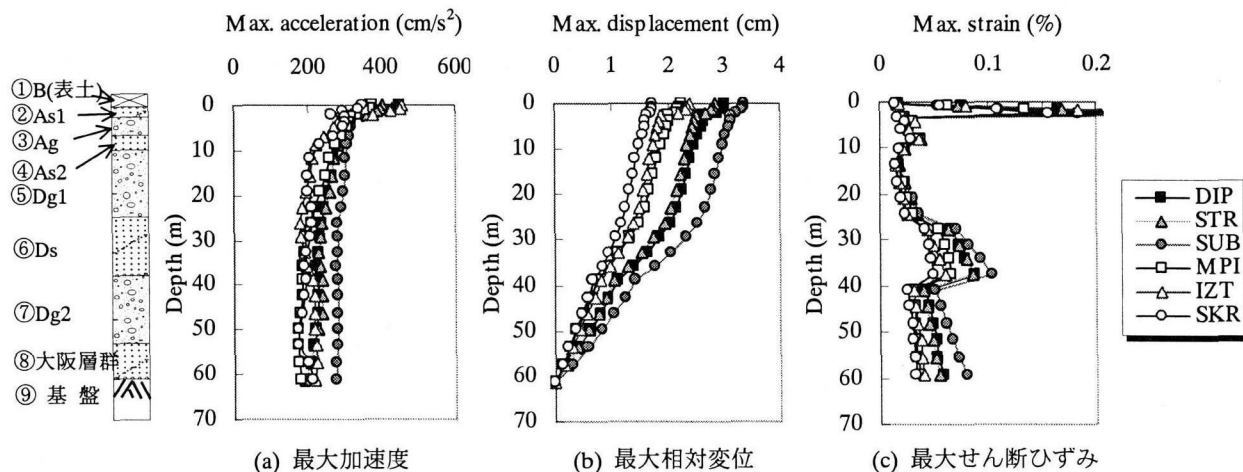


図-15 入力加速度が  $300 \text{ cm/s}^2$  における応答の深度分布 (A 地盤)

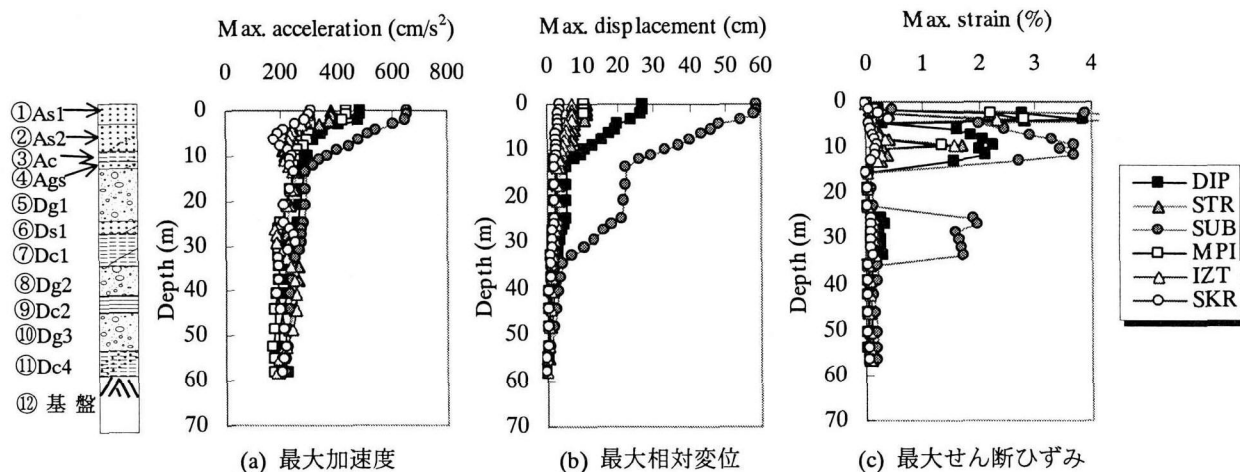


図-16 入力加速度が  $300 \text{ cm/s}^2$  における応答の深度分布 (B 地盤)



したものである。

図-17と図-18にA地盤とB地盤のDIP波のフィルター波による最大値分布を示す。A地盤では3 Hz以下の成分で加速度、変位、せん断ひずみともにオリジナル波とほぼ同じ応答が得られることがわかる。B地盤でも3 Hz以下の成分でほぼ同じ応答が、さらに沖積層に限れば1 Hz以下の成分でほぼ同じ応答が得られることがわかる。したがって、地表の加速度と変位および地層の最大せん断ひずみに注目して、カットオフ周波数との関係を考察する。

図-19、図-20に入力と地表の加速度とカットオフ周波数の関係を全半経験的計算地震動について示す。加速度について見ると、A地盤では1 Hz以上、B地盤では0.5 Hz以上の成分が含まれたときに増幅が見られるとともに、3 Hzまでの成分が含まれているとオリジナルと同等の応答が得られることがわかる。

続いて図-21に地表の変位とカットオフ周波数の関係を全半経験的計算地震動について示す。変位については、DIP、STR波ともにA地盤では3 Hz以下の周波数成分でB地盤では1 Hz以下の周波数成分でオリジナルの応答が得られる。0.3~0.5 Hz以下の成分はほとんど寄与してい

ないことから、A地盤は0.5~3 Hz、B地盤0.3~1 Hzの成分が支配的であると言える。SUB波では1 Hz以下の周波数成分でオリジナルの応答が得られ、0.3~1 Hzの成分が支配的である。

さて、変位がせん断ひずみの積分量であることを考えると、せん断ひずみについても同様の考察ができる。図-22、図-23にそれぞれA、B両地盤の沖積層と洪積層の最大せん断ひずみとカットオフ周波数の関係を全半経験的計算地震動について示す。沖積層のせん断ひずみはA地盤では1~3 Hzの成分が、B地盤では0.5~1 Hzの成分が支配的であることがわかる。さらに、洪積層についてはA地盤では沖積層よりも非線形化が鈍るが、B地盤では沖積層と同様の傾向である。これは地盤全体の卓越周波数の違いによるものと考えられる。

また、SUB波については0.3~3 Hzまで徐々に変化している。先に3.2で述べたように、SUB波でも300 cm/s<sup>2</sup>を超えると大きく非線形化が進むことを考え合わせると、加速度レベルが大きくなると非線形化が進み、A地盤では1~3 Hzの成分が、B地盤では0.5~1 Hzの成分が支配的であると考えられる。

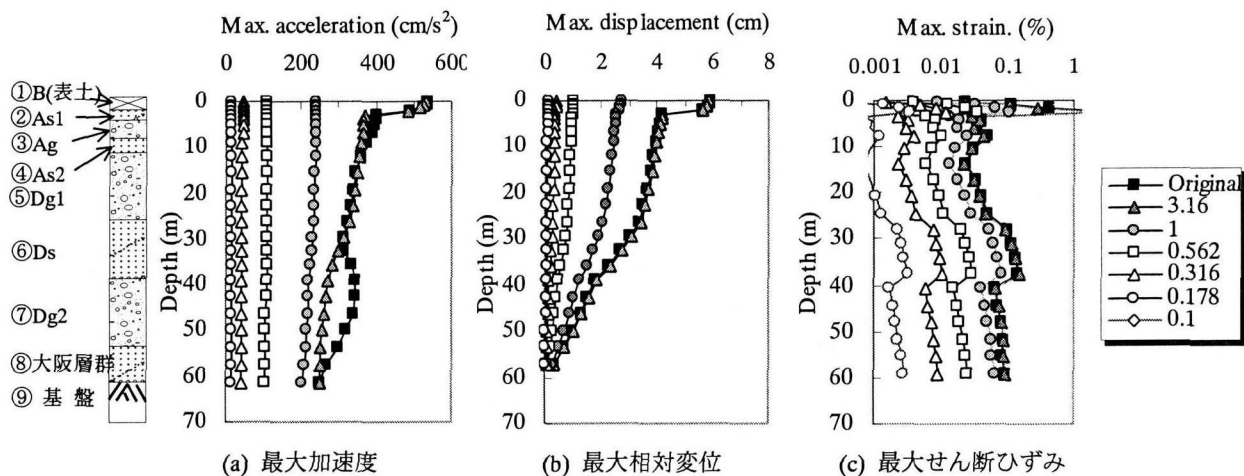


図-17 DIP波のフィルター波による応答の深度分布 (A地盤)

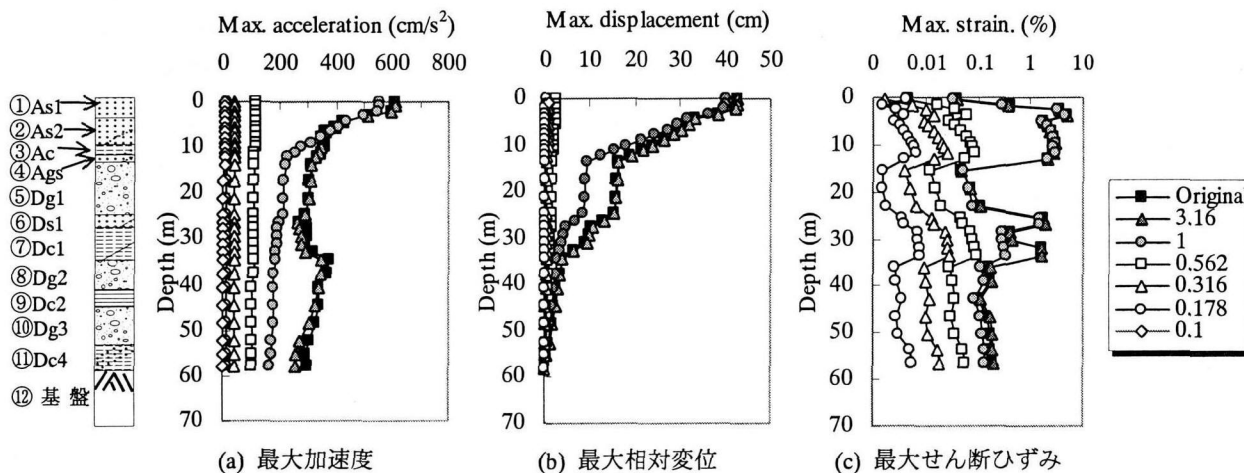


図-18 DIP波のフィルター波による応答の深度分布 (B地盤)

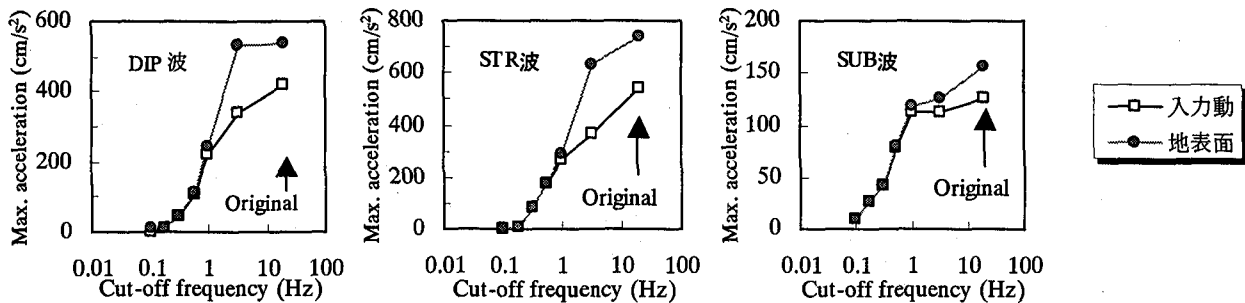


図-19 入力と地表の加速度とカットオフ周波数の関係 (A 地盤)

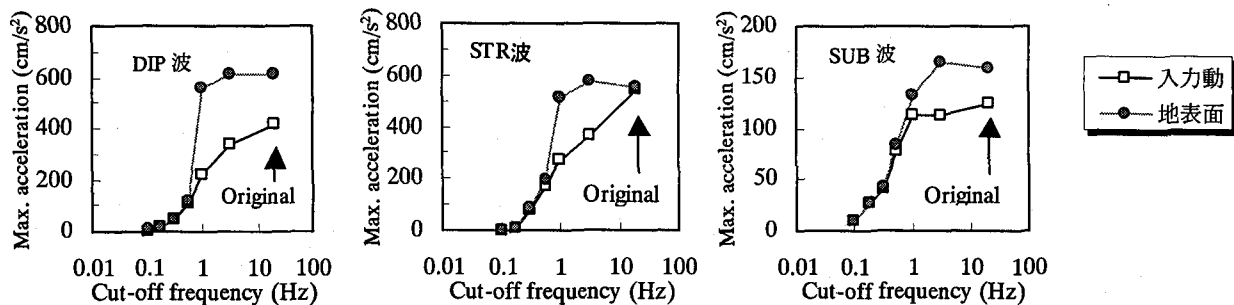
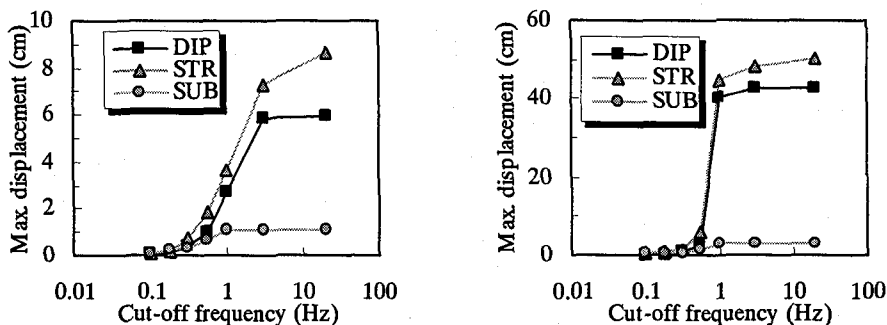


図-20 入力と地表の加速度とカットオフ周波数の関係 (B 地盤)



(a) A 地盤

(b) B 地盤

図-21 地表の変位とカットオフ周波数の関係

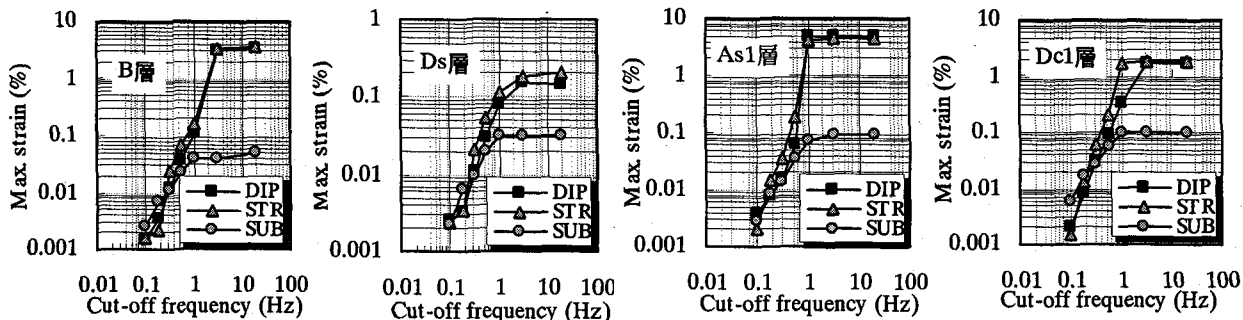


図-22 A 地盤の沖積層と洪積層の最大せん断ひずみとカットオフ振動数の関係

図-23 B 地盤の沖積層と洪積層の最大せん断ひずみとカットオフ振動数の関係

## 4. 議論

### 4.1 非線形応答に支配的な周波数成分の意味

前章では、入力地震波の内、A地盤では1~3 Hzの成分が、B地盤では0.5~1 Hzの成分が地盤の非線形応答に支配的であることがわかった。これらの周波数の意味を考える。図-12、図-13の伝達関数からこれらの周波数は、非線形化が大きく進んだときの地盤の卓越周波数である。また、非線形化が一旦大きく進むとその後は頭打ち状態になる。すなわち、沖積層におけるせん断ひずみの伸びが緩やかになった後、洪積層におけるせん断ひずみの伸びが始まっていた。これは、等価線形解析であるが、図-2のような剛性低下曲線で示される非線形性が考慮されているからである。軟質な沖積層などが数%のオーダーにひずみが大きくなると、図-10、図-11や図-17、図-18に見られるようにひずみの伸びは緩くなる。

すなわち、地盤の非線形応答に支配的な成分は、非線形化したときの地盤の1次卓越周波数周辺の成分であること、軟質な沖積層のひずみを1~数%程度と仮定したときの剛性を用いて算定すればよいと言える。

### 4.2 等価線形解析における高周波数成分の意味

前節での議論について等価線形解析における高周波数成分の意味を考え、他の研究との比較を行う。

等価線形解析法は、ひずみの大きさに依存する剛性と減衰を等価線形的に考慮しようとするものである。周波数領域での一次元重複反射理論によるSHAKEでは、周波数に依存しない剛性を採用し、仮定したひずみの大きさと応答計算で得られるひずみの大きさが許容誤差内に収束するまで剛性と減衰を変化させて繰り返し解析が行われる。また、周波数領域で得られたひずみをフーリエ逆変換によってひずみ時刻歴を求めて、その最大値に有効係数を乗じた有効ひずみが参照されるひずみとなる。

ひずみ時刻歴の最大値はひずみスペクトル振幅の最大となる周波数が支配的であること、また、低次の卓越周波数ほど地盤のひずみの増幅効果は大きいことが考えられる。この仮説によれば、ひずみの最大値は地盤の1次卓越周波数や入力地震動のその周波数付近における成分の大きさに左右されると考えられる。SHAKEは地盤の1次卓越周波数付近の非線形振動特性あるいは時刻歴最大値付近の非線形応答を等価線形的に評価しようとする解析法であると捉えることができよう。

しかし、SHAKEには、前述したような等価線形化を行うため、地盤の1次卓越振動数より大きな周波数領域で剛性を低く減衰を過大に評価するという欠点がある。この欠点を解決するために、杉戸ら<sup>8)</sup>は、ひずみのスペクトルが周波数に大きく依存すること、周波数領域の解析であるので剛性と減衰が周波数ごとに独立して扱えることに着目して、各周波数ごとにそれぞれのひずみ波形に寄与する程

度に応じて有効ひずみを算定して、各周波数ごとに異なる剛性と減衰を用いる解析法(FDEL)を提案した。地盤の1次卓越周波数より低周波数領域では剛性や減衰の違いは増幅特性に大きな影響はないので、SHAKEに対して高周波数領域でひずみに依存する剛性と減衰の効果の評価を改善しようとするものである。

SHAKEの等価線形評価法の捉え方、SHAKEの欠点とそれを解決する一手法としてのFDELの評価法について述べたが、現在新たな耐震設計で考えられているようなレベル2地震動の下では強度の非線形応答が予想され、その際には高周波数成分の影響は小さくなると考えられる。したがって、地盤の1次卓越周波数付近の非線形振動特性あるいは時刻歴最大値付近の非線形応答を等価線形的に評価することは、本来の非線形応答の事前評価や適切な入力地震動設定のための地震動の危害性評価に有用であると考えられる。

## 5. 結論

本研究では、比較的硬質な地盤(A地盤)と比較的軟質な地盤(B地盤)の二つの地盤に対して、等価線形解析により地震応答特性を検討した。検討には、半経験的計算地震動3波(逆断層波:DIP波、横ずれ断層波:STR波、海溝型地震波:SUB波)に加えて、1995年兵庫県南部地震の際に神戸ポートアイランド地中-79mの観測記録から計算された基盤入射波:MPI波と1999年トルコ地震の観測波であるSKR波、IZT波の観測波3波も使用した。最大加速度、最大変位、最大せん断ひずみの応答に着目して、地震応答特性とその非線形挙動の評価を検討した。得られた結論は次の通りである。

- 1) 硬質なA地盤の地震応答は地震波の違いにあまり影響されず入力最大加速度の大きさが支配的であるのに対して、相対的に低速度層の厚い軟質なB地盤の地震応答は地震波のスペクトル特性に大きく影響を受け、相対的に軟質な地盤では応答に対して非線形化の影響が大きい。
- 2) 入力最大加速度を変化させ徐々に大きくした場合には、SUB波、DIP波、STR波の順で非線形化と応答の増大が進む。横ずれ断層であるトルコ地震のSKR、IZT波は試算された横ずれ断層によるSTR波より小さいが、入力の大きさの違いによる応答の変化はSTRに類似する。また、MPI波はSTR波に類似した変化であり、横ずれ断層観測波とSTR波の変化の様子は似ている。
- 3) 地盤の非線形化は、200から300 cm/s<sup>2</sup>にかけて沖積層の非線形化が進み、300 cm/s<sup>2</sup>以上で急激に促進されるのに対して、洪積層では400 cm/s<sup>2</sup>以上で非線形化が進む。入力加速度が400 cm/s<sup>2</sup>以上になるような

レベルの地震動に対しては、洪積層の非線形性が重要となるであろう。

- 4) 地盤の非線形化に及ぼす地震動のスペクトル特性としては、長周期成分を多く含む地震動ほど加速度振幅の増加に伴う地盤の非線形化が著しい。しかし、半経験的計算地震動でみると長周期成分の卓越する地震動 (SUB 波) では  $300 \text{ cm/s}^2$  以上で急激に非線形化が進展するのに対して、長周期成分に加えて短周期成分の勢力も大きいスペクトル特性を持つ地震動 (DIP 波, STR 波) では、 $100 \text{ cm/s}^2$  以上で非線形化が進むのが特徴的である。観測波でみると、MPI 波, IZT 波, SKR 波の順で非線形化が進み、地表での最大加速度, 最大変位の大小の順に等しい。
- 5) 加速度振幅を変化させたときの伝達関数の検討およびローパスフィルターを施した半経験的計算地震動の検討の両面から、特に、 $300 \text{ cm/s}^2$  を超えるような地震動では、比較的硬質な A 地盤では  $1\sim 3\text{Hz}$ , 比較的軟質な B 地盤では  $0.5\sim 1 \text{ Hz}$  の周波数成分が非線形挙動に支配的であり、それらの周波数成分は非線形時の地盤の一次卓越周波数に相当することがわかった。また、軟質なほど長周期成分の寄与が大きい。

## 謝辞

本研究は、(社)地盤工学会に設置された「土構造物への設計用入力地震動に関する研究委員会(委員長:佐藤忠信 京都大学防災研究所教授)」において実施したものである。委員長および委員各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 末富岩雄, 吉田 望: 地震動の周波数特性が地盤の非線形挙動に及ぼす影響に関する一検討, 土木学会第 51 回年次学術講演会, 第 I 部門, pp.352-353,1996.9
- 2) 土構造物への設計用入力地震動に関する研究委員会: 委員会報告 2. 試算波に対する土構造物の応答解析, レベル 2 地震に対する土構造物の耐震設計 講習会テキスト, 地盤工学会, pp.119-245,2000,8
- 3) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites - ,University of California Berkeley, Report NO.EERC 72-12, pp.1-54, 1972.
- 4) 森 伸一郎, 西垣 好彦: 2.2.1 等価線形解析による 2 種類の地盤の地震応答特性, レベル 2 地震に対する土構造物の耐震設計シンポジウムおよび講習会テキスト, 地盤工学会, pp.125-137, 2000.8.
- 5) 香川敬生, 江尻謙嗣: 震源断層の破壊過程を考慮した震源近傍地震動の試算, 土構造物の耐震設計に用いるレベル 2 地震動を考えるシンポジウム発表論文集, 地

盤工学会, pp.1-6, 1998.10.

- 6) 運輸省港湾局監修: 埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版), 沿岸開発技術研究センター, 1997.
- 7) トルコ共和国公共事業省: ホームページ <http://angora.deprem.gov.tr/august17.htm>
- 8) 杉戸 真太, 合田 尚義, 増田 民夫: 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No. 493 /III-27, pp. 49-58, 1994.6.

(2000 年 9 月 14 日受付)