

地盤の非線形性を考慮した地震応答解析について

——等価線形化法の適用性に関する検討——

松田 隆 後藤 洋三

Earthquake Response Analysis of Sandy Ground Considering Material Non-linearity of Soil

——Study on Applicability of the Equivalent Linear Method for Ground Motion——

Takashi Matsuda Yozo Goto

Abstract

As compared with earthquake response analyses using a time integration procedure, the Equivalent Linear Method has been applied for many cases of practical analyses of dynamic problems with material non-linearities, although its physical background and scope of application are not quite clear.

Taking account of these points, this report describes not only the scope of the Equivalent Linear Method for ground motion, but also the appropriate estimation method for dynamic soil properties. The principal results of this research are: ① up to 1.7×10^{-3} of shear strain level, the results calculated by this method coincide well with experimental results, ② it is very effective to make use of in-situ soil properties in regard at least to maximum shear modulus, ③ the extent of the effective shear strain is between 0.5 and 0.8.

概 要

地盤の材料非線形性を等価線形化法によって考慮し、応答を周波数領域で計算する解法は多くの実務分野で用いられている。しかし、この手法は逐次積分型の非線形応答解析に比べて物理的な明確さに欠け、適用範囲にも制限を受ける。本研究は、この点をかんがみ実務面で多用されている等価線形化法の信頼性を向上させることを目的にして、その適用限界および解析に用いる動的定数の評価に関する検討を行なっている。検討方法は、大型の模型地盤を用いた振動台実験を対象に、入力強度や地盤の動的定数の評価法をパラメータとした解析を行ない実験結果と比較した結果、以下のことが分かった。① 地盤に生じるせん断ひずみが 1.7×10^{-3} までの領域で、解析結果と実験結果とに良好な一致をみた。② 最大せん断剛性だけでも原位置の計測結果を用いることで、解析精度は向上する。③ 有効ひずみ率は応答結果に大きな影響を与える。

1. まえがき

地盤あるいは地盤と構造物の相互作用系における地震時挙動を予測する際、地盤の材料非線形性を考慮に入れることは地震時挙動の予測精度を向上させるために重要である。地盤の材料非線形性を考慮に入れた応答計算手法は既に多く提案されており、それらは次の二つの方法に大別される。(a)非線形履歴特性を用いた直接積分型の時刻歴応答計算 (b)等価線形化法と周波数領域での解析を用いた応答計算

(a)の方法は、非線形性の強弱に関わらず液状化のような破壊領域までの広い範囲の地震入力に対して適用が可能であり、刻々変化する加速度振幅に応じた状態を直接反映できることから、厳密な方法と言える。ただし、一般的に(a)の方法は多くの計算時間を要し、また、非線形な系での時間積分の実施には知識と経験に裏付けされた技術も必要である。そのため、地盤震動に関する(a)の方法は実務分野に供されているとは言い難いのが現状である。

これに対して、(b)の方法は液状化や滑り等の強度の非線

形現象への適用が困難であるものの、以下に示す理由から、この解析手法を用いた例は多い。

- ・地盤に発生するせん断ひずみが 10^{-3} 以下程度の非線形領域の解析が可能であり、軟弱地盤を除きこの領域を越す強い非線形性を示すことは稀である。
- ・通常、(a)の方法に比べ計算時間は短くなる。

(b)の方法は、原位置の地震観測などを対象にその適用性の検証が行なわれてきた。しかし、これらの実測結果には当該地盤の物性値のうち動的諸元が明確にされ、しかも地盤が非線形領域に入る強震時の結果であるものは少なく、検証としてはいまだ不十分である。

そこで本研究は、等価線形化法による非線形震動解析の信頼性を向上させることを目的として、その適用限界を検討し解析に用いる的確な地盤の動的定数評価法の確立を試みた。

この報告は、微小振幅から強震状態まで入力強度をパラメータとした大型模型地盤の振動台実験結果を検討の対象としている。検討の主な内容は、地盤の動的定数を明確

にしたうえで、 10^{-5} から 2×10^{-3} までの幅広い領域のせん断ひずみ状態での等価線形化法の適用性に関する検証、解の精度と実用性の二面からの地盤動的定数の評価方法に関する検討、および、ランダム波入力における等価剛性の算定に用いる有効ひずみ率の応答結果に与える影響についてである。

2. 模型振動実験

2.1 模型地盤と加振方法

実験に用いた模型地盤の材料は、粒径が細かく粒度分布が均質な珪砂である。模型地盤は大型せん断土槽に投入された乾燥状態の珪砂を可能な限り振動台加振により締め固め作製した。模型地盤の平均的な単位体積重量は 1.56 t/m^3 であり、相対密度は86%である(図-1)。

加振方法は正弦波入力(共振実験)と地震波入力の2種類である。その入力諸元を表-1に示す。

2.2 実験結果

地表面の常時微動の卓越振動数 f_1 は 15.0 Hz である。この振動数がS波の重複反射による固有振動数と仮定すれば、模型地盤のSは速度 V_s は 124 m/sec 、平均的な初期せん断剛性は $2,460 \text{ t/m}^2$ となる。

正弦波入力実験の共振曲線を図-2に示す。入力加速度レベルの増大に伴い、最大応答倍率および共振振動数が低下している。これは、地盤のせん断ひずみ振幅に関する非線形性の影響、すなわち、加速度振幅に伴うせん断ひずみ振幅の増大がせん断剛性を低下させ、減衰性を高めることによるものである。

地震波入力実験の応答波形を図-3に、地表面の応答と入力強度との関係を図-4に示す。図から正弦波入力時と同様に入力強度が増大すると伝達関数の最大倍率やピーク振動数が低下することが明瞭に示されている。

2.3 相似則の適用

地盤の非線形性を考慮に入れた相似則は国生らによって提案されている(表-2)。この相似則に従い幾何的な縮尺を1/10、密度に関する変換率を実物の地盤を 2.0 t/m^3 と仮定したとき、模型地盤に対応する実物地盤の諸元は表-2の右側の欄の値になる。これによると、模型での加速度は実物と同一であり、実物の地盤で生じるであろうせん断ひずみは実験の約3.6倍の値であることを示している。

2.4 模型地盤材料の動的な土質試験

模型地盤材料である珪砂の動的土質試験を実施した。模型地盤からの不攪乱試料の採取が困難なため、ここでは再調整試料を用いた。せん断ひずみ γ とせん断剛性 G との関係(以下、 $G \sim \gamma$ 関係)および減衰定数 h との関係(以下、 $h \sim \gamma$ 関係)を図-5に示す。図から、 G は γ の増大に比し低下し、 h は大きくなる傾向が明瞭に現われている(ひずみ依存性)。

3. 動的地盤定数の算定と構成式

3.1 逆解析手法による動的地盤定数の算定

原位置での動的な地盤定数を算定する。ここでは、地盤

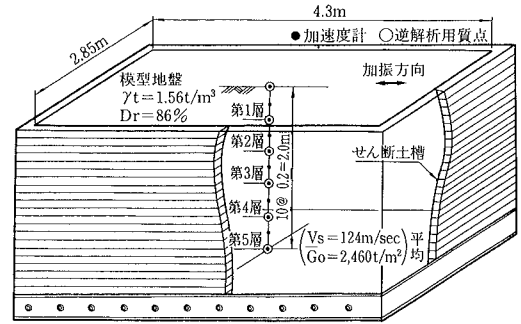


図-1 大型せん断土槽と計器配置

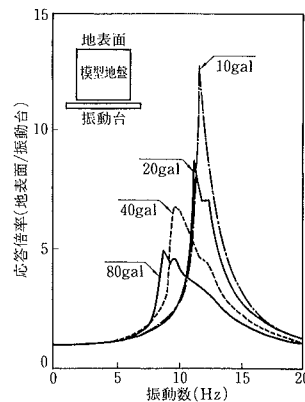


表-1 入力諸元 (振動台上)

(1) 正弦波	
振動数	1~20Hz
振幅	10, 20, 40, 80gal
(2) 地震波	
波形	EL-centro 1940 NS
時間軸	1/6に縮尺
振幅	40, 80, 160, 240, 320gal

図-2 共振曲線(実験)

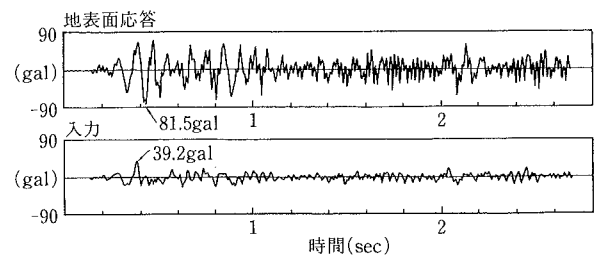


図-3 地震波入力実験結果

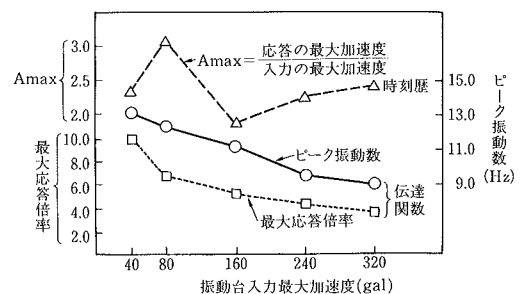


図-4 入力強度と応答特性の関係

表-2 相似則

諸元	模型	相似則 (模型/実物)	($\lambda=10.0$, $\eta=1/26$) 実物
長さ(m)	2.07	$1/\lambda$	20.7
密度(t/m^3)	1.56	$1/\eta$	1.97
せん断剛性(t/m^2)	2460	$1/\lambda^{0.5} \eta^{0.5}$	8730.0
S波速度(m/sec)	124	$\eta^{0.25}/\lambda^{0.25}$	209.0
加速度(gal)	1	1	1.0
変位(m)	1	$1/\lambda^{1.5} \eta^{0.5}$	16.1
ひずみ	1	$1/\lambda^{0.5} \eta^{0.5}$	3.55
振動数(Hz)	1	$\lambda^{0.75}/\eta^{0.25}$	0.168
時間(sec)	1	$1/\lambda^{0.75} \eta^{0.25}$	5.95

の共振振動実験結果から動的な逆解析手法²⁾を用い各ひずみ状態でのせん断剛性と減衰定数を求める。

2 m の砂層を 5 層に等分割したモデルを使用した。逆解析によって求められた $G \sim \gamma$ 関係と $h \sim \gamma$ 関係を図-6 に示す。 $G \sim \gamma$ 関係は土質試験と同様のひずみ依存性と、同一ひずみレベルにおいて拘束圧に比例して G が大きくなる傾向 (拘束圧依存性) が明瞭に現われている。 $h \sim \gamma$ 関係においてもひずみ依存性および拘束圧依存性が認められるが、 $G \sim \gamma$ のような明瞭さはない。

3.2 構成式モデル

前節で求めた $G \sim \gamma$ 関係と $h \sim \gamma$ 関係をモデル化する。ここでは、Hardin-Drnevich モデル (以下、H-D モデル) と Ramberg-Osgood モデル (以下、R-O モデル) をとり上げる。

各モデルパラメーターは、従来から土質試験結果のカーブフィッティングとして用いられている回帰分析を主体とする方法 (従来法) と、微小振動域の応答結果の改善を目的に常時微動計測結果を導入した方法 (改良法) の二つの方法とで設定する。

3.2.1 H-D モデル H-D モデルの $G \sim \gamma$ 関係と $h \sim \gamma$ 関係は式(1)で表わされる。

$$G = \frac{G_0}{1 + \gamma/\gamma_{ref}}, \quad h = \frac{h_{max}}{1 + \gamma_{ref}/\gamma} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 G_0 : 最大せん断剛性
 h_{max} : 最大減衰定数
 γ_{ref} : 規準ひずみ

従来法によって求めた $G \sim \gamma$ 曲線および $h \sim \gamma$ 曲線を図-6 に示す。 $G \sim \gamma$ 曲線は下層での微小ひずみ領域で逆解析結果との差が大きくなっているものの、ほぼ逆解析結果に沿っている。

改良法は微小ひずみ領域の振動特性と拘束圧依存性の再現性を向上させるため提案するものである。ここでは、微小ひずみ領域の地盤の動特性を表わすものとして常時微動を、拘束圧依存性を決定する要因として微小入力時の振動モードを採用した。

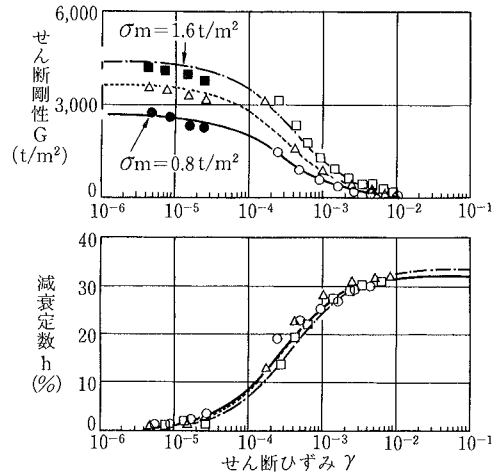


図-5 $G \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係 (土質試験)

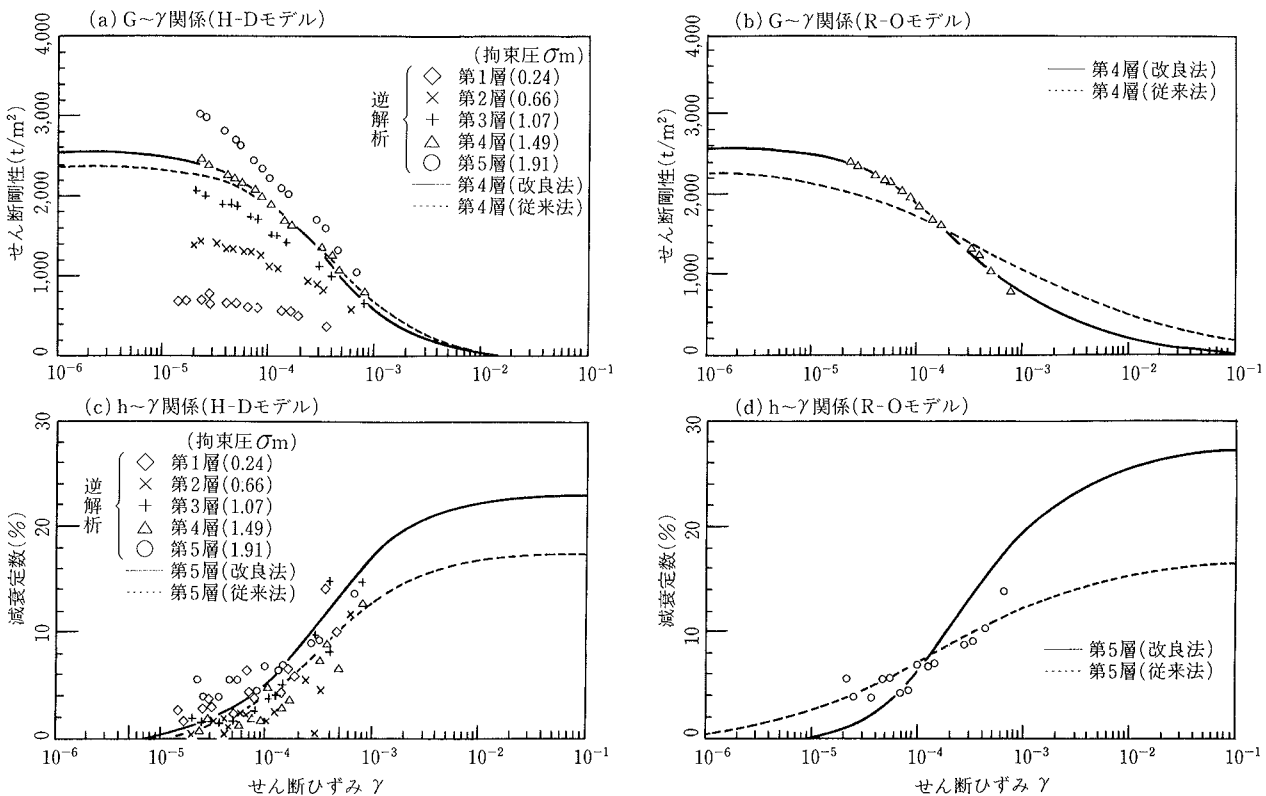


図-6 $G \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係 (逆解析)

まず、 G_0 は式(2)のように平均拘束圧 σ_m の指数関数で表わす。

$$G_0 = \alpha (\sigma_m)^n \quad \dots\dots\dots(2)$$

n はせん断振動のモード形状を規定する。図-7 に n を変化させたときの1次固有モード(理論解)と、ほぼ線形とみなせる微小入力時の1次振動モード(実験値)とを示す。図の理論解と実験値とを比較して、 $n=0.6$ とした。常時微動の卓越振動数 f と式(2)の G_0 を用いた固有値 f_a とが一致するよう係数 α を決定した。その結果、 α は2,040になった。

次に、逆解析結果からの $G \sim \gamma$ モデル曲線の差 R_G (式(3a))が最小となるように γ_{ref} を決定し、逆解析結果からの $h \sim \gamma$ モデル曲線の差 R_h (式(3b))が最小となるように h_{max} を決定した。図-6 に示す改良法の $G \sim \gamma$ 曲線を見ると、従来法で求めた曲線に比べ、せん断ひずみの小さい領域における対応は良くなっている。

$$R_G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |G_R - G_F| \quad \dots\dots\dots(3a)$$

$$R_h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_R - h_F| \quad \dots\dots\dots(3b)$$

ここに、 n : データ数
 G_R, h_R : 逆解析結果
 G_F, h_F : 構成式

式(3)を用い評価したモデル曲線の近似度を図-8 に示す。せん断剛性の誤差 R_G は2~4%と非常に小さく、近似度としては良好である。減衰定数に関しては $R_h = 30 \sim 90\%$ となり、せん断剛性のそれに比し近似度は悪くなる。これは、このカーブフィッティングの精度が悪いのではなく、逆解析で求めた減衰定数そのものにバラツキが多いためと思われる。

3.2.2 R-O モデル R-O モデルの $G \sim \gamma$ 関係および $h \sim \gamma$ 関係は式(4)で表わされる。

$$G = \frac{G_0}{1 + K(G\gamma/G_0)^{R-1}} \quad \dots\dots\dots(4a)$$

$$h = \frac{2}{\pi} \frac{R-1}{R+1} \left(1 - \frac{G}{G_0}\right) \quad \dots\dots\dots(4b)$$

ここに、 R, K : R-O モデルパラメーター

従来法および改良法によって求めた結果を図-6 に(b)、(d)に示す。図中の逆解析結果(○と△印)へのフィッティングをみると、 $G \sim \gamma$ 曲線は改良法が、 $h \sim \gamma$ 曲線は従来法がよい。このことは、図-8 に示す平均誤差の分布からも明らかである。

4. 地震応答解析

4.1 解析方法

4.1.1 解析手法と解析モデル

解析手法は一次元重複反射解析法(SHAKE)である。等価線形化法での収束判定は5%とした。入力の実験に対応させた正弦波と地震波とし、それぞれ振動台で観測された波形を入力した。解析モデルは総厚2mの地盤を10層に等分割したモデルを用いた。解析検討のパラメーターは入力強度、地盤の動的定数の

の評価法、有効ひずみ率 ϵ_f (式(5))である。 ϵ_f はランダム波の応答解析時の等価線形化手法の収束過程に用いるパラメーターである。

$$\gamma_{ref} = \epsilon_f \cdot \gamma_{mx} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 ϵ_f : 有効ひずみ率

γ_{ref} : 等価線形化手法に用いるせん断ひずみ

γ_{mx} : 最大せん断ひずみ

4.1.2 地盤の動的定数

地盤の動的定数の評価法は表-3 に示す3種類である。ケースAは前章の逆解析から評価した構成式を用いており、最も良好な結果が予想される。ケースCはサンプリングによる土質試験の結果を用いたもので、一般的な方法である。ケースBは、ケースAの最大せん断剛性とケースCの非線形モデルとを組合せたものである。これは、実地盤において、非線形特性を直接与えるデータが原位置で取得し難いことを考慮し、この非線形特性に関してのみ土質試験の結果を用いることを提案するものである。

4.2 正弦波入力実験のシミュレーション

前章で設定した種々の構成式のうち最も適切なモデルを抽出する。 ϵ_f は正弦波加振のため1.0である。

4.2.1 加速度応答結果

図-9 に解析結果としての共振曲線を示す。図の(a)10 gal 入力および(d)80 gal 入力はケースAに関するもので(H-D, R-O, 従来法, 改良法)の比較である。10 gal 入力では(H-D改良法)と(R-O従来法)

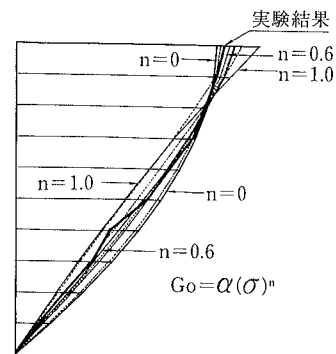


図-7 せん断振動モード

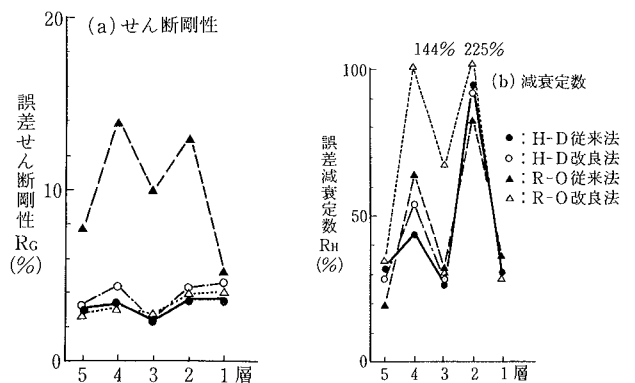


図-8 構成式モデルの誤差

が、同じく 80 gal 入力では (R-O 従来法) 以外が良好な近似を示している。総合的に判断すると、(H-D 改良法) を用いた解析が良好な再現性を示した。この再現性の良否は図-8 のモデルカーブの誤差の大小と関係していることがわかる。

図-9 の(b) 20 gal および(c) 40 gal は地盤の動的定数の評価法の違いによる影響を示している。ケース A はほぼ実験結果を良好にシミュレートしている。ケース C は共振振動数は高めに最大応答倍率は大きめになっている。ケース B の共振曲線はケース A のそれに近く、実験結果と比較するとほぼ良好な近似と言える。このことから、最大せん断剛性だけでも原位置地盤の情報を使用することで良好な振動応答解析が可能となると思われる。

4.2.2 せん断ひずみ 共振状態におけるせん断ひずみの分布を図-10に示す。図から、最大せん断ひずみを生じるのは中間層からやや下であることがわかる。この現象は図中に記した実験結果と一致している。このような地盤の場合には、等価線形化の収束計算過程の妥当性が確認されたことになる。今回の解析においての最大せん断ひずみ値に関しては、80 gal 入力時において 7.6×10^{-4} に達している。この解析による応答が実験結果を再現していることから、 7.6×10^{-4} が正弦波入力時の等価線形化法の適用範囲の一つの目安となる。

4.3 地震波応答

4.3.1 有効ひずみ率 ϵ_f の影響 ϵ_f を 0.30~1.00 の範囲で変化させた解析を行ない実験結果と比較する。構成式はケース A を用いている。図-11に各入力段階における地表面の加速度応答波形のフーリエスペクトルを示す。図からスペクトルの形状は ϵ_f の値によって大きく異なり、この値の応答結果に与える影響は多大と言える。実験結果との対応を見てみると、80 gal 入力レベルにおいては $\epsilon_f = 0.65 \sim 0.80$ が、160 および 320 gal 入力レベルにおいては $\epsilon_f = 0.50 \sim 0.65$ が良好な結果と思える。ここで、図-11に示す地表面の加速度応答波形から最大応答値 a_{max} を示す以前に $0.6 a_{max}$ 以上の振幅を持つ波頭の数をみてみると、80 gal 入力の場合では 3 個以上あり、これはよく言われている振動型に属する。これに対して 160, 320 gal 入力の場合のそれは 2 個以下であり衝撃型に属する。このような観点

表-3 地盤材料定数

	最大せん断剛性 (t/m^2)	非線形モデル(H-Dモデル)
ケースA	$2,040\sigma m^{0.6}$	$\gamma_{ref} = 3.3 \times 10^{-4}$, $h_{max} = 20\%$
ケースB	$2,040\sigma m^{0.6}$	$\gamma_{ref} = 2.34 \times 10^{-4}$, $h_{max} = 30\%$
ケースC	$3,378\sigma m^{0.6}$	$\gamma_{ref} = 2.34 \times 10^{-4}$, $h_{max} = 30\%$

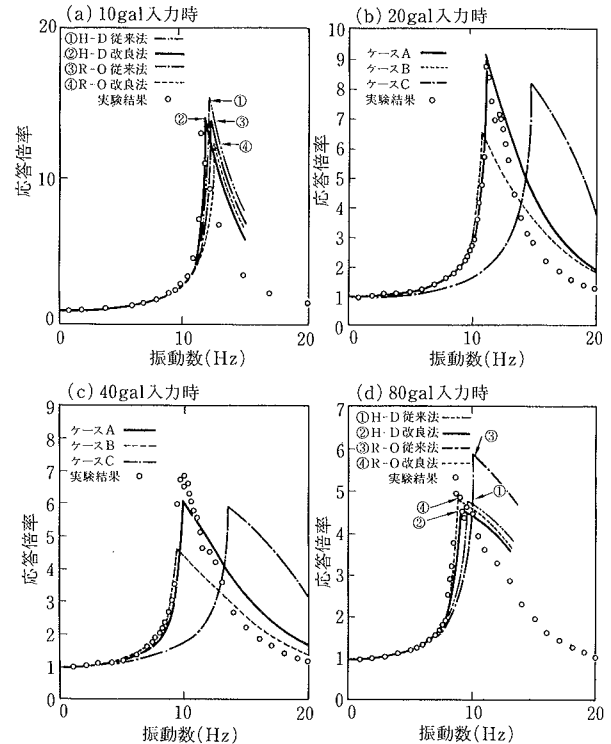


図-9 共振曲線 (実験と解析の比較)

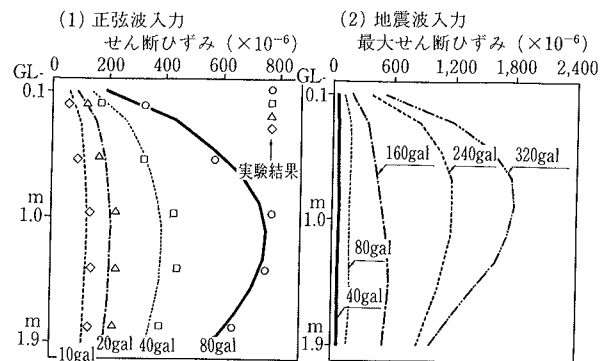


図-10 せん断ひずみ分布

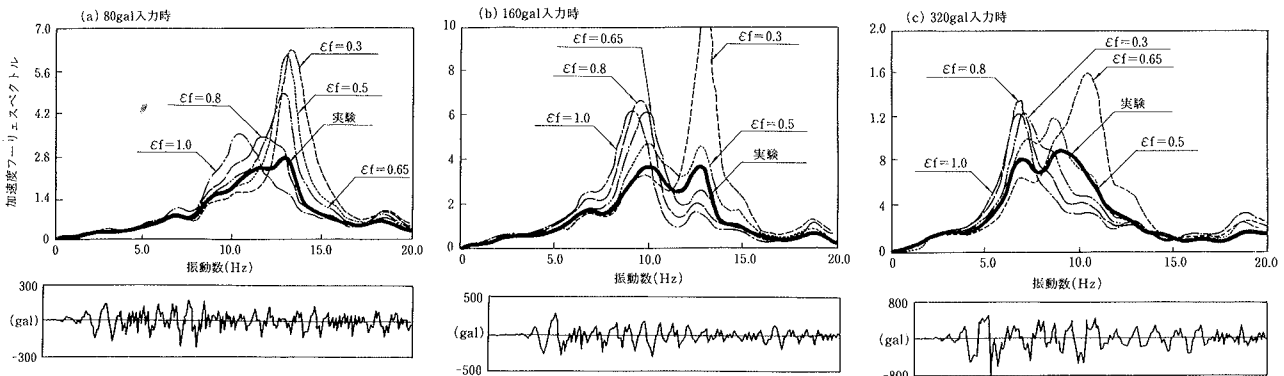


図-11 ϵ_f の影響

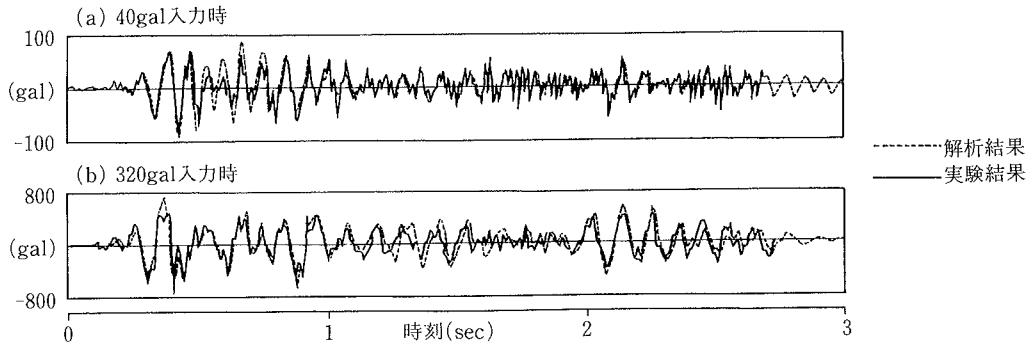


図-12 地震応答波形 (実験と解析の比較)

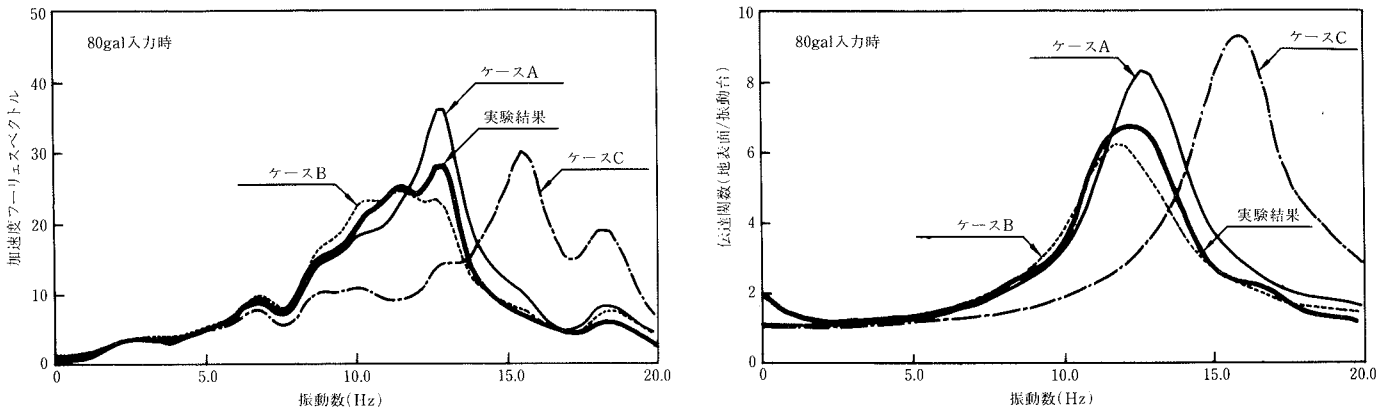


図-13 地盤定数評価法の影響

から等価線形化法に用いる ε_r を評価すると、衝撃型では 0.50~0.65が、振動型では0.65~0.80が良好な結果を与えていることがわかる。

4.3.2 入力レベルの影響 図-12における地表面の加速度波形を示す。図の 40 gal 入力の結果から主要動の終了後に見られる高周波成分の再現が良好でないことを除き実験結果との一致がみられる。320 gal 入力の結果もほぼ主要動の再現性は良好と言える。このとき地表面での最大応答は約 800 gal に達している。また、図-8(b)に示す最大せん断ひずみの分布をみると、地盤中央部において 1.7×10^{-3} まで達している。このせん断ひずみ値 1.7×10^{-3} が地震波入力時の等価線形化法の適用範囲の一つの目安となろう。

4.3.3 地盤材料定数の影響 ケース A~C の地盤定数値を用いた解析を行ないその結果を比較した。図-13に 80 gal 入力時の地表面の応答結果を示す。ケース A は実験結果とほぼ一致しており、ケース B も実験結果に近い傾向を示している。これに対して、ケース C のフーリエスペクトルは高振動数側へずれていることがわかる。全般的な応答結果はケース A → ケース B → ケース C の順に実験結果との対応が良いことがわかる。以上のことから、ケース A のような地盤の材料非線形性を原位置地盤から直接求める手法の有効性が示された。また、そのようなデータが無い場合、最大せん断剛性のみでも原位置地盤情報を導入することで解の精度が向上することが示された。

5. まとめ

等価線形化法を用い、地盤の非線形地震応答に関する検討を行なった。その結果、以下のことが分かった。

- ① この手法は 1.7×10^{-3} 以下のせん断ひずみ領域における地盤の非線形応答が解析可能である。
- ② 地盤の動的定数の評価は非線形性を含め原位置地盤から直接求める手法が有効的である。ただし、非線形性に関連するようなデータがない場合、常時微動等の情報を基に評価した最大せん断剛性だけでも解析に用いることは有効的である。
- ③ 等価線形化法に用いる有効ひずみ率はランダム波の波形形状に影響を受けるが、その設定値によって応答結果は大きく異なる。

参考文献

- 1) 国生剛治：土の動的変形特性と地盤の非線形震動応答，電力中央研究所総合報告，No. 301, p. 245~260, (1982)
- 2) 松田，後藤：大型せん断土槽内の模型砂地盤の拘束圧を考慮した動的 $G \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係について，第18回地震工学研究発表会，p. 437~440, (1985)