

1 まえがき

弾性半無限領域内の平面波動伝播挙動は理論的には良く知られており、たとえば調和SV波に対しての応答倍率あるいは反射係数はいろいろの形で示されている。均質等方弾性体と考えたときの地盤の地震時挙動において最も重要な自由面の挙動もこの意味では解明されている。しかしながら調和波でない入射波が傾斜した地表面に入射する場合のように、臨界角を越えたSV波入射に対する応答波形については十分に解明がなされていないように思われる。

ここではこのよな場合に対する応答と、動光弾性実験結果とともに理論解および差分による波動方程式の数値解の関係を明らかにする。特に調和波に対する理論解を、ここで問題とするような非調和入射波の代表としての衝撃的なパルス波形の応答解析に用いる場合の問題点について検討する。

2. 実験結果と差分解析結果

写真-1に臨界角 $\gamma_0 = 34^\circ$ である模型板の直線自由縁に対して、入射角 $\gamma = 36.4^\circ$ で図-2に示す形の平面SV入射パルスが入射した場合の、動光弾性実験による等色線縞模様の一連の応答を示す。等色線縞は等主応力差線と同じ意味を持つから、以下では便宜上この線上の値を最大せん断応力 (T_{max}) と考える。

写真-1には実験上の制約から先行する平面縦波による反射SV波面も一部に同時に見られているが、視野内で右上りの直線的縞模様が入射SV波面であり、この右側の右下りの直線的縞模様が反射SV波面である。これら2つの波面に挟まれ、境界付近に見える同心円状の縞模様は臨界角を越えた入射により生じた表面波の存在を示す。

図-1は図-2に示したSV入射パルスと等価な変位パルスを三角形の解析領域の斜辺BCに入力として与えた場合の差分解析による $80\mu\text{sec}$ での等最大せん断応力線図である。この場合辺AB, ACは共に自由縁としており、入射角 γ はそれぞれの辺に対して、 53.6° および 36.4° である。

AC辺に対する入射、反射波面およびそれらの間に存在する同心円状の模様は写真-1のそれと極めて良く一致している。ただしD点近隣の模様は伝播速度および模様の形から、AC自由辺を伝播する表面波で、C点に入力変位を与えたために発生したものである。

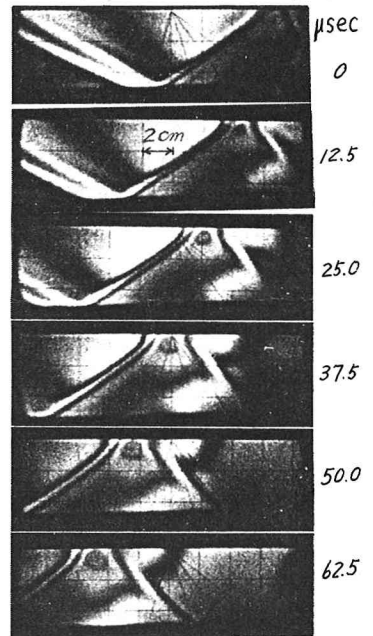
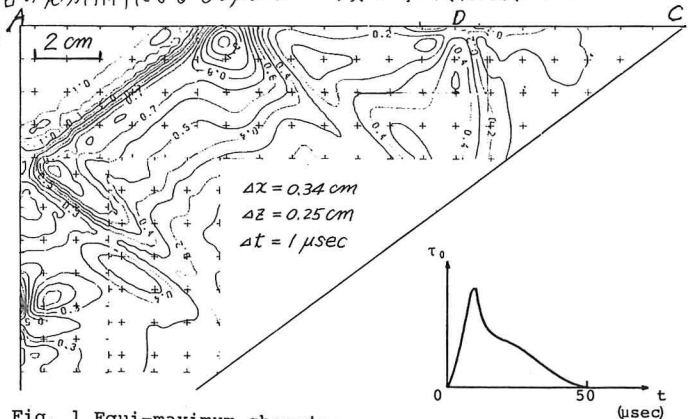
写真-1 等色線縞模様 $\gamma = 36.4^\circ$ 

Fig. 1 Equi-maximum shearing stress line

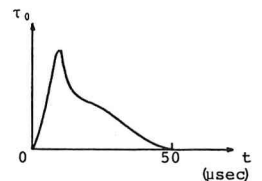


Fig. 2 Incident pulse

3. 応答

図-3は調和波に対する理論解からフーリエ変換により、図-2の入射パルスに対する自由縁の時刻歴応答を求めた結果である。この場合後続の0は入射パルス長の約9倍としている。この図には入射パルスの対応するピーク値で無次元化した $\tau_{\max}$ と z 軸方向の変位速度成分 v_z を示したが、 x 方向の速度成分 v_x は $\tau_{\max}$ に比例し形は $\tau_{\max}$ と同一である。 $t=0$ は図中に示した原点に入射波が到達する時間であるが、 $\tau_{\max}$ の応答はこれより先行している。

理論解では一般に自由境界の速度成分 v_z ($\propto \tau_{\max}$)、 v_z に対して円振動数 ω の応答 $\bar{v}_x$ 、 $\bar{v}_z$ は p を slowness として

$$\bar{v}_x = \bar{v}_x^* \exp\{i\omega(px - t - \phi_1/\omega)\},$$

$$\bar{v}_z = \bar{v}_z^* \exp\{i\omega(pz - t - \phi_2/\omega)\}$$

と書ける。ここに $\bar{v}_x^*$ 、 $\bar{v}_z^*$ は振中の絶対値であり、 ϕ_1 、 ϕ_2 は偏角である。

入射角が臨界角を越えらると $\phi_1 < 0$ 、 $\phi_2 > 0$ となり、 $\bar{v}_x$ の位相は進み、 $\bar{v}_z$ の位相は遅れる。このため図-3のように v_z は入射パルス形をほぼ保ったまゝ、位相が遅れ、 v_z ($\propto \tau_{\max}$) は位相が進みしかも応答パルス形は入射パルス形に比較して著しく変形している。

図-4は図-1に示した差分解析結果の自由縁AC上の $\tau_{\max}$ と v_z の分布を示す。前述したようにC点から伝播する表面波のために、 $d = 12 \text{ cm}$ 付近では正しい応答を示さないうが、横軸をACに沿う波面の伝播速度 (1840 m/sec) に対応させて時間軸として見ると、 $\tau_{\max}$ 、 v_z とともに図-3と同様の特徴を持つ応答を示し、各ピークの応答値も理論値にほぼ等しい。しかし $d = 4 \text{ cm}$ より左の $\tau_{\max}$ の応答は理論値と異なり、振動数領域解の限界を示すと思はれる。

図-5は破線が示す正弦2波の入射パルスを与えたときの $\tau_{\max}$ と v_z の理論応答である。この場合も位相の進みと遅れは前述したように現われているが、応答波形の乱れは最初と最後の部分でのみ著しい。したがってたとえ地震波形のような入射波に対しては見かけ上乱れは無視されようと考えられる。

1) 以下 K. Aki & P. Richards, "Quantitative Seismology," Vol. 1, pp. 123~192, 1980.

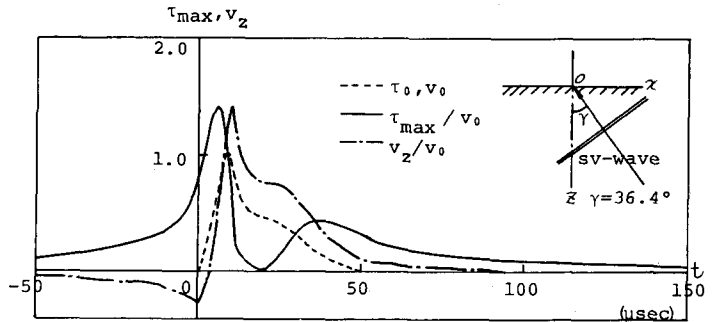


Fig. 3 Theoretical responses of $\tau_{\max}$ and v_z to SV-wave incidence on free surface ($\gamma=36.4^\circ$)

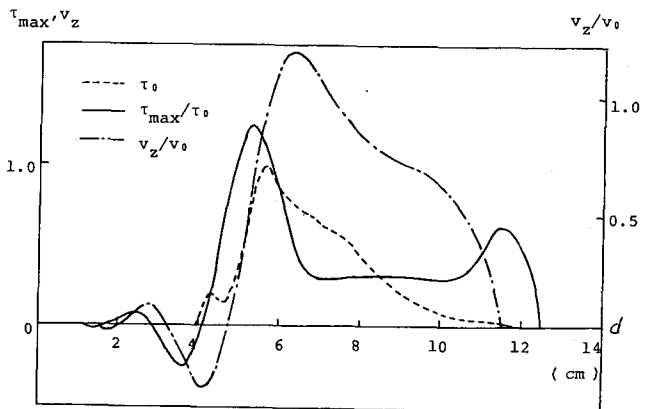


Fig. 4 Calculated responses of $\tau_{\max}$ and v_z on free surface ($\gamma=36.4^\circ$) $t=80 \mu\text{sec}$

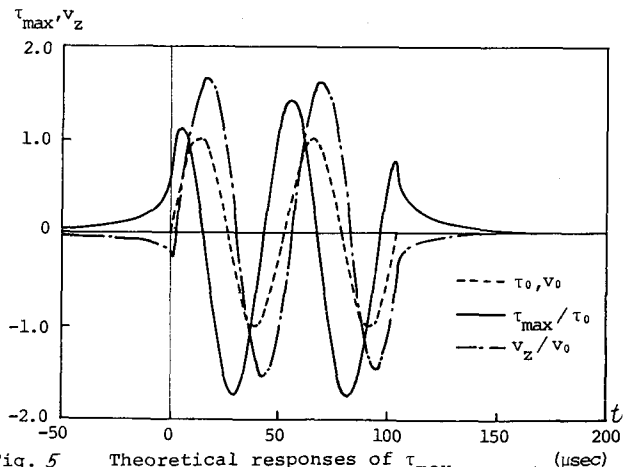


Fig. 5 Theoretical responses of $\tau_{\max}$ and v_z on free surfaces ($\gamma=36.4^\circ$)