

(27) 動光弾性実験によるスリットおよび断層を有する模型内の波動解析

広島大学工学部 正員 佐藤 誠

1. まえがき

波動問題と対象とする実験的研究は簡明で精度の良い解析法が十分開発されていなかった時期に、計測手段、装置、模型材料などいくつかの困難な問題を克服しつつ、多数の研究者によって遂行され、貴重な成果を得て来た。しかし最近では差分法、有限要素法、境界要素法などこの種の問題に対する数値解析法が急速に発達し、実験的研究は次第にその価値と減じたかのように思はれる。一方上記の各数値解析法も波動問題に対する汎用性と保ちながら精度の高い解析を行なう場合には時間と費用が増加することが避けられず、一般的に波動問題に対処することは必ずしも簡単でない。さらに波動問題に特有な無限領域における境界波の処理においても依然として精度に不明な部分が残されている。以上の現状から筆者らは地表付近に各種の不整合、不均質な地盤構造が存在する場合の地盤内の波動挙動を解明するために、これに対して最も有効であると考えられる動光弾性実験を行なった。地表付近の地盤に存在する不均質状態のうち、耐震設計に興味あるものは主として地層および断層を含む地盤構造であろう。この場合には地層波がP波またはSV波としてこれら不均質部分に入射した場合には、不均質境界で常に2種類の実体波が発生し、また入射角によっては表面波あるいは境界波が発生する。さらに隅角部と有する境界からはその隅角で発生線とするような円筒波と表面波が発生する。これらに対する波動挙動の数値解析は前述したように必ずしも容易にはない。

本研究に用いた動光弾性実験法によると、撮影速度、入力パルスの形、模型寸法などに制約は受けるが、広い領域にわたる波動挙動が得られ、結果の平明さ、含有される情報量の多さを考慮すれば、この種の波動挙動を解析するために本実験法が極めて秀れた有効な手段であると考えられる。

ここでは入射パルス長に比較して十分短い中のスリットと、このスリット内に波動インピーダンス(PC)比が $1/2 \sim 1/2.5$ であるような軟材料と充填した断層を有する模型に対する動光弾性実験結果と報告する。

2. 模型および実験方法

図-1に本研究で用いた光弾性模型の基本形を示す。台形ABCDは厚さ4.4mmのエポキシ樹脂板で、辺ABは黄銅角棒LRに接着されている。模型板のP波の伝播速度より高速の棒内伝播速度をもつ黄銅角棒のしまたはR端とポンプ銃弾で衝撃すると、模型板AB縁に走行荷重を与えた結果となり、板内にそれぞれ伝播方向の異なる平面P波とSV波が入射する。図中にLおよびR端衝撃を行なった場合のO点に到達するP波とSV波の伝播経路と波面の例とそれぞれ破線と実線で示す。図-1に示す基本模型S₀の場合、DC辺と地表と考えるとSV波はL端衝撃に対しては地表に垂直に入射し、R端衝撃に対しては反射P波の臨界角(33.8°)にほぼ等しい36.4°で地表に入射する。

図-2にスリット模型 S_1 と S_2 を示す. これらは S_0 模型

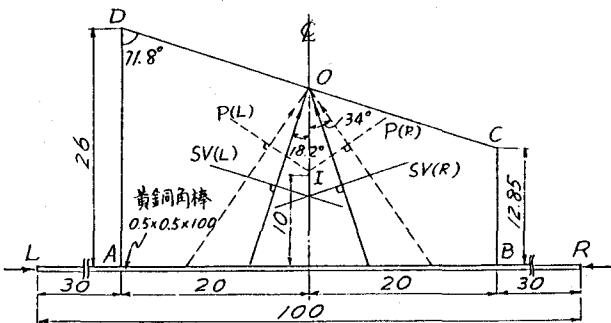


圖-1 基本模型 S_0 單位 cm

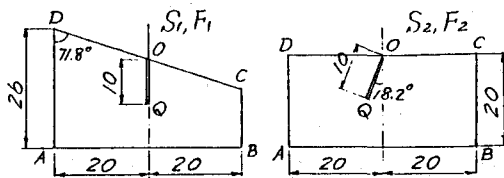


図-2 スリットおよび断層模型

板 (Ep-I) と長方形板 S_0 に中 1.5mm 、長さ 10cm のスリット OQ と設けたものであり、このスリットに表-1に示す模型材料 Ep-II または Ep-III を充填した模型とそれぞれ模型 F_1 および F_2 と呼ぶ。なお模型 S_0 と S_0' の模型材料は Ep-I である。

図-3 (a) はポンプ銃弾衝撃によって発生する入射パルス波形状を調べるために、図-1の基本模型 S_0 のほぼ中央の測点 I で測定した主ひずみ差を示す。これから応力またはひずみに対応する入射パルス波形状の主要部は継続時間約 $50\mu\text{sec}$ のほぼ三角形であり、P波パルスに次いでピークがその約3倍のSV波パルスが入射することになる。したがってP波とSV波のパルス長はそれぞれ約 10cm と 5cm である。

上記の2種類のパルスが模型内と伝播して生じる動光弾性縞模様は閃光時間約 $800\mu\text{sec}$ のキセノン光源と、MLD-1型ドラム式超高速カメラ (最大撮影速度 12 万駒/秒) を用い通常 8 万駒/秒の撮影速度でカラー撮影した。被写体の撮影視野は約 $16 \times 6\text{cm}$ である。写真-1に模型 S_0 のR端衝撃の場合の等色線縞模様を示す。ここでは白黒写真として示すが等色線縞次数は主応力差に比例する。

図-3 (b), (c) は測点 I 付近に入射P波とSV波それぞれのパルスのピークが最初に到達した時刻における駒写真から、伝播方向の等色線縞次数 N の分布と写真-1から読取ったものである。

図-3 (a) と (b) および (c) はよく対応しており、それぞれの波のピーク値の比から計算すると、模型材料 Ep-I の動的ひずみ-フリンジ値 f_e は約 $770 \times 10^6 / N / \text{cm}$ であると推定される。

3. 実験結果

写真-1は前述のように基本模型 S_0 のR端衝撃によるO点近傍の暗視野写真である。ここではカラー写真から複写したモノクロ写真であるため、以下の写真と同様に細部が不鮮明であるのはやむを得ない。模型 S_0 の場合O点への入射P波とSV波の到達時間差は約 $87\mu\text{sec}$ であり、入射パルス波形状から考えてO点付近ではP波とSV波が独立に到達すると考えられる。

この写真には $25\mu\text{sec}$ からCD自由縁へ入射するP波面とその反射SV波面、 $75\mu\text{sec}$ から自由縁へ入射するSV波面とその反射SV波面、および入射SV波が丁度臨界角を越えて入射するため生じた表面波の存在が明瞭である。また表面波の存在領域が自由縁の近傍に限られること、しかも自由縁よりやや内側に最大縞次数が生じていることも明らかである。

模型材料	P波速度 C_p m/sec	SV波速度 C_r m/sec	密度 ρ g/cm ³	ポアソン比 ν	臨界角 θ_{cr} degree	ρC_r 比
Ep I	1,960	1,090	1.27	0.381	33.8°	1
Ep II	1,100	530	1.22	0.444	31.8°	0.511
Ep III	860	450	1.22	0.452	29.2°	0.397

表-1 模型材料の動的物性値 (12°C)

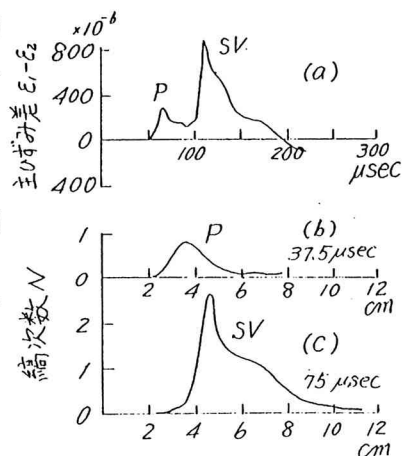


図-3 入射パルス波形状

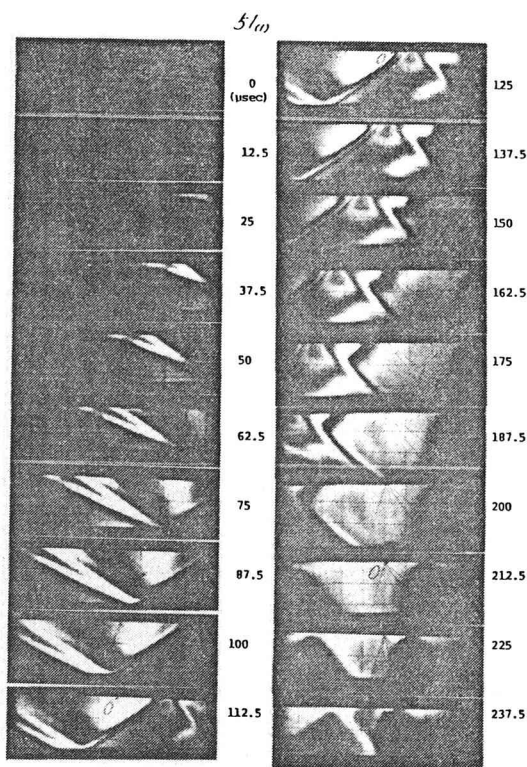


写真-1 模型 S_0 のR端衝撃の縞伝播

3-1 スリット模型

図-4 (a), (b) に半無限スリットのスリット底を含む領域へ平面P波およびSV波が入射した場合に発生する各種の波の波面を示す。この場合は隅角部のある自由境界に対しては同様であるが、スリット縁からの平面反射波および表面波以外に、スリット底Qから円筒P波とSV波が発生し、それに伴う head waveが発生する。またQ点から表面波も発生伝播するからスリット底(隅角)のある場合には直線自由縁のみの場合とはかなり異なった波動挙動となる。なお模型材料 E_p-I の表面波の伝播速度 C_R は $1,020 \text{ m/sec}$ と計算される。

図-2 に示したスリット模型 S_1 と S_2 に対してはL端とR端衝撃によりスリット軸OQに関して3種類の入射角の場合が得られる。どの場合もSV波はOQに対して臨界角を越えた入射角を持つ。 S_1 のL端とR端入射の差はCD自由縁に対する入射角が異なることである。

写真-2 はスリット軸OQに対する入射角が最も小さい模型 S_2 のR端衝撃の場合を示す。

この例について写真-2 から波動挙動を詳しく検討する。スリット底QにP波が入射した $37.5 \mu\text{sec}$ 以後スリット右縁から右方向に伝播するほぼ垂直な波面はPSである。 $37.5 \mu\text{sec} \sim 112.5 \mu\text{sec}$ においてQからスリット両縁とOに向って移動する縞次数0の縞(暗点)の移動速度は $1,020 \text{ m/sec}$ であり、P波入射によりQで発生した表面波(R_Q)の縞であることが確認される。 $75 \mu\text{sec}$ からはスリット右縁にSV波が入射し、 $87.5 \mu\text{sec}$ 以後Qで発生した表面波(R)がOに向ってスリット両縁と伝播している。スリット右縁では臨界角を越えたSV波入射により表面波(R)が発生するが、この入射角ではOQに沿う方向のSV波の波面の移動速度は $1,350 \text{ m/sec}$ であるため、前述の表面波(R_Q)とは次第に分離している。この写真の場合スリット底Qで発生した R_Q がスリット縁に最大の縞次数(縁応力)を生じさせている。

ここには示さなかったが、模型 S_1 およびL端衝撃の S_2 の場合についても写真-2 の場合と比較して各波の発生メカニズムに大差はない。ただしスリット軸に平行に入射する場合のスリット縁縞次数が最大である。

PSc: P波入射による円筒SV波
PPc: " " 円筒P波

SSc: SV波入射による円筒SV波
SPc: " " 円筒P波

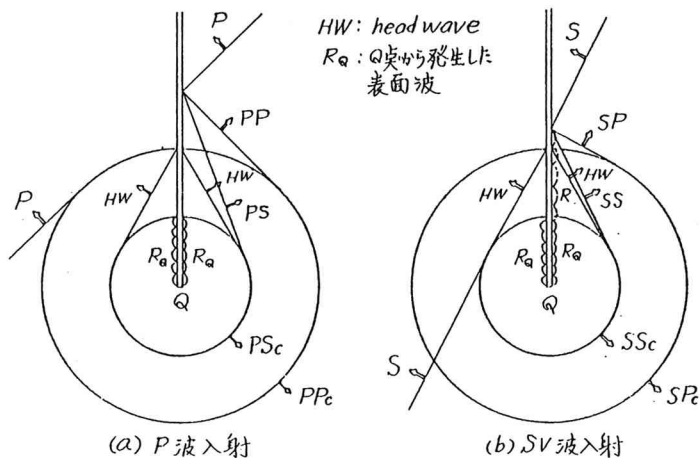


図-4 半無限スリットへ平面波が入射した場合の波面

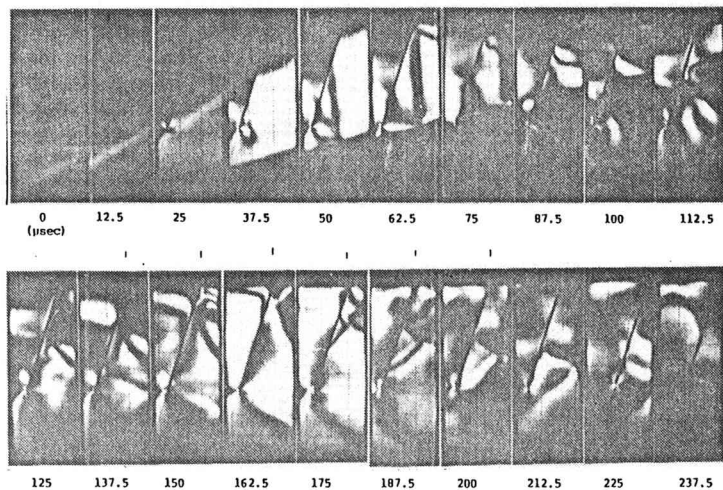


写真-2 模型 S_2 のR端衝撃による縞伝播 (スリット)

3-2 断層模型

図-2に示したように、断層模型はスリット模型のスリット内に模型材料Ep-IIまたはEp-IIIの軟層を充填したものである。P波の伝播速度から計算されたEp-IIIの動弾性係数はEp-Iの約1/6である。

写真-3は写真-2のスリットにEp-IIIを充填した断層模型F₂にR端衝撃を行なった得た結果である。

この写真では明瞭でないが、対応するスリット模型の写真-2で観察されたことと同様の波動挙動がスリット縁近傍に必ず現われている。しかし断層部に入射したP波、SV波とともに断層軸と横切ってそのまゝ、平面波面を維持している。また模型F₁のR端衝撃の場合についても、写真-1の場合と同様にC/D自由縁で発生した表面波はほとんどそのままの縞模様で断層軸と横断して伝播している。

縞模様の伝播状態から判断する限り、どの断層模型についてもこの程度のP/C比の断層では、断層のなまの場合に比較して影響はわずかであると思われる。

4. まとめ

図-5 (a), (b)にはスリット模型と対応する断層模型について、OQ付近でSV波入射の効果が最も強く現われる137.5μsecにおけるスリット(断層)の左右両境界に沿う縞次数の分布を示した。図中のθとδはそれぞれOQに対するP波とSV波の入射角である。

スリット模型ではスリット軸への入射角が小さい程SV波入射側の右縁の縁応力(縞次数)が当然大きい。しかしδ=71.8°の場合のように非入射側の左縁に直接入射波が到達しない場合でも、スリット底Qから発生する2次的な波による縁応力が大きく、入射側の右縁と同程の大きくなることもある。

断層模型では断層軸に対する入射角に無関係に断層軸に関してほぼ対称な縞次数分布であり、本研究で用いた波動インピーダンス比では非均質性はほとんど現われない。

最後に波動問題解析において、ここで用いた動光弾性実験法は波動現象そのものと等色線縞模様の形で直接観察することができるため極めて有効であることが示されたと考えられる。

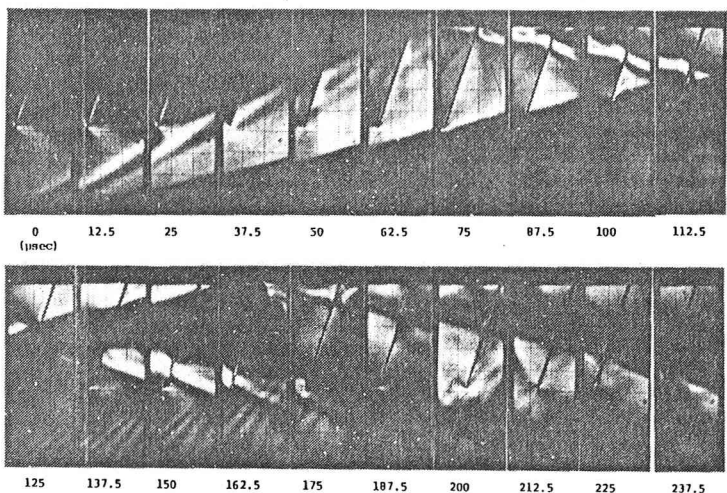


写真-3 模型F₂のR端衝撃による縞伝播 (断層)

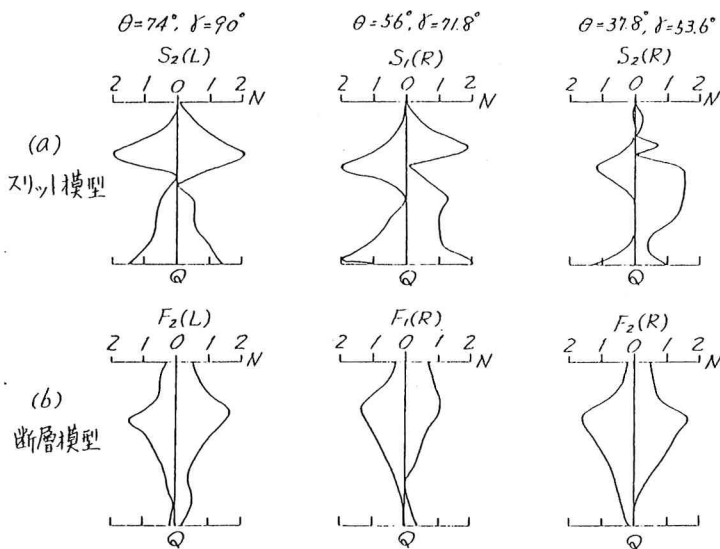


図-5 スリット縁および断層境界の縞次数分布 (137.5μsec)

(27) Dynamic Photoelastic Studies of Wave Propagation in Slit
and Fault Model

Makoto SATO

Faculty of Technology, Hiroshima University

Dynamic photoelasticity was used to study some fundamental aspects of wave propagation in a two-dimensional model with a deep and very narrow trench or a slit and a model with a fault filling the slit by lower characteristic impedance material, and to obtain information on the dynamic event associated with the various wave generated by plane wave incidence to those inhomogeneous region.

Photoelastic models were fabricated from Epoxy Resin plate which was $4.4 \times 200 \times 400$ mm in size. A slit was cut to a depth 100 mm and a width 1.5 mm, and inclined to the free boundary of the plate so that plane distortional waves struck the slit axis with incident angle of 53.6° to 90° .

Softened Epoxy Resin was filled in the slit to obtain a fault model with a characteristic impedance mismatch of 1 to 0.4.

Travelling load method, which was performed by longitudinal compressive impact on one end of brass rod bonded to a longer edge of model plate by means of a lead bullet driven by air gun, was used to generate plane longitudinal and distortional waves simultaneously in the model plate, and the predominate pulse length of these waves were 10 cm and 5 cm respectively.

A high-speed drum type framing camera operating at 80,000 frames per second, was used to record the colored dynamic isochromatic fringe patterns associated with the propagating stress waves.

The dynamic isochromatic fringe patterns presenting cylindrical wave, headwave, Rayleigh wave, and reflected waves generated from the free boundaries and an end of slit associated with several angle of incidence of both type of pulses were discussed in detail. It was noted that the headwave and Rayleigh wave propagating from an end of slit had predominate effects on both free boundaries of the slit.

To evaluate the effects of the characteristic impedance mismatch and the difference of incident angle of pulses, the transmission and reflection coefficients of the boundaries of fault, presented by dynamic isochromatic fringe orders, were compared with reference model. But the differences of those effect were a little comparing with those of slit model in any incident angle in an range of the characteristic impedance mismatch.

It is clearly shown that the dynamic photoelastic method provides visual information over the entire region of interest and is very usefull in interpretation and analysis of the complex behavior associated with stress wave reflection and transmission encountered in the seismic problems above mentioned.