「海—自然と文化」東海大学紀要海洋学部　第２巻第３号　1-12頁（2004）
Journal of The School of Marine Science and Technology, Vol.2 No.3 pp. 1-12, 2004

地震断層近傍における地震動および永久変形に関する実験的研究

太田良巳*1・アイダン・オメル*2

An Experimental Study on Ground Motions and Permanent Deformation nearby Earthquake Faults

Yoshimi OHTA and Ömer AYDAN

Abstract

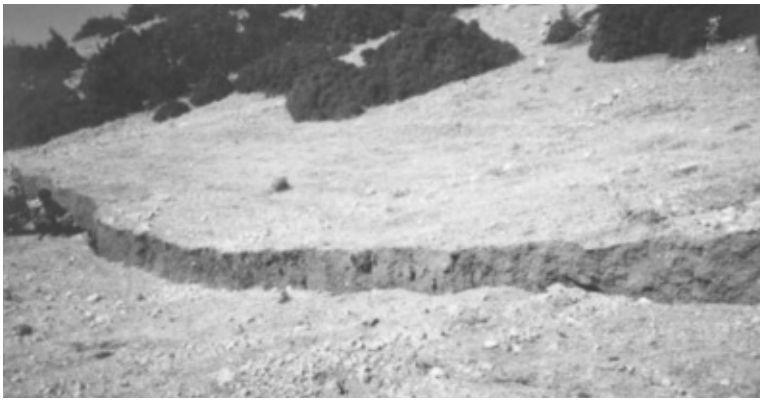
It is well known that earthquake faulting induces ground vibrations and permanent ground deformations, which damage structures and cause the loss of lives and properties. The studies on the characteristics of vibrations and permanent ground deformations during faulting process are very few. However, the ground vibrations induced by faulting have important directivity effect. There are some laboratory experiments on how crack propagates and appear on the ground surface in soil deposits overlaying a solid basement undergoing faulting motions under constant velocity conditions. The authors developed an experimental equipment and performed acceleration measurements during a dislocation action under gravitational environment. The relative displacement of the moving side in the faulting experiments was varied between 25 and 100 mm. The accelerations were measured on the surface of quartzite sandy soil deposit of the moving and stationary sides in the faulting experiments. In this article, the acceleration responses of hanging-wall and footwall in relation to faulting motion are described and discussed. The experimental results clearly indicated that the accelerations on the mobile side of the fault several times larger than those on the stationary side. This experimental result is consistent with acceleration measurement in earthquakes such as 1999 Chi-chi, 2003 Miyagi-Hokubu and 2004 Niigata-ken Chuetsu earthquakes.

１．はじめに

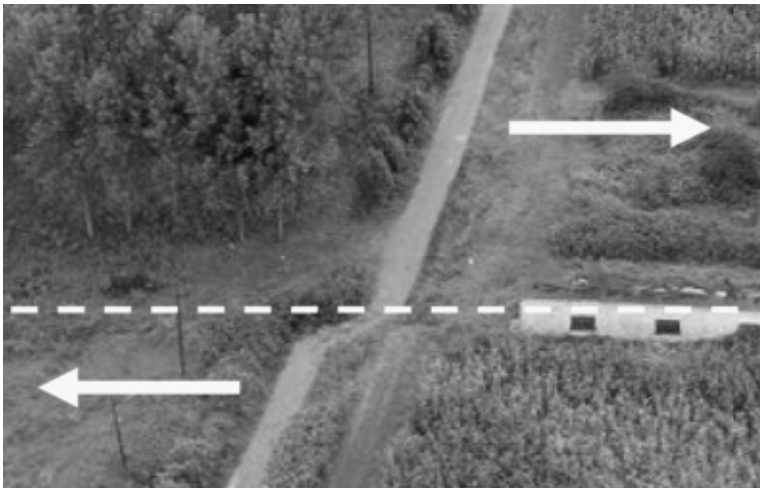
内陸型大地震では地表面に断層変位による道路や鉄道・橋梁・ライフライン・ダム等への大きな被害が報告されている．国内において2004年10月の新潟県中越地震，2003年７月の宮城県北部地震，1995年の兵庫県南部地震，国外においては1999年８月のトルコ・コジャエリ地震や同年９月の台湾・集集地震での被害は，いまだに我々の記憶に新しい．その他，サンアンドレアス断層（サンフランシスコ地震：1906ロマプリエタ地震：1989），北アナトリア断層（1939年 Erzincan 地震，1943年 Ladik 地震，1944年 Bolu 地震，1967年 Mudurnusuyu 地震，1999年 Duzce 地震）など数多くの地震で地表断層変位が報告されている．一般に，地震の原因は，地殻を構成する岩盤の破壊や既存の断層のすべり運動によるものであり，地表面断層近傍においては地震断層を挟んで建物などの被害に大きな違いが存在することが多くの地震において確認されている．

地震による被害には，地震動による被害と断層運動による地表面変形による被害がある．断層は，岩盤の破壊に伴って相対変位が認められる不連続面である．断層は地殻に作用する応力によって Photo１に示したように a）正断層，b）横ずれ断層と c）逆断層に分類される．Photo１では断層運動によって地表面地盤が大きく変形している様子が見て取れる．これらの断層運動によって，Photo２に示されるような，鉄道や鉄塔，ダムのような地上の構造物や地下鉄や水道管などの地下構造物に多大な被害が発生している（Aydan 2003, Aydan ら 1999, Ulusay 2002）．Photo２a）～c）は，1999年トルコ・コジャエリ地震の時のものである．Photo２b）の線路の曲がり方より右横ずれ断層が確認できる．Photo２d）は，1995年兵庫県南部地震による地下鉄神戸高速鉄道大開駅の被害状況である．

2005年１月18日受理
＊1　東海大学大学院海洋学研究科海洋工学専攻（Tokai University, Graduate School of Marine Science and Technology）
＊2　東海大学海洋学部海洋土木工学科（Tokai University, Dept. of Marine Civil Engineering, Shizuoka, Japan）



a) Normal faulting (1995 Dinar Earthquake)



b) Strike-slip faulting (1999 Kocaeli Earthquake)

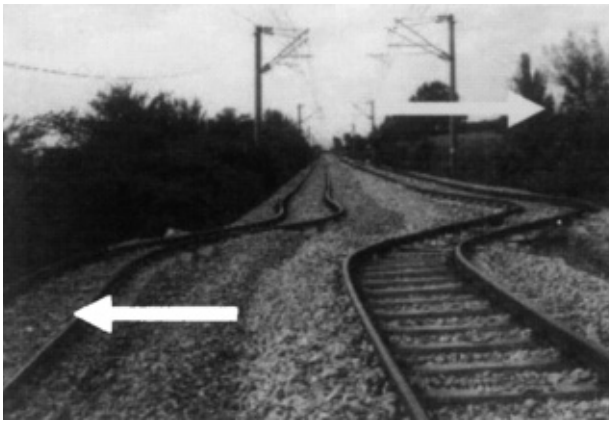


c) Thrust faulting (1999 Chi-Chi Earthquake)

Photo 1: Fault types



a) Apartment blocks (1999 Kocaeli Earthquake)



b) Railway (1999 Kocaeli Earthquake)



c) Tubular line-like structure (1999 Kocaeli Earthquake)



d) Subway (1995 Hyogo-Nanbu Earthquake)



e) Dam (1999 Chi-Chi Earthquake)



f) Pylon (1999 Chi-Chi Earthquake)

Photo 2: Damage of the structures by earthquake faults

Photo 2 e)・f）の写真は，1999年台湾・集集地震のものである．集集地震で確認された断層は逆断層で，この断層によって多くの被害が報告された．これらの被害を断層近傍で比較すると，Photo 2 a）のアパートの倒壊状況のように，同じ構造物であっても断層を挟んで被害状況が異なることが報告されている．

このため，日本でも断層運動による地表面や表層内への影響について1999年のコジャエリ地震や台湾・集集地震を起点にして研究が開始されている．構造地質の分野で様々な断層の発生や亀裂の伝達および地形の変化について古くから模型実験が行われている（Scholz, 1990；垣見・加藤1994）．また，工学的な立場から縦ずれ断層模型実験は，多くの研究者たちによって行なわれてきた．これらの実験は基盤の断層変位に伴う未固結被覆層の変形挙動の解明を目的とした実験であった（上田・谷1999）．

未固結被覆内の断層の形状が，基盤の断層型，断層傾斜角の違いによりどのように変化するのかを解明するため，Cole and Lade（1984）は層厚 45cm の模型地盤に，さまざまな傾斜角を与え，砂地盤内に生じる破断面の形状を観察し，理論的に求めた断層形状と比較した．

また遠心模型実験を用いて，Roth ら（1981）は，基盤の逆断層変位を模擬し，厚さ 457mm の模型地盤に50G の加速度を作用させる実験を行った．その結果，基盤の断層変位速度が遅く，地盤の密度が大きい方が，模型地盤内の断層は緩傾斜となった．

さらに，粘土層を対象とした断層模型実験の例として，Bray ら（1994）は高さ 610mm の土槽等からなる装置を使用し実験を行なった．その結果，粘土の物性により粘土層の変形状況が大きく異なり，より延性変形しやすい粘土層ほど断層は地表面に到達しにくいことが示された．

以上のように，既存の研究では基盤岩盤上の堆積地盤内の変形や地表面の変形に注目した研究が多い．これらの実験は断層運動をジャッキによって等速運動下で模擬して行なわれており，動的な重力場における未固結被覆層の変形挙動や地震動について堆積層上部地盤の層厚を変えた実験は行なわれていない．本研究では，地震時の動的運動に注目している．断層運動を重力場における上部堆積地盤の自由落下により模擬し，堆積地盤内の断層亀裂の伝達・変形のほか，地震断層の上盤と下盤の地震時の地震動について検討した．

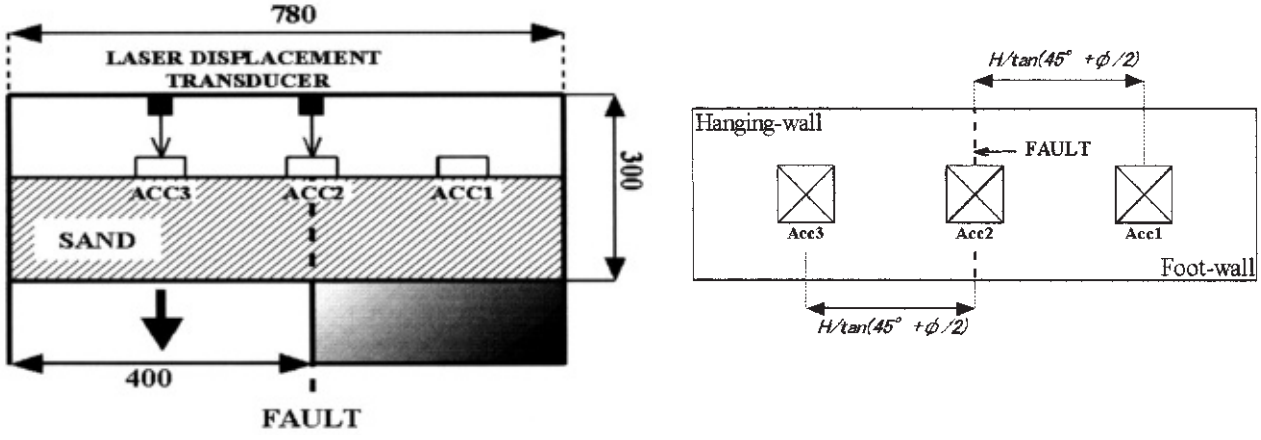
2．実験概要

2.1　実験装置

Fig. 1 に実験装置の略図を示す．本実験装置は重力場のもとで断層運動中に発生する加速度応答や堆積地盤の変形を観測するために製作した．観測水槽の大きさは，長さ 780mm・高さ 300mm・奥行き 250mm である．観測水槽のみ透明なアクリル板になっており，その他の部分は鉄製になっている．水槽の底盤は左右 2 つのブロックよりなっている．片方のブロックの下に底盤を支える棒があり，この棒はピンによりとめられている．このピンを引き抜くことにより一定の角度 90° で底盤が落下する．この運動を断層運動としている．本実験装置は断層傾斜角・断層変位量を変化させることが可能である．実験装置の落下する底盤の断層変位量は 25〜100mm の間で変化させた．実際の地震は等速場ではなく重力場において発生するので，底盤を角度 90° で重力場において自由落下させることにより，従来の実験と比べて断層運動をより正確に表現することができると考えている．地質学的に垂直な正断層の場合に上盤と下盤の定義は明確にされていないが，本実験では運動する側を上盤，運動しない側を下盤とする．

2.2　実験条件と実験ケース

Table 1 に実験条件を示す．断層変位量は 25，50，75，100mm とし，上部堆積層の層厚は 200mm で実験を実施した．断層の種類は正断層で，その傾斜角は 90° である．地盤材料は気乾燥砂を用いた．地盤材料の材料特性を



a）Front view　　b）Plan view

Figure 1:　A sketch of experimental set-up (unit in mm)

Table 1: Experimental conditions

Angle of inclination for faulting	90°
Faulting type	Normal Fault
Faulting displacement	25, 50, 75, 100mm
Layer thickness	200mm
Ground material	Sandy soil

Table 2: Physical and mechanical properties of dry sand

Mean Grain Size (mm)	Dry Unit Weight (kN/m^3)	Porosity (%)	Friction Angle (°)	Repose Angle (°)
0.46 – 0.60	14.7	43.73	32 – 34	29 – 31

Table 2 に示す．同じ条件の実験を 3 回ずつ行った．

2.3 実験方法

模型地盤の作成には空中散布法により砂をまき，密な砂地盤を作成した．砂地盤内の変形過程を確認するために 4 cm 間隔で水平層を作成し，水平層には気乾燥砂を黒インクで着色したものを用いた．この水平層は，砂の空中散布を一時中断して，黒色の砂を観測面付近のみに散布して作成した．この作業を繰り返し行い，層厚 200mm の模型地盤を作成する．

2.4 計測器及び設置位置

地盤の変位と地表面加速度を同時に測定するためにレーザー変位計と加速度計を使用した．加速度応答は堆積砂の地表面で測定したものである．計測には YOKOGAWA の WE7000 計測装置を利用して自動計測し，加速度計は TOKYO SOKKI の AR-10TF である．この加速度計は最大 10G まで計測可能で，3 成分の加速度を計測可能である．実験に用いた加速度計は Fig. 1 のように設置した．落下する（運動する）側の加速度計番号を Acc 3，静止している（運動しない）側の加速度計の番号を Acc 1，断層真上の加速度計の番号を Acc 2 として設置した．運動中の地表面の鉛直変位量は KEYENCE のレーザー変位計を用いて計測した．Fig. 1 に示したように，落下地盤と断層真上の地表面で計測した．加速度計の設置位置は断層運動による地表面での破壊の限界距離とし，より求める．ここで ϕ は砂の内部摩擦角で，その値は約 30° である．また，H は砂地盤の層厚である．

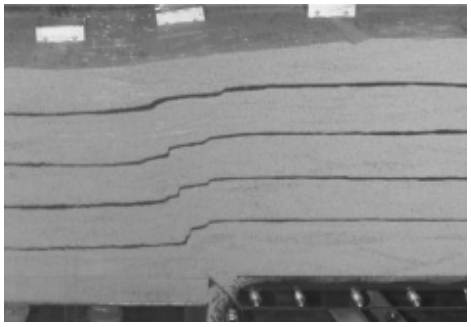
3．実験結果と考察

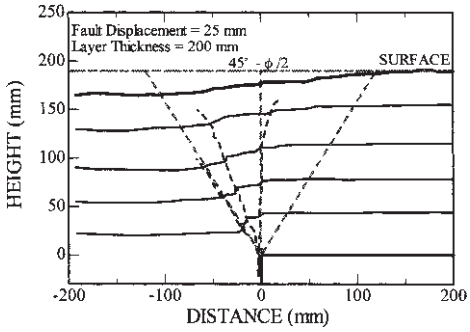
3.1 断層亀裂の伝達

各断層変位量に対する断層運動停止後の断層亀裂の伝達の様子を Fig. 2 に示す．図より断層亀裂の伝達の様子が明確である．伝達の様子は，4cm 間隔で作成した水平層のずれから見て取ることができる．断層亀裂は複数の線になって左右両方の地盤に発生していることがわかる．伝達した断層亀裂によって水平層が階段状の変形形態を示している．断層発生後は地表に緩やかな坂が形成されている．その傾斜は最大で安息角に等しい．また，運動する側の地盤（上盤）に発生している亀裂の様子は逆断層運動に近いが，動かない側の地盤（下盤）内に発生する亀裂の様子は正断層に類似している．さらに，上盤が下盤に対して破断・変形した領域が大きいことを判断できる．

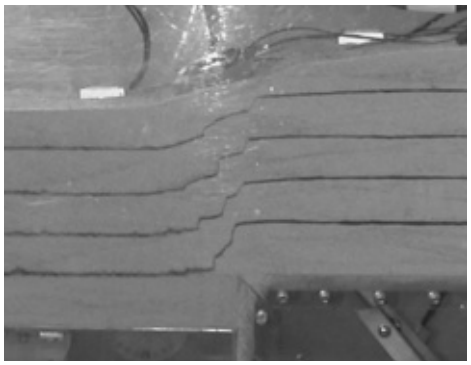
断層亀裂の地表面への到達位置は断層発生後に砂の安息角に依存して地表面が滑らかな斜面が形成されるために，断層亀裂が地表面に達する場所については目視することができない．Fig. 2 に断層運動による断層亀裂の伝達状況の写真と写真をデジタイザーで数値化した図を示す．Fig. 2 では断層の端から 60° の角度の範囲では下盤に水平層のずれ方に正断層が見られるが，上盤に断層の停止位置より 60° の範囲では逆断層亀裂が見られる．断層変位が小さくなるほど目に見える断層亀裂は断層変位量 10cm のときと比べると数が少なくなっている．断層亀裂の広がりの範囲は断層変位量 10cm のときと比べると若干狭くなっているように見受けられる．しかしながら断層亀裂の伝達の様子より同様な現象が発生しているといえる．下盤に進展した断層亀裂は断層変位量 20cm のときと比べて立っているように見受けられる．水平層のずれ方は断層から下盤側では正断層で，上盤側では逆断層型である．また共通した現象としては，断層亀裂は層厚に限らず断層直上から両側の地盤に発達し，まっすぐな線にはならず上方に向かうほど曲がる傾向にある．等速度場で行われた他の実験結果（Cole ら，1984；Roth ら，1981；Richards & Krantz, 1991；上田・谷，1999）と比べると，動的な場で発生する亀裂の量と地盤の永久変異量は大きくなっていることが明確になっている．

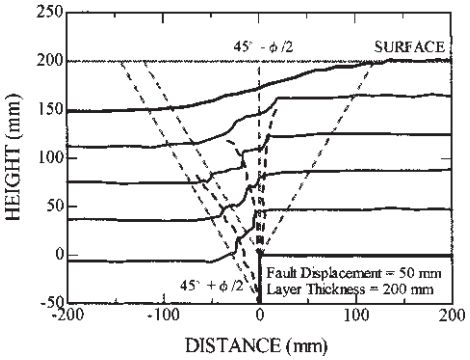
Fig. 3 に断層変位量 100mm における層厚 100，150，200mm の場合の地表面変形の関係を示す．Fig. 3 では層厚による断層真上の傾斜の変化は見られない．Fig. 4 に層厚 200mm における断層変位量と断層変位量を 25，50，75，100mm の場合の地表面変形の関係を示す．Fig. 4 よ



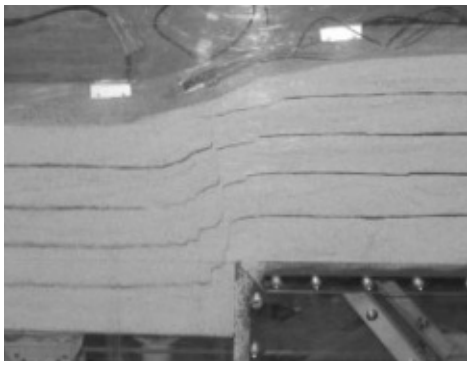


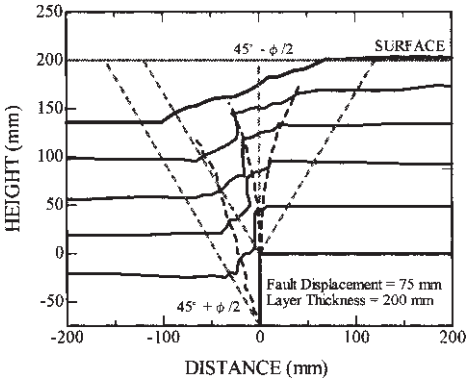
a) Fault displacement＝25mm



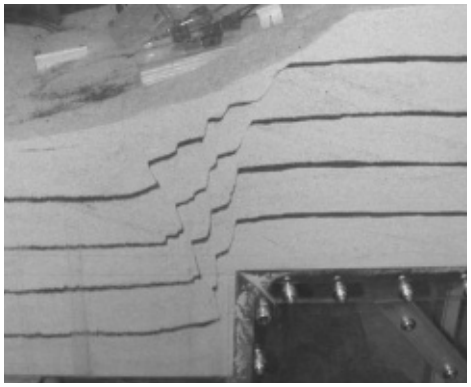


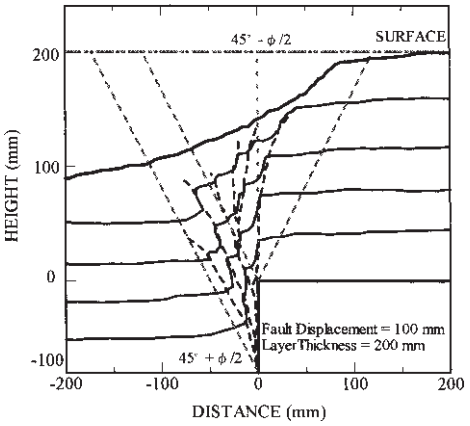
b) Fault displacement＝50mm





c) Fault displacement＝75mm





d) Fault displacement＝100mm

Figure 2 Views of faulting for various fault displacement

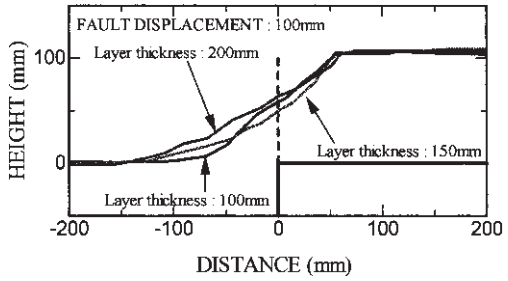


Figure 3: The effect on layer thickness on ground surface profile
(Fault displacement: 100mm)

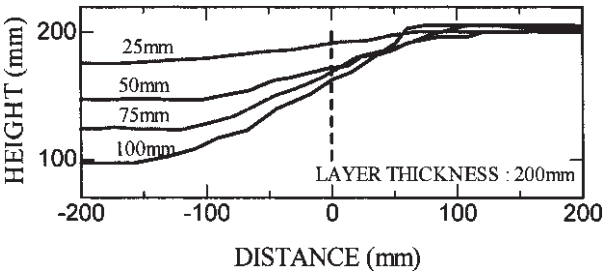


Figure 4 The effect of fault displacement on ground surface profile
(Layer thickness: 200mm)

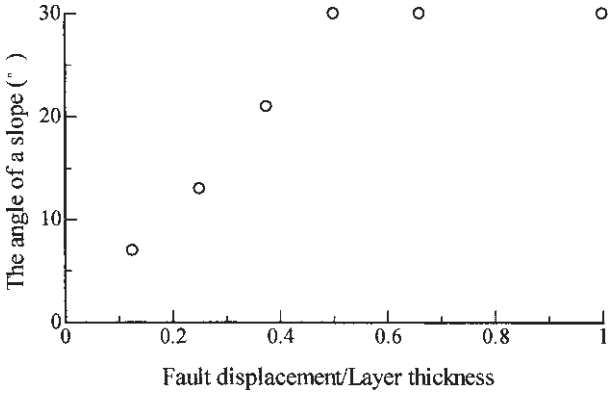


Figure 5 The relation between the angle of slope and the ratioof amount of fault displace ment to layer thickness

り断層変位量の増加に伴って斜面の角度が大きく異なることが確認された．また，断層変位量 25，50，75mm の場合では断層真上の斜面は砂の安息角より小さい，断層変位量 100mm の場合には断層真上の斜面が砂の安息角と一致している．Fig. 2 ～ 4 よりわかるように垂直の断層運動をしても地表面には垂直な断層面が発生していない．これは断層真上で斜面先破壊が起こっているものと考えられ，その後斜面が形成される．また，この破壊による斜面は最大で安息角になるため，断層変位量が大きくなると斜面が滑り出す位置が断層から離れていく．

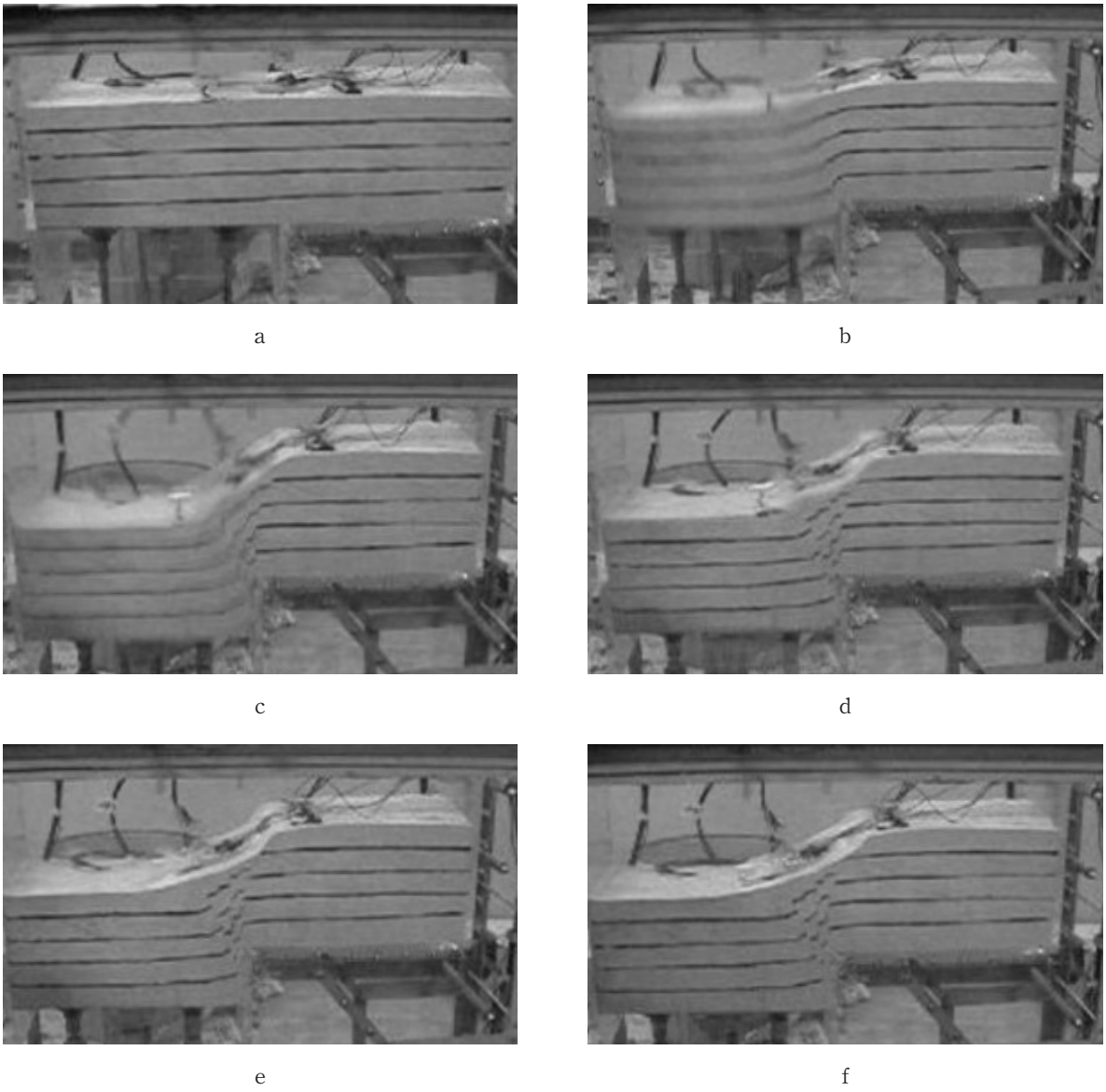
Fig. 5 に断層変位量と層厚の比と傾斜角の関係を示す．Fig. 5 よりわかるように断層変位量と層厚の比がある値より大きくなると断層運動に伴う地表面傾斜面の角度は上部地盤の安息角に等しくなることがわかった．今回実験に用いた砂地盤では断層変位量と層厚の比が 0.5 で安息角に等しくなった．

Photo 3 に断層運動の様子を示す．Photo 3-a では水平だった地表面と水平層が，底盤の落下とともに垂直に運動する．Photo 3-b では運動中の様子が伺える．このときの水平層にはまだ階段状な亀裂が発生していない．Photo 3-c より水平層が階段状への変形が始まり，Photo 3-d and e では，模擬断層の真上から静止している側の地盤に急傾斜な断層崖が形成されていることが確認できる．その後，Photo 3-f では砂の内部摩擦角の影響で滑らかな斜面が形成されているのが分かる．

3. 2　加速度応答

層厚 200mm で断層の変位量は 25，50，75 および 100 mm のときの加速度記録を Fig. 6 に示す．Fig. 6 よりわかるように運動する側の地盤（上盤）における鉛直加速度は，停止している側の地盤（下盤）のものに比べて，大きな値を示している．上盤の鉛直加速度の時間的な変化を見ると 4 つの領域が見受けられる．すなわち，それぞれの領域を立ち上げ，自由落下，運動拘束および運動停止と名づける（Fig. 8）ことにする．最初の立ち上げ後に加速度は有る一定値に達して等加速度運動が発生する．その加速度の値は周面の摩擦抵抗を受けているため重力加速度の値より小さい．落下する部分の運動が拘束され始まると，加速度の値が逆の記号をもって最大に達する．運動の停止と共にその値はゼロになる．一方，停止している部分の加速度は自由落下領域を含めて小さな値を示し，運動拘束領域において遅れて最大になる．しかし，その値は上盤のものに比べて小さい値を示す．最大加速度の値は断層変位量の関数であり，変位量が大きくなりにつれて大きくなる．また，Fig. 7 より断層の震源とみなされる位置における加速度の値より，断層から離れた位置にある上盤の加速度応答の方が大きな値を示している．

次に，断層変位量 100mm・層厚 200mm の場合の加速度応答と地表面変位の実験結果を Fig. 9 に示す．Fig. 9 に



a　b　c　d　e　f

Photo 3　Views during faulting motion

は上盤と下盤の加速度応答のほかに，変位記録を数値微分して求まった加速度応答を示している．断層運動による加速度応答の波形は Fig. 6a に示した断層変位量 100mm・層厚 200mm の場合の応答と同様の応答である．変位記録を数値微分して求めた加速度応答は，実測された加速度応答に非常に類似している．この結果より地震時にその場の地盤の変位を正確に計測できたならばその地点での地表面加速度を求めることが可能であると推測される．また，加速度が求まるならば，地震時のその地点における地盤の速度を求めることも容易である．

Fig. 10 に層厚 200mm における最大加速度と断層運動による仕事の関係を示す．仕事は次式より求める．

$$W = gm\gamma$$

ここで g は重力加速度，m は質量，γ は断層変位量である．m は同じ材料を用いているため，層厚に依存する．

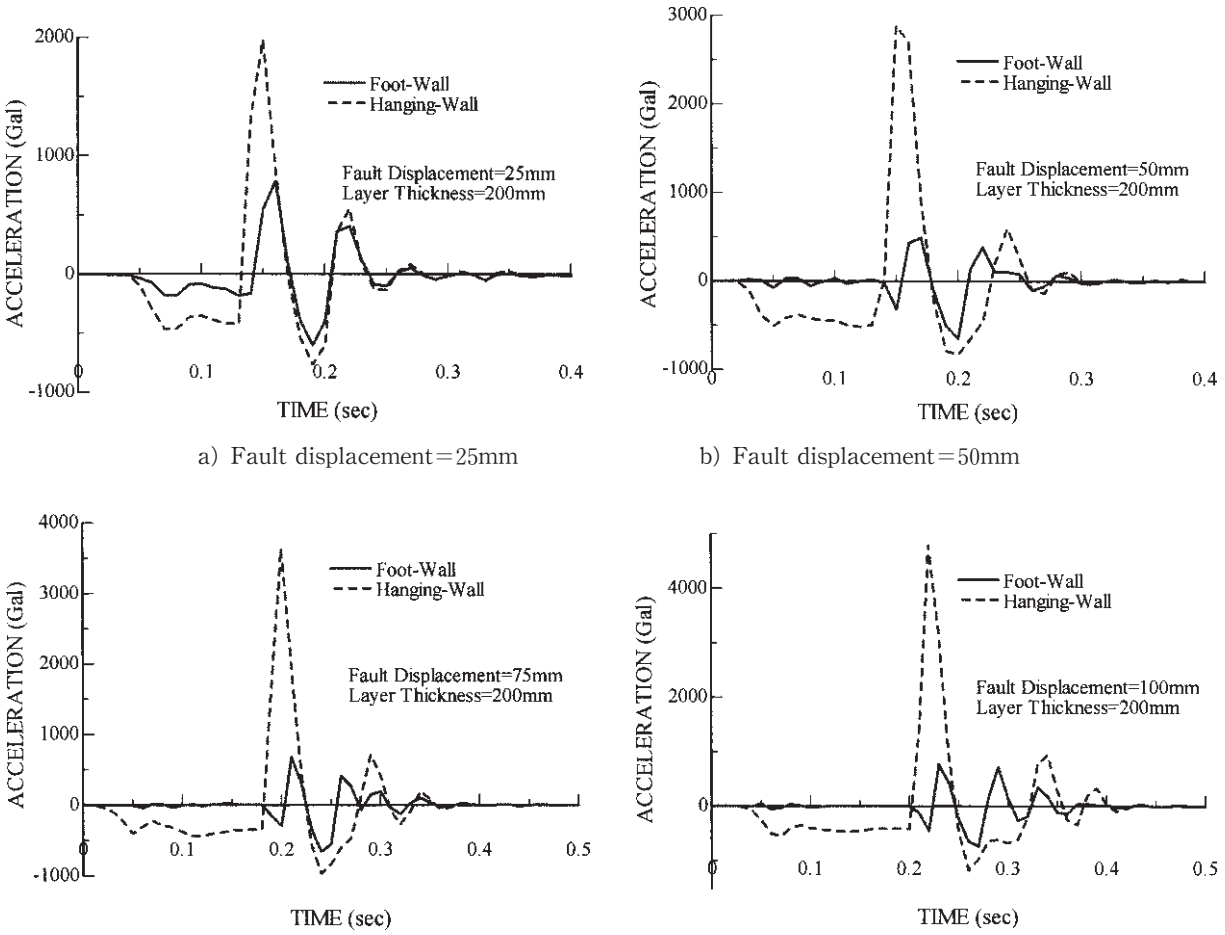
Fig. 10 より断層変位量と加速度応答には相関性があることが見て取れる．同図に示した直線は次式より求めることができる．

$$a = g + 2\pi \frac{D}{T^2} \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right)$$

ここで g は重力加速度，D は断層変位量，T は運動拘束領域時間，t は時間である．したがって，上式より加速度の値は t＝T/2 のとき最大に成り，次式のように与えられる．

$$a = g + 2\pi \frac{D}{T^2}$$

上記の関数を Fig. 10 に示す。その傾向は上盤の実験結果と同様である．上式をそのまま自然界で起きている現象に適応させることは剛性率などの関係で難しいと思われる．しかし，本実験での現象は自然界において起こっている現象に非常に類似している．



a) Fault displacement＝25mm　　b) Fault displacement＝50mm

c) Fault displacement＝75mm　　d) a) Fault displacement＝100mm

Figure 6: Measured acceleration responses

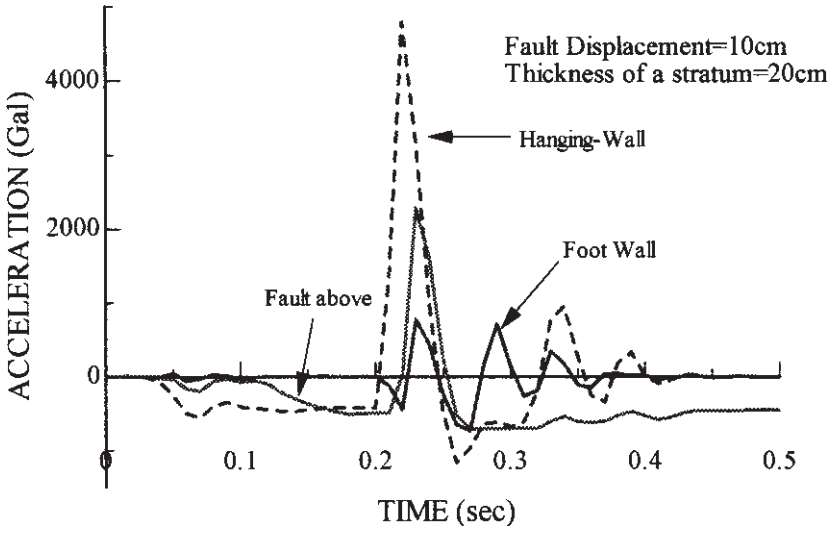


Figure 7: The acceleration responses

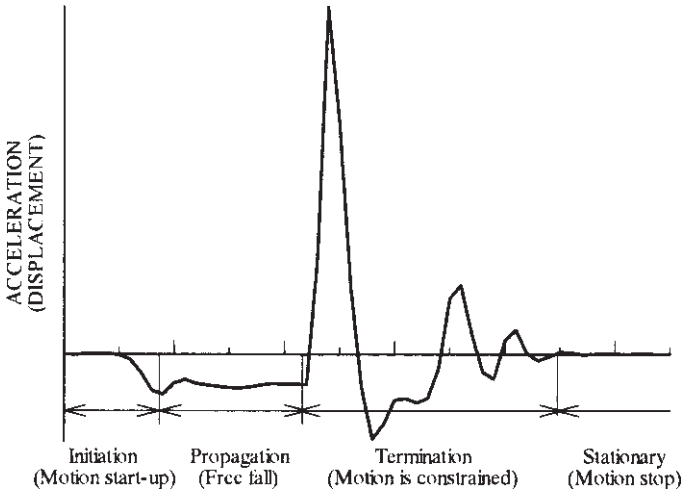


Figure 8: Four types of a time domain

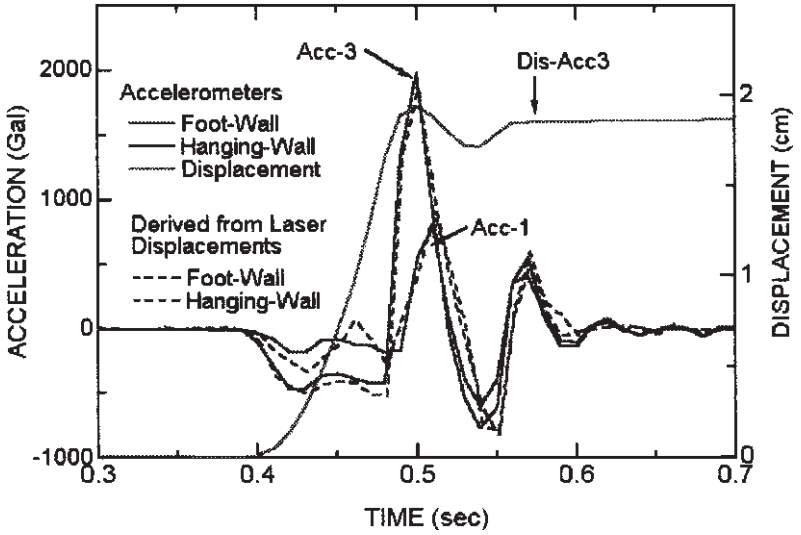


Figure 9: The relation between acceleration responses and fault displacement (Faulting displacement＝100mm, Layer thickness＝200mm)

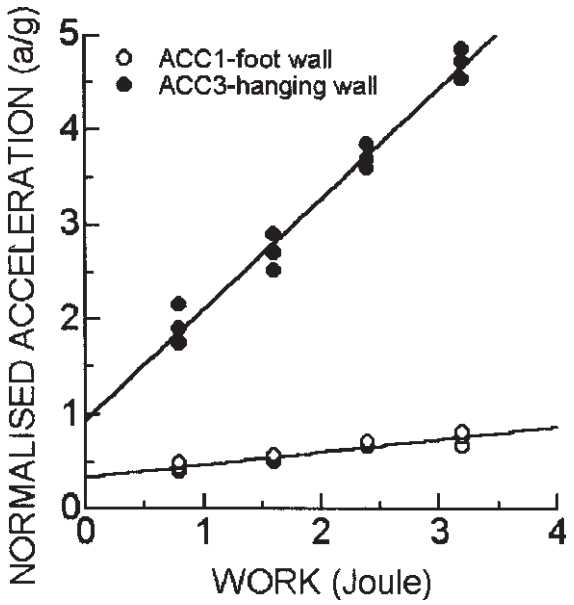


Figure 10: The relation between work done during faulting and maximum ground acceleration

4．結　論

断層亀裂は複数であり，下盤（静止している側）よりも上盤（運動する側）に数多く発生する．また，伝達の幅は断層変位量に依存して変化する．上盤（運動する側）は下盤（地盤が動かない側）の地盤に対して破断・変形した領域が大きい．また，断層亀裂の伝達には正断層亀裂と逆断層亀裂が存在する．断層運動による地表面変形は層厚ではなく断層変位量に依存し，そのときに形成される斜面の滑り出す位置も断層変位量に依存する．断層運動による斜面の角度は最大で地盤材料の内部摩擦角になる．これら実験結果を等速度場で行われた他の実験結果と比べると，動的な場で発生する亀裂の量と地盤の永久変異量は大きくなっていることが明確になっている．

地表面最大加速度の値は断層変位量に依存し，その値は下盤よりも上盤で大きく観測される．断層運動に伴う最大加速度応答は運動が拘束されるときに発生している．これら実験での観察された結果は実際の地震において計測される上盤側および下盤側の最大地盤加速度応答に見られる傾向と一致している．また，地表面の変位を計測することでその地点に加速度計が設置されていなくても加速度を正確に把握することができる．

謝　辞

本研究は文部科学省科学研究費「地表地震断層に対する社会基盤施設の防災向上に関する研究」（No. 13305032 代表者濱田政則 早稲田大学）の補助を受けて行ったものであり，感謝の意を表します．また，実験を行うにあたり，多大な協力をしていただいた東海大学海洋学部海洋土木工学科アイダン研究室の卒業生と大学院生にも，感謝の意を表します．

参考文献

Aydan Ö., 2003: Actual observations and numerical simulations of surface fault ruptures and their effects engineering structures. The Eight U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Liquefaction. Technical Report, MCEER-03-0003, 227-237.

Aydan Ö., Ulusay, R., Hasgür, Z., and Hamada, M. 1999: The behavior of structures built on active fault zones in view of actual examples from the 1999 Kocaeli and Chi-Chi earthquakes. ITU International Conference on Kocaeli Earthquake, Istanbul, 131-142.

Bray, J.D., Seed, R. B., and Seed, H.B., 1992, Analysis of earthquake rupture propagation through cohesive soil. J. Geotech. Eng., ASCE, **120**, 562-580.

Cole, D. A., J. and Lade, P.V., 1984: Influence zones in alluvium over dip-slip faults, J. Geotech. Eng., ASCE, **110**, 599-625.

垣見俊弘，加藤碵一 1994：地質構造の解析－理論と実際－愛智出版 274p.

太田良巳，加納和幸，中村将徳，大洞光央，アイダン・オメル：地震断層の上盤と下盤における加速度応答に関する基礎的研究　日本地震工学会大会2003梗概集，140-141.

Richards, P. & Krantz, R.W., 1991: Experiments on fault reactivation in strike-slip mode. Tectnophysics, **188**, 117-131.

Roth, W.H., Scott, R.E., and Austin, I., 1981: Centrifuge modeling of fault propagation through alluvial soils. Geophys. Res. Ltrs., 8, 561-564.

Scholz, C. H. 1990: The Mechanics of Earthquakes and Faulting. Cambridge University Press, 439p.

上田圭一，谷　和夫 1999：基盤の断層変位に伴う第 4 紀層及び地表の変形状況の検討（その 2）-正断層，逆断層模型実験　電力中央研究所研究報告 No.U98048

Ulusay R., Aydan Ö. and Hamada M. 2002: The behavior of structures built on active fault zones: examples from the Recent Earthquakes of Turkey［Structural Eng./ Earthquake Eng., JSCE, Vol. 19, No. 2］Special Issue, 149-167.

要　旨

地震断層によって地盤の振動や地表面の変形が引き起こされ，それによって構造物などが様々な被害を受ける．1999年の台湾・集集地震，2003年の宮城県北部地震，2004年の新潟県中越地震では断層近傍で上盤と下盤において構造物の被害や加速度応答に大きな違いがあることが報告されている．これまで地震による地盤の振動に関してはよく研究されているが，地表面断層に極めて近い場所における振動および地盤の変形に関する研究はまれである．過去の研究では断層運動をジャッキで地盤を持ち上げることで模擬した等速場における地盤内の変形や地表面の変形に注目した研究が多い．しかし，実際の地震は重力場において発生している．そこで我々は断層運動を重力場において模擬できる実験装置を開発し，断層近傍における地表面加速度応答や地盤の変形を計測した．断層実験では地表面加速度を断層を挟んだ上盤・下盤および断層真上で計測を行なった．実験より得られた加速度応答は集集地震や宮城県北部地震で報告された事例と同様な傾向であった．本論文では断層運動に伴う上盤と下盤に関する加速度応答および地盤の変形について紹介する．