

研究解説

地震断層に対する社会基盤施設の防災性の向上への課題

Remedial Measures for Fault-inflicted Damage to Urban Facilities

小長井 一 男*・堀 宗 朗**・目 黒 公 郎***・古 関 潤 一*・
寒 川 旭****・室 野 剛 隆****・松 島 亘 志*・上 半 文 昭****・
山 口 直 也*・アミール・サダール*

Kazuo KONAGAI, Muneo HORI, Kimiro MEGURO, Junichi KOSEKI, Akira SANGAWA, Yoshitaka MURONO,
Takashi MATSUSHIMA, Fumiaki UEHAN, Naoya YAMAGUCHI and Amir A. SADR

1. はじめに

1999年8月17日のトルココジャエリ地震,そして同年9月21日の台湾集集地震¹⁾と立て続けに発生した巨大地震は,その希有な規模の断層変位と断層上に位置した構造物被害の甚大さという点から,地震工学に携わる研究者に多くの深刻な課題を投げかけるものとなった(図1)。これらの地震は,地震工学の研究者に,地盤の強いゆれで構造物が揺すられるという従来のシナリオにとどまることを許さず,断層進展に伴う著しい地盤変形への適切な対応を検討することを強く迫っている。わが国では陸域だけでも2000を越える活断層の存在が確認されていて,およそ10年に1回の頻度でいずれかが地震断層という形で地上に現れる。しかし地震断層による地盤変状そのものについては,現行の耐震設計でほとんど考慮されていないのである。この背景には,過去の地震断層の発生時刻や発生箇所が幸いし,社会基盤施設に人命に関わる深刻な事態に至らなかった幸運がある。しかし,高速道路,鉄道および電力・水道などの社会基盤施設は,戦後,経済成長のボトルネックにならないようにとの方針でこの狭隘な国土に急激にかつ高密度に整備され(運輸政策審議会答申20号),都市環境の激変があったことを忘れてはならない。

筆頭著者らは2000年11月に土木学会地震工学委員会のもとに研究委員会,また2001年7月には地盤工学会のもとに調査委員会を立ち上げ,地震断層に対する社会基盤施設の防災性向上のための研究を多面的に進めてきた。その目標は以下の3点に絞られた。すなわち(1)被害事例デジタルデータ(台湾,日本,トルコ)のアーカイブス,

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

**東京大学地震研究所

***東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

****東京大学生産技術研究所 高次協調モデリング客員部門



図1 台湾集集地震で断層により破壊した石岡ダム洪水吐:この地点で上下のずれは10mに達している。

(2) 未固結地盤の断層による変形の予測ツールの開発,
(3) ハードウェア・ソフトウェア両面からの対応,である。そしてこれらの目標に向かってそれぞれの新しい成果が得られつつある。平成14年度に至り,この研究は科学技術振興調整費「アジア・太平洋地域に適した地震・津波災害軽減技術の開発とその体系化に関する研究」の一研究課題として組み入れられ,一連の成果が近々国際ワークショップなどを通し,また電子化された情報としてWeb上で公開される見込みである。ここではこれらの活動を概括し,地震断層対応への今後の課題を述べることにする。

2. 従来の成果

地震断層の変位に構造物だけで抵抗することはおよそ不可能に近い。したがって,構造物の破壊は避けられなくも,その破壊形態を制御し,関連する被害の規模を最小限に抑さえる工夫が必要になる。そのためには断層の進展に伴っ

てどのような地盤変形が発生するか入力情報として把握しておくことが重要になる。断層に伴う変位は必ずしもナイフで切ったように一面に局所化しない。特に都市部が広がるような地域では柔らかい河川堆積物が地表を覆っていることが多く、これがある幅を持った帯状の区域に地盤ひずみを分散させ、また雁行状の亀裂（塑性論でいうリーデル線）を発生させることもある（Tani, Ueta, Onizuka²⁾）。

この研究の当初の目的は、構造物の破壊モード制御までを視野に入れたものであったが、その前提となる地盤の大変形と変形の局所化を推定するツールの開発そのものが極めて困難な課題であったことから、まずこれを中心に据え、その手法の検証を過去の被害事例や実験を通して進めてきた。

大変形の評価手法としては、この研究の代表者、および研究分担者が、汎用な応用を目的として開発を進めてきた手法【Lagrangian Particle 有限差分法：LPFDM, 小長井^{3,4,5)}】、確率関数空間と実物理関数空間での関数展開に基づいた、新しい非線形確率有限要素法（堀⁶⁾）、Applied Element Method (AEM, 目黒⁷⁾）、ひずみ勾配理論による変形の局所化解析手法（松島⁸⁾）】が活用できると考え、これらを断層解析手法として発展させる試みが始まった。堀による非線形確率有限要素法では、いわゆる雁行断層（echelon）のパターンを巧妙に表現することに成功し、また目黒らは亀裂の存在を解析前に想定する必要のない AEM によって縦ずれ断層近傍での非線形領域の発達で地震動の強さが抑えられる可能性があることを指摘した。さらに小長井は極端な大変形を記述する上で有利な Euler 座

標系上で、地盤の分野で多用される解析手法である FLAC (Fast Lagrangian Analysis for Continua⁹⁾) を用いた独自の地盤の大変形解析手法 (LPFDM^{3,4,5)}) を開発し (図 2)、間隙水圧の影響を取り込んだ堆積地盤の変形解析を進めている。これらの検討は実際の断層調査、あるいは模型実験で検証されつつあり、平成 14 年度はそのほとんどが水で飽和している地盤を想定した急速せん断実験を実行中である。

しかしこの一連の研究は同時に今後取り組むべき以下の新たな課題を掘り起こすことにもつながった。

3. 浮かび上がった課題

3.1 ゾーニング法と逆断層

例えば、アメリカ・カリフォルニア (図 3) やニュージーランドで施行されている断層周辺の危険域ゾーニング法^{10,11)} は、構造物が断層変位におよそ抗し得ないことを考えれば、被害を軽減するための有効な手段であるが、これらが対象とする断層はいずれも横ずれ運動を主体とするものである。しかしながら、わが国の断層帯の 2/3 は逆断層である。

逆断層は地形上認知できる過去の断層線から離れて、新たに平野部に忽然と現れるものも多く、これらは伏在してその位置が確認できていないものも多いと考えられる。向山¹²⁾ は森本断層 (石川県金沢市) の事例を挙げて、この点についての注意を喚起している。図 4, 5 にこの断層のトレンチ断面の写真 (寒川)、およびその位置を示す。固結した砂泥の互層 (更新統) は明確な滑り線に沿ってナイフで切ったように競りあがっているが、その上を被覆した柔らかい完新統の層には明確な破断面は見られず緩やかな撓曲構造を示している。そして現在の地表面には顕著な断

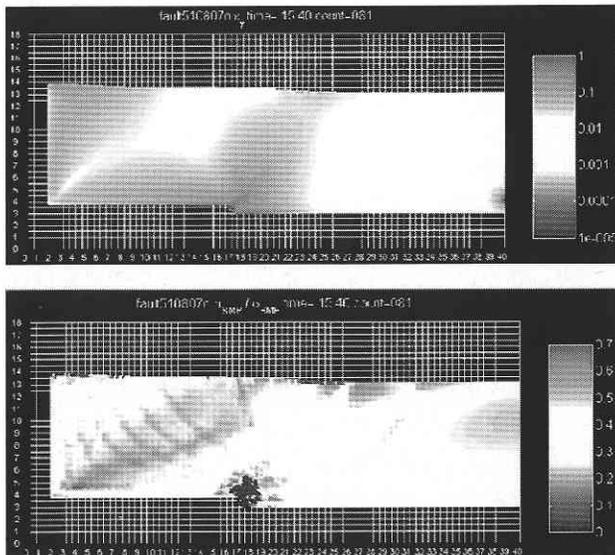


図 2 逆断層による表層未固結地盤の変形シミュレーション (左: 最大せん断ひずみ分布 (絶対値の対数表示), 右: τ_{SMP}/σ_{SMP} 分布): Konagai, Johansson (2002) による LPFDM はその後 Johansson によって大きな改良が加えられた。Hypoplasticity (Kolymbas, D., 1995) が構成則の記述に用いられ大変形の統一的な記述を容易にしている。

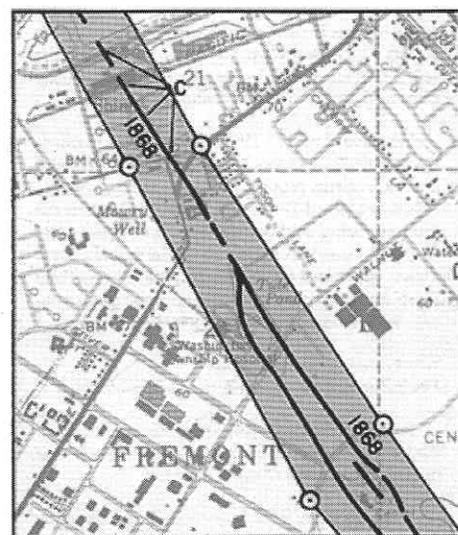


図 3 Alquist Priolo 地震断層ゾーニング法⁹⁾ (アメリカ・カリフォルニア) で整備された地震断層ハザード地図

層変位地形は全く見られないのである。そしてこの隠れた断層破断面は断層崖と平地の境界から 100 m も海側に離れている。さらにこの写真の示す部分は、海側でなく“山側に向かって競りあがっている”ことに注意する必要がある。つまり断層線の海側が山側に比べて隆起しているのである(図 4, 5, 平成 8 年度トレンチ)。これはある土のブロックが地中から平野部に押し出されてきて、その崖の一方が

発見されたものだと考えることができる。とすればもう一方の見えない崖がさらに平野側の地中に隠れている可能性がある。事実最近になって、さらに 400 m も海側で新たな断層が確認されたことが、中田・今泉¹³⁾によって紹介されている。断層が地形的に認知できる形として残るには、断層変位の累積が、河川や降雨による侵食か堆積量を上回らなければならない。1 回の断層変位が小さく、後背斜面があり、また扇状地として洪水の影響を受けやすい場所では、相対的に低いほうに土砂が流入し断層の跡はほぼ完全に隠滅させられてしまうのである。したがって、わが国でゾーニング法を導入するのであれば、より幅広の規制域を考えなければならないであろう。

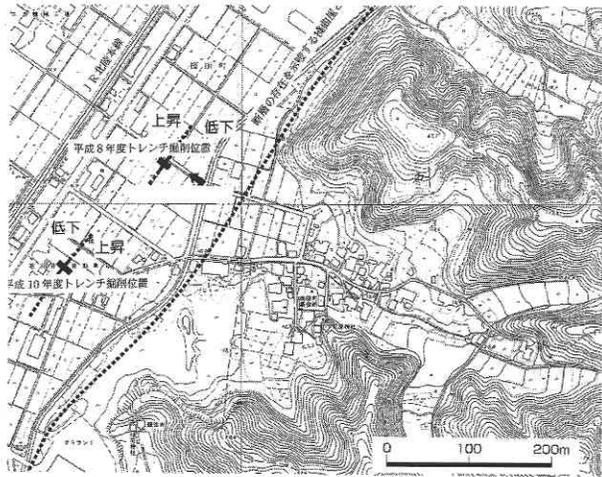


図 4 森本断層トレンチの位置と断層に存在を地形的に示唆する直線(山地の地形工学, 2000 より)

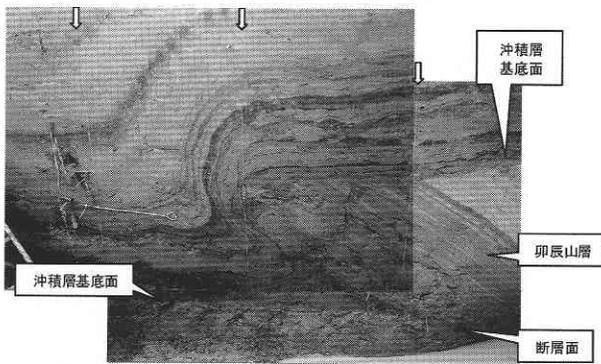


図 5 森本断層のトレンチ断面(撮影:寒川旭, 計測用の縦糸(矢印)の間隔は約 1 m)

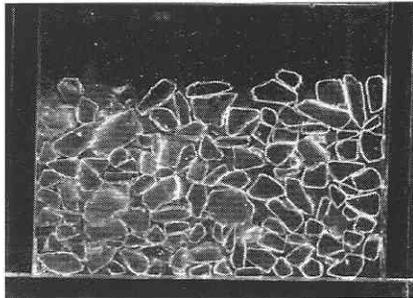
またアメリカ・カリフォルニア州のゾーニング法にある「断層の存在が確認された場合、これから 50 フィート離す」という条項が逆断層の場合にも適切かどうかも疑わしい。事実台湾では円礫を含み水で飽和した堆積地盤がその端部に現れた逆断層によって 30 m の幅にわたり傾いた(食水料溪, 石岡地区, 図 6)。このような逆断層が現れる地盤の多くは、背後の山から流下する河川が運んだ巨礫を含む土砂が堆積したもので、しかも伏流水で飽和している。このような地盤では変形に伴う体積膨張は巨礫の骨格構造に大きく依存し、一方で透水係数はこの骨格の間隙を埋め尽くす細砂やシルトに支配されるであろうから、このような地盤が断層で大きく変形させられる場合には、間隙水圧が劇的に変化し、これが地盤の変形パターンにまで影響を及ぼしかねないであろう。そしてこのことを示唆する解析結果が LPFDM (図 2) などを用いた研究で得られており、これを実験やフィールドでの調査などから早急に検証していく必要がある。

ともかく巨礫を含む土砂のように富配合の地盤材料の大変形特性を記述することが、これから進展する全ての研究の出発点になる。富配合の材料の詳細な変形特性は、中間主ひずみをゼロに制御する特殊な大型平面ひずみ試験で確認することができるであろう(古関¹⁴⁾)。しかしながら、巨礫の骨格構造の変化までは追跡することが困難であるので、LAT/PSC 試験で骨格構造を可視化しながら、その骨

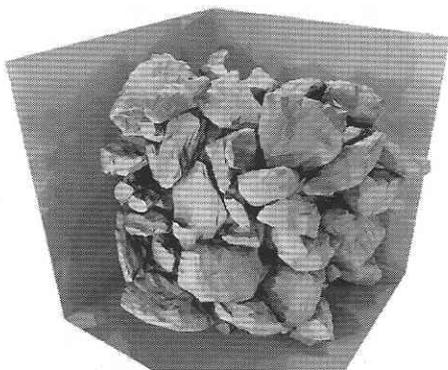


図 6 断層によりせき止められた食水料溪(1999 年台湾集集地震): 差し渡し 20 cm 程度の円礫を含むの堆積層が、競りあがってきた第三紀の泥岩(矢印)に引きずられて傾いている。

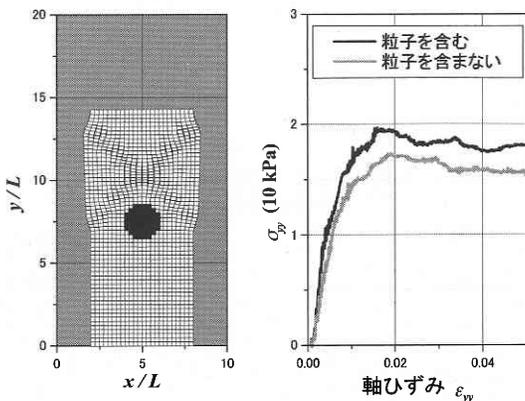
格の変化が集合体としての挙動にどう影響するのかを検討することもできるであろう (松島¹⁵⁾). LAT/PSC 試験装置は小長井による独自の粒状体の骨格可視化手法 (LAT: レーザー援用トモグラフィー¹⁶⁾, 図7(a), (b)) を松島¹⁵⁾ が平面ひずみ試験に応用した独自の試験方法である. そして得られた知見を確認する数値シミュレーションを行うこともできる (図7(c)). 様々な最新のツールがようやく整いつつあり, 今後早急に具体的な研究に踏み込んでいかなければならないのである.



(a) LAT で可視化された粒状体断面



(b) (a)のような写真を何断面も撮影して得られる3次元画像 (画像提供: 松島亘志)



(c) 円礫を中央に含む材料の平面ひずみ圧縮試験のシミュレーション例⁴⁾

図7 富配合材料の変形挙動確認の手段

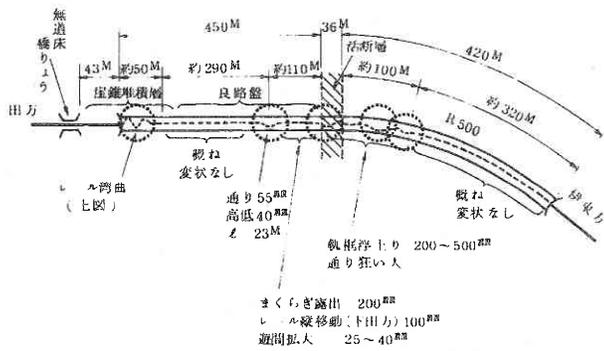
3.2 地中構造物と断層

このように地盤内部の地下構造物の可能な変形パターンが予測できたとしても, 地中の構造物は周辺地盤の動きに追随して動かざるを得ないのであるから, 地震断層への対応を考えること自体, あるいは無謀な試みに見えるかもしれない. しかし例えば1mの横ずれ断層変位を受けた稲取トンネル (鉄道) では, 周辺地盤が温泉余土化していたこともあって, インバートの盤膨れなどはあったものの, トンネル内空は崩壊することなく保たれたのである (1978年伊豆大島近海地震^{17,18)}, 図8(a)). これは, 断層のずれがある限界内に収まるのであれば, 断層面との交差角などを工夫することで, その破壊モードを適切に制御し, ひずみをより広く分散させることも可能であることを示す事例と思われる. しかし先にも述べたように, 日本の断層帯の2/3は逆断層であり, この場合の対応はさらに難しくなる. 逆断層を横切るトンネルは必ず曲げとともに大きな圧縮の力を受けることになるからである. したがって, 継ぎ手を柔構造とし地盤との接触面でのすべりを許すなど新たな対策を講じる必要が生じるのである. 岩手県内陸北部地震 (1998) では発電所の放水路トンネルを横切って数10cmに満たない断層のずれが現れた¹⁹⁾. そしてコンクリート側壁の一部がトンネル内部に倒れこみ, そこから差し渡し30cmを越す円礫混じりの土砂が入り込む被害が生じたが, これも逆断層によるものであった. 橋梁のような地上構造物の安定にも群杭基礎など地中の基礎の挙動が直接的に影響することは言うまでもない. 台湾の石岡地区にあった石岡橋は逆断層が直下を通り, 巨礫を含む河床砂礫中にあった橋脚が並進とともに回転し落橋に至っている²⁰⁾. 埋設基礎構造物がどのように移動, 回転するか, 定量的な評価を可能にするノモグラフを提供できれば, 必要な対策を設計する上でも有益であろう.

このような地盤内部の地下構造物の可能な変形パターンが予測でき, かつその構造損傷を工学的に最小限に抑えたととしても, それだけでは十分でなく, その構造が有するのシステムとしての機能を損なわないようにしなければならないことは言うまでもない. 先に述べた稲取鉄道トンネル内ではせっかくトンネルによって分散されたはずのひずみがレールのバックリングという形で再び局所化して現れた (図8(b)). バックリングはバラストが沈下したり, あるいはレールが相対的に浮き上がるなどして, レールの横方向抵抗が著しく減少した箇所で起こりやすい. そして列車の脱線, 転覆などの惨事につながりかねない深刻な変形モードである. したがって構造物のみならず社会基盤システムとしての機能全体を見据えた対応が必要になるのである.

3.3 断層近傍の地震動

これまでは地震断層変位への対応の関わる課題について見



(a) トンネルの変状¹⁶⁾: 丸印がバックリング箇所



(b) レールのバックリング

図8 稲取鉄道トンネルの被害

てきたが断層近傍の地盤の揺れも併せて検討の俎上に載せておく必要がある。断層変位が地震断層という明瞭な形でかろうじて地上に到達する場合にも状況によっては著しい強い揺れが生じることがある。

2002年6月22日にイランの首都テヘランの西方200kmほどの所にあるChangurehで発生した地震は、モーメントマグニチュードが6.4(東京大学地震研究所)で、この国にかつて起こった巨大地震に比べれば規模の小さな地震であった。しかしながらこの地震では、わずか5~10cmではあるが小規模な地震断層(逆断層)が現れた。土木学会調査団(団長:筆頭著者)が確認した範囲では、この断層は壊滅した村の一つであるAbdarrehからほぼ西南西に向かってまっすぐ丘陵地を横切っている(図9)。そして村の中の道路に沿って立つ電柱の亀裂が調べられた。ほとんど壊滅に近い村の中でコンクリートの電柱が唯一客観的なゆれの強さの指標を与えるものと思われたからである。図10には地震断層の位置(faultと表示)、および電柱の位置(utility polesと表示)が3次的に示されている。亀裂の程度は開口幅でもって4段階に区分されていて、色の濃いものほど亀裂幅が大きい。断層は村の手前から尾根を越えてAbdarrehの村のほうに伸びていて、この断層によって

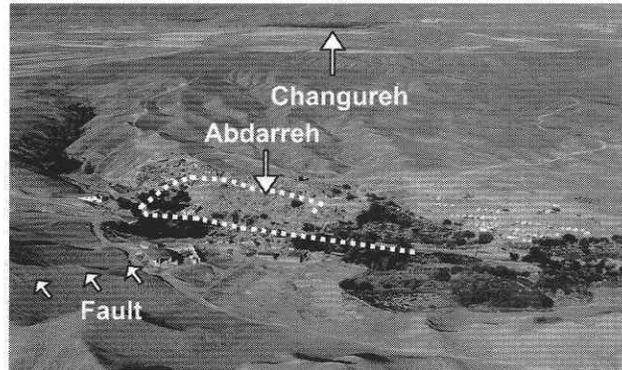


図9 壊滅したAbdarrehの村を横切る断層:村の中の道路(図中破線)沿いの電柱の亀裂が調査された

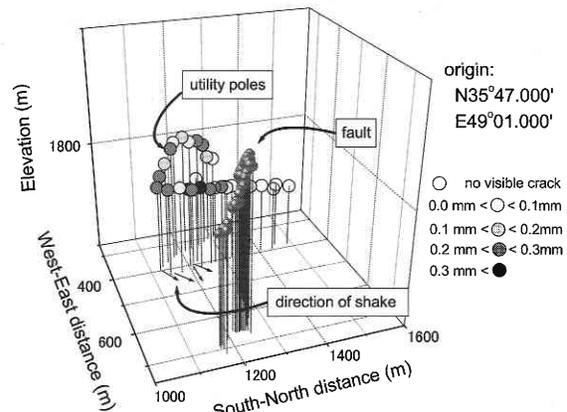
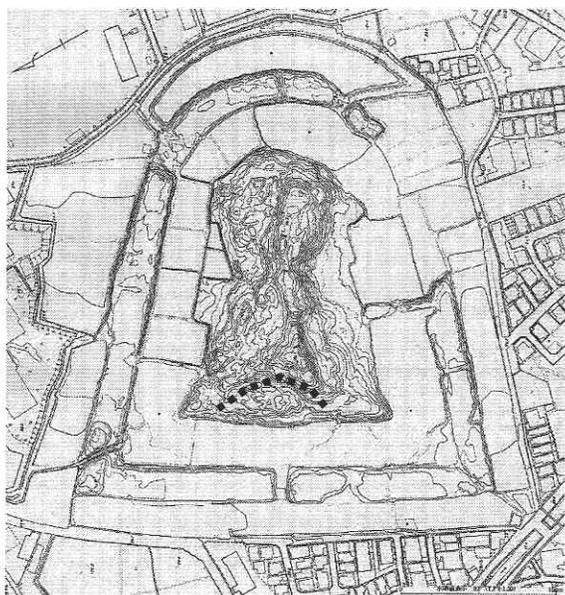


図10 断層と電柱の亀裂

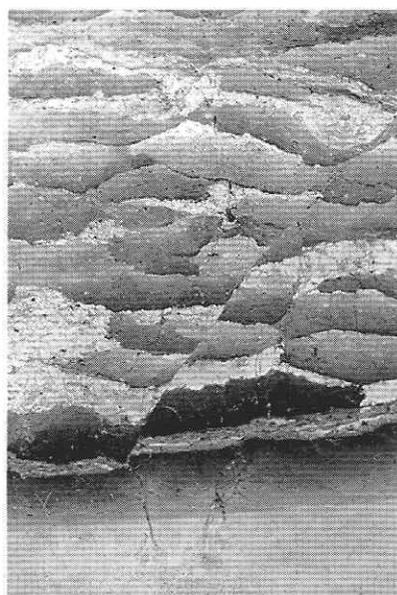
道路は、上盤側と下盤側に区分されている。この図から明らかなように、濃い色をつけられた電柱は、そのほとんどが上盤側に存在し、これは上盤側で強いゆれが生じたことを物語るものと考えられる。

断層は他の地震災害と違い、一旦位置がわかれば、その位置ですべりが繰り返される。したがって、変位ばかりでなく、断層の位置と揺れの分布についても過去の地震で得られたデータをまとめておくことは大切であろう。

過去の地震ということでは、遺跡の地震痕跡を用いて、地震動の様子を推定する手法も用意されていくべきであろう。遺跡で発見された地震の痕跡を用いて、地震の発生時期(時には時刻)、地盤変状、人々の生活への影響などを考えるという寒川によって始められた研究手法は「地震考古学」と呼ばれている²¹⁾。考古学に関わる遺跡探査の技術は極めて先進的かつ様々な広がりを見せている。陶磁器片などの遺物の調査はもとより、¹⁴Cを用いた年代特定手法、電気探査、磁気探査、地中レーダーなどによるジェオトモグラフィー技術、そして古代のトイレの寄生虫卵を用いた調査法さえある。しかしながらこれらは時間の特定と生活、文化の推定という考古学本来の目的に適う手法であ



(a) 古墳の変形状況：図中の破線部が調査された地滑り



(b) せん断された版築のパターン

図 11 今城塚古墳の地すべり (写真, 図面提供: 寒川旭)

っても当時の地震の揺れの強さを推定する技術ではない。

地震断層については、これが直接遺跡の中で見つかる確率は、液状化や斜面崩壊に比べてかなり低い。しかし、例えば古墳で見つかる地すべり痕跡を用いて活断層近くの歴史地震の強さを推定することができるかもしれない。それは、古墳が崇拜の対象であったことから、これらが背面に山地や丘陵の迫るような場所に築造されており、結果として活断層に沿うように分布していることが多いからである。古墳に見られる地すべりのパターンは極めて明瞭に観測できる。それは古墳が、人が抱えられる程度の土の塊を丁寧に層状に突き固めて造り上げられているからである(版築)。したがって古墳の地すべり面に沿ってトレンチを掘削すると本来規則的なはずの版築模様がすべり面に沿って大きく変形している様子が現れ、これを精密に計測することで地すべり土塊内部のひずみの全貌を把握することができる(図 11(a), (b))。併せて古墳の周囲に丁寧に並べられていた埴輪も地すべり変位を計測する上で有用なマーカーである。

悲惨でかつ制約条件の多い地震災害の現場調査と異なり、遺跡では地盤の変形パターンを丁寧に計測でき、また調査用のトレンチから直接サンプルを得ることも容易である。したがって、その変形過程を矛盾なく再現できるシナリオ構築が可能であれば、年間数千ヶ所に及ぶ遺跡の発掘が行われているわが国で、(1) 地震の発生時期と (2) 地震動の強さの地域分布を客観的な指標を持って示し得るであろう。

4. ま と め

1999年の台湾集集地震で、石岡地区に現れた断層の上下方向の食い違いは、石岡ダム地点でおよそ10mにも達し、ダムを破壊し、導水トンネルを上下に食い違わせるなど、構造物を破壊させずにこれに対応することは不可能であるように思われる。しかしながら、地震断層は他の地震災害と違い、一旦位置がわかれば、その位置ですべりが繰り返されることは確実である。また工学的なスケールでの時間の予知は困難であっても、おおよその滑り量が推定できる。現行の耐震設計でほとんど考慮されていない地震断層への対応を早期に図ることは焦眉の急であり、そのために理学、工学、社会対応を横断して研究を加速させる必要がある。

(2002年10月15日受理)

参 考 文 献

- 1) Earthquake Engineering Committee [1999], The 1999 Ji-Ji Earthquake, Taiwan, Japan Society of Civil Engineers.
- 2) Tani, K., Ueta, K. and Onizuka, N. [1996]: Discussion on "Earthquake fault rupture propagation through soil" by J.D.Bray, R.B.Seed, L.S.Cluff and H.B.Seed, *J. of Geotechnical Engineering*, ASCE, 122 (1), 80-82.
- 3) Konagai, K. and Johansson, J. [2001], Two Dimensional Lagrangian Particle Finite Difference Method for Modeling Large Soil Deformations, *Structural Eng./Earthquake Eng.* 18(2), 91s-95s.
- 4) Konagai, K. and Johansson, J. [2001]. "Lagrangian Particles for Modeling Large Soil Deformations." *Proc., Seismic Fault-*

- induced Failures*, Konagai *et al.* eds., IIS, University of Tokyo, 99–106.
- 5) Konagai, K. and Numada, M. [2002]: Pseudo-three dimensional Lagrangian Particle Finite Difference Method for modeling long-traveling soil flows, *Journal of Japan Society of Dam Engineers*, 12(2), 123–128.
 - 6) 中川英則, 堀宗朗 [2002]: スペクトル確率有限要素法を用いた横ずれ断層運動に伴う地表地盤の変状とその確率分布に関する研究, 応用力学論文集, 5, 573–580.
 - 7) Meguro, K. and Hatem Tagel-Din, Applied Element Simulation of RC Structure under Cyclic Loading, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 127(11), 1295–1305, 2001.
 - 8) Matsushima, T., Chambon, R. and Caillerie, D. [2002]: Large Strain Finite Element Analysis of Local Second Gradient Model: Application to Localization, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 54, 499–521.
 - 9) Cundall, P.A. and Board, M. [1988]: A microcomputer program for modeling large-strain plasticity problems, *Numerical Methods in Geotechnics (Proc., 6th Int. Conf., Innsbruck, Austria, April 1988)*, pp. 2101–2108.
 - 10) California Geological Survey [2002]: Alquist Priolo Earthquake Fault Zones, California Department of Conservation, <http://www.consrv.ca.gov/cgs/rghm/ap/index.htm>
 - 11) Wellington Regional Council [2002]: Hazard management, <http://www.wrc.govt.nz/em/hazrep.htm>
 - 12) 向山栄 [2000]: “埋没した断層変位地形,” 山地の地形工学, 日本応用地質学会編, 古今書院, 96–100.
 - 13) 中田高, 今泉俊文 [2002]: 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会.
 - 14) Maqbool, S., Anhdan, L.Q., Sato, T. and Koseki, J. [2002]: Plane strain? compression tests on gravel and sand using large scale true triaxial apparatus, Proc. of 4th International Summer Symposium, International Activities Committee, JSCE, 219–222.
 - 15) Matsushima, T., Ishii, T. and Konagai, K. [2002]: Observation of grain motion in the interior of a PSC test specimen by Laser-Aided Tomography, *Soils & Foundations*, Japanese Geotechnical Society, 42(5), 27–36.
 - 16) Konagai, K., C. Tamura, P. Rangelow and T. Matsushima [1992]: Laser-Aided Tomography: A Tool for Visualization of Changes in the Fabric of Granular Assemblage, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, 9(3), 193 s–201 s, JSCE.
 - 17) 森野亮宏, 三浦重, 鬼頭誠, 吉川恵也, 桜井孝, 吉岡修, 神山立男, 梅原俊夫 [1978]: 伊豆大島近海地震調査報告, 鉄道技術研究報告, No. 1097 (施設編第 489 号).
 - 18) 吉川恵也 [1979]: 鉄道トンネルの震災事例調査, 鉄道技術研究報告, 1123 (施設編第 497 号).
 - 19) Konagai, K., Mikami, A., Katagiri, T., Ahsan, R. and Maruyama, D. [1999]: Report of damage caused by the Mid-North Iwate Earthquake of September 3, 1998, *Bull., Earthquake Resistant Structure Research Center*, IIS, University of Tokyo, 32, 3–13.
 - 20) Kosa, K. and Yamaguchi, E. [2001]: Mechanism of damage to ShiWei Bridge caused by 1999 Chi-Chi Earthquake, *Proc., Seismic Fault-induced Failures*, Konagai *et al.* eds., IIS, University of Tokyo, 155–160.
 - 21) 寒川旭 [1992]: 地震考古学—遺跡が語る地震の歴史—, 中公新書.