

# 工学のサステナブルな展開

—地震工学からみた課題—

Future Problems for Sustainable Development of Engineering

小長井 一 男\*

Kazuo KONAGAI

## 1. はじめに

国際防災の10年(International Decade of Natural Disaster Reduction: IDNDR)の終わらんとする年, 1999年に, トルコ, ギリシャ, 台湾, メキシコそして再びトルコと立て続けに巨大な地震が頻発したことはいかにも皮肉なめぐり合わせであった。そしてこれらの地震は, また皮肉にも, あまりにも多分野に分岐した地震工学の間隙をすり抜けるようにわれわれが埋めきれなかった諸課題をつきつける結果になったように思われる。神戸以来のいくつかの地震被害を振り返りながら, 我々が地震工学, というより巨大化した工学の中でいかにサステナブルな戦略を打ち立てていくべきなのか考えてみたく思う。

## 2. 地盤は決して固くない

1995年1月17日の兵庫県南部地震の被害は, 神戸の地形や表層地質条件と密接に関わっている。六甲山間部では風化花崗岩や大坂層群に分類される斜面の崩壊が, また臨海部では液状化による埋め立て地盤の大変形がこれらの地区での被害を特徴づけている。一方地盤が良好とされる複合扇状地上にいわゆる震災の帯が広がり, この地域でも航空写真の判読結果からかなりの地表面変位が残留していることが示唆されている(田中<sup>1)</sup>)。この地表面での残留変位は, あるいは表層地盤に覆われて見えない断層破壊の地表への投影なのかもしれない。あるいは表層地盤そのものの変形が主たる原因なのかもしれない。もしも表層地盤そのものが大きく変形しているとしたら, その痕跡は地中の構造物の破壊と変形という形で残っているかもしれない。著者らはトンネル, 杭基礎などのクラックパターンやマンホールのリングのずれなどからその手掛かりを探ろうと調査を行っている<sup>2)</sup>。マンホールを例にとれば, それは図1に示すように直径90 cm, 高さ60 cmのコンクリートのリングを接合面にモルタルを塗って鉛直に積み上げただけの

構造である。したがって地盤の変形に容易に追随し, その結果, 地盤の残留変形は接合面のずれとして残される。図2は神戸の地震で転倒した阪神高速道路の深江高架橋付近でのマンホールリングのずれの空間分布で, 図中の白丸の大きさがリングのずれの最大値を, また矢印は地表面の残留変位の大きさと方向を示している。地表面の変位の大きな部分でマンホールのずれが大きい傾向がある。図3a, 3bはマンホールリングのずれの生じた深さとその程度, そして地質柱状図を併記したものである。ずれの生じた深さは地表から2リング目, 120 cmのものが圧倒的に多い。ここには10~30 cmほどの厚さの砂層が挟在しており, この部分が大きく変形したものと推測される。この砂層が常時の地下水面より上に位置していることは, その変形が液状化によるものとは思われないことを示唆しており留意すべきことである。

つまり地盤は構造物に比べて十分固いわけではない。地震時に地盤はそれが支える構造物を激しく揺するが, 同時に揺れる構造物も地盤を揺すり返している。このため支持地盤の動きは上の構造物の揺れや破壊の進み方を反映して時々刻々変化していく。この現象は動的相互作用と呼ばれ, 地盤と構造物の境界面を通してのエネルギーの収支を伴う現象と理解できる。構造物に入ってくるエネルギーと, 逆に構造物から地盤へ逸散していくエネルギーの差が, 構造物の破壊に強く関係するであろうことは自明であろう。図4はこの様子を振動台実験で再現したものである<sup>3)</sup>。振動台の上には反力を検知するプラットフォームが置かれ, その上にブロックが置かれている。振動台が表現するのは半無限の広がりをもつ地盤上のコンクリート基礎であり, その上にブロックが置かれているとの想定である。ここに自由地盤の地震動を入力すると, 結果的に振動台の動きはブロックの影響を受けて変化するように制御される。ブロックが滑った距離は構造物の破壊の程度を象徴的に現すものとすると, 相互作用の影響を考えない従来型の実験と, その影響を取り込んだ実験の差が語ること(図5)の意味は重

\*東京大学生産技術研究所 第1部

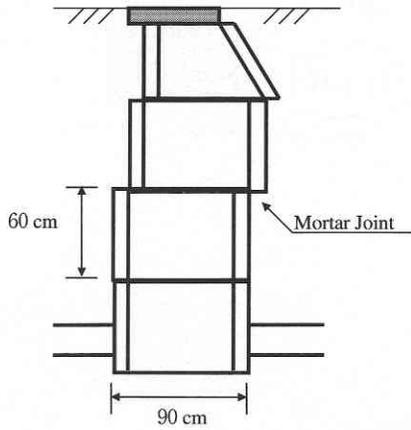


図 1 マンホールの構造

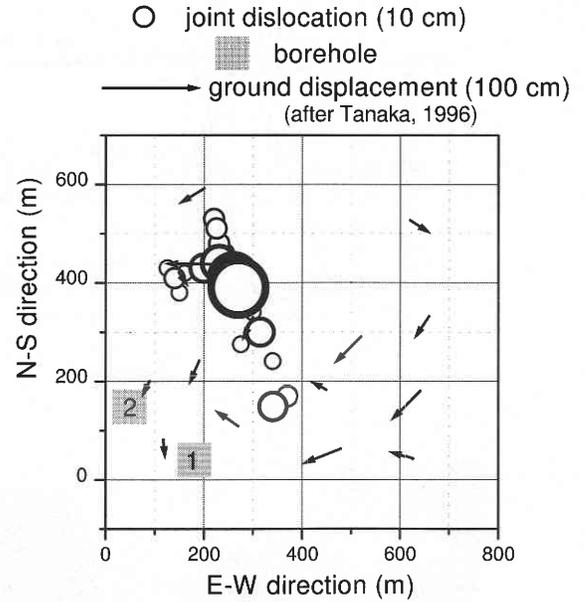


図 2 マンホールリングのずれと地盤表面の残留変位

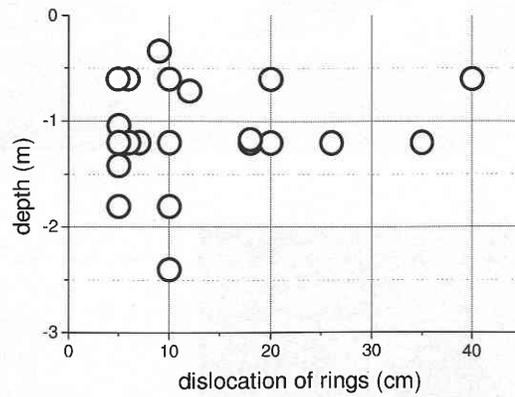
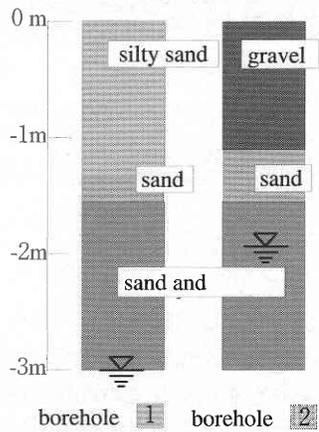


図 3 マンホールリングのずれの深さ方向分布

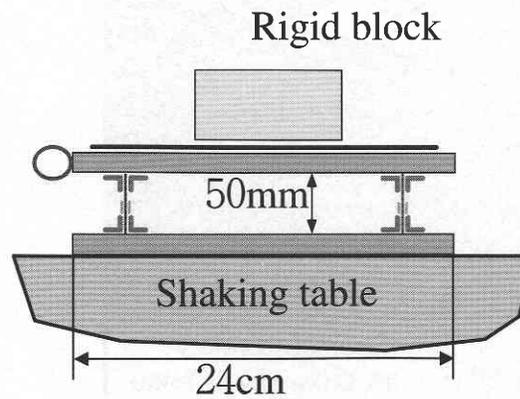
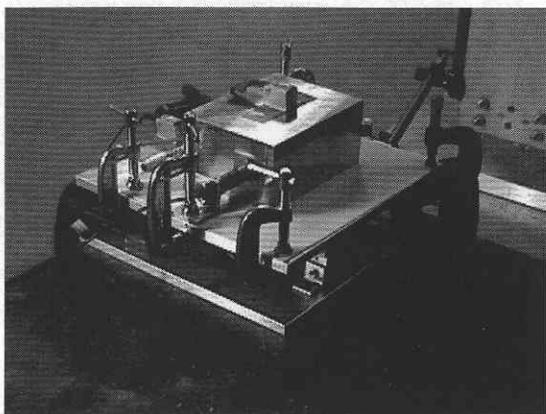


図 4 相互作用実験 (半無限の地盤上の直接基礎に置かれたブロックの想定)

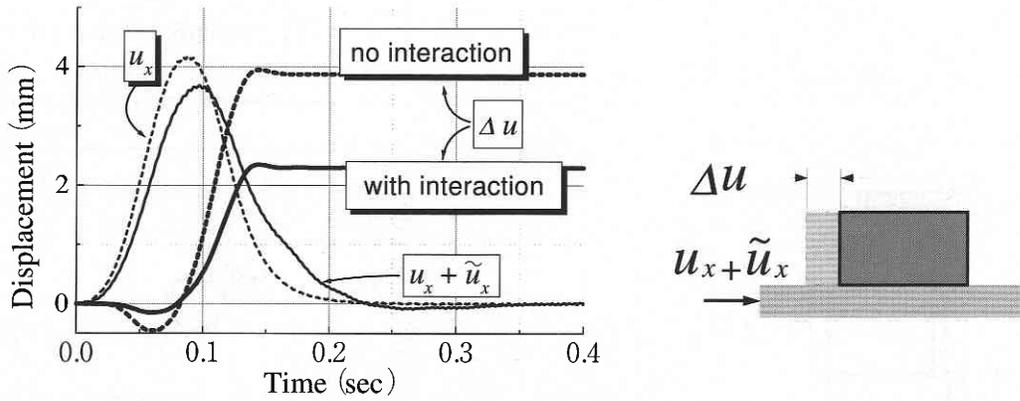


図5 振動台とブロックの変位

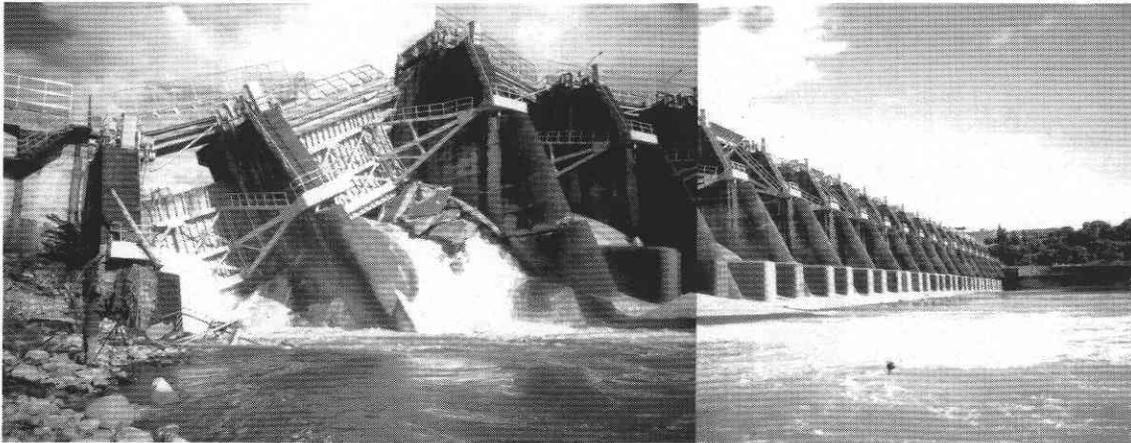


写真1 石岡ダムの被害

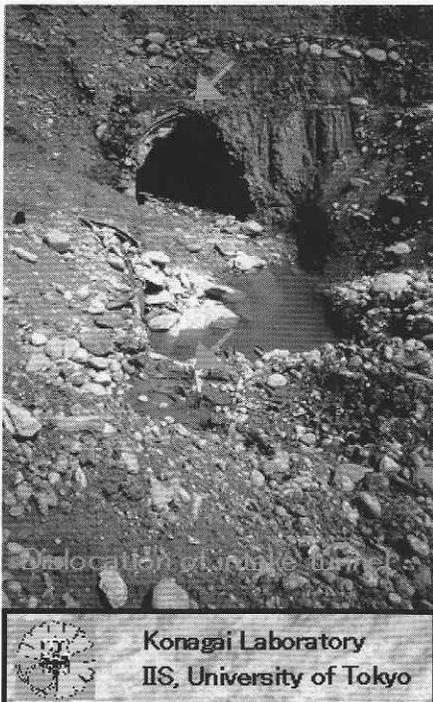


写真2 断層で切断された石岡ダム導水路トンネル

大である。

このような実験結果は、構造物のみならずそれを支える地盤をも併せて、被害を論じていかなければならない必要性とともに、それらをバランスの取れた精度で論じなければならないことの難しさを我々に突きつけている。構造物に比べて地盤は無限の広がりを持ち、またそれが示す非線形性も、上部構造物のそれと大きく異なるのは言うまでもない。構造物、あるいは地盤のそれぞれが破壊していくことを追跡できる個別の精緻なモデルの開発は多くの研究者が手がけていることである。しかし、橋梁が横倒しになる一方で、マンホールリングを数十 cm ずらすほどの地盤の変形が近くで生じるという現象を同じ土俵で精度のバランスを持って論じられなければ、得られる結果そのものの意味が問われることは十分認識しておかなければならないのである。

### 3. 断層による破壊

1999年8月17日のトルココジャエリ地震、そして9月21日の台湾集集地震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。これらの地震は、我々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想定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を想定し適切な対応を検討することを強く迫っている。実際、台湾集集地震の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 10 m にも達し、ダムを破壊し (写真 1)、導水トンネルを上下に食い違わせる (写真 2) 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。カリフォルニア州で地表に現れている断層上での開発を規制する州法を 1972 年に制定し、その後、必要な整備が順次進められている状況は、このような断層による被害の実態を考えれば合理的な対応と思われる。しかし伏在断層を含め多数の活断層が存在し、かつ人口過密な国や地域で、これらの疑わしい箇所をすべて避けて諸施設を建設する対応もまた非現実的である。

このような認識に立てば、単に開発の規制に頼るばかりでなく、構造物の破壊を許容した上でその形態を制御し、関連する被害の規模を最小限に押さえる工夫も必要になる。さらにそのような踏み込んだ対応を社会的に受容する合意の形成も必要になる。そのための第一段階として断層の進展に伴ってどのような変形が発生するか入力情報として把握しておくことは欠かせない。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集中 (localize) 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、また雁行状の断層を発生させることもある。また断層直近の地盤面では単に水平動ばかりでなく上下動、ねじれ、回転を伴う地盤の動きもその上に存在する構造物の応答を考える上で重要である。しかしここに至り地球物理的なアプローチから極めて表層の地盤の土質力学的なアプローチまでを系統だって補間していく作業の困難さに行き当たるのである。それは時間的にかつ空間的に予測のスケールが違うものをすり合わせていく作業に他ならないからである。

#### 4. バランスとサステナビリティ

上述のように地震工学の限られた分野の例を通して、バランスを取った工学的アプローチの難しさが痛感されるのである。地震工学の分野では 4 年に一度、世界会議が開催されてきた。最近の開催は 2000 年 2 月であり、その会議でのディベートのテーマは：

**That earthquake professionals are successfully meeting the challenges of reducing earthquake risk worldwide...**

であった。この諧謔的なしかも痛切なテーマはわれわれが地震工学に関わってきた姿勢そのものに真摯な反省と議論を迫る問いかけであったと思われる。しかし皮肉なことにプロシーディングスに収載された 1800 編 (内 700 編は日本) という論文の数の多さは、結果として特化したテーマへの探求があまりにも多いことを示しているのではないかとさえ思わせる。さらに 2000 名に近い参加者の多くは主に日本、アメリカなどからであり、その国別の偏りからも、また経費の面からも自然災害の深刻な発展途上国の人々には、あるいは研究サロンの敷居の高さを感じさせる面がなきにしもあらずと懸念されるのである。地震工学に限らず、最近、工学の様々な側面で報道が関わるような事故が相次いでいるが、それは単純で本質的な課題を見通しにくくなるほど技術体系が巨大化し、人とシステムの関わりが複雑になっている状況の現れなのかもしれない。サステナブルな貢献をする上で、地震工学者はもう一度巨大で輻輳したシステムの中の、単純で本質的な課題を見つめなおす努力が求められているように感ずる。

(2000 年 2 月 21 日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) Tanaka, K. [1996], "Ground-surface displacement map for the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, National Research Center for Earth Science and Disaster Prevention
- 2) Konagai, K. T. Matsushima and A. Mikami: Deformation build up within a granular assemblage during an intense earthquake, *International Journal of Earthquake Engineering*, 2 (3), 419-441, 1998.
- 3) Konagai, K., O., Uemura, T., Katsukawa and T., Suzuki: Real Time Simulation of Soil-Structure Interaction Effects on Shaking Tables, Proc., 10<sup>th</sup> Japan Earthquake Engineering Symposium, E 1-13, 1647-1652, 1998.