

## 地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウムの概要

地盤と土構造物の地震時の挙動に関する研究委員会 委員長 石原研而

## 1. まえがき

平成元年1月23日(月)に家の光会館において地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウムが開催された。雨の降る寒い日であったが、参加者は約150名で、活発な討論が繰り広げられた。

「地盤と土構造物の地震時の挙動に関する研究委員会」は昭和59年11月から学会内に設けられ約3年間活動を続けてきた。この研究活動の内容は大きく二つに分けられる。一つは地盤、土構造物、構造物基礎の地震被災事例の収集整理である。主に昭和58年日本海中部地震の被害記録に基づいて、できるだけ客観的なデータを整備することに主眼を置いて検討を行った。もう一つは地盤および土構造物の有効応力解析手法の検討である。現在、各機関で研究されている最新の有効応力解析手法を検討し、例題を与えて比較計算を実施した。こうした研究活動に関してシンポジウムを開催する事とし、会員の諸兄から論文を応募したところ、地盤と土構造物の地震時の挙動に関して15編の論文が寄せられた。

シンポジウムでは、まず委員会報告として地盤、土構造物、構造物基礎の地震被災事例の収集結果と、地盤および

土構造物の有効応力解析手法の比較計算結果を示した。次に、一般応募論文を耐震設計、耐震度判定に関するもの、地震被災事例とその考察に関するもの、地震時の挙動の解析に関するものの三つのセッションにわけ、発表と討論を行った。

なお、本研究委員会の構成メンバーは表-1のとおりである。

(文責：上部達生)

## 2. 委員会報告

## 委員会報告-I 地盤、土構造物、構造物基礎の地震被災事例

座長：石原研而

- I-1 概要(上部達生)
- I-2 係船岸(上部達生)
- I-3 河川堤防(栗原徹郎)
- I-4 鉄道盛土(那須 誠)
- I-5 ため池(谷 茂)
- I-6 干拓堤防(柳沢栄司)
- I-7 1964年新潟地震による川岸町アパートの被害と強震記録(時松孝次)

過去の地震被災事例は貴重な資料であり、地震被災事例を詳細に検討する事はより合理的な耐震設計法の確立のために不可欠である。一方、コンピューターの急速な進歩に伴い、地震応答計算手法は複雑な地震時の現象をより忠実に表現できるようになりつつある。こうした地震応答計算手法は模型振動実験結果等により、その妥当性が検証されているが、最終的には実際の地震被災事例についてその妥当性が検証されるべきである。このように、地震応答計算手法の妥当性を検証するためのデータとしても、地震被災事例を詳細に検討しておくことは重要である。こうした観点に立って、地震被災事例を収集し、検討した結果を報告した。

対象とした構造物は上記のとおりである。ほとんどが土構造物であり、液状化が被害の主要な原因と推定された事例が主である。対象構造物が建築物の場合だけが新潟地震における被災事例であり、ほかはすべて昭和58年日本海中部地震の被災事例である。各対象構造物ごとにほぼ以下の順序：(1)対象構造物、(2)対象構造物の構造断面、(3)被災状況、(4)土質資料、(5)入力地震動で被災事例を示した。土質

表-1 地盤と土構造物の地震時の挙動に関する研究委員会構成

	氏名	所属
委員長	石原研而	東京大学工学部
委員兼幹事	上部達生	運輸省港湾技術研究所
委員	井上芳生	住宅・都市整備公団
同	大岡弘	建設省建築研究所
同	大槻明	清水建設 <sup>株</sup>
同	杓沢貞雄	中央開発 <sup>株</sup>
同	後藤洋三	<sup>株</sup> 大林組
同	塩見忠彦	<sup>株</sup> 竹中工務店
同	田中忠次	明治大学農学部
同	谷茂	農林水産省農業工学研究所
同	谷口栄一*	建設省土木研究所
同	栗原徹郎	"
同	時松孝次	東京工業大学工学部
同	那須誠	(財)鉄道総合技術研究所
同	平田和太*	(財)電力中央研究所
同	西好一	"
同	福島徳良	危険物保安協会
同(調査部)	本多隆	前田建設工業 <sup>株</sup>
委員	柳沢栄司	東北大学工学部
同	吉田望	佐藤工業 <sup>株</sup>

(\*印、途中交替)

## 学会活動から

資料としては、対象地点の土質柱状図、土質試験結果、PS 検層結果、動的変形特性、液状化強度等を示した。地震応答解析手法の妥当性を検証するための事例解析の模範例としてこれらが役立つことを願っている。

### 委員会報告Ⅱ 地盤および土構造物の有効応力解析

座長：石原研而

- Ⅱ-1 概要（石原研而・吉田 望・塩見忠彦）
- Ⅱ-2 TARA-3による解析（吉田 望）
- Ⅱ-3 Multi-mechanism モデルによる解析（吉田 望）
- Ⅱ-4 ALISSによる解析（福武毅芳・大槻 明）
- Ⅱ-5 FLIPによる解析（井合 進）
- Ⅱ-6 Pastro-Zienkiwicz モデルによる解析（塩見忠彦）
- Ⅱ-7 NAFSSによる解析（西 好一）
- Ⅱ-8 NONSOLANによる解析（田中忠次）
- Ⅱ-9 解析結果の考察（石原研而）

繰返し載荷時の砂の挙動を表現するモデルの中で、電算プログラムに組み込まれて解析できる態勢が整っている上記の七つのモデルに対し、共通の input を与えてそれぞれの解析結果を比較検討してみることにし、そして、それらと実験値との対比を行う試みを次の3段階に分けて行った。第1は構成則そのものの特性を見るもので、 $K_0=0.5$ 、1.0で非排水という条件のもとで、間隙水圧の上昇と応力-ひずみ関係の変化を求め、それぞれのモデルにつき比較検討を行った。第2は、新潟市川岸町の地盤を対象にしたモデル地盤を考え、これに共通の入力を与えて応答解析を行うものである。各層の加速度、せん断応力、間隙水圧上昇の時刻歴を output として求め、各モデルで得られた結果を比較してみた。第3は、盛土またはアースダムを対象とした二次元の有効応力解析である。これについては、Cambridge 大学で行われた遠心載荷装置による水浸盛土を対象にした実験結果との対比を行ってみた。実験条件が分かっているので、これに合致するように各モデルの定数を決め、与えられた共通の input motion のもとで応答解析を行い、加速度、間隙水圧、せん断応力を output し、別に得られた実験値との比較検討を行ってみた。

七つの解析手法の構成則またはモデルについての検討結果の概要は以下のとおりである。まず、各モデルは意外に共通点が多いことがわかった。ほとんどのモデルで硬化関数として双曲線を用いて応力-ひずみ関係を表現していること、流れ則は多くのモデルで変相角をパラメーターとしたエネルギー則に基づくものを用いていること、降伏関数としては直線を用いるものと放物線の形状を用いるものとに大別されること等である。また、すべてのモデルで塑性変形について非関連則を用いている。また、弾性則としてはすべてのモデルで有効拘束圧の1/2乗に比例する形で弾性定数が変化するという仮定を用いている。しからば、構成則モデルの差異はどこにあるかというと、第1にダイレイタンスの表現式（流れ則と硬化関数の規定の仕方と言ってもよい）の中にある定数の決め方やその物理的な解釈

が挙げられる。第2に挙げられるのは、三次元での構成則の定式化が違うため、それを二次元に適用した場合に現れる差異である。第3番目に、除荷一再載荷を含む繰返し載荷時の挙動を表現するために、単調載荷時の構成則をいかなる考えと方法により拡大適用しているのかによって生ずる差異である。また、全体のモデルを見たとき、各計算モデルで主応力軸の回転を考慮しているものとそうでないものがある。

解析結果の考察の概要は以下のとおりである。第1の要素モデルの挙動解析では主応力軸の回転の影響を考慮している解析手法と、そうでない解析手法で計算結果に差が出た。第2の一次元応答解析結果の比較では、液状化層の厚さと深さが少しずつ異なる点、地表面の最大加速度が80~150 Gal の間の値を示した点以外は各モデルともほぼ同一の傾向が得られた。第3の盛土の遠心載荷装置による実験との比較結果は以下のとおりである。実験の盛土モデルの底面部、のり尻部では間隙水圧の測定値と計算値はよく一致した。沈下量の計算値は0.05 mm 前後のものと、1.8~4.5 mm の範囲のものに大きく二つに分かれたが、後者は実測値とほぼ一致した。この差は前者の解析手法に剛性低下が重力のもとで生み出す変形項が含まれていないためと考えられる。

討論ではまず、一次元解析の入力地震動についての質問があり、次に、各計算手法における減衰についての議論があった。今回の比較計算では減衰が統一されていないこと、各計算手法で与えられている減衰について説明があった。さらに、今回の比較計算について、各計算担当者から次の様な意見が出た。

- ・各計算手法で計算結果にもっと差が出ると思ったが、それほど大きな差はなかった。
- ・間隙水圧の時刻歴の一致度は良いが、加速度波形の一致度は良くない。
- ・モデル内のある要素にとっては、加振後すぐ液状化するような入力レベルであったので、計算例題としては非常に難しいものであった。

ここで取り上げた七つのモデル以外にも、異なったモデルを所持しておられる読者のために、独自の検証が可能なように、特に一次元と二次元の解析につき、数値化した入力加速度データを発表論文集に掲載した。各自で解析を試み、発表論文集に掲載した結果と比較してみられるよう希望して止まない。

（文責：上部達生）

## 3. 発表論文の概要と討論

### セッション1—地盤、土構造物、構造物基礎の耐震設計、耐震度判定に関する研究

座長：後藤洋三

- (1) 宮城県における斜面の地震時危険度判定

土と基礎, 37—6 (377)

- 麓 秀夫・金子史夫・瀬川秀恭・菅井一嘉  
 (2) 三次元すべり面法解析における地震荷重について  
 吉田 順・黒田英高・近藤 司  
 (3) エネルギーに着目した飽和砂地盤の液状化条件式の提案  
 諸戸靖史・田上 裕

本セッションでは3件の論文が発表された。その内容は、斜面の簡易な地震時危険度判定法とその適用例、斜面の三次元すべりを考慮した場合の安全率と震度の関係、ならびに地震波の到達エネルギーに着目した液状化条件式の提案である。

(1)は宮城県下の3602箇所の斜面を対象に既存の調査資料を活用して地震時危険度判定を行った事例を示したものである。判定方法は斜面の高さ、勾配、地盤種別、湧水、過去の崩壊歴等を点数制で評価し、その点数とその地点で予想される震度を組み合わせて危険度を求め、A、B、Cの3ランクで表すものである。震度と危険度の関係付けは1978年宮城県沖地震の際の震度と被害の関係を参考に設定されている。また、震度は過去の被害地震の震央分布をもとに定めた三つの想定地震から距離減衰と表層地盤の増幅を考慮して決定されている。判定結果は宮城県沖地震の被害傾向と比較して検証されており、三つの想定地震については金華山沖南部地震が最も注意を要する地震であると述べられている。この論文については、想定地震の大きさの決定法や直下型地震の考慮について質問があったほか、判定結果の検証は個々の被災の正解率で判断すべきでないかとの意見が出された。

(2)は斜面の円弧すべりについて、震度の大きさと盛土内の震度分布、盛土斜面の物性、およびすべり面の深さをパラメーターとし、二次元すべり面と三次元すべり面を仮定して解析した結果を比較、検討したものである。三次元の解析には、すべり面形状の中央を円筒形、端部を回転楕円体と仮定し、分割法により長軸まわりのすべり安全率を計算する三次元すべり面法が用いられている。その結果、すべり面の三次元性が安全率に及ぼす影響は震度の有無にかかわらず見られ、 $c$ 材料では安全率は大きくなり、 $\phi$ 材料では小さくなること、震度分布の影響はすべり面の大きさや形状により異なること、等が明らかにされている。この論文については、解析に用いられた震度分布の一般性、すべりの運動方向を長軸回りの回転成分のみとしたことの影響、検討の対象としたすべり面の深さと実現象との対応性についてそれぞれ質問があった。

(3)は、対象地点に到達する地震波のエネルギーを初期有効上載圧で割った値と液状化の対象となる砂層の $N$ 値をプロットしたグラフを作り、液状化発生の有無に関する情報を入れて液状化条件式を求める方法を提案したものである。到達エネルギーは、Gutenberg and Richter式に従って求めた発震点の地震エネルギーに震央距離の自乗に反比例する距離減衰則を適用して求めている。得られた条件式

から震央距離とマグニチュードの関係式を求めると、栗林、龍岡の液状化が観測される最大震央距離とマグニチュードに関する経験式と良く似た形となること、液状化と $N$ 値に関する3種のデータベースに対してこの条件式は良くあてはまること、等が示されている。この論文に関連して、マイクロゾーニングの手段としては簡便な式が必要であるが、個々の対象物の液状化を論ずる場合にはより詳細なデータを入力する判定条件式が必要であるとのコメントがあった。

(文責：後藤洋三)

## セッション2—地盤、土構造物、構造物基礎の地震被害事例とその考察

座長：時松孝次

- (4) 千葉県東方沖地震における埋立地の液状化発生特性  
 安田 進・陶野郁雄・森本 巖・山本芳生  
 (5) 1987年千葉県東方沖地震による地盤の液状化について  
 吉田一郎・岩崎恒明・田中 宏・田村 智  
 (6) 1987年千葉県東方沖地震による被害と地震動の関係  
 山本明夫・金子史夫・梅津一晴・神田正一  
 (7) 1978年宮城県沖地震におけるPHC杭の被害原因推定  
 杉村義広  
 (8) 地震時の盛土の変形と地盤条件の関係—傾斜地盤の影響—  
 那須 誠

本セッションでは、各種の地震被害事例に関する上記5件の論文が発表された。そのうち(4)~(6)の3編は1987年千葉県東方沖地震に関する報告であった。各論文の概要は以下のとおりである。

(4)では、1987年12月17日に発生した千葉県東方沖地震後に現地調査を行い液状化発生地点とその特徴を明らかにしている。その結果、(1)東京湾岸の埋立地では、従来液状化しにくいと考えられていた細粒分を多く含んだ砂が液状化した可能性が高いこと、(2)液状化が広範囲に発生した割に被害が小さかったことが示された。室内実験、考察をとおして、埋立砂の堆積年代が若いことおよび液状化層が薄かったことが上記調査結果の原因と考えられると結論している。

(5)では、千葉県東方沖地震による液状化発生箇所の地形、地質、土質の特徴をまとめ、液状化発生地点が震源距離75 kmまでの広範囲(経験式では $M=6.7$ に対して36 km)におよぶこと、および噴砂のなかにシルトに分類される土が含まれていることを指摘している。次に、細粒分を含む液状化試験結果から、粘土分含有率が大きくなると液状化抵抗が大きくなるが、シルト分含有率が多くなっても液状化抵抗はきれいな砂の場合と大差のないことを示し、シルトが液状化した説明を行っている。また、既往の液状化判定法の妥当性を3地点について検討している。

(6)では、1987年千葉県東方沖地震による被害状況を整理するとともに、被害と地震動の強さについての検討を行っている。その結果、地震動は地表の地形および表層地盤の種類、厚さなどに大きく影響を受けたことが推定された。

## 学会活動から

また、大きな加速度を受けたと推定される地域ほど被害が大きいと考察している。さらに、マイクロゾーニングの手法を用いて、広域での地震動を予測した結果、ほぼ観測された加速度およびアンケート調査などから推定した地震動の強さに対応がつくことが示されている。

(7)では、1978年6月の宮城県沖地震で既製コンクリート杭の破壊により傾斜した11階建の鉄骨鉄筋コンクリート造アパートの被害原因を、実態調査、実大杭の曲げせん断実験等の結果を踏まえて考察している。その結果、被害の原因は地震時水平力と同時に構造物のロッキングによる軸力増分が杭に作用した結果、杭頭でせん断ひびわれがおきたためと推論している。

(8)では、過去の地震で被害を受けた盛土を調査して盛土被害発生箇所の地盤状態について報告している。その結果、盛土を始めとする各種構造物の地震時被害は地盤(基礎層)の傾斜した所で多く発生しており、被害を無くすためには地盤環境条件に十分配慮する必要があることを指摘している。

主な討論の概要は以下のとおりである。

(4)~(5)への質問：千葉県東方沖地震では細粒分を多く含む層が液状化した例が多かったと考えてよいか。答：埋立地では確かにそうだった。しかし、内陸部では、細粒分をあまり含まない砂が液状化した例もある。ただし、粒径の粗いものはなかった。

(6)への質問：震度6とした地域の地盤の $G, h \sim \gamma$ 曲線ほかの地盤と異なっているか。また、地盤応答計算結果の最大加速度、波形の周期に特徴的なものがみられるかどうか。答：詳細を質問者に送付する。

(7)への質問：杭の打設時の施工に問題はなかったか。答：明確に地震被害によると断定できるものを論文で紹介した。

(7)への質問：地震外力との関係から被害原因が検討されているかどうか。答：今回は被害パターンだけの記述に限定した。また、長期の作用荷重については少し述べているが詳細は今後の研究課題と考えている。

(8)への質問：傾斜地盤の被害で限界傾斜角のようなものは考えられるかどうか。答：まだ詳しく調査していない。震源と直角方向に地盤が傾斜していると被害が大きい(p. 186 17行の震源に関係なくという記述は誤り)。

(8)への質問：盛土の地盤の地下水位が被害に与える影響は。答：地下水位が高いと被害が大きい傾向がある。

(文責：時松孝次)

### セッション3—地盤、土構造物、構造物基礎の地震時の挙動の解析

座長：柳沢栄司

(9) 液状化による地盤の永久変位の模型実験と解析

安田 進・中島良二・規矩大儀

(10) Densification モデルによる 振動台液状化実験のシミュレ

ーション

森尾 敏・日下部伸・三原正哉

(11) 千葉県東方沖地震の長柄ダムの挙動解析

柏木 順・青木美樹・塚本康二・向後和広

(12) 三次元地盤を伝わる表面波の実用的数値解析手法

年縄 巧・大町達夫

(13) 初期せん断剛性の拘束圧依存性が等価線形地震応答解析結果に及ぼす影響について

薄井治利・風間基樹・稲富隆昌

(14) 地震観測記録に基づく高盛土斜面の動的挙動の検討

近藤 司・吉村 隆・竹脇尚信・清水勝美・

田蔵 隆・柳沢栄司

(15) 非線形動的相互作用を考慮したハイブリッド実験手法の開発

土岐憲三・佐藤忠信・清野純史・Nozar Kishi・

吉川正昭・荒野政信

本セッションでは、地震動観測あるいは模型振動実験による地盤および土構造物の地震時応答とその解析手法に関する7編の論文が発表された。その内容は多岐にわたり、理論解析の手法そのものに関する研究からオンライン振動実験や地震の現場観測に至るまで、種々なアプローチが示された。

(9)は、傾斜した地表面あるいは傾斜した基盤を有する地盤の液状化による永久変位の発生機構について、模型振動実験と静的有限要素解析により考察を行ったものである。模型実験の結果では、地盤の永久変位は地表面の勾配と基盤の勾配の影響を受け、その方向や大きさと両者の相対的な関係で変位の大きさは異なり、地表面の傾斜方向と基盤の傾斜方向が一致した場合には永久変位が著しく大きくなることが示されている。また、有限要素解析により、種々な対策工の効果について比較がなされている。

(10)は、エンドクロニク理論に基づいて Densification Modelを用いて、飽和砂の非排水ねじりせん断試験結果および模型振動実験による地盤の液状化についてシミュレーションを行った結果を述べたものである。従来提案されている、間隙水圧を累積せん断仕事  $W_s$  で表す式のかわりに、新しいパラメーター  $r$  を用いた損傷パラメーター  $\kappa$  を定義することにより、より合理的な解析が行えることを示している。実験結果との対比などから、 $r=4$  程度にとれば概ね良好な計算結果が得られるとの結論を得ている。

(11)は、千葉県東方沖地震に際して長柄ダムで得られた地震動記録の解析と観測結果に基づく二次元有限要素法による応答解析結果を論じたものである。この地震によりこのダムでは、堤頂部で350 galを越える最大加速度が観測されたが、実質的な被害はほとんどなく、堤頂の舗装面に上下流方向のヘアクラックが発生した程度であった。動的物性値を通常用いられている方法で推定して有限要素法による応答解析を行った結果、かなりの精度で応答が近似できることを示している。

(12)は、表面波の波動解析に適した三次元有限要素法を新たに考案し、波動伝播のシミュレーションを行った結果について述べたものである。二次元問題では、剛基盤上のポアソン比0.25の単一表層を伝播するレイリー波の固有関数

がラブ波のそれとほとんど等しいことを利用して、一次・二次モード形から変位関数を仮定して三次元有限要素法に適用している。数値解析結果では、位相速度の分散特性も理論値とよい一致を見ており、この解析手法が有効であることを立証している。

(13)は、地盤の地震応答解析において初期せん断剛性  $G_0$  の拘束圧依存性が解析結果にどのような影響を及ぼすかについて検討したものである。遠心力载荷試験装置を用い、飽和砂地盤についてホワイトノイズ入力による振動実験を行い、その応答特性から地盤の  $G_0$  が有効応力のほぼ 0.25 乗に比例することを確かめた。また、分割数を変えた一次元の地盤モデルについて 2 種類の入力地震波を用いて応答解析を行うことにより、解析結果の精度について論じ、3～5 m の層厚でモデル化するのが最も良いとの結論を得ている。

(14)は、高盛土の宅地地盤および斜面において地震観測と常時微動測定を行い、盛土の振動性状について論じたものである。常時微動と地震観測から得られた高盛土の周期特性は良く対応していること、さらに地震時の加速度増幅率は盛土の横断方向と縦断方向では差があり、縦断方向の方が 3 割ほど大きいこと、したがって、地震の入力方向と地震動の主軸の方向は必ずしも相関がないことなどを報告している。

(15)は、非線形復元力特性を考慮した地盤—基礎構造物連成系のハイブリッドなオンライン加振実験装置の概要の紹介と、これを用いた加振実験結果について述べたものである。基礎は、直接基礎、埋込みを有する直接基礎およびケーソン基礎の 3 種類とし、それぞれについて地下逸散減衰効果と復元力の周波数依存性を取り入れた動的応答解析によるオンライン加振実験を行い、並進と動揺ばね定数を求めて基礎形式の違いによるばね定数の評価方法について考察を行っている。

討論は時間的余裕があまりなかったが、各論文に対して活発な質問や討議がなされた。このうち、主なものは次のようなものである。

(9)について、完全液状化時の土圧係数は基盤の傾きに無関係なのではないかとの質問があった。これに対し、図-11は液状化開始時の値であるが、傾きによる影響は少ないとの回答があった。

(10)について、応力比  $\theta$  は応力制御試験で与えられる  $\theta_{max}$  を用いているが、 $\theta$  の増分形式で用いる方が良いのではないかとの質問があった。これについては、 $\theta$  は応力制御試験の  $\theta_{max}$  を用いるのが基本であり、この方法では当該パルスのピークが過ぎるまで  $\theta_{max}$  が分からないので、近似的に(5)式を用いているとの回答があった。

(11)については、地震後のダム浸透流量の変化やクラックの詳細について質問があり、浸透流量は 1 時間後に増加したが、24 時間後にはほぼ平常に戻った旨、また、クラックはすべて上下流方向であった旨の回答があった。

(13)については、 $V_s$  が深さ方向に一定とした場合は、分割して深さ方向に  $V_s$  を変化した場合よりも、せん断力は小さく液状化しにくいと考えられるが、表-5 の結果では液状化しやすいとなっている理由について質問がなされた。これに対し、液状化の判定では、せん断力から求める等価加速度と、等価  $N$  値が用いられる。この等価  $N$  値は  $V_s$  を深さ方向に一定とした場合と、分割して深さ方向に  $V_s$  を変えた場合とで異なっている。このため、表-5 のような結果を得たとの回答がなされた。

(14)については、地山の観測点 G1、G5 および G7 の記録の最大振幅あるいは周期特性に差はないかとの質問があり、上記 3 地点の記録はほとんど同じであったとの回答がなされた。

(文責：柳沢栄司)