

液状化地盤での応答変位法の活用状況に関するアンケート調査

QUESTIONNAIRE ABOUT PRACTICAL USE OF SEISMIC DEFORMATION METHOD IN LIQUEFIABLE GROUND

田村修次 — * 1 内田明彦 — * 2
石崎定幸 — * 3 大島快仁 — * 4
藤森健史 — * 5

Shuji TAMURA — * 1 Akihiko UCHIDA — * 2
Sadayuki ISHIZAKI — * 3 Kaiji OSHIMA — * 4
Takeshi FUJIMORI — * 5

キーワード：
杭基礎, 耐震設計, 液状化, 応答変位法

Keywords:
Pile foundation, Aseismic design, Liquefaction, Seismic deformation method

In order to investigate the practical use of the seismic deformation method in liquefiable ground, the questionnaire was conducted for structural engineers. The following were concluded. The ground deformation was not considered for the secondary design in the lateral resistance of the pile foundation. There was a difference among structural engineers for the estimation of ground deformation and the reduction of soil reaction spring. A simple design method that is considered of the effect of ground deformation will be needed for aseismic design of the pile foundation.

1. はじめに

軟弱地盤や液状化地盤では、地震時の地盤変位が杭基礎の挙動に大きな影響を及ぼす。そこで、建築基礎構造設計指針 2001¹⁾ (以下、基礎指針と略す) は、そのような地盤条件における杭基礎耐震設計法として、地盤変位の影響を考慮できる応答変位法を推奨している。ただし、具体的な検討手法や杭応力の評価方法の選択は設計者の判断に委ねられている。

地盤と基礎構造物の相互作用小委員会・応答変位法 WG では、設計実務の現状について調査するため、2008 年度に 22 名の実務設計者を対象としたアンケート調査を行い、液状化地盤での応答変位法の活用状況を調べた²⁾。さらに、2009 年度において既報の成果を踏まえ一部の設問を見直すとともに、調査対象を 40 名に増やしたアンケート調査を実施した。

本報告では今回実施したアンケート調査結果について述べるとともに、既報の結果も踏まえて液状化地盤での杭基礎の耐震設計における現状と課題にふれる。

2. アンケート調査の概要と回答者の基本情報

応答変位法は地震時における建物からの慣性力と地盤の変位による杭の応力を共に考慮する検討方法 (図 1 参照) であり、液状化地盤など地盤変位が卓越する場合に有効な手法として基礎指針で紹介されている。

アンケート調査は液状化地盤での応答変位法の活用状況について調べることを目的とし、表 1 の設問を用意した。設問は、2 次設計の実施の有無や液状化の考慮方法などから成り、個別評価物件と確認申請物件の設計方法の違いを比較できる構成とした。地盤条件

は地表面最大加速度 150cm/s^2 および 350cm/s^2 のいずれにおいても液状化の可能性がある地盤とした。

アンケート調査は JSCA (日本建築構造技術者協会) を通じて 40 名の実務設計者に依頼し、2009 年 12 月から 2010 年 1 月の期間で回答を集めた。アンケートは比較的経験年数の多い方に回答をお願いした。

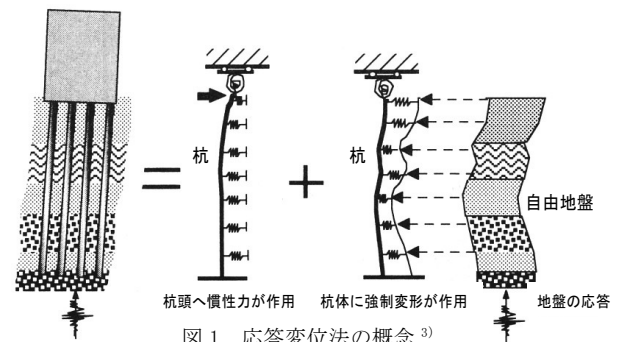


図 1 応答変位法の概念³⁾

表 1 アンケート内容

1. 基本情報について

Q1: あなたが所属している会社名 (差し支えなければ) と設計実務の経験年数 (通算) を教えてください。

(会社名: , 経験年数: 年)

Q2: 液状化の発生を許容して杭を設計した事例数は何件程度ありますか。

(①1 件もない、②5 件未満、③5 件以上)

(①に該当する方は、以下の質問に対しては「自分ならこうする」という想定で回答してください)

¹⁾ 京都大学防災研究所 准教授・博士 (工学)
(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²⁾ ㈱竹中工務店技術研究所 主任研究員・博士 (工学)

³⁾ 大成建設㈱技術センター建築技術研究所 副主任研究員

⁴⁾ ㈱地震工学研究所

⁵⁾ ㈱大林組技術研究所 主任研究員・博士 (工学)

¹⁾ Assoc. Prof., DPRI, Kyoto Univ., Dr. Eng.

²⁾ Chief Researcher, R&D Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.

³⁾ Research Engineer, Technology Center, Taisei Corporation

⁴⁾ Jishin Kogaku Kenkyusho, Inc.

⁵⁾ Senior Research Engineer, Technical Research Institute., Obayashi Corporation, Dr. Eng.

2. 液状化地盤での杭の水平に対する設計方法（個別評価を受ける場合）について

評価物件の設計方法について伺います。建物：地下なし、
地盤：地下水位 2m

- ・150cm/s²で GL-2～5m の FL=0.8～0.9
- ・350cm/s²で GL-2～12m の FL=0.5 程度

このような条件で杭を設計する場合、あなたはどの様に対応しますか。（複数回答可）

Q3：杭の2次設計を行いますか。（はい、いいえ）
（Q4～Q10は「はい」の場合2次設計、「いいえ」の場合1次設計を想定して回答してください）

Q4：杭の設計において液状化の影響を考慮しますか。
（はい、いいえ→Q11へ）

Q5：液状化した地盤変位の影響を考慮しますか。
（はい、いいえ→Q9へ）

Q6：液状化地盤の変位はどうやって求めますか。
（①基礎指針のDcyから求める、②SHAKEで液状化を考慮、③有効応力解析、④その他（ ））

Q7：地盤変位を与える場合の地盤ばねは初期値に対してどのように低減しますか。
（①：Na値よりβで低減、②：相対変位により $y^{-1/2}$ で低減、③：①と②を共に考慮、④低減しない、⑤その他（ ））

Q8：慣性力と地盤変位によるモーメントの足し合わせ方法は？
（①：慣性力と地盤変位を同時に作用させる、②：個別に作用させて単純和、③：個別に作用させて地盤と建物の変形モードを考慮して足し合わせる、④自乗和平方、⑤その他（ ））

Q9：慣性力に対して地盤ばねは液状化による低減をしますか。
（はい、いいえ）

Q10：液状化に伴う側方流動が想定される場合、設計上の配慮はしますか。
（①：特に配慮しない、②杭の仕様に余裕度を持たせる、③その他（ ））

3. 液状化地盤での杭の水平に対する設計方法（確認申請のみの場合）について

確認申請物件の設計方法について伺います。地盤条件は2.と同じとします。

Q11：杭の2次設計を行いますか。（はい、いいえ）
（Q12～Q14は「はい」の場合2次設計、「いいえ」の場合1次設計を想定して回答してください）

Q12：杭の設計において液状化の影響を考慮しますか。
（はい、いいえ→終了）

Q13：どのような手法で杭応力を評価しますか？
（①：Chang式、②：ウィンクラーばねを用いた解析、③：応答変位法、④：その他（ ））

Q14：地盤ばねは初期値に対して低減しますか。
（①：Na値よりβで低減、②：Na値よりβで低減し、かつ相対変位により $y^{-1/2}$ で低減、③：ゼロとする、④低減しない、⑤その他（ ））

Q15：（Q11が「いいえ」の場合のみ）

350cm/s²時の液状化の影響について、設計上の配慮はしますか。

- （①：特に配慮しない、②杭の仕様に余裕度を持たせる、③その他（ ））

4. 最後に

Q16：建築基礎構造設計指針に紹介されている応答変位法について疑問点やご意見がありましたら自由に記述をお願いします。

[]

回答者の所属と実務経験年数（Q1）に対する回答を図2に示す。回答者40名の所属は設計事務所17名、ゼネコン23名である。また、実務経験年数は15年以上が78%とベテランの設計者が中心である。

液状化地盤での杭基礎の設計事例数（Q2）に対する回答を図3に示す。5件未満が55%を占めている。

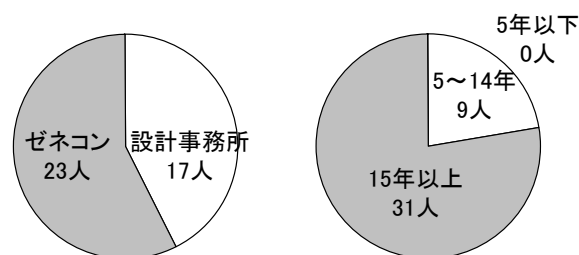


図2 回答者の所属と実務経験年数（Q1）

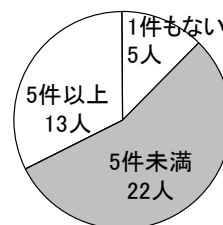


図3 液状化の発生を許容して杭を設計した事例数（Q2）

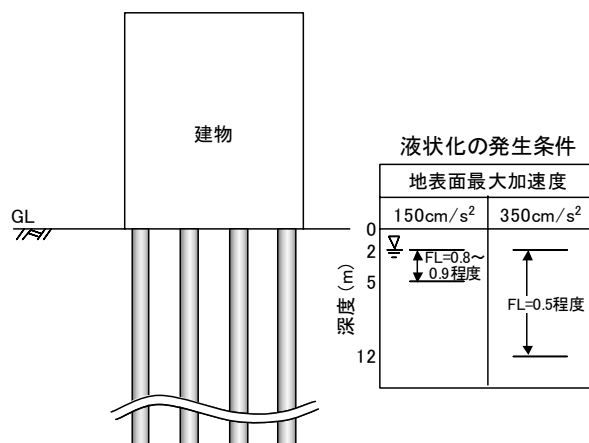


図4 対象建物と液状化の発生条件

3. 個別評定物件での杭基礎の耐震設計

Q3～Q10 は基礎の2次設計が要求される個別評定物件における杭基礎の耐震設計法についての設問である。対象建物と液状化の発生条件を図4に示す。建物は地下なしで、地盤条件として地下水位はGL-2m、地表面最大加速度 150cm/s^2 に対してGL-2～5mの液状化安全率 $FL=0.8\sim0.9$ 、地表面最大加速度 350cm/s^2 に対してGL-2～12mの $FL=0.5$ 程度とし、1次設計および2次設計レベルにおいて液状化の可能性がある地盤を対象とした。

杭の2次設計実施の有無（Q3）に対する回答を図5に示す。液状化の可能性がある地盤において杭基礎の設計として2次設計を行うと回答した方が約93%であり、個別評定物件では杭基礎の2次設計が定着していることがわかる。

液状化の影響考慮の有無（Q4）に対する回答を図6に示す。杭の設計において液状化の影響を考慮するのは40名中39名である。なお、液状化の影響を考慮しないと回答した1名は、個別評定物件では液状化を許容しない方針であると回答している。

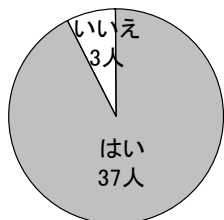


図5 杭の2次設計実施の有無（Q3）

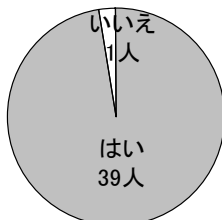


図6 液状化の影響考慮の有無（Q4）

液状化した地盤変位の影響考慮の有無（Q5）に対する回答を図7に示す。液状化の影響を考慮すると回答した39名のうち、液状化した地盤変位の影響を考慮するのは33名であり、多くの設計者が杭の設計に地盤変位の影響を考慮している。

液状化した地盤変位の求め方（Q6）に対する回答を図8に示す。液状化地盤の変位の求め方については「②SHAKE で液状化を考慮」する方が58%を占め、次いで「③有効応力解析」が32%であり、基礎指針に紹介されている「①Dcy から求める」は3名だけである。なお、①～③の複数を選択する方が5名あり、検討条件によって地盤変位の算定方法を使い分けていることがわかる。液状化した地盤の変位については様々な評価方法が提案されているが、その妥当性について十分な検証がなされているとは言えず、適用条件や適用範囲などの提示が必要と考えられる。

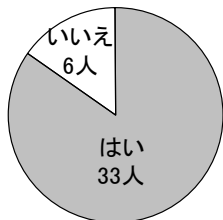


図7 液状化した地盤変位の影響考慮の有無（Q5）

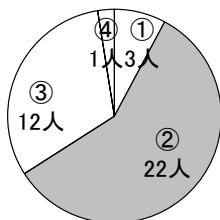


図8 液状化した地盤変位の求め方（Q6）

地盤変位考慮時の地盤ばねの低減方法（Q7）に対する回答を図9に示す。地盤変位を与える場合の地盤ばねの低減は「①Na 値より β

で低減」と「②相対変位により $y^{-1/2}$ で低減」の両方を考慮する「③：①と②を共に考慮」と回答した方が52%を占めているが、①と②のどちらかのみを考慮する方も回答者の42%であり、回答が分かれている。

慣性力と地盤変位による杭の曲げモーメントの重ね合わせ方法（Q8）に対する回答を図10に示す。回答者33名のうち8名が複数の選択肢を挙げている。回答としては「④自乗和平方」が40%と「②個別に作用させて単純和」が33%と多いものの、ケースバイケースで異なる方法を採用していることがわかる。これは、基礎指針では重ね合わせ方法に関して設計者判断に委ねているためと考えられる。

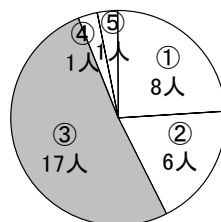


図9 地盤変位考慮時の地盤ばねの低減方法（Q7）

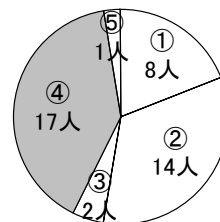


図10 慣性力と地盤変位によるモーメントの重ね合わせ法（Q8）

慣性力検討時の地盤ばね低減の有無（Q9）に対する回答を図11に示す。40名中38名が低減させると回答している。Q7と合わせて考えると、液状化地盤において慣性力と地盤変位の影響を考慮する際に大半の設計者が慣性力と地盤変位のいずれに対しても地盤ばねを低減していることがわかる。

側方流動時の配慮（Q10）に対する回答を図12に示す。64%の方が「②杭の仕様に余裕度を持たせる」と回答しているが、「配慮しきれない」や「対策を講じる」などの回答もある。阪神大震災では側方流動によって杭基礎が損傷し、その支持性能が大きく損なわれ、建物の使用性にも大きな影響を与えた事例が報告⁴⁾されている。敷地周囲の地盤条件や建物条件に応じた設計方針を定めること、設計法の適用範囲を示すことが必要と思われる。

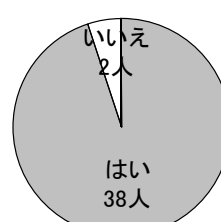


図11 慣性力検討時の地盤ばね低減の有無（Q9）

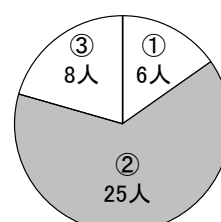


図12 側方流動時の配慮（Q10）

4. 確認申請物件での杭基礎の耐震設計

Q11～Q15 は確認申請物件における杭基礎の耐震設計方法についての設問である。地盤条件は前章の個別評定物件のケースと同じである。杭の2次設計実施の有無（Q11）に対する回答を図13に示す。確認申請物件では杭の2次設計を行わないと回答した方が80%で、地盤条件が同じであっても個別評定物件と確認申請物件では明確に杭基礎の設計レベルが異なることがわかる。

液状化の影響考慮の有無（Q12）に対する回答を、図14に示す。杭の設計において液状化の影響を考慮すると回答した方は40名全

員であり、1 次設計レベルで液状化の可能性のある地盤では、液状化の影響を杭の設計に反映させていることがわかる。

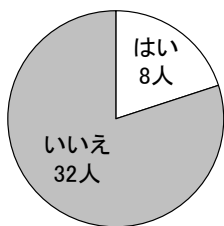


図 13 杭の 2 次設計実施の有無 (Q11)

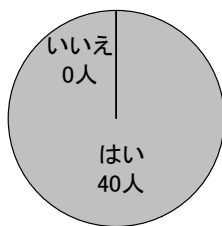


図 14 液状化の影響考慮の有無 (Q12)

杭応力の評価方法 (Q13) に対する回答を図 15 に示す。杭応力の評価方法については、「②ウィングラバねを用いた解析」が 61%、「①Chang 式」が 30%であり、「③応答変位法」を用いる方はわずかに 2 名である。この 2 名も①か②との複数回答として選択しているので、応答変位法を選択する場合もあるというのが現状である。すなわち、確認申請物件では液状化による地盤変位の影響を、杭の設計に考慮するケースは極めて少ないと考えられる。

地盤ばねの低減方法 (Q14) に対する回答を図 16 に示す。「②Na 値より β で低減し、かつ相対変位により $y^{-1/2}$ で低減」が 53%、「①Na 値より β で低減」が 38%を占めており、地盤ばねの低減は行われている。ただし、低減方法は設計者によって異なる。

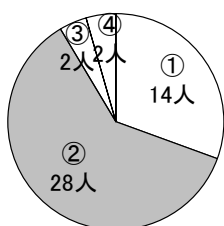


図 15 杭応力の評価方法 (Q13)

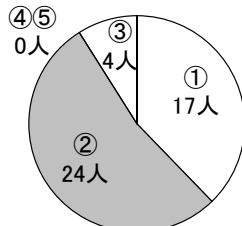


図 16 地盤ばねの低減方法 (Q14)

杭の 2 次設計を行わない場合、350cm/s²時の液状化に対して設計上の配慮はするかという問い (Q15) に対する回答を図 17 に示す。

「②杭の仕様の余裕度を持たせる」が 56%、「①特に配慮しない」が 28%であるが、①を選択した方の 3 名は複数回答であり、「液状化層の度合により考慮する」という意見である。杭の 2 次設計が行われない確認申請物件では、杭の耐震性能のレベルは設計者によって異なることが推察される。

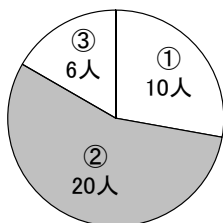


図 17 350cm/s²時の液状化に対する設計上の配慮 (Q15)

Q16 の応答変位法に対する意見・疑問に対する自由記述では、「地盤変位を考慮する地盤条件が明確でない」、「液状化地盤の応答解析精度について検討してほしい」、「外力をレベル 2 相当にすることが 2 次設計なのか」などのコメントが出された。

5. 液状化地盤での杭の耐震設計の課題

アンケート調査から、同じ地盤条件でも個別評価物件と確認申請物件で杭の耐震設計のレベルにかなり大きな差があることがわかった。個別評価物件では杭の設計に液状化した地盤変位の影響が考慮されている。ただし、地盤ばねの低減方法や慣性力と地盤変位による曲げモーメントの重ね合わせ方法は、実務設計者によって異なる。別途行った液状化地盤と杭基礎の遠心載荷実験に対するブラインドテストで、地盤ばねの低減方法や曲げモーメントの重ね合わせ方法が杭応力に及ぼす影響を検討したところ、それらの組み合わせによっては杭応力が過小評価され危険側の設計になることがわかった⁵⁾。実務設計者が適切な方法を選択できるように、適用範囲の明示、設計法の整備が必要と考えられる。

一方、確認申請物件では基本的に杭基礎の 2 次設計が要求されないため、液状化地盤であっても地盤変位を考慮しない簡易な設計方法が採用されていることがわかった。一部の実務設計者は 2 次設計を想定して 1 次設計に余裕度を見込むなどの配慮をしているケースもあるが、このような配慮も設計者の判断に委ねられているため、個人差があると思われる。2 次設計を行わない場合、1 次設計において地盤変位の影響を考慮すべき地盤条件を示すことや地盤変位の影響を考慮できる簡易な設計法の構築などが急務と考えられる。

6. おわりに

実務設計者へのアンケートを通じて液状化地盤での応答変位法の活用状況に関する調査を行った。その結果、個別評価物件では杭の設計に地盤変位の影響が考慮された設計が行われるが、確認申請物件では地盤変位の影響はほとんど考慮されておらず、設計のレベルに差があることがわかった。また、地盤変位の算定法、地盤ばねの低減方法および曲げモーメントの重ね合わせ方法については、設計者によって採用する方法が異なることがわかった。今後は、これらの課題を解決した設計法の構築が必要と考えられる。

謝辞

本報告は地盤と基礎構造物の相互作用 WG (主査：田村修次、京都大学准教授) の応答変位法 SWG の活動として行った結果をまとめたものである。末尾ながら WG メンバーに謝意を表する。また、アンケートにご協力いただいた JSCA の関係者および実務設計者に感謝致します。

<参考文献>

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、2001
- 2) 内田明彦、石崎定幸、大島快仁、田村修次、藤森健史：液状化地盤での応答変位法の活用状況に関するアンケート調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1, pp. 537-538, 2009
- 3) 日本建築学会構造委員会基礎構造運営委員会：杭基礎の耐震性に関する諸問題、建築基礎の設計施工に関する研究資料 6, 2000
- 4) 大岡弘、飯場正紀、阿部秋男、時松孝次：孔中内視カメラと弾性波非破壊試験を併用した建物基礎の震害調査、土と基礎、Vol. 44, No. 3, pp. 28-30, 1996
- 5) 石崎定幸、内田明彦、大島快仁、田村修次、藤森健史：液状化地盤における杭基礎の水平抵抗に関する遠心載荷実験とブラインドテスト その 2 応答変位法による評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I, pp. 533-534, 2009. 8

[2010 年 6 月 17 日原稿受理 2010 年 9 月 1 日採用決定]