

液状化地盤中の橋脚基礎に作用する地盤変形の影響 に関する実験的検討

小野和行¹・田村敬一²・岡村未対³・谷本俊輔⁴

¹正会員 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ 交流研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

²正会員 工博 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ 上席研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

³正会員 工博 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ 主任研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

⁴正会員 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

1. はじめに

現行の道路橋示方書における、液状化地盤中の杭基礎の耐震設計では、液状化程度に応じて土質定数を低減させた上で、上部構造からの慣性力を作用させる¹⁾ことが基本となっている。しかし、液状化地盤では大きな地盤変形が発生し、それに伴う土圧が杭基礎に作用することが想定される。杭基礎はその影響により、前述した設計手法による荷重作用状態とは異なる変形モードとなることが考えられる。しかし、こうした影響を適切に設計に取り込むまでには至っていない。

また、道路橋示方書では、性能規定型の技術基準への移行を念頭に、橋の耐震性能、および耐震性能の照査等に関して、基本的な要求事項を示すに至っている。したがって今後、道路橋示方書で求められる耐震性能を確保した橋梁の適切な設計を行う上で、液状化に伴う地盤変形が杭基礎に及ぼす影響も、解明すべき事項の一つである。

2. 研究の背景と目的

1995年1月の兵庫県南部地震では、液状化地盤における杭基礎の被害として、杭頭部以外の杭中間部・深部での被害が確認されている。また、この被害が、上部構造物の慣性力以外に地盤の液状化に伴う地盤変形によるものであることが種々の研究²⁾で報告されている。しかしながら、この地盤変形の影響に伴う土圧が、杭基礎に作用するメカニズムについては未解明な点が多く残されている。

このような背景を踏まえて、本研究では液状化した地盤と杭基礎の相互作用に着目した模型振動実験を実施した。

液状化地盤中の杭基礎に作用する地震時外力のイメージは、図-1に示すとおりであるが、本研究では液状化した地盤の変形により発生する土圧について検討した。すなわち、液状化した地盤と杭基礎との間に生じる相対運動と杭基礎に作用する土圧の関係を定性的・定量的に評価することを試みた。さらに、その結果に基づき今後の橋脚基礎の耐震設計法への適用に関して考察を行った。

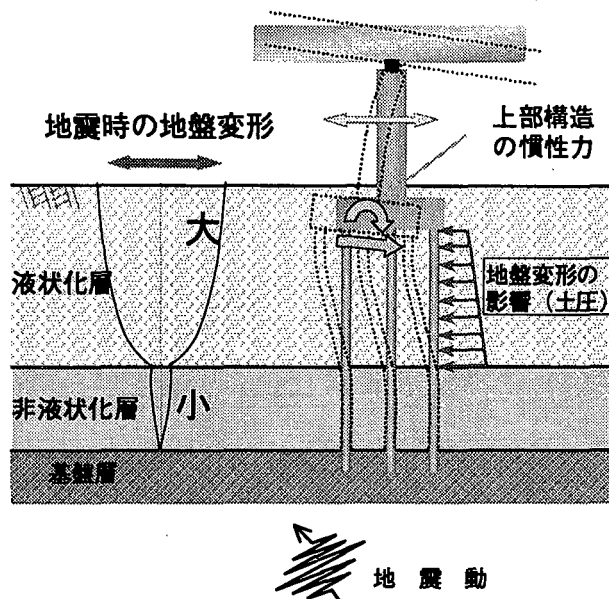


図-1 本研究のイメージ図

3. 実験概要

(1) 実験装置

実験は、独立行政法人土木研究所所有の二次元大型振動台（テーブル寸法 長さ 8m×幅 6m）を用い、一方向加振により行った。

実験では、地盤のせん断変形に対する拘束を低減するために、アルミ製せん断土槽（内寸長さ 1.5m×幅 0.75m

×高さ 1.0m) を用いた。また、図-2 に示すような計測器（加速度計、間隙水圧計、変位計、ロードセル等）を土槽内外に設置した。

(4) データ整理

後述する実験結果で用いた各データは、以下のように整理した。

- ① 相対速度
地盤と杭の相対速度は、地盤加速度から杭加速度を減じ、1回積分し算出した。
- ② 相対変位
地盤と杭の相対変位は、地盤加速度から杭加速度を減じ、2回積分し算出した。
- ③ 土圧
杭模型に設置したロードセル計測値から荷重を求め、荷重作用面積（杭径×パイプ高さ）にて除し算出した。

本論文では、G.L-0.15m、-0.25m、-0.40mの3深度にて計測したデータを中心に議論する。また、本研究では液状化した地盤が、杭基礎に及ぼす土圧に着目しているの、実験結果の整理においては、地盤が完全に液状化した時刻以降のデータのみを用いることとする。

4. 実験結果

(1) 杭加速度—土圧関係

鉄道構造物等設計標準・同解説³⁾では、地震時の変位が大きい地盤に建設される杭基礎の設計には、地盤バネを介して地盤変位を作用させる応答変位法が用いられている。しかし、液状化地盤では、その性状が固体—液体—固体と時々刻々と変化する、そのメカニズムは複雑である。そのため、杭基礎の耐震設計に液状化地盤の変形による影響を考慮しようとする、その影響による土圧が何に依存するのかを十分把握する必要がある。そこで、杭に作用する土圧が、杭加速度、地盤と杭の相対速度および相対変位とどのように関係しているのかを検討する。

まず、図-3にケース S40-1、S70-3、S70-5について、G.L-0.15mまたは-0.25mの位置で計測した杭加速度と土圧時刻歴の一部を示す。(a) S40-1 および(c) S70-5は、入力速度および入力変位が比較的小さいケースで、(b) S70-3は大きなケースである。いずれのケースでも加振後約2秒程度で地盤全体が液状化している。

図-3 において、(a)S40-1 および(c)S70-5 では杭加速度と土圧の波形の位相がよく一致している。一方、(b)S70-3 については、土圧が比較的小さな部分では、杭加速度と土圧との相関が確認できるが、大きな土圧が生じている時刻、すなわち土圧にサイクリックモビリティの影響によるスパイク状の波形が生じた部分では、杭加速度との相関性はほとんどみられない。

そこで、加速度に依存する土圧の成分を動水圧による影響と考え、加速度依存性が明らかとなっている柱状構造物に作用する地震動水圧の評価式との整合を試みた。

模型地盤は次のように作成した。すなわち豊浦砂をせん断土槽に投入し、土槽底面に配置したパイプから水を供給することによってボイリングさせ、所定の相対密度40、70%の飽和地盤を実験ごとに作成した。

(2) 杭模型

杭模型は、地盤変形により発生する土圧を精度よく計測するために、ロードセルを内蔵した杭基礎模型を土槽内に設置し、振動台上に剛結した反力フレームに杭頭を固定、杭先端は土槽底面に固定した。この杭は、上下端を固定された角鋼(□32)と、外径φ76.3mmで、高さ100、200mmの円筒パイプを6段重ねたものから成り、各パイプはロードセルを介して角鋼に固定した。

(3) 実験ケース

加振波形は正弦波とし、相対密度Dr=40、70%の2種類の地盤模型に対して、入力加速度および周波数を変化させ、表-1に示す9ケースの実験を行った。

表-1 実験ケース

ケース	入力 加速度 (gal)	入力 周波数 (Hz)	地盤 相対密度 (%)	入力速度 (cm/s)	入力変位 (cm)
S40-1	100	5.0	40	3.2	0.1
S40-2	100	3.0		5.3	0.3
S40-3	150	2.0		11.9	1.0
S40-4	200	2.0		15.9	1.3
S70-1	100	5.0	70	3.2	0.1
S70-2	100	3.0		5.3	0.3
S70-3	150	2.0		11.9	1.0
S70-4	200	2.0		15.9	1.3
S70-5	300	5.0		6.9	1.2

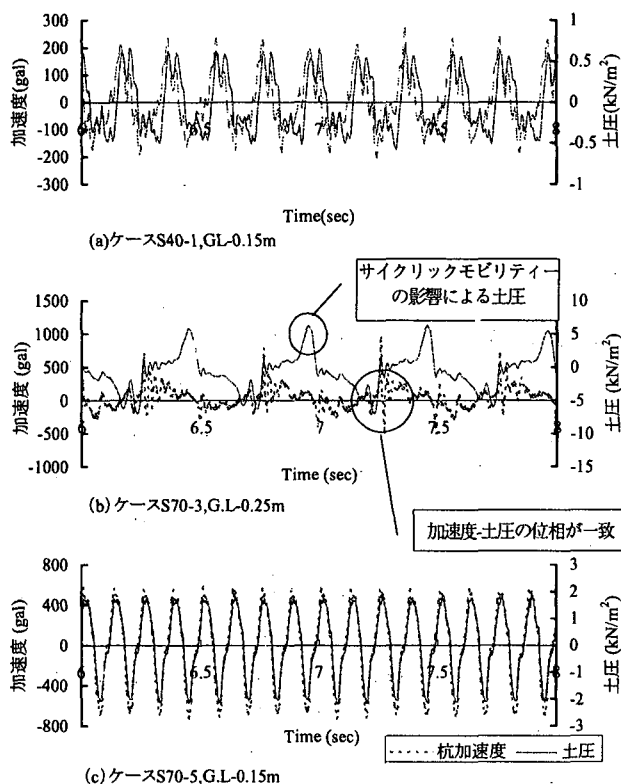


図3 杭加速度—土圧時刻歴

図4(a)は、S70-5の杭加速度—土圧履歴を示したもので、図中には、式(1)に示す桜井^{4,5)}による剛な円柱構造物に作用する地震時動水圧の近似直線も合わせて示している。この図から分かるように式(1)は、杭に作用する土

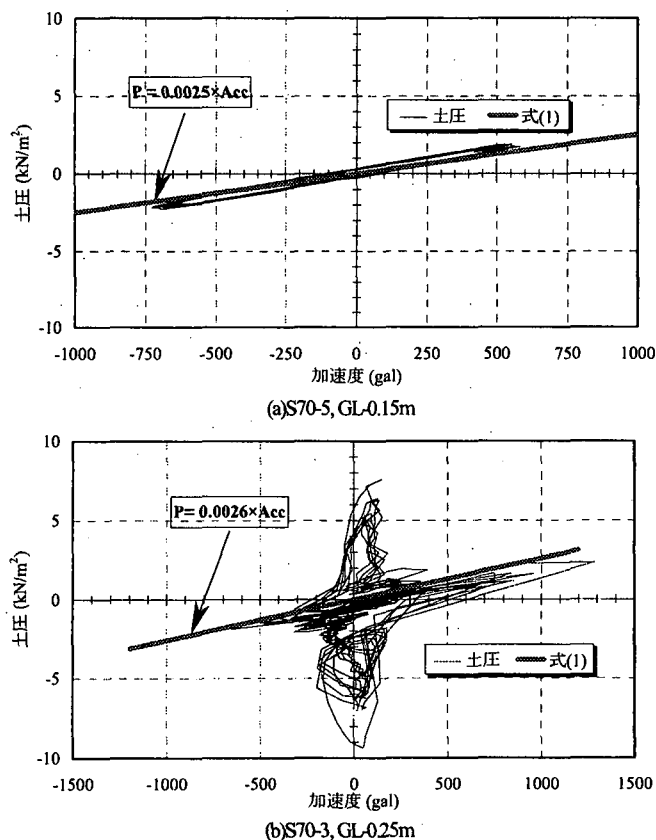


図4 杭加速度—土圧履歴

圧をほぼ近似していることが確認できる。さらに、(b)S70-3でも、土圧が比較的小さい値の部分においては、式(1)が杭に作用する土圧を近似していることが確認できる。

$$P = A \cdot \gamma \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \left(\frac{R}{L} \right) \cdot \left(1 - \frac{L-y}{L} \right)^{\frac{R}{L}} \dots (1)$$

ここに、P：土圧(kN/m²)、A：加速度(m/s²)、 γ ：砂の有効単位体積重量(kN/m³)、R：杭径(m)、L：杭長(m)、y：着目深度(m)である。

以上のことより、杭に作用する土圧には加速度に依存した成分があり、それは円柱構造物に作用する地震時の動水圧の評価式(1)によってほぼ近似できると言える。また、その土圧は比較的小さいものであることが確認できる。

(2) 相対速度・相対変位—土圧関係

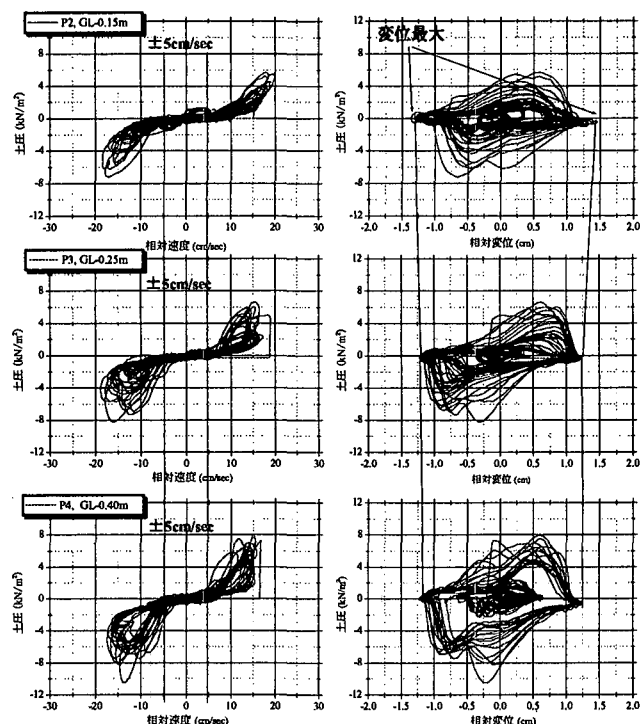
前述したように加速度に依存した土圧は比較的小さく、いずれのケースにも含まれている。そこで、式(1)で近似される加速度に依存した土圧の影響を各データから控除し、速度、変位との関係を検討することとした。

図5に、相対密度ごとの相対速度—土圧曲線および相対変位—土圧曲線を示す。各図は、全実験データを深度ごとに取りまとめたものであり、相対速度および相対変位の小さなものから大きなものが含まれている。

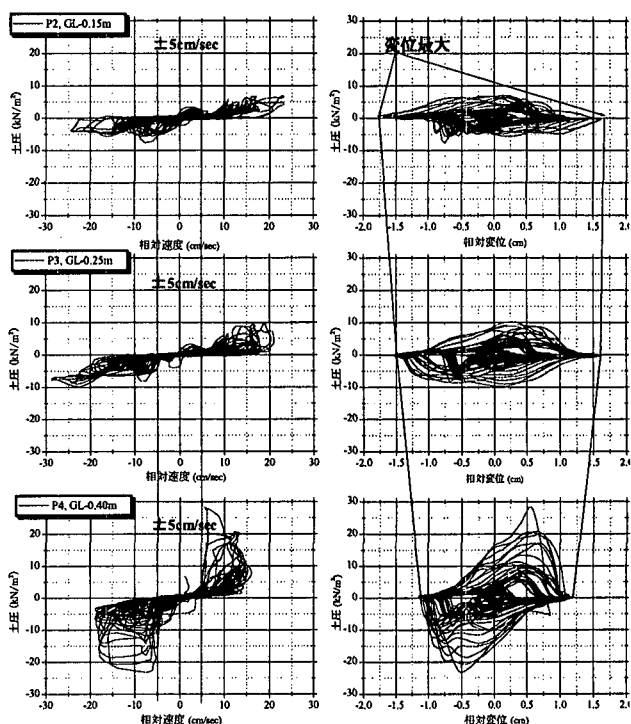
これらの図より、(a)S40-1~4および(b)S70-1~5ともに深度(土被り圧)が大きいほど、杭に作用する土圧は大きいことが確認できる。さらに相対密度によってもその値は異なり、 $Dr=70\%$ の実験ケースで杭に作用する土圧は、 $Dr=40\%$ のケースよりも明らかに大きいことが確認できる。

次に、相対速度と土圧の関係では、相対速度がある値以上になると急激に土圧が増加する傾向が確認できる。この現象は、深度が大きくなるにしたがい顕著となり、(a)および(b)のP4(GL-0.40m)では、相対速度が絶対値で5cm/sec付近を境に急激な土圧の変化が生じる。これは、杭相対速度が5cm/sec以上になるとサイクリックモビリティの影響により地盤の剛性回復が生じ始め、その影響が土圧として杭に作用しているためであると考えられる。このような傾向は全ての深度で確認できた。

一方、相対変位と土圧の関係は、砂の非排水せん断時の応力—ひずみ曲線と類似した形状となっていることが、ほぼ全深度で確認できる。この傾向は、深度および相対密度が大きいほど顕著である。また、相対速度の大きさによる影響が、相対変位と土圧の大きさに顕著な違いを与えている。すなわち、相対速度の大きなケースと小さなケースでは、同じ相対変位であっても土圧の大きさが異なり、相対速度が大きいほど杭に作用する土圧が大きいことが確認できる。図6は、S40のGL-0.40mでの履歴



(a)S40-1~4



(b)S70-1~5

図-5 相対速度—土圧曲線、相対変位—土圧曲線

曲線に着目したもので、上記の事項がこの図より確認できる。他のケースに関しても同様の傾向が確認されているがここでは省略する。

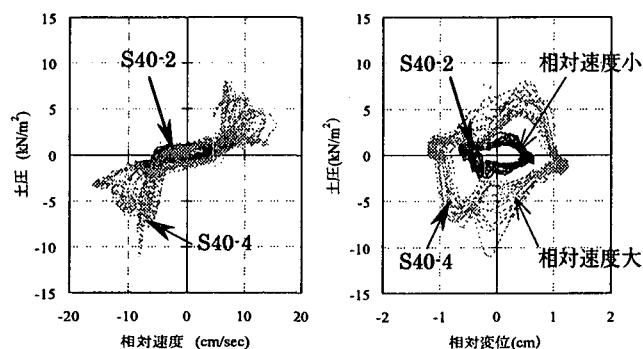


図-6 相対速度—土圧、相対変位—土圧曲線
(P4, GL-0.40m)

また、図-6 から分かるように、相対変位—土圧曲線の形状が、相対速度によって変わることも確認できる。すなわち、相対速度の小さい S40-2 では、相対変位—土圧曲線は比較的滑らかな形状であるが、相対速度が大きい S40-4 では変位の増加に伴い、土圧が急激に増加し突起のような形状を示す。

これらの結果は、高橋⁹⁾による砂地盤の流動速度が杭の水平抵抗に及ぼす影響を検討した実験結果、すなわち、液状化した地盤における剛性回復には、地盤変位の他に地盤速度が大きく依存するということを定性的に示しているものと考えられる。

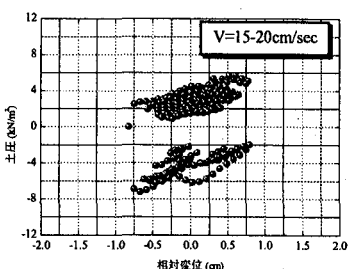
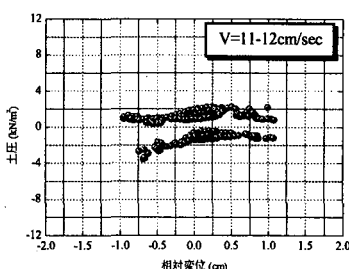
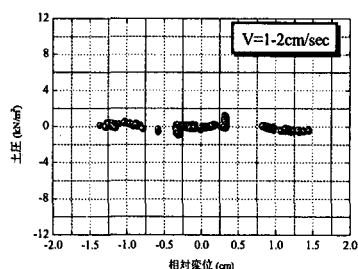
以上、相対速度および相対変位と土圧の関係を示したが、深度による違いすなわち有効上載圧の違い、また相対密度の大小により杭に作用する土圧の大きさが異なることが十分確認できた。一方、相対速度および相対変位との関係は複雑であるが、杭に作用する地盤変形の影響による土圧に対して、両者が相互的に関係していることが確認できた。すなわち、杭に作用する土圧は、相対速度がある値以上となると急激に大きくなり、また相対速度が大きくなる程、土圧発生に必要となる相対変位は小さくなる。

(3) 土圧依存成分

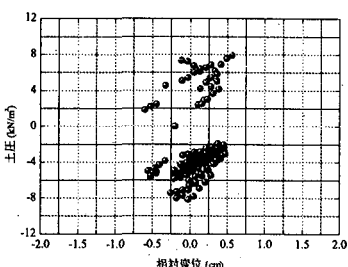
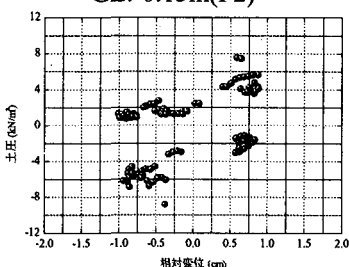
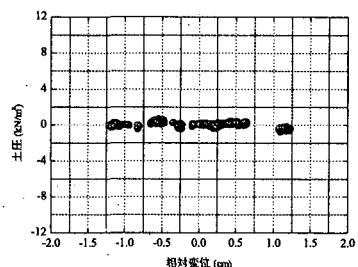
前述したように杭に作用する土圧は、杭加速度、相対速度、相対変位の各々に依存しており、その依存性はある程度ケース分けできることが確認できた。すなわち、杭加速度に依存する土圧は、地震時動水圧の評価式にてほぼ定量的に近似できる。一方、相対速度、相対変位と土圧との関係は複雑であるが、図-5 に示した各図のように、杭に作用する土圧には相対速度と相対変位の両者が相互的な影響を及ぼしている。しかし、図-5 に示す個々の履歴図だけでは、速度と変位の両者とも時々刻々と変化しているので、これらと土圧の関係を定量的に評価することは困難である。

以上のことから、相対速度、相対変位および土圧の 3 者の関係を総合的に評価することを試みた。相対速度が小($V=1\sim 2\text{cm/sec}$)、中($V=10\sim 12\text{cm/sec}$)、または大($15\sim$

S40-1~4

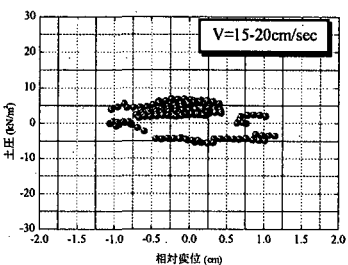
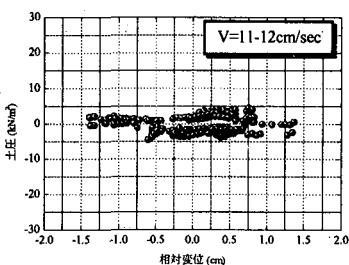
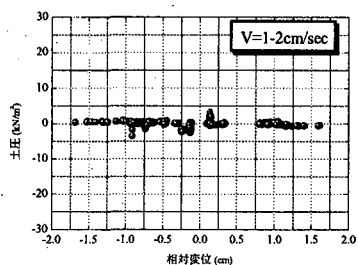


GL.-0.15m(P2)

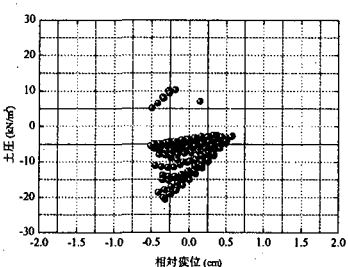
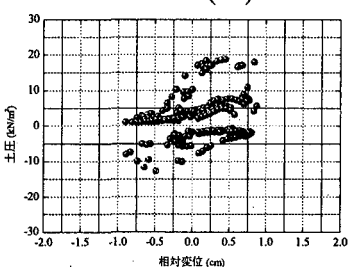
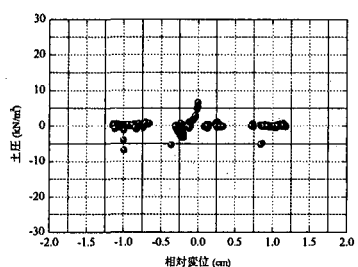


GL.-0.40m(P4)

S70-1~5



GL.-0.15m(P2)



GL.-0.40m(P4)

図-7 相対変位—土圧関係

20cm/sec)の時刻における相対変位と土圧を図-7にプロットした。この図より、相対変位と土圧関係に顕著な違いが確認できる。すなわち、相対速度が小さい場合($V=1\sim 2\text{cm/sec}$)、相対変位は非常に大きい、杭に作用する土圧は僅かである。これは、S40 および S70 の両ケースとも同様で、相対密度による違いはほとんど生じていない。次に、相対速度が中程度の場合($V=10\sim 12\text{cm/sec}$)は、杭に作用する土圧が、S40 および S70 のいずれの深度でも大きくなっている。特に、深度の大きい GL-0.40m では S40 および S70 の両ケースとも比較的大きな土圧が杭に作用していることが確認できる。さらに、相対速度が最も大きい場合($V=15\sim 20\text{cm/sec}$)は、杭に作用する土圧もほぼ最大値を示している。ここで着目すべき点は、相対速度が大きくなるとともに杭に作用する土圧も大きくなるが、

その土圧が発生するまでの相対変位は小さくなっているということである。すなわち、相対速度が比較的大きい場合、僅かな相対変位によっても杭には大きな土圧が作用することとなる。これは相対変位、すなわち地盤ひずみ速度と、地盤の間隙水の排水速度(透水係数)の相対的な大小関係による影響があるものと考えられる。すなわち、相対速度が大きい程、杭周辺の地盤剛性回復が速いのは、間隙水移動速度との関係が非常に強く、地盤が瞬時に非排水状態に近くなるためである。一方、相対速度が小さい場合、地盤剛性回復が遅いのは、逆に地盤が排水状態に近くなり間隙水が絶えず供給されることから、地盤の剛性回復には比較的大きな相対変位が必要となることが考えられる。

以上のことから、杭に作用する土圧は、相対速度およ

び相対変位に強く依存しており、相対速度の大小により土圧発生に必要となる相対変位が異なることが確認できた。

5. まとめ

道路橋示方書における液状化地盤上の杭基礎構造物の設計では、周知のとおり対象となる液状化層について、その液状化程度に応じて、地盤反力係数等の土質定数等を低減するという方法がとられている。

しかし、本研究において、液状化地盤中の杭基礎は、地盤変形による土圧の影響を受けていることが明らかとなった。そして、その土圧は杭加速度に依存する成分、また相対速度および相対変位に依存する成分に区分される。さらに、後者の土圧はサイクリックモビリティの影響を受け比較的大きなものとなる。これは、杭基礎の耐震設計上非常に重要な事項であると考えられる。

以下では、本研究により得られた結果に基づき、今後の液状化地盤中の杭基礎の耐震設計に関する考察を示す。

前述したように、鉄道構造物等設計標準・同解説では、地盤変位を考慮した応答変位法により杭基礎の耐震設計が行われている。本研究では、地盤変形の大きくなる液状化地盤において、地盤反力係数等の低減のみを考慮するのではなく、地盤変形により杭基礎に作用する土圧を考慮する必要があることが確認された。しかし、現時点では、その影響を適切に考慮した設計法の確立までは至っていないが、その設計法の基本的なイメージを以下に示す。

杭基礎に作用する土圧のうち、杭加速度に依存した動水圧的な土圧は、式(1)にて定量的に算出できる。しかし、最も重要となる相対速度および相対変位に依存する土圧は、本報告では定式化まで至っていない。そこで、実験から得られた知見から、図-8に示すような手法により、その影響を考慮できるものと考えられる。すなわち、相対速度レベルに応じた地盤バネ（土圧／相対変位）を杭基礎に作用させる手法である。そのためには、相対速度をパラメータとして、地盤バネを評価するチャートの作成が必要であるが、液状化地盤の地盤変形により杭基礎に作用する土圧の算出は、これにより可能になるものと思われる。

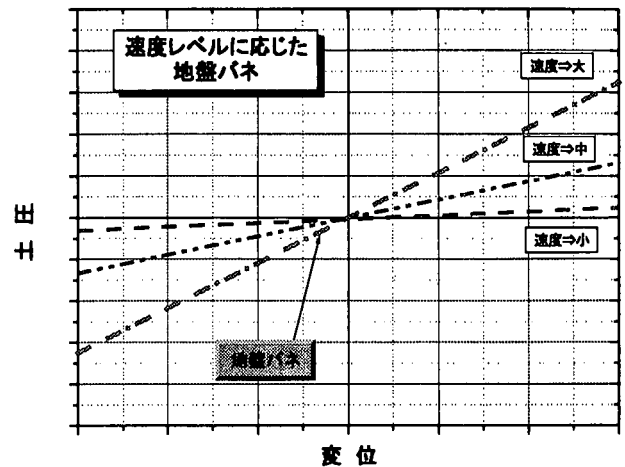


図-8 イメージ図

以上、本実験により得られた知見を基に今後の杭基礎耐震設計法に関する考察を行ったが、ここでは地盤と杭基礎の相互作用のみに着目しており、上部構造との連成までは考慮していない。したがって、実際にこの土圧が杭基礎に対して外力となるか、反力となるかの評価が必要となる。さらに、本研究で対象とした地盤は非常に浅い部分であり、深度の大きい部分での地盤-杭基礎の相互作用も把握する必要がある。したがって今後は、遠心力場での実験により、深度の大きな部分におけるそれらの関係について検討していく予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，平成 14 年 4 月
- 2) 堀越研一、大津宏康：兵庫県南部地震により被害を受けた PC 杭の調査，第 31 回地盤工学研究発表会講演論文集，pp1227-1228，1996 年 7 月
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計編，平成 11 年 10 月
- 4) 桜井章雄：水中に立てられた柱状構造物の振動，土木技術，16 巻，6 号，1961 年。
- 5) 桜井章雄：水中構造物の振動（仮想質量分布，自由振動，強制振動）電力中央研究所技術研究所報告，土木 63006，1963 年
- 6) Takahashi, Akihiro：Soil-Pile interaction in liquefaction-induced lateral spreading of soils, Doctoral Thesis of Tokyo Institute of Technology, pp.35-47, 2002 年 6 月