

短い杭のモデル化に対する基礎的考察

岩上 憲一¹・大塚 久哲²・竹村 太佐³

¹正会員 (株) 構造技術センター福岡支社 (〒812-0011 福岡市博多区博多駅前 3-5-7)
(九州大学大学院工学部建設システム工学専攻博士後期課程)

²フェロー 九州大学大学院工学部建設システム工学専攻教授 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

³学生員 九州大学大学院工学部建設システム工学専攻修士課程 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

現行設計法を用いた荷重漸増方式による杭の設計において、短い杭の水平耐力は、地盤に対し杭の剛性が大きく、かつ鉛直方向の支持力が小さいため、長い杭に比べ小さくなることが指摘されている。しかしながら、既存の実験結果などでは長い杭とさほどかわらないことも指摘されている。そこで、本研究では、短い杭を設計する上でのモデル化について、長い杭との比較により相違点について検討するものである。

検討においては、2次元はり-バネモデルを用い、杭や地盤の損傷過程の違いや杭と地盤の間に設定した要素（バネモデル）の個別の影響度を算定している。この結果より、短い杭でのモデル化における改善に対する若干の提案を行っている。

Key Words: pile foundation, short length pile, seismic design, push over analysis

1. まえがき

筆者らは、杭基礎の巨大地震時の挙動について地盤や杭長をパラメータとする解析を行い、短い杭の領域では慣性力による杭に作用する荷重や抵抗する地盤が同じ場合でも、杭基礎の耐力（ここでは、杭頭水平変位急増点を指す。）に変化が生じることを指摘^{1),2)}した。

一方、現行の設計手法は、2次元はり-バネモデルが多用されており、動的な荷重を静的な荷重に置き換え、一般的な杭の実験や解析で得られた結果をもとに杭と地盤の間に抵抗要素としてのバネが確立されている。現在最も整備が進んでいる道路橋示方書（以下道示と呼称）³⁾や鉄道構造物等設計標準（以下鉄道標準と呼称）⁴⁾においてもこの短い杭の領域については明確にされていない。筆者らの研究に用いているモデルも、文献5)において鉄道標準作成時の実験結果や道示モデルとの整合は図っているものの、短い杭に限定した部分の整合は明確にしておらず、一般杭のモデルを準用しているのが現実である。

そこで、短い杭におけるモデル化は、一般杭（無限長の杭を指す。）と同じ良いのか？という観点から、まず、一般杭と短い杭で杭や地盤の損傷過程が異なるのか？短い杭に最も影響を与える原因は何か？などを探ってみた。そして、これらの結果をもとに、短い杭のモデル化の改善について若干の提案を行っている。

2. 検討条件

対象とする構造物は道路橋の橋脚であり、図-1に示すような場所打ち杭を有する鉄筋コンクリートの張り出し式橋脚である。杭長は、これまでの研究^{1),2)}をもとに、短い杭の挙動を示すと思われるケース B と C の他に、比較のため同地盤における長い杭長を有するケース D 及び一般的な地盤における長い杭長を有するケース A を加えている。（表-1 参照）

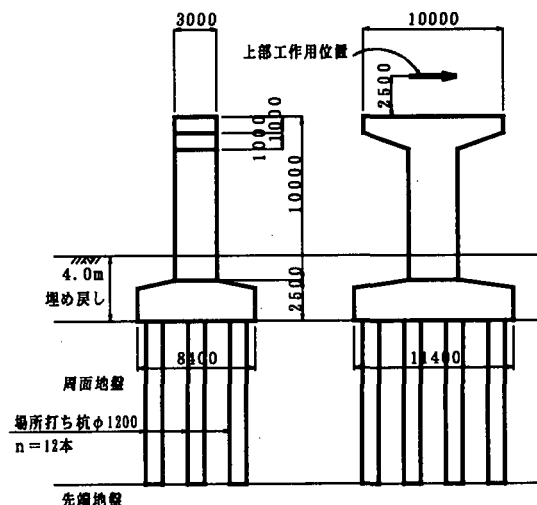


図-1 橋脚形状概略図

表-1 検討ケース諸元

	杭長	L/D	周面地盤	摘 要
ケース A	18m	15	N=15	一般杭
ケース B	12m	10	N=2	短杭 1
ケース C	18m	15	N=2	短杭 2
ケース D	24m	20	N=2	比較杭

注) いずれも先端地盤は N 値 30 以上の砂質地盤である。

解析モデルは図-2 に示すような 2 次元はり-バネ系モデルを用い、荷重の載荷はプッシュオーバー式⁹⁾とし、橋脚柱下端の降伏震度に相当する荷重を最大として杭頭の図心位置に漸増載荷している。なお、モデルの詳細は文献 5) 参照とする。

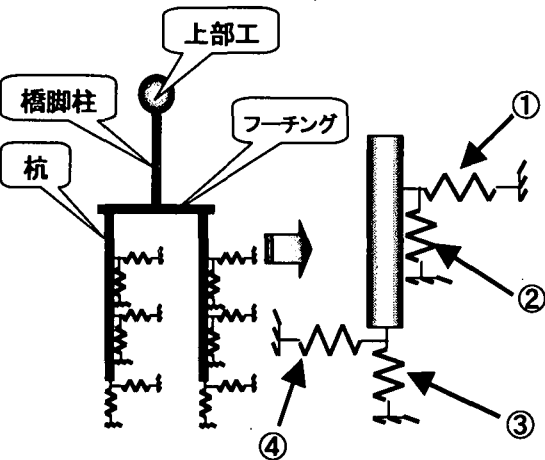


図-2 解析モデル

3. 検討結果

(1) 杭・地盤の損傷過程

図-3, 4 にケース A~D について押し込み側と引き抜き側の換算震度-杭頭水平変位曲線を示しており、同図には各バネの降伏発生位置を示している。これより、ケース A においては杭体が降伏した時に水平変位が急増し、ケース B~D においては水平地盤 (①バネ) と先端地盤 (③バネ) が降伏した時に水平変位が急増することが分かる。また、注目すべき点は、ケース A における変位急増点では杭先端地盤は降伏しておらず水平地盤と杭体の関係となっており、ケース B~D の変位急増点では水平地盤と杭先端地盤の両方が一度に降伏しており水平かつ鉛直地盤と杭の関係となっている点である。

ケース A においては、杭周面の鉛直抵抗が大きいいため鉛直力を負担しているとともに杭が長いため杭体が曲げ変形を起こしやすく曲げモーメントや水平力を杭体の変形で受け持っているためだと考えられる。ケース B~D

においては、杭が短いまたは地盤が弱いいため杭体が曲げ変形をおこしにくくかつ鉛直抵抗が小さいため曲げモーメントが杭の鉛直変位に寄与していると考えられる。

これらより、杭長の長いケース A においては水平方向の地盤抵抗が水平変位を急増させる重要な要因であり、短い杭のケース B, C においては水平方向と鉛直方向の地盤抵抗が同時に水平変位を急増させる重要な要因となる。

なお、ケース D はこの両者の中間的存在と考えられ、わずかではあるが先端地盤の降伏が水平地盤に比べ遅れているのが分かる。

(2) 水平変位に影響を及ぼす要因

ここでは、杭基礎の水平変位に及ぼす要因を探るため、地盤バネを個別に変化させて影響度をみた。変化量は、初期勾配と上限値であり、基本値に対してそれぞれ 2 倍として換算水平震度-杭頭水平変位の関係を算定した。表-2 に解析時の検討ケース番号を、図-5 にバネ変化の概要を示す。

表-2 検討ケースの解析番号

バネ番号	初期勾配 2 倍	上限値 2 倍
①	(a)	(d)
②	(b)	(e)
③	(c)	(f)
基本ケース	(g)	

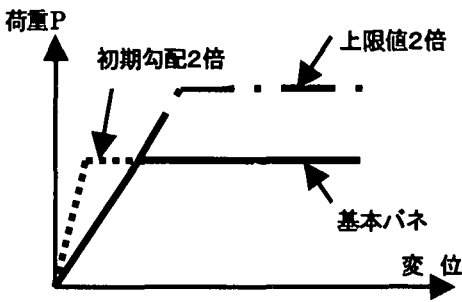
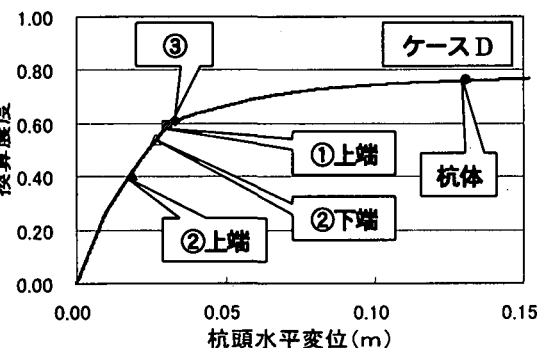
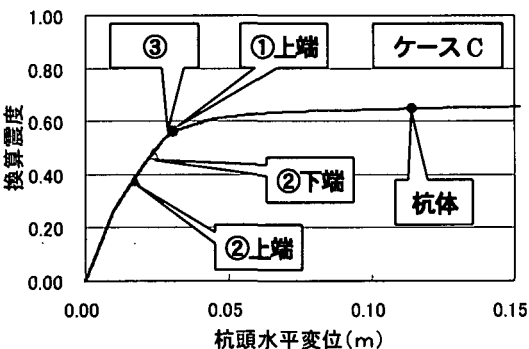
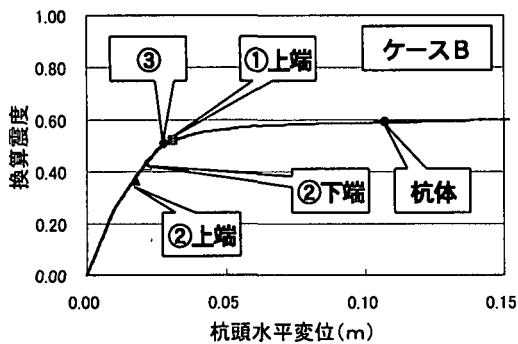
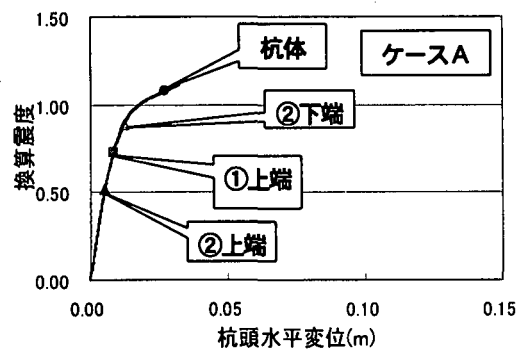


図-5 バネの変化概要

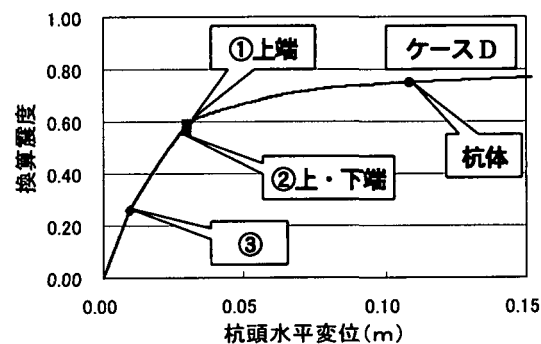
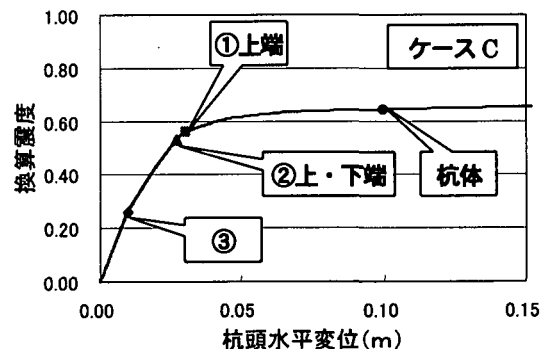
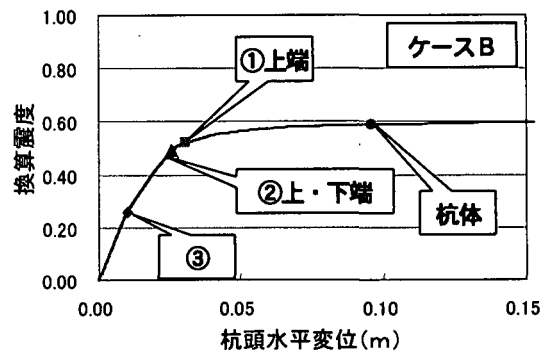
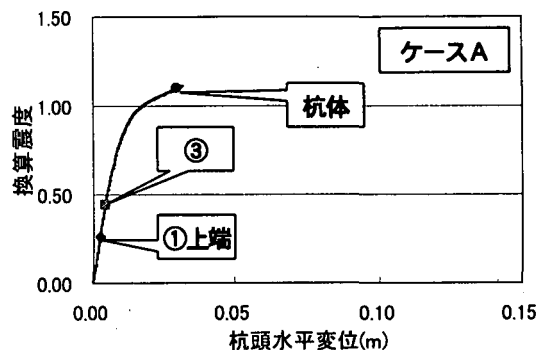
図-6, 7 には代表して、一般杭 (ケース A) と短い杭 (ケース B) の検討結果を示している。

どちらの場合も、初期勾配よりも上限値に依存している傾向にあり、上限値を大きくするのが効果的であることが判る。また、短い杭の場合には水平方向および鉛直方向いずれも上限値を大きくすると効果があるのに対し、一般杭では水平方向の上限値を大きくするのが鉛直方向よりも卓越しているのが分かる。



注) 丸番号はバネ、上、下端は杭の最上端、最下端を示す。

図-3 換算震度-杭頭水平変位 (押し込み側杭)



注) 丸番号はバネ、上、下端は杭の最上端、最下端を示す。

図-4 換算震度-杭頭水平変位 (引き抜き側杭)

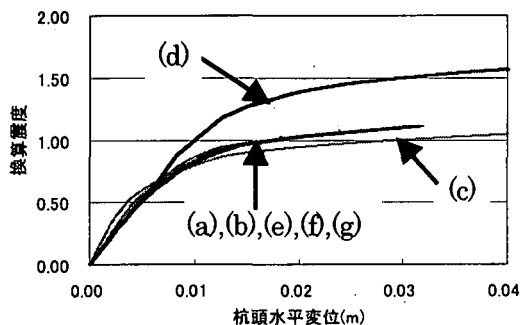


図-6 換算震度-杭頭水平変位の比較 (ケース A)

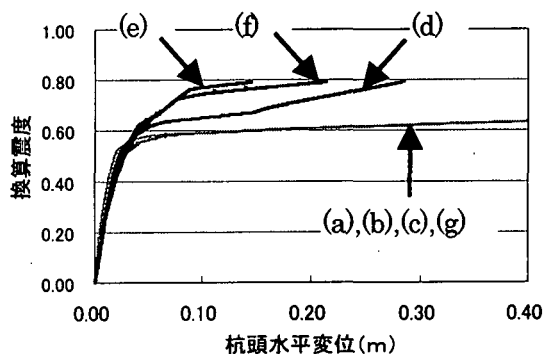


図-7 換算震度-杭頭水平変位の比較 (ケース B)

4. 短い杭のモデル化における問題点の考察

前項までの結果より、一般杭においては水平方向に注意していれば鉛直方向の抵抗値は多少ラフに設定しても解析結果に与える影響は小さい。しかし、短い杭の場合、剛性が大きく変形しにくいことに追加して鉛直方向の抵抗も小さいため、水平方向に加え鉛直方向の抵抗値設定にも注意する必要がある。

短い杭においては、これらを踏まえたモデルの改善が必要であると思われる。ここではその方策の1つとして、既存の研究により得られた結果を基に、上限値向上に対する若干の提案を行う。

なお、前項までの検討により、地盤抵抗をバネに置き換える場合、一般杭でも短い杭でもバネの初期勾配が杭の水平挙動に与える影響は非常に小さいため、ここでは対象としない。

(1) 水平 (①) バネの上限値：

通常地盤抵抗は受働土圧以上にはならないが、杭が地盤に比べ剛性が高くかつ水平変位に加え鉛直変位が生じる場合、坂田らの研究⁷⁾により受働土圧領域が地盤の深さ方向へ広がり水平土圧が受働土圧より大きくなることが示されている。短い杭の場合、この条件に当てはまるため上限値の向上が望める。ただし、適用に際して、坂田らの研究は杭全体としての研究成果であるため杭上方部からの進行性破壊となる場合の適用性について検討が必要である。

(2) 周面鉛直バネ(②)バネ：

現在、鉄道標準と本研究において初期勾配には若干の差があるが、上限値については摩擦力を上限値としている点で同じである。実際には、杭の摩擦力は安福らの研究⁹⁾により深さ方向に増加することが知られており、これらの研究を適用し土被り圧に応じた摩擦力の増加も考慮するのが効果的である。

ただし、現状での安福らの提案は、地盤によって一義的でないとされているため、適用に際しては土質試験等の調査を行い地盤に応じて設定する必要がある。

(3) 先端鉛直バネ (③) バネ：

長い杭では周面鉛直方向のせん断抵抗が大きいいため、先端バネの値が杭の水平変位に与える影響はほとんど問題にはならないが、短い杭では周面鉛直方向のせん断抵抗が小さいためこの影響が大きくなる。現在の水平方向の上限値である受働土圧同様に土被り圧を考慮した上限

値の設定が必要である。

5. まとめ

検討結果より、以下のことが明確になった。

(1) 杭の水平変位は、一般杭の場合水平方向の地盤のみに依存し、短い杭の場合水平方向と鉛直方向の両方に依存する。

(2) 杭の水平変位は、初期の剛性(ここではバネの勾配)よりも上限値に依存しており、基礎としての耐力が向上することが明確になった。

(3) 実設計に適用するには若干の検討が必要ではあるが、上限値の向上策についての提案を行った。

短い杭において大変形までの設計を行う場合、杭基礎の水平変位の推移は地盤の抵抗特性、特に鉛直方向抵抗特性に敏感であり、モデル化においては十分な抵抗特性の評価が必要でありかつ重要である。今後は、前項で提案した上限値向上策の実設計への適用について、研究を行うこととしている。

参考文献

- 1) 岩上,大塚,竹村:大地震時における短杭基礎の耐震設計に対する基礎的研究, 構造工学論文集 Vol.47A, pp1545-1556, 2001.3
- 2) 岩上,大塚,竹村:杭基礎の耐震設計に対する基礎的研究, 第55回年次学術講演会概要集, I-B451, 2000.9
- 3) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説, V耐震設計編, 平成8年12月
- 4) 鉄道総合研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説, 耐震設計, 平成11年10月
- 5) 大塚, 久納, 岩上:地盤の鉛直方向抵抗力のモデル化が杭基礎の水平抵抗力に及ぼす影響, 構造工学論文集 Vol.45A, pp1583-1590, 1999.3
- 6) (社)日本道路協会:道路橋の耐震設計に関する資料, 平成9年3月
- 7) 坂田,前田,除,落合,安福:傾斜荷重を受ける杭の支持力特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp1667-1674, 1998.3
- 8) 坂田,前田,落合,安福,横田:傾斜荷重を受ける柱状体基礎の水平方向塑性地盤反力, 土木学会論文集 No.610/Ⅲ-45, pp69-82, 1998.12
- 9) 安福, 落合,前田:限界状態に着目した場所打ち杭の周面摩擦算定法, 土木学会論文集 No.617/Ⅲ-46, pp89-100, 1999.3