

道路構造物基礎に用いるパイルド・ラフト工法の小規模橋梁の適用性研究

パイルド・ラフト研究会

1. はじめに

本研究は、小規模橋梁を対象とした基礎設計について、経済的かつ効率的な設計法の提案を行うものである。

北陸地方の平野部は、中小河川の氾濫原にあり扇状地で形成されている。扇状地下流部は、 N 値が比較的低い砂地盤が厚く堆積し、その平野部の多くは、圃場として利用され、用排水が張り巡らされている。したがって、それら用排水を横断するための小規模橋梁多数存在している。

これら小規模橋梁は、市町村等の小規模自治体が設置することが多く、今後は既存橋梁の老朽化に伴い、橋梁の更新の増加が想定されるが、直接基礎が採用できない場合、杭基礎が選定され支持層が深く杭長が長くなり、上下部工のバランスが悪く、コスト増大が問題となる場合が多い。

また、近年、建築、土木に係る多くの分野で、設計基準の性能照査型設計法化が進められている中、小規模橋梁における要求性能を明確化し、コスト縮減を図る意義は大きい。そこで本研究では、橋梁設計にパイルド・ラフトの設計概念を取り入れることで、橋梁建設コスト縮減に向けた取り組みを行うものである。

2. 対象とする小規模橋梁

本研究で対象とする橋梁は、道路橋示方書¹⁾示される重要度がA種に区分される比較的小規模（橋長25.0m以下）かつレベル2地震動を考慮しない単径間橋梁とする。大規模橋梁は要求性能が高く、レベル2地震動まで考慮するため、地震時の水平荷重によって杭長が左右されることが多く、一方で小規模橋梁は、要求性能が比較的低く、支持力のみによって基礎が決定されることが多いため、パイルド・ラフトを適用した場合の効果が高い。

表1 対象橋梁の基本条件¹⁾²⁾

項目	対象橋梁
橋の重要度	A種の橋
橋の使用	橋長25m以下の単径間の橋 (橋台背面は土を想定)
橋梁形式	鋼橋：単純合成H桁橋 PC橋：スラブ桁橋, 軽荷重スラブ桁橋 Uコンボ橋

3. パイルド・ラフト工法概要

道路橋示方書³⁾に基づく基礎設計では、フーチング、杭、地盤での相互作用が不明確ことから①1基の下部構造には、異種の基礎形式を併用しない②全ての外力を杭で抵抗させることを原則としている。ただし、外力を全て杭で負担しているため、安全側な設計であり、画一的な設計となってしまうがちである。また近年設計基準の性能照査型設計法化が進められている中で、橋の要求性能に応じたより合理的な設計法としてパイルド・ラフト基礎の適用性を検証する。

ここでパイルド・ラフト基礎とは、直接基礎と杭基礎が複合してその両方で上部構造を支持する基礎形式であり、橋梁の要求性能が低い橋等ある程度の沈下を許容でき、基礎底面による地盤の抵抗力が期待できる場合に効果的な工法である。パイルド・ラフト基礎は、既に建築基礎や海外においても適用されており、今後は道路構造物基礎においても活用が期待できる基礎形式である。

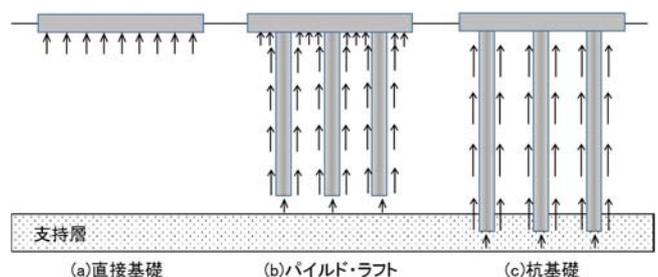


図1 基礎形式概要

4. 三次元変形解析プログラムを用いた検証

同一地盤において同一な構造を有するパイルド・ラフト基礎（PR 基礎）と群杭基礎（PG 基礎）の挙動の差異を検討することを目的に、PR 基礎と PG 基礎の変形解析を実施した。

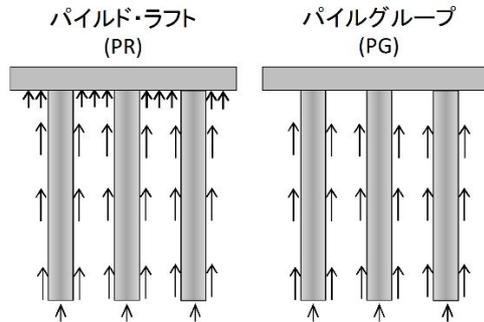


図 2 PRAB のモデル化概要

4-1. 解析条件

本項では、PRAB(簡易三次元変形解析プログラム)を採用した弾性解析結果を示す。なお PRAB は、すべてのラフト節点、杭節点での地盤バネ同士の相互作用を考慮した解析プログラムであり、各バネの概要は図 3 の通りである。

また解析モデルは、図 4 に示すように 6m×10m のラフト（フーチング）に直径 $D=1\text{m}$ のコンクリート杭を 6 本配置させたものを想定し、杭長 L を 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30m の 7 種に変化させた。ラフト材料は $E_p = 2.8 \times 10^7$ (kPa), $\nu_p = 0.17$ としほぼ剛体を想定する。また地盤条件は、砂地盤を想定し N 値=5,10,15,20 相当の計 4 パターンに対し、道路橋示方書に準じ、 $E_s = 2800N$ (kPa) より弾性係数 E_s を設定し、 $\nu_s = 0.30$ とした。

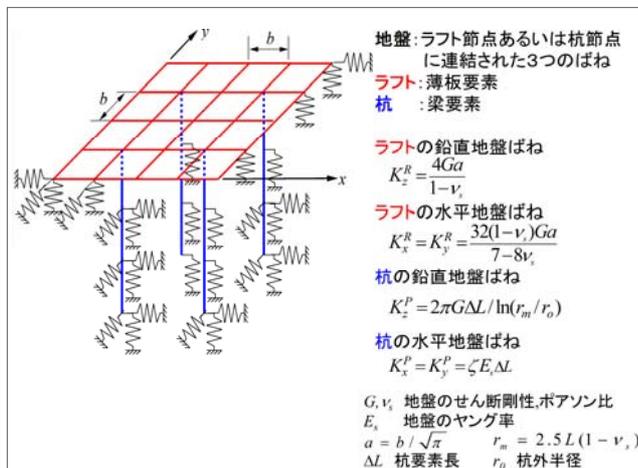


図 3 PRAB のモデル化概要⁴⁾

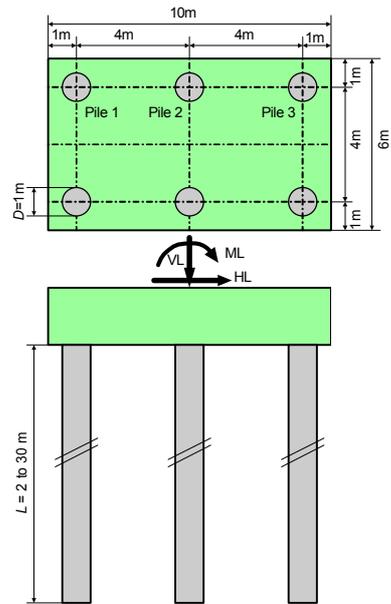


図 4 解析モデル

杭基礎の計算モデルは、基礎地盤構造物と外力の対象上面に基づいて、地盤と基礎構造物の半分をモデル化し解析を行った。

4-2. 解析結果

(1) 鉛直載荷時

鉛直荷重を受けた場合の沈下量は、 N 値 5～10 の地盤変化に対し急激な差があり、また杭長 15m 以上では PR 基礎と PG 基礎の差が小さく、杭長が長くなることでの沈下抑制効果が大幅に低減している。また鉛直荷重に対するラフトの荷重分担は、10%程度を示しており、沈下量の関係と同様に杭長 15m 以上ではラフトの荷重分担はほぼ変化しない。これは、杭長が増加すると荷重の大半が剛性の大きい杭に分担され、杭周面の摩擦力によって沈下が抑制されているためと考えられる。

(2) 水平載荷時

水平荷重を受けた水平変位量は、PG 基礎と PR 基礎の差が顕著に表れている。特に N 値が 5～10 の地盤変化に対して、両者の差が大きい。但し杭長 10m 以上では水平変位に対する抑制効果が小さい。これは、 N 値=5 程度では、杭に作用する応力が大きいためと考えられる。また杭長が長くなると杭の剛性により荷重が負担される一方で、水平荷重に対してはラフトが負担する荷重分担率が高く（50%程度）杭長による効

果が低くなったと考えられる。したがって、PR基礎では杭の剛性によって負担しきれない水平荷重をラフトによって大きく負担できる。

(3) 転倒モーメント荷重時

転倒モーメント荷重を受けた場合の水平変位量は、PG基礎とPR基礎の差が顕著に表れており、杭長5mをピークに水平変位量は減少する。また、よってPR基礎では、水平荷重時と同様ラフトが受け持つ応力が大きく、転倒モーメント荷重時にも有効である。ただし杭長が短いもしくは地盤がゆるい場合ラフトと杭で荷重を支えきれず、地盤方向へ杭が押し込まれる。よって水平変位量が小さくなる一方でラフトの傾きが問題となる。

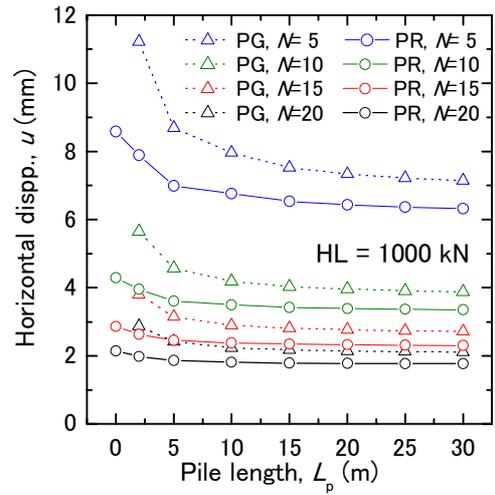


図7 水平荷重時の杭長と水平変位量の関係(PRAB)

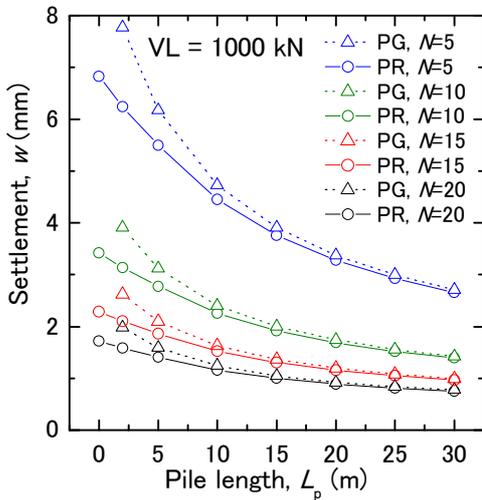


図5 鉛直荷重時の杭長と沈下量の関係(PRAB)

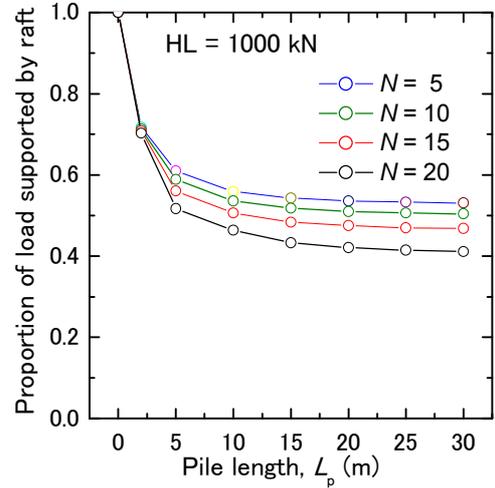


図8 水平荷重時の杭長とラフト負担率の関係(PRAB)

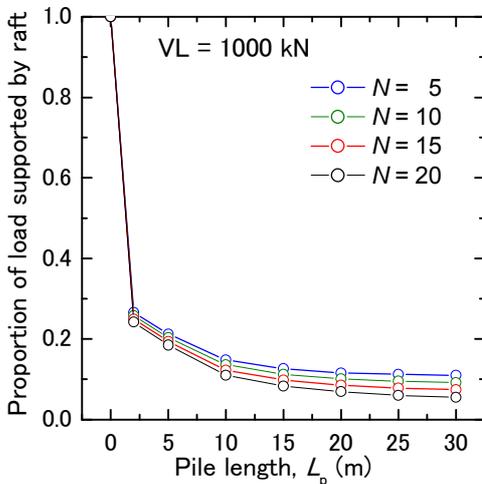


図6 鉛直荷重時の杭長とラフト負担率の関係(PRAB)

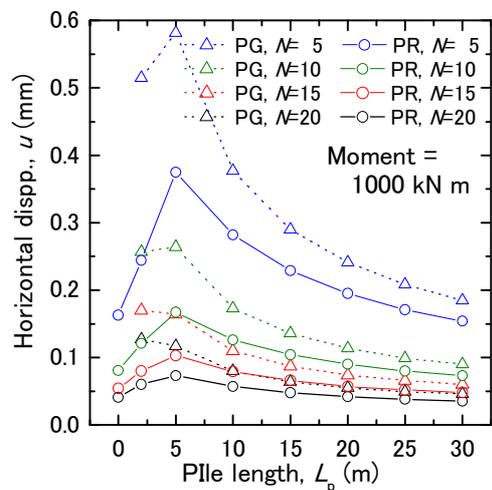


図9 転倒モーメント荷重時の杭長と水平変位量の関係(PRAB)

5. 弾性 FEM 解析による検証

5-1. 解析条件

本項では、前項同様の解析モデルおよび荷重条件を用いた、基礎地盤 N 値 = 20 相当の砂地盤の弾性 FEM 解析結果について述べる。解析コードには、PLAXIS 3D⁵⁾を用いた。図 10 は、地盤と基礎の三次元有限要素モデルである。

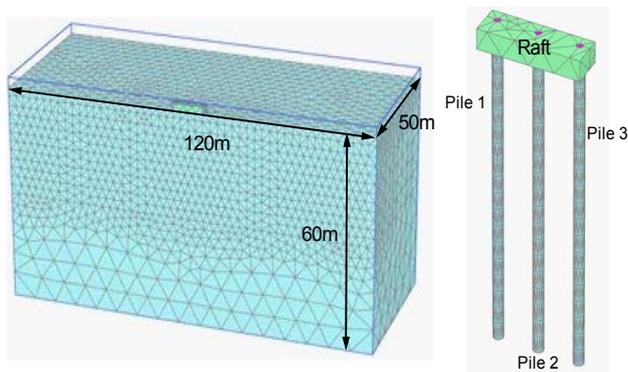


図 10 三次元 FEM 解析モデル

5-2. 解析結果

(1) 鉛直荷重時

図 11 は、鉛直荷重に対する杭長 L_p と基礎の沈下量の関係である。PR 基礎における $L_p=0$ の結果は、直接基礎の沈下量である。PR 基礎および PG 基礎ともに、杭長が長くなるに伴い基礎沈下量は減少するが、杭長 15m 以上では沈下低減効果が小さくなる。また、杭長 10m 程度までは、PG 基礎よりも PR 基礎の沈下抑制効果が見て取れるが、杭長 10m 以上では基礎形式による沈下量に有意な差は見られない。仮に、許容沈下量が 1.2 mm であるなら、PG 基礎では 8m の杭長が必要なのに対し、PR 基礎では 5m の杭長で十分である。

図 12 は、PR 基礎における杭長と杭の荷重分担率である。杭長 15m を超えると杭の荷重分担率 80%程度に収束してくる。PG 基礎の、杭の荷重分担率は、杭長に関わらず 100%である。

図 13 は、PR 基礎および PG 基礎における Pile 1 (corner pile) のモーメント分布および軸力分布である。杭に発生するモーメントおよび軸力は、PR 基礎が PG 基礎と比較して小さくなっている。杭長 30m では、その差は小さいが、

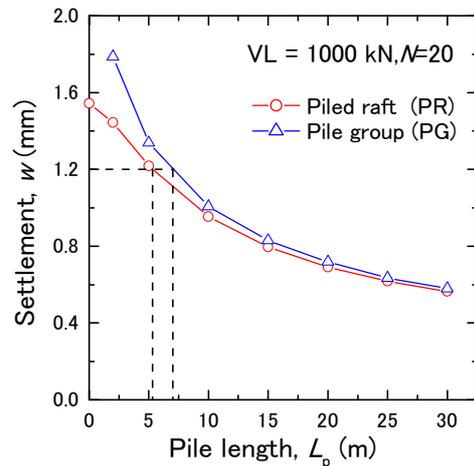


図 11 鉛直荷重時の杭長と沈下量の関係

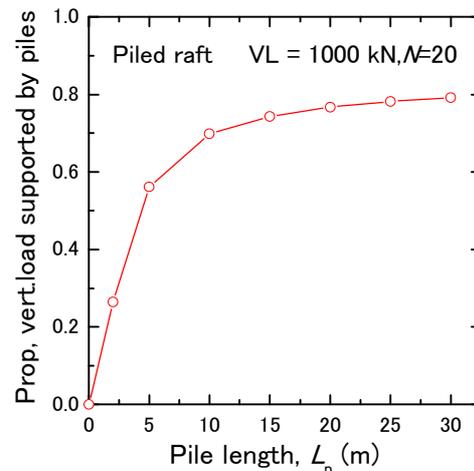


図 12 鉛直荷重時の杭長と杭荷重分担率の関係

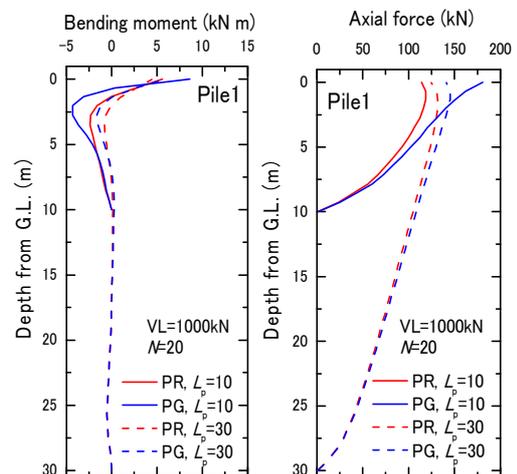


図 13 杭の応力深度分布

杭長 10m では、PR 基礎の杭頭モーメントおよび軸力共に、PG 基礎の約 70%程度に低減されている。

(2) 水平荷重時

図 14 は、水平力 $HL = 1000\text{kN}$ を荷重したときの、杭長と水平変位 u の関係である。また、図 15

は、杭長と杭の荷重分担率の関係である。

PR および PG 両基礎形式ともに水平荷重に対する水平変位は、杭長 10m 程度ではほぼ一定となり、それ以上杭長を増しても水平変位の抑制効果は小さい。また、PG 基礎と PR 基礎を比較すると、同一杭長の場合、PR 基礎は PG 基礎の 80%程度の変位量に減少する。特筆すべきは、杭長 5m の PR 基礎と杭長 30m の PG 基礎の水平変位が、ともに $u = 2.1\text{mm}$ で、同等の水平変位となっている。

これは、図 15 に示すように、PR 基礎において杭自体は、水平荷重の 20%程度しか負担しておらず、約 80%はラフトが負担しているため、PR 基礎と PG 基礎に大きな違いが出たと考えられる。つまり、ラフトによる水平変位抑制効果が顕著であると考えられる。

図 16 は、水平力载荷時の杭体に発生するモーメント深度分布である。Pile 1 および Pile 3 は、

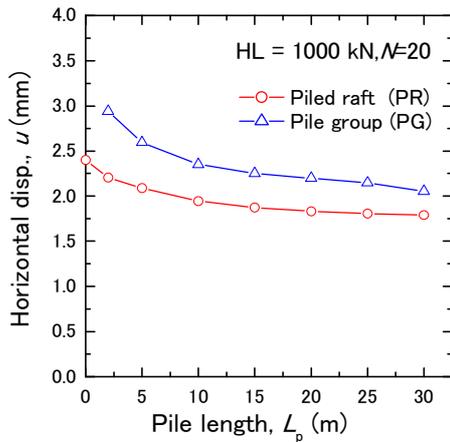


図 14 水平载荷時の杭長と水平変位の関係

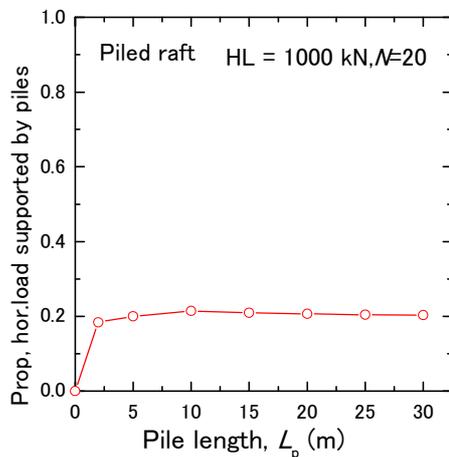


図 15 水平载荷時の杭長と荷重負担率の関係

基礎両端の杭の深度分布で、Pile 2 は基礎中央の杭である。中央杭に比較し、両端杭の方が杭頭に発生するモーメントが大きい。また、PR 基礎の杭頭モーメントは、PG 基礎の杭よりも、モーメントが減少する。

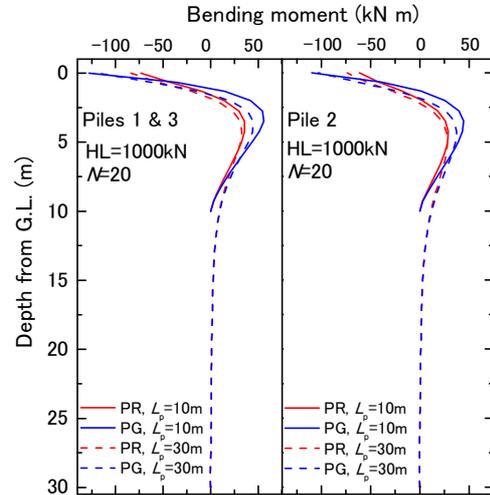


図 16 水平载荷時の杭曲げモーメント深度分布
(3) 転倒モーメント载荷時

図 17 は、転倒モーメント载荷時の杭長と水平変位の関係である。また、図 18 は、杭長と基礎の傾斜角の関係である。図 17 に示すように、転倒モーメント荷重に対する水平変位は、鉛直荷重時と同様に、15m 程度ではほぼ一定となり、それ以上杭長を増しても水平変位の抑制効果は小さい。同様に基礎の傾斜角も、図 18 に示すように杭長 15m 程度ではほぼ一定となる。一方、基礎形式の違いにおいては、杭長 15m までは、ラフトの効果が確認できるが杭長 15m を超えると同様の挙動を示す。

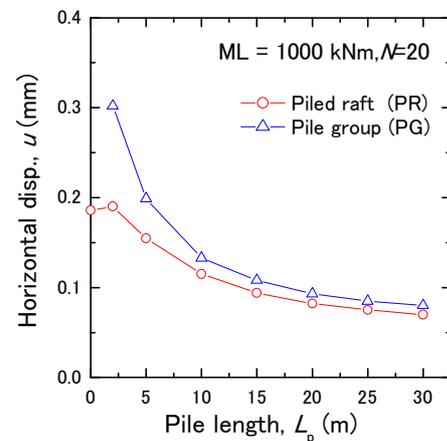


図 17 転倒モーメント载荷時の杭長と水平変位の関係

図 19 は、モーメント載荷時の引抜き側 Pile 1 杭体に発生する軸力深度分布である。転倒モーメント載荷時も水平力載荷時と同様に、PR 基礎と PG 基礎を比較すると、PR 基礎での発生軸力が、かなり小さく、杭長 10m では、顕著に減少している。

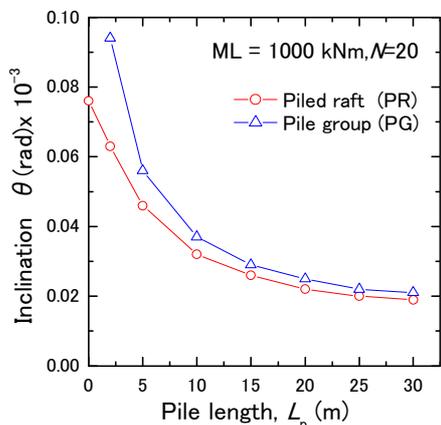


図 18 転倒モーメント載荷時の杭長と基礎傾斜角の関係

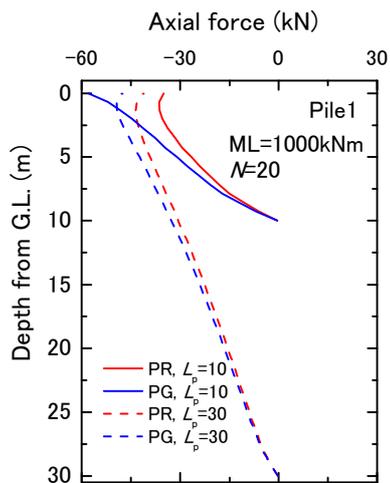


図 19 転倒モーメント載荷時の杭の軸力深度分布

6. 解析結果の評価および今後の展望

今回の解析条件の範囲内ではあるが、鉛直荷重に対しては杭長が 10m 以下の場合、許容沈下量の設定によっては、PR 基礎の杭長は、PG 基礎に比べて 30~50%低減することが可能である。

また水平荷重に対する水平変位は、杭長 5m の PR 基礎の水平変位と、杭長 30m の PG 基礎が同じ水平変位となっており、PR 基礎の水平変位耐力は、顕著に大きいと考えられる。これらは、杭の水平荷重分担率が、杭長が 10m 以上で、約 20%程度に収束し、約 80%はラフトが負担しているこ

とに関連すると思われる。また、水平変位と同様に、杭頭付近に発生する曲げモーメントおよび軸力は、PG 基礎と比較して PR 基礎は、大幅に減少する。さらに、転倒モーメントに対しても、同様な傾向が見て取れる。

従来、パイルド・ラフト基礎形式は、地震力などの水平外力や基礎地盤の液状化に対する挙動が不明確なことから、直接基礎の沈下低減や不同沈下対策のみの部材とみなす設計法が主流であったが、今回の一連の解析結果から、ラフト抵抗を考慮することにより、比較的短い杭でも従来の群杭で採用される長尺杭と同等の水平抵抗性能を有することが認められ、耐震設計にも高い期待が出来ると考えられる。また各荷重載荷ケースにおいて、パイルド・ラフト基礎形式を用いることで杭に作用する応力や変形量が軽減されるため、建設コスト縮減（経済的、工期短縮）が期待できる。

今後は、動的解析や弾塑性解析を用いた、パイルド・ラフト基礎を適用した場合の地震動や液状化時の検証、構造物の要求性能にあわせた許容変位量の立証を行うことで、北陸地域における小規模橋梁へのパイルド・ラフト基礎適用に向けて取り組みたい。

謝辞

本研究は、一般社団法人 北陸地域づくり協会の第 21 回「北陸地域の活性化」に関する研究助成事業の研究援助を受けて実施した。研究を行うにあたり協力して頂いた関係者の方々に謝意を表す。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会,道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2012
- 2) 北陸地方整備局,設計要領[道路編], 2012
- 3) 社団法人日本道路協会,道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 2012
- 4) Pastsakorn Kitiyodom ,SIMPLIFIED ANALYSIS OF PILED RAFT FOUNDATIONS SUBJECTED TO ACTIVE LOADING AND PASSIVE LOADING, 2004
- 5) PLAXIS 3D User's Manual