

# 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

かわもりまゆみ もりかげあつし むらえひろのぶ  
川森真弓<sup>1</sup>・森影篤史<sup>1</sup>・村江博信<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (株) 日本海コンサルタント (〒921-8042 石川県金沢市泉本町2-126)

本研究は、道路構造物の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に関する研究である。パイルド・ラフト工法は、杭の摩擦力に加え、直接基礎のラフトの効果（支持力）を併用した杭基礎形式であり、道路構造物の基礎に適用するには、ラフトの性能評価法の確立やその効果の検証、課題の明確化等が求められている。そこで、本報告では、パイルド・ラフト基礎構造と従来の杭基礎構造について弾性三次元FEM解析により比較・検証した結果、パイルド・ラフト基礎は、主にラフトの効果から、比較的短い杭でも従来の杭と同等の水平抵抗性能を有することが認められ、今後耐震設計においても高い期待ができると考えられた。

**Key Words** : 小規模橋梁, 杭基礎, パイルド・ラフト基礎, 弾性三次元FEM解析

## 1. はじめに

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（N値<30程度）が厚く堆積しているため、直接基礎が採用できない場合、杭基礎が選定されるが、支持層が深く杭長が長くなり、コスト増大が問題となる場合が多い。

道路橋示方書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なため、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、外力を全て杭で負担している。

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、かつ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で適用されている工法であり、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。

また近年、建築、土木に係る多くの分野で、道路橋示方書の改訂等、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。

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。

## 2. 解析条件

### (1) 基礎形式

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）と従来の杭基礎（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基礎の弾性三次元FEM変形解析を実施した。解析を実施した杭基礎は、図-1に示すように6m×10mのラフト（フーチング）に直径D=1m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<sub>p</sub>を7種（2, 5, 10, 15, 20, 25, 30m）に変化させた。なお、ほぼ剛なラフトとするため、ラフトの厚さは、2mと仮定した。

### (2) 荷重条件

荷重は、鉛直荷重としてV = 1000kN、水平荷重としてH = 1000kN、および転倒モーメントとして1000 kN・mをそれぞれ別個に載荷させた解析を行った。

### (3) 弾性解析条件

基礎地盤および基礎は、等方線形弾性体とし、それぞれの材料定数は、表-1に示すとおりである。基礎地盤は表-1に示すように、標準貫入試験のN値 = 20相当の砂地盤とし、道路橋示方書<sup>1)</sup>に準じ、E<sub>s</sub>=2800N (kPa)より弾性係数E<sub>s</sub>を設定した。地盤および基礎材料のポアソン比は、0.30および0.17と仮定した。

解析コードには、PLAXIS 3D<sup>2)</sup>を用いた。図-2は、地盤と基礎の三次元有限要素モデルである。基礎構造物と外力の対称条件に基づいて、地盤と基礎構造

物の半分をモデル化し，モデル地盤底面の鉛直変位，側面の垂直変位を固定した。

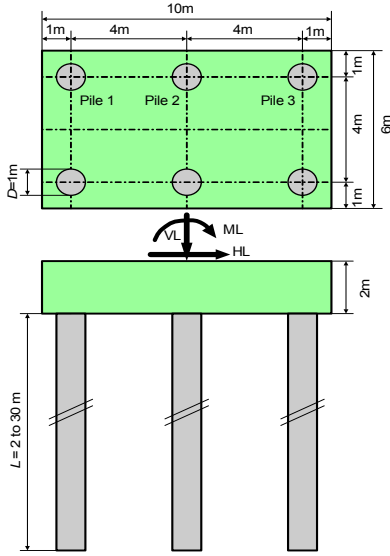


図-1 解析対象杭基礎モデル

表-1 解析モデル定数

	SPT N-value	Young's modulus(kPa)	Poisson's ratio
Ground	20	$E_s = 5.6 \times 10^4$	$\nu_s = 0.30$
Raft and piles	----	$E_p = 2.8 \times 10^7$	$\nu_p = 0.17$

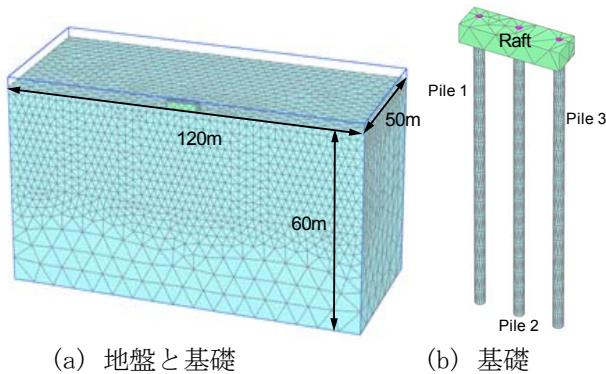


図-2 三次元FEM解析モデル

### 3. 解析結果

#### (1) 鉛直荷重載荷時の挙動

図-3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-4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。

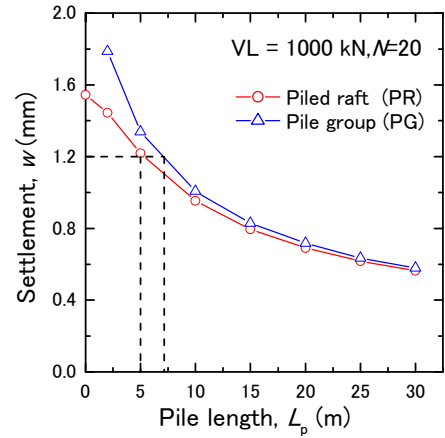


図-3 鉛直載荷時の杭長と沈下量の関係

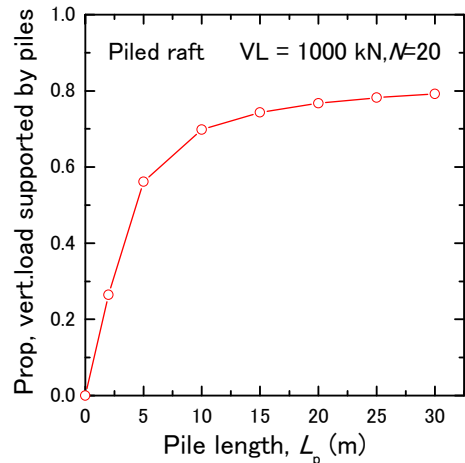
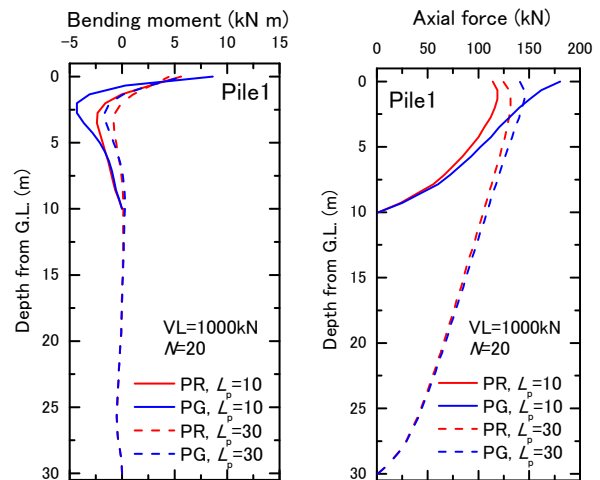


図-4 鉛直載荷時の杭長と杭荷重分担率の関係

図-5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，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。



(a) 曲げモーメント (b) 軸力

図-5 鉛直載荷時の杭の深度分布

## (2) 水平直荷重載荷時の挙動

図-6は、水平力 $HL = 1000\text{kN}$ を載荷したときの、杭長と水平変位 $u$ の関係である。また、図-7は、杭長と杭の荷重分担率の関係である。

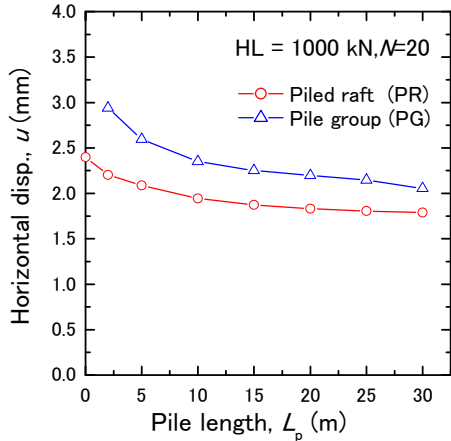


図-6 水平載荷時の杭長と水平変位の関係

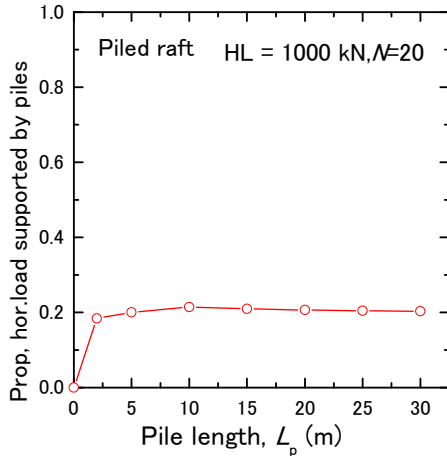


図-7 水平載荷時の杭長と荷重負担率の関係

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-7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-8は、水平力載荷時の杭長と基礎の傾斜角の関係である。水平力のみでの載荷であるが、基礎が傾斜する。傾斜角は、杭長15m程度でほぼ一定となる。これは前述した沈下が杭長15mで一定となる結果と、同様と考えられる。

図-9は、水平力載荷時の杭体に発生するモーメント

メント深度分布である。Pile 1およびPile 3は、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。

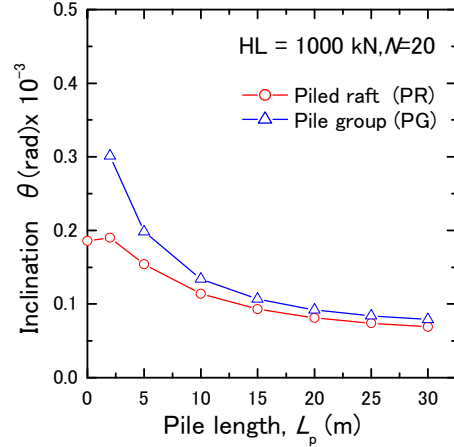


図-8 水平載荷時の杭長と基礎傾斜角の関係

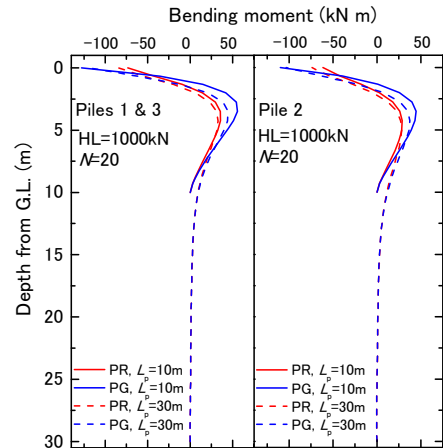


図-9 水平載荷時の杭曲げモーメント深度分布

図-10は、水平力載荷時の引抜き側Pile 1に発生する軸力深度分布である。水平力のみでの載荷であるが、基礎の傾斜の発生と共に、杭に軸力が発生する。PR基礎とPG基礎を比較すると、PR基礎での発生軸力が、かなり小さくなっている。特に杭長10mは、顕著に減少している。

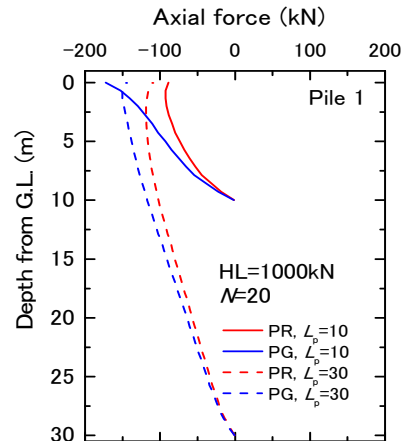


図-10 水平載荷時の杭の軸力深度分布

### (3) 転倒モーメント載荷時の挙動

図-11は、転倒モーメント載荷時の杭長と水平変位の関係である。また、図-12は、杭長と基礎の傾斜角の関係である。図-11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-12に示すように杭長15m程度でほぼ一定となる。

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-13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。

## 4. おわりに

パイルド・ラフト基礎と群杭基礎の挙動の差異を検討することを目的に、一連の弾性三次元FEM解析を実施した。今回の解析条件の範囲内では、鉛直荷重に対し基礎の沈下量は、杭長15m以上では沈下低減効果が小さくなる。これはPR基礎では、杭長15mを超えると杭の荷重負担率80%程度に収束してくることと関連している。また、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。

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考えられる。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等を行うことで、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。

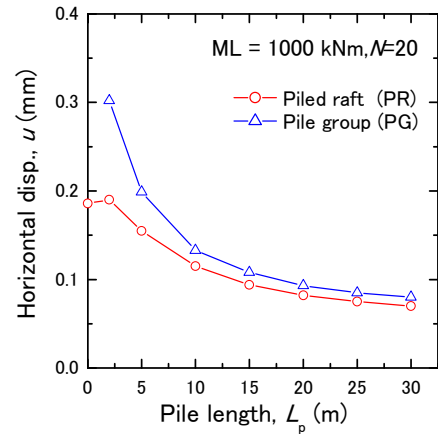


図-11 転倒モーメント載荷時の杭長と水平変位の関係

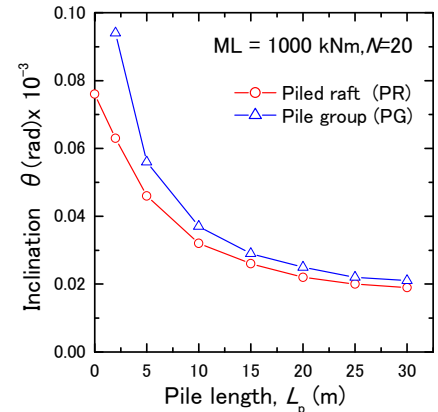


図-12 転倒モーメント載荷時の杭長と基礎傾斜角の関係

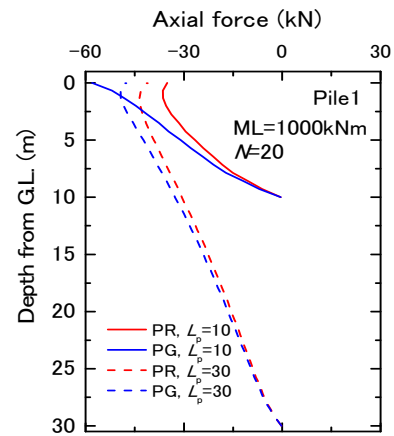


図-13 転倒モーメント載荷時の杭の軸力深度分布

謝辞：本論文の作成にあたり、適切な助言を賜り、丁寧にご指導頂いた金沢大学松本樹典教授に謝意を表します。

また、本研究は、一般社団法人北陸地域づくり協会第21回「北陸地域の活性化」に関する研究助成事業の援助を受け実施しました。ここに深くお礼を申し上げます。

### 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会, 道路橋示方書・同解説IV下部構造編, pp. 285, 2012.
- 2) PLAXIS 3D User's Manual.

