

# 「パイルド・ラフト基礎」 の調査報告

(財)建築コスト管理システム研究所  
新技術調査検討会

## 1 序

2000年の建築基準法の改正において、建築構造設計は、従来の仕様規定型から性能規定型への方向性が明確に示された。2001年には、日本建築学会「建築基礎構造設計指針」の改定が行われ、従来の許容応力度設計法から、建物沈下量など変形評価を主体とする限界状態設計法に移行するとともに、直接基礎に沈下低減用の杭を併用したパイルド・ラフト基礎が新たな基礎形式として加えられた。これにより、従来の直接基礎と杭基礎の二者択一に対して、基礎の選択肢が拡大された。

ここで追加された「パイルド・ラフト基礎」は、要求性能の確保とコストダウンを同時に実現できる性能設計に則したいわば「第3の基礎形式」として、近年、研究開発が盛んに行われ、今では各企業で広く採用されてきている新技術となった。また、2005年にはその開発と超高層建物への応用展開の実績が評価された開発企業に対し、日本建築学会賞（技術）が授与されている。

## 2 建物基礎の種類とパイルド・ラフト基礎の特徴

かつて、建物の基礎構造は、建物荷重を基礎底面地盤で直接支持する直接基礎と、直接基礎として設計できない場合に杭を打設して支持する杭基礎の2種類に大別されていた。直接基礎としての成立性を検討するとき、基礎底面地盤の支持力は確保できるが、沈下または不同沈下が過大となる場合がある。この場合、通常、杭基礎が採用されるが、支持層が深いと杭長が長くなり、工期、コストの面で著しく不利になる。それを解決する合理的な設計手法として、従来の直接基礎（ラフト）に沈下低減用の杭（パイル）をうまく組み合わせ建物性能を確保するパイルド・ラフト基礎が開発されている。

パイルド・ラフト基礎は、直接基礎と杭基礎の中間領域にあり、直接基礎としての支持力は確保できるが、建物荷重により過大な沈下や不同沈下が懸念される場合、直接基礎に沈下低減杭を併用し、建物荷重の一部を杭に分担させることで沈下を抑制し建物性能を確保することを特徴とする基礎形式である（図1）。

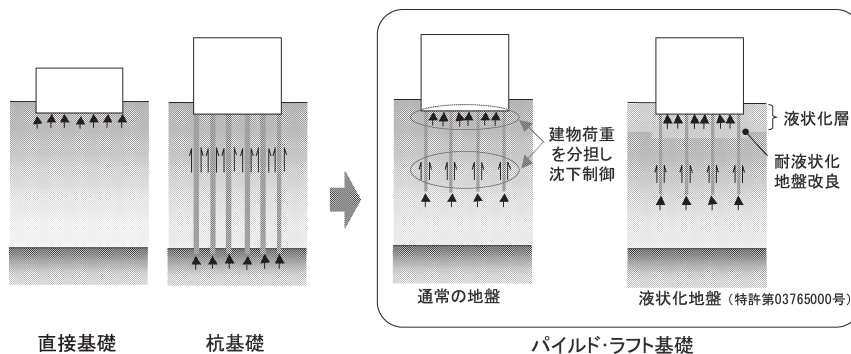


図1 基礎型式の種類

また図1のように、地盤に地震による液状化の発生が懸念される層がある場合でも、例えば地盤改良を併用することにより建物性能を確保することができる。

パイルド・ラフト基礎は、1980年代初頭より設計法の開発が着手されて以来、1987年には実建物における計測データを基に基本的な設計法が構築され、国内の建築物に初めて適用された。これまでに、低層建物から超高層建物まで幅広い建物で挙動観測が行われ、設計法の妥当性の検証が実施されており、現在までに数多くの適用実績（表1）がある。

表1 パイルド・ラフト基礎の主な適用事例

規模	竣工	用途	建築地	構造	階数	延床面積(m <sup>2</sup> )
A社	1987	事務所	埼玉	RC	F4, P1	1,365
	1987	駐車場	大阪	RC, S, SRC	B2, F7, P1	35,160
	1993	事務所	埼玉	RC	F5	2,068
	1997	保養所	神奈川	RC	F3	1,026
	2000	店舗	千葉	S	F4	36,927
	2000	事務所, 店舗	大阪	RC, S, SRC	B4, F23, P1	54,697
	2000	事務所, 集会場, 店舗	東京	CFT, RC, SRC, S	B4, F31, P2	83,255
	2003	店舗	東京	RC, S	B1, F4	25,513
	2004	事務所	東京	S	F7, P1	29,747
	2005	事務所	愛知	S	F11, P2	36,877
	2005	病院	大阪	RC, SRC	B1, F13, P2	23,203
	2005	集合住宅	東京	RC	B2, F38, P1	36,430
	2005	事務所, ホテル, 店舗	東京	RC, S, SRC	B4, F37, P2	190,257
	2006	集合住宅	東京	RC	B3, F7	15,423
	2006	店舗	千葉	S, RC	B1, F4, P1	112,012
	2006	工場	佐賀	S	F2	32,250
	2006	店舗	福岡	SRC, RC, S	B3, F8, P1	11,127
	2006	百貨店, 映画館	大阪	S, SRC	B2, F12, P2	35,909
2006	集合住宅	鹿児島	RC	F19, P2	17,483	

	2006	駐車場	千葉	S, SRC	F4	37,140
B社	2003	倉庫	ベトナム	S	F1	2,600
	2006	集合住宅	東京	RC	B4, F28	49,000
	2007(*)	集合住宅	福島	RC	F24	11,600
	2007(*)	商業施設	埼玉	S, RC, SRC	B4, F10	108,000
	2008(*)	事務所, 商業施設	東京	S, SRC	B3, F39	186,000
C社	2005	倉庫	神奈川	S	F1	990
	2006	事務所	兵庫	S	F2	3,165
D社	2005	事務所	東京	S, SRC	B2, F31	49,680
	2005	事務所, ホテル	東京	S, SRC	B4, F39	133,856
	2006	事務所, 店舗	東京	S, SRC	B3, F22	161,676
	2006	ホテル, 事務所	東京	RC	B2, F28	63,972
E社	2001	研究施設	東京	RC	F3	668
	2005	学校	埼玉	S, RC, SRC	B1, F19, P2	24,543
F社	1998	病院	茨城	RC	F2	1,042
	2001	工場	新潟	S	F2	3,400
	2001	工場	東京	S	F3	2,400
	2002	ホテル	新潟	S	B1, F16	12,500
	2004	病院	山形	RC	B1, F9	29,000
	2004	老健施設	茨城	RC	F3	4,400
	2004	病院	神奈川	RC	B1, F3	4,800
	2005	駐車場	千葉	S	F6	112,900
	2006	商業施設	東京	RC	F5	170,000
	2006	事務所	千葉	S	F2	200
	2006	工場	愛知	S	F2	1,100
	2007	事務所	東京	S	B3, F38	119,000
	2007	事務所	東京	S	B3, F33	134,400
G社	2006	放送会館	徳島	RC, SRC	B1, F4	6,421
	2007	空港施設	東京	RC, S	F2	244
	2007	病院	北海道	RC	F6	19,713

(\*) 予定

### 3 パイルド・ラフト基礎の設計法

パイルド・ラフト基礎の設計法は、日本建築学会「建築基礎構造設計指針(2001)」に示されている。パイルド・ラフト基礎は、異なる基礎形式を併用した併用基礎のうち、直接基礎(ラフト)と杭基礎(パイル)が複合してその両方で建物を支持するものである。この基礎形式は、直接基礎と杭が複合し

て抵抗するため、これらの相互作用を考慮した支持力の評価が必要であるが、現状は直接基礎により支持力が確保でき、沈下低減のため杭を併用する場合に適用範囲が限定されている。すなわち、パイルド・ラフト基礎は、直接基礎と杭基礎の両者の支持力を抵抗要素として考慮するが、支持力は、直接基礎の支持力のみを評価し、杭は沈下低減用として用いることとしている。

### (1) 常時の設計法

パイルド・ラフト基礎の適用にあたり、最初に直接基礎としての基礎底面地盤の支持力を確認する。この際、地震により基礎底面地盤の液状化の発生が懸念される場合や、圧密沈下の発生が懸念される場合、直接基礎と杭が複合して建物を支持するため、建物性能確保上問題となる。この場合、液状化対策工や、圧密沈下に対する設計上の配慮による対処が必要となる。

直接基礎としての支持力を確認した後、パイルド・ラフト基礎に用いる沈下低減杭を設計する。パイルド・ラフト基礎では、直接基礎と杭が複合して抵抗し建物を支持するため、**図2**に示すような杭と地盤と直接基礎の相互作用を考慮して沈下挙動の検討を行い、直接基礎と杭の荷重分担と、基礎の性能を確認する必要がある。すなわち、単に直接基礎に杭を併用すればパイルド・ラフト基礎とならず、地盤条件、基礎の構成要素の的確な評価が必要である。

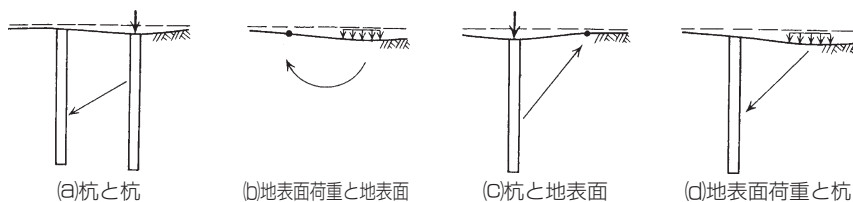


図2 パイルド・ラフト基礎の杭と地盤と直接基礎の相互作用

具体的には、**図2**に示した杭と地盤と直接基礎の相互作用の評価で得られた直接基礎と杭のばねを、**図3**に示すように有限要素法でモデル化し、基礎の沈下、直接基礎と杭の荷重分担および基礎梁の応力を評価することで、パイルド・ラフト基礎が設計される。

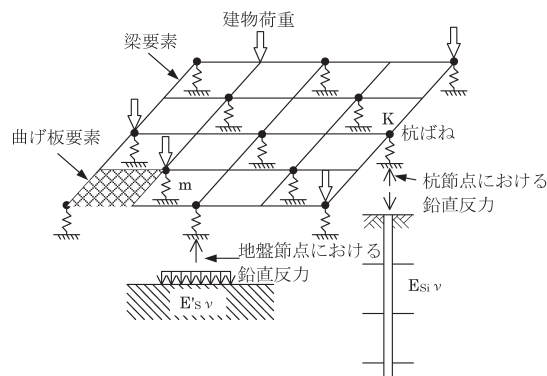


図3 パイルド・ラフト基礎の検討モデルの例

## ② 地震時の設計法

超高層建物などでは、鉛直支持性能とともに、建物の耐震安全性の確保が特に重要となる。

パイルド・ラフト基礎の地震時の設計法については、近年、研究が盛んに行われており、常時と同様に、直接基礎—地盤—杭の水平抵抗に対する相互作用を評価した設計法が提案されている（図4）。また、上部構造—基礎—地盤を一体とした連成系モデルによる動的相互作用解析を実施して、基礎の安全性を詳細に検討する方法もある。

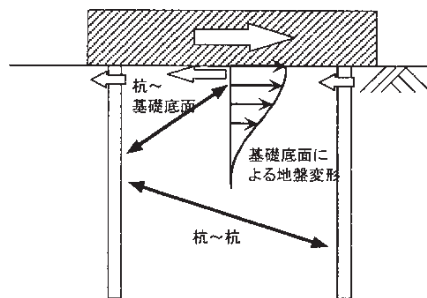


図4 パイルド・ラフト基礎の地震時検討モデルの例

## 4 パイルド・ラフト基礎の実施例

パイルド・ラフト基礎を採用することによって、基礎の合理化をおこなった事例を以下に紹介する。

ここでは、軟弱粘性土地盤における適用事例、液状化地盤における適用事例と、シルト層と砂層が混在する地盤における適用事例を示す。

### (1) 軟弱粘性土地盤における適用事例

軟弱粘性土地盤が厚く分布する敷地に立地する保養所を、パイルド・ラフト基礎の適用により合理化した事例を示す。

#### a. 建物条件および地盤条件

本建物は、関東地方に建設された鉄筋コンクリート造、地上3階の保養所である。建物は短辺12.4m、長辺33.7mの長方形平面で、直接基礎とした際の長期平均接地圧は43kN/m<sup>2</sup>である（図5、表2）。

敷地地盤の概要を図6に示す。地盤は、GL-2mまで埋土層、GL-27.3mまで軟弱な粘性土層、GL-39.4mまでN値10~20の礫混り粘性土層が分布し、支持層はGL-39.4m以深にN値50以上の安山岩

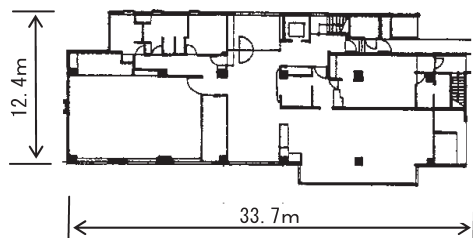


図5 建物平面

表2 建物概要

構造	鉄筋コンクリート造
用途	保養所
規模	地上3階
竣工年	1997年

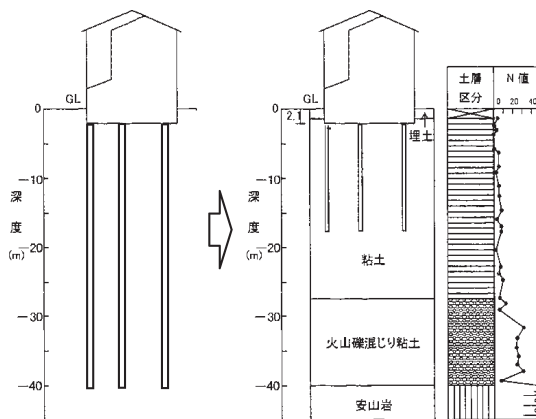


図6 建物および地盤の概要

層が分布している。

## b. 基礎の合理化

地盤条件より、本建物を設計する場合、通常的设计ではGL-40mに杭先端を支持させた支持杭基礎あるいは摩擦杭基礎が考えられる。ここで支持杭基礎とするとφ800のPHC杭15本が必要となり、建物規模に対する基礎のコストが過大となる。そこで、本建物では、建物規模が比較的小さく、荷重も小さいため、パイルド・ラフト基礎が適用された。

適用にあたって、GL-2.1mの基礎底面の支持力と下部に分布する軟弱粘性土層の圧密沈下が問題となる。これらについては、基礎底面地盤の平板載荷試験による地耐力の確認および、敷地地盤調査による粘性土の室内試験を実施し、パイルド・ラフト基礎の成立性を確認している。

これより、本建物は、杭先端をGL-17mの粘土層としたセメントミルク埋込み杭工法によるPHC杭φ450、15本を用いたパイルド・ラフト基礎として設計された。

パイルド・ラフト基礎の概要を、支持杭基礎とした場合の比較とあわせ図6に示す。また、これらの基礎のコスト比較を表3に示す。

表3 基礎のコスト比較

基礎形式	パイルド・ラフト	支持杭
杭種	PHC	PHC
杭径	φ450	φ800
杭長	15m	40m
杭本数	15本	15本
発生残土	40m <sup>3</sup>	320m <sup>3</sup>
コスト	45*	100

\*コストには基礎のマットスラブ化によるコストの増分を含む。

## c. コスト比較

本建物では、パイルド・ラフト基礎工法により、支持杭基礎としたときに比べ、杭長、杭径が低減され、基礎のコストの約55%低減、杭工事の発生残土の約85%削減が実現した。

## (2) 液状化地盤における適用事例

地震時に液状化の発生が懸念される敷地に立地する事務所ビルに、深層混合処理工法による格子状地盤改良（TOFT工法）を併用して地震時安全性を確保したパイルド・ラフト基礎の合理化事例を示す。

### a. 建物条件および地盤条件

本建物は、東京都江東区に建設された鉄骨造、地上7階、塔屋1階の事務所（写真1、表4）である。建物は短辺32.4m、長辺118.8mの長方形平面で、直接基礎とした際の長期平均接地圧は100kN/m<sup>2</sup>である。

敷地地盤の概要を図7に示す。地盤は、GL-11mまで液状化のおそれのある砂層が分布し、その下部には軟弱な粘性土層が分布し、支持層はGL-45m以深となっている。





写真1 建物概要

表4 建物概要

構造	鉄骨造
用途	事務所
規模	地上7階、塔屋1階
竣工年	2004年

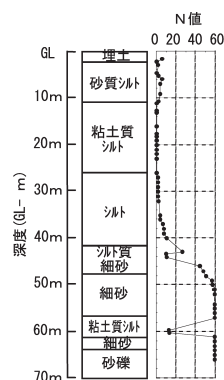


図7 地盤の概要

b. 基礎の合理化

地盤条件より、本建物を設計する場合、通常の設計ではGL-50m付近に杭先端を支持させた支持杭基礎となる。この際、 $\phi 900$ の先端根固め工法による鋼管杭100本程度が必要となり、基礎のコストが大きく、建設残土の増大による大きな環境負荷が懸念された。このため、建物性能と耐震性を確保し、かつコストダウンと環境負荷低減を実現するため、パイルド・ラフト基礎による合理化がおこなわれた。

基礎の合理化では、液状化層と軟弱粘性土層に対する対策が課題となる。ここでは、液状化層をGL-12mまでの深層混合処理工法による格子状地盤改良 (TOFT 工法) (図8) による液状化対策を行い、粘性土層は、建物荷重による圧密沈下生じないように杭とラフトの荷重分担を設定することにより、直接基礎としての耐震安全性を確保し、パイルド・ラフト基礎の適用条件を満足させている。

以上の結果、建物は杭先端を過圧密状態のGL-32mのシルト層としたセメントミルク埋込み杭工法によるPHC杭 $\phi 600\sim 900$ 、70本を用いたパイルド・ラフト基礎として設計された。

採用した耐液状化地盤改良を併用したパイルド・ラフト基礎の概要を、支持杭基礎とした場合の比較とあわせて図9に、コスト比較を表5に示す。

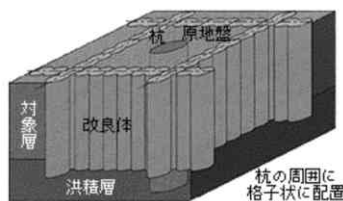


図8 格子状地盤改良

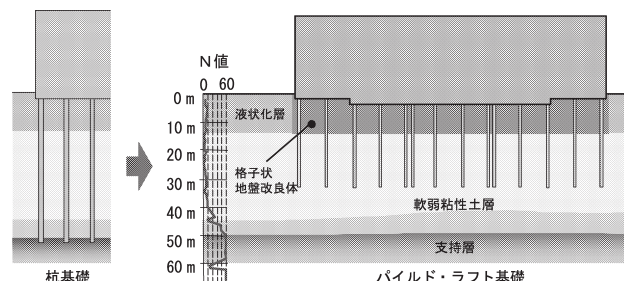


図9 耐液状化地盤改良を併用したパイルド・ラフト基礎の概要

表5 基礎のコスト比較

基礎形式	パイルド・ラフト	支持杭
杭種	PHC	鋼管
杭径	$\phi 600\sim 900$	$\phi 900$
杭長	30m	50m
杭本数	70本	100本
発生残土	1150 $m^3$	3350 $m^3$
コスト	55*	100

\*コストには基礎のマットスラブ化および格子状地盤改良によるコストの増分を含む。

### C. コスト比較

本建物では、耐液状化地盤改良と併用したパイルド・ラフト基礎工法の採用により、支持杭基礎としたときに比べ、杭長、杭径、杭本数の低減がはかられ、支持杭基礎としたときに比べ、コストの約45%低減、基礎工事期間の約30%短縮、杭工事の発生残土の約65%削減が実現した。

なお上記のコスト比較は、支持杭、パイルド・ラフト基礎共、耐液状化地盤改良を考慮した基礎設計での比較とした。

### (3) シルト層と砂層が混在する地盤における適用事例

シルト層と砂層が混在する敷地地盤に立地する病院を、パイルド・ラフト基礎の適用により合理化した事例を示す。

#### a. 建物条件および地盤条件

本建物は、東北地方に建設された鉄筋コンクリート造、地上9階・地下1階の病院（図10）である。建物概要を表6に示す。

敷地地盤の概要を図11に示す。地盤は、GL-10mまでシルト層、GL-10mよりGL-30mまで砂層砂質シルト層が混在し、GL-30mよりN値40~60の砂礫層が分布している。



図10 躯体イメージ図

表6 建物概要

構造	鉄筋コンクリート造
用途	病院
規模	地上9階，地下1階
竣工年	2004年

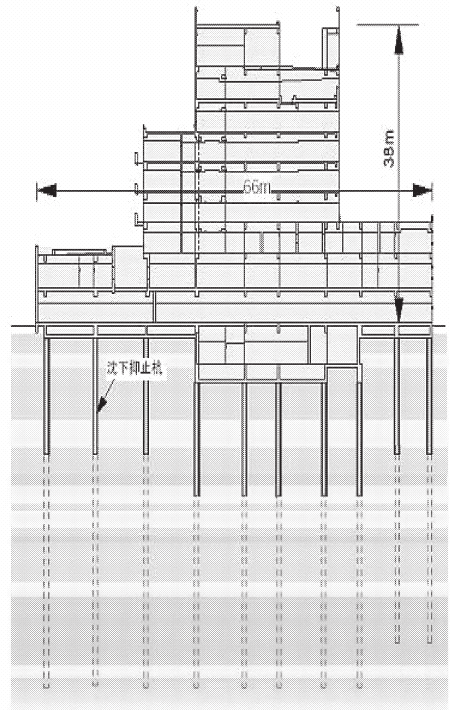
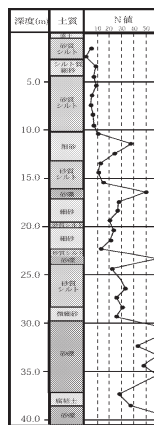


図11 建物および地盤の概要

#### b. 基礎の合理化

地盤条件より、本建物を設計する場合、通常の設計ではGL-35m~-40mに杭先端を支持させる支持杭基礎、あるいは摩擦杭基礎が考えられる。ここで支持杭基礎とすると杭長35~40m、



φ1000 (1400) ~1600 (2200) の拡底杭が159本必要となり、基礎のコストが大きくなる。また、摩擦杭基礎としても、杭は建物全荷重を支持する必要があるため、同様に基礎のコストが大きくなる。このため、本建物では、パイルド・ラフト基礎を適用することによる合理化がおこなわれた。

そこで本建物は、沈下抑止杭として場所打ちコンクリート直杭（アースドリル）φ1000~1800、12m（一部15m）をGL-6m~-18m及びGL-2m~-14mに159本打つことによるパイルド・ラフト基礎として合理化が行われた。（図11）

### C. コスト比較

本建物では、パイルド・ラフト基礎工法により、一般の支持杭基礎とした時に比べ、基礎全体コストの約25%低減、基礎工事期間の約25%短縮、杭工事の発生残土の約60%削減が実現した。コスト比較を表7に示す。

表7 基礎のコスト比較

基礎形式	パイルド・ラフト	支持杭
杭種	アースドリル	拡底アースドリル
杭径	φ1000~1800	φ1000~1600
杭長	15m	40m
杭本数	159本	159本
発生残土	3900m <sup>3</sup>	9750m <sup>3</sup>
コスト	75	100

## 5 まとめ

直接基礎、杭基礎につづく「第3の基礎形式」として、建物の要求性能の確保とコストダウンを同時に実現できる可能性をもつ「パイルド・ラフト基礎」について、調査を行った。

パイルド・ラフト基礎は、建物性能を確保し、かつコストパフォーマンスと環境負荷の低減を実現する合理的な基礎工法として、低層建物から超高層建物まで幅広い建物での適用が行われており、今後は公共建築工事においてもコスト低減技術として幅広い活用と展開が期待できる。

なお、本調査は(株)竹中工務店技術研究所、大成建設(株)建築技術研究所、(社)建築業協会地盤基礎専門部会から技術資料、写真等を提供していただき、建築基礎構造設計指針（日本建築学会）から図2、3を、建築基礎構造設計例集（日本建築学会）から図4・5・6を引用している。