

建物荷重による拡底杭の支持力機構

金谷 祐二 宮崎 祐助
森 脇 登美夫

Behavior and Bearing Capacity Mechanism of End-Expanded Cast-in-Place Concrete Pile under Actual Structure Weight

Yuji Kanatani Yusuke Miyazaki
Tomio Moriwaki

Abstract

This report describes the stresses in an actual pile from piling work to completion of the building on top, a period of about 2 years and a half. The purpose of this investigation was to obtain the behaviors and the bearing capacity mechanisms of actual piles from the results of stress changes during construction. The following were disclosed by the investigation. (1) The ratio of pile load to actual structure load during substructure work differs from the ratio during superstructure work. (2) Skin friction at the upper parts of piles acts to a lesser degree than at the lower parts because the ground at the upper parts is restrained by group piles, the foundation slab, and surrounding retaining walls.

概 要

この報告は、場所打ち鉄筋コンクリート拡底杭の施工時から躯体竣工時までの約2年半にわたる杭体応力の測定結果をまとめたものである。測定目的は、建物荷重の増加に伴う杭体応力の変化を調査し、基礎杭の支持力機構、すなわち杭先端地盤への到達荷重および周面摩擦力の稼働状況を明らかにすることである。調査の結果、(1) 地下部分施工時と地上部分施工時では、建物荷重に対する杭体の荷重分担率が異なること、(2) 単一杭の鉛直載荷試験と異なり、複数の杭、耐圧版および周辺の山留め壁などによって上部の地盤が拘束されているため、杭体上部と下部とでは周面摩擦力の稼働状況が違うこと、などが判明した。

1. まえがき

基礎杭の支持力機構は、これまでに多くの研究がなされ、かなり詳細なところまで解明されている。しかし、その研究対象は単一の杭であることが多く、長期間にわたって複数の杭の支持力機構を調査した例は数が少ない。特に、地中ばりや耐圧版に組み込まれた構造系として杭の支持力機構を研究・調査した例となると、ごく限られたものとなる。実際に供用されている基礎杭の研究・調査例の少ない理由として、まず、杭の施工時から竣工時までの少なくとも数年間にわたる長期計測が必要となることがあげられる。また、基礎杭が場所打ち鉄筋コンクリート杭の場合、コンクリートの水和熱・クリープ現象が杭体ひずみや応力に及ぼす影響など取扱いの難しい点もある。

この報告では、場所打ち鉄筋コンクリート拡底杭（以後、拡底杭と略称する）の施工時から躯体竣工時までの約2年半における杭体応力の測定結果から判明した、杭先端地盤への到達荷重や周面摩擦力について紹介する。

2. 地盤概要

測定を実施した工事場は、広島市を流れる太田川下流域に形成されたデルタのほぼ中央部に位置している。図-1は、敷地内で行なった土質調査結果を示したもので、地盤は、地表面から埋土層、砂層、粘土質シルト層、砂質シルト層および砂層の順で沖積層が続き、深さ28m付近から拡底杭の支持層でもあるN値50以上の洪積砂礫層が現われている。このうち、深さ10.9mから22.4mにある沖積粘性土層は非常に軟弱で、その一軸圧縮強度(q_u)は0.5~1.5 kgf/cm²の範囲にある。

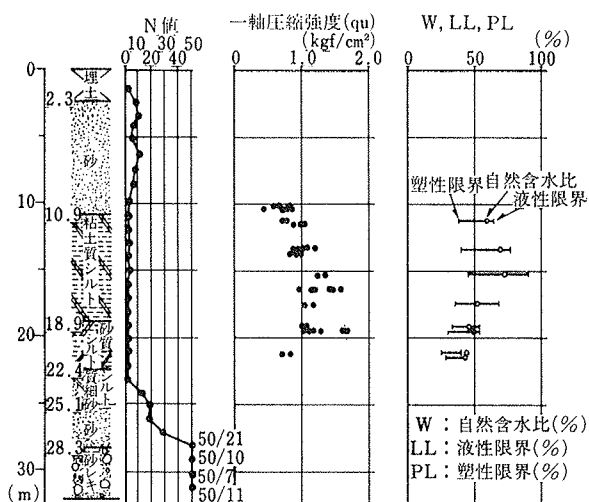


図-1 土質柱状図および土質試験結果

3. 調査内容

建物は地下1階、地上8階、塔屋1階の鉄骨鉄筋コンクリート造である。基礎杭には、軸部をベント工法、拡底部をリバース工法によって削孔する拡底杭を採用しており、施工本数は合計90本である。このうちの1本について杭体応力およびコンクリートの強度を調査した。

3.1. 計測杭

図-2は、杭体応力およびコンクリート強度の調査を行なった拡底杭（以後、計測杭と呼ぶ）の位置を示したものである。計測杭の断面は、図-3に示すように軸部径1.8m、拡底部分2.8mで、杭先端深さは29.8mである。主筋には、材質SD-35の異形鉄筋(D25)を20本使用し、また、帯筋は杭頭から2mの区間でD13を150mm@、以下杭先端までの区間では300mm@としている。計測杭の削孔は、昭和58年7月5日に行ない、翌々日の7月7日にコンクリート ($\sigma_{28}=240 \text{ kgf/cm}^2$) を打設した。

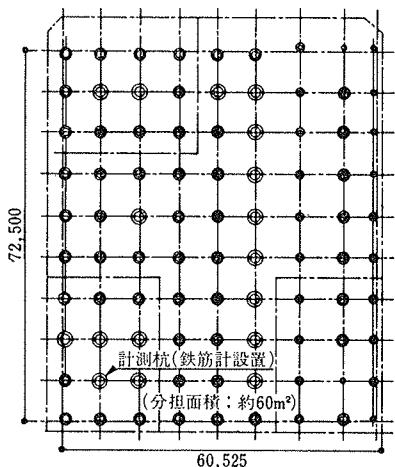


図-2 計測杭位置 (平面図)

3.2. 調査方法

3.2.1. 杭体応力 根切り期間中と躯体構築期間中における計測杭の鉄筋応力の測定には、温度測定も可能な鉄筋計を用いた。図-3は、計測杭に取付けた鉄筋計の

設置深さを示したものである。なお、この図には、計測杭の削孔時に確認した土質柱状図も示している。

場所打ちコンクリート杭の主筋には、コンクリート打設中から数箇月間、圧縮応力の発生することが知られている。この挙動も併せて調査するため、鉄筋計の測定は計測杭のコンクリート打設直前から始めた。結果の取りまとめにあたり、まず、計測杭のコンクリート打設直前の測定値を「仮初期値」として採用し、杭施工時から床付け時までの鉄筋応力を求めた。躯体構築時における計測杭の鉄筋応力は、床付け時の測定値を改めて「初期値」とし、設定し直した。

3.2.2. 杭体コンクリートの強度・弾性係数 計測杭のコンクリート強度とその弾性係数は、杭の施工時に採取した標準供試体と、床付け時(材齢:約150日)に計測杭全長にわたって採取したコア供試体について調査した。このうち、図-3に示すコア供試体の調査結果の一部によると、圧縮強度は設計基準強度(240 kgf/cm²)を満足する250~400 kgf/cm²の範囲内にあり、深さが増すに従って増加している。また、弾性係数(E_c)も同様に深さ方向に増加しており、その値は鉄筋計の測定結果から計測杭の到達軸力を求める際に使用している。

4. 調査結果およびその検討

ここでは、約2年半にわたる本設拡底杭の測定結果か

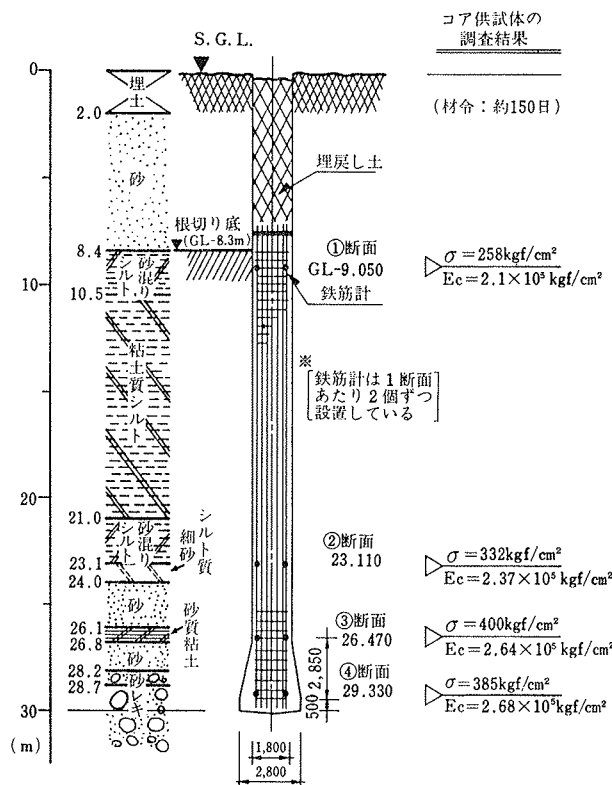


図-3 鉄筋計設置深さ・コア供試体調査結果

ら判明した杭体温度による応力への影響、杭体各部への到達軸力および周面摩擦力について紹介する。

4.1. 杭施工時・根切り期間中（昭和58年7月7日～昭和58年12月9日）の挙動

4.1.1. 温度変化による鉄筋応力への影響（温度応力）

図一4は、計測杭の施工時から40日間の鉄筋応力および杭体温度（以後、温度と略称する）の経日変化をまとめたものである。鉄筋にはコンクリート打設中から圧縮応力が生じ始め、打設終了から1日半経過した時点で、100~400 kgf/cm²に達し、以後、漸減する傾向にある。この鉄筋応力の変化は、同図に示す温度変化に類似しており、両者は密接な関係にあることが分かる。図一5は、今回の測定における鉄筋応力と温度の関係、すなわち、温度応力を検討するため、根切り工事開始までの温度変化量(ΔT)と鉄筋応力の変化(ΔS)をまとめたものである。これによると、両者間にはかなり明確な相関関係が認められ、各断面とも、1°Cの温度上昇に対して約10

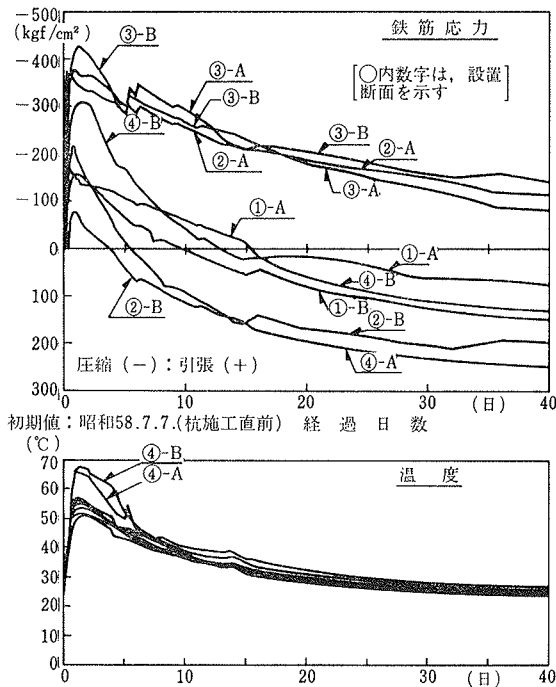
kgf/cm²の圧縮応力の発生がみられる。以後、計測杭の鉄筋応力はこの温度応力で補正した。

4.1.2. 根切り期間中の杭体応力 図一6は、測定開始から根切り終了時（床付け時）までの平均鉄筋応力と温度の経日変化をまとめたものである。杭のコンクリート打設直後に60~70°Cまで上昇した温度は、打設から約4週間急激に低下しているが、これ以後の温度低下量は少ない。一方、杭の施工後、定常状態を保っていた鉄筋応力は根切り開始と同時に引張側へ移行し始め、杭上方の土被り圧の除去により、床付け時にはいずれの断面においても50~250 kgf/cm²の引張応力が生じている。

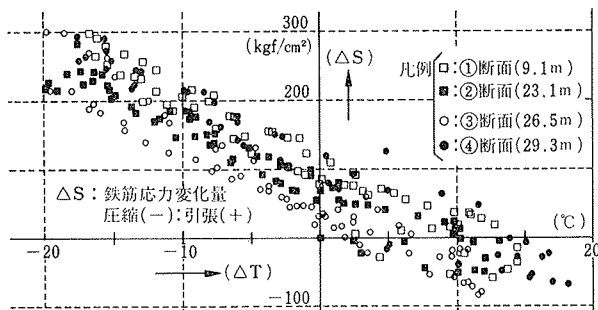
4.2. 躯体構築期間中（昭和58年12月9日～昭和60年7月5日）の挙動

躯体工事は、昭和58年12月10日の耐圧版の施工に始まり、昭和60年3月に塔屋階のコンクリート打設をもって終了した。この時点までの計測杭への建物荷重は、鉄骨とコンクリート重量を併せた固定荷重1,127 tf/本である。また、杭1本あたりの設計荷重は、これに積載荷重230 tf/本(≒3.8 tf/m²)を加えた1,357 tf/本である。

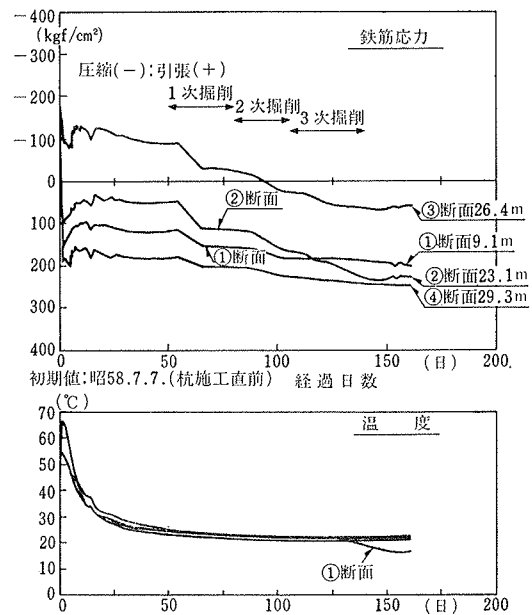
4.2.1. 鉄筋応力・温度 図一7は、昭和58年12月9日の計測値を初期値とし、温度補正した各断面の平均鉄筋応力、温度および建物荷重の経日変化である。計測杭の温度のうち、外気温の影響が大きいのは①断面で、1年間周期の定期的な変化が認められ、年間較差は約8°Cである。これに対して②断面以深の温度は常に減少傾向を示しているが、この間の温度差は2°C前後とわずかである。図一7のうち、杭先端部を除くいずれの断面においても工事の進行に伴い、鉄筋応力は徐々に圧縮側へと増加している。しかし、その過程は複雑で、地下部分施工



図一4 鉄筋応力・温度の経日変化（根切り開始まで）



図一5 鉄筋応力変化量(ΔS)と温度変化量(ΔT)の関係



図一6 根切り期間中の鉄筋応力・温度

時と地上部分施工時では様相を異にしている。すなわち、耐圧版の施工から1階床打設までの期間の鉄筋応力は建物荷重にかなりよい対応を示しているが、地上階（1階～5階）施工時の鉄筋応力は建物荷重の増加に対して微増にとどまっている。6階以上の躯体施工時になると、鉄筋応力は再び増加傾向を示し始め、建物荷重にかなりよく対応している。躯体工事が終了すると、鉄筋応力は定常状態に入り、杭頭から順に、250 kgf/cm²、200 kgf/cm² および 150 kgf/cm² 前後の圧縮応力となっている。ただし、杭先端部の鉄筋応力は、わずかながら引張応力となっている。これは、計測杭が掘底杭であり、杭先端部の応力状態が普通の形状の杭と異なるためと考えられる。従って、以後の検討では便宜上、杭先端部の応力は考慮からはずしている。

4.2.2. 杭体軸力 図-8は、鉄筋応力から求めた計測杭の到達軸力と建物荷重の経日変化をまとめたものである。なお、この到達軸力は、床付け時に計測杭から採取したコア試供体の弾性係数 (iE_c: 図-3 参照) を用いて、下式によって算定したものである。

$$P_i = \varepsilon_i \times (E_s \cdot A_s + iE_c \cdot iA_c)$$

ここに、P_i: 各断面への到達軸力、ε_i: 各断面の平均鉄筋応力から求めたひずみ、A_s: 鉄筋の断面積、iA_c: 各断面のコンクリート部分の断面積である。

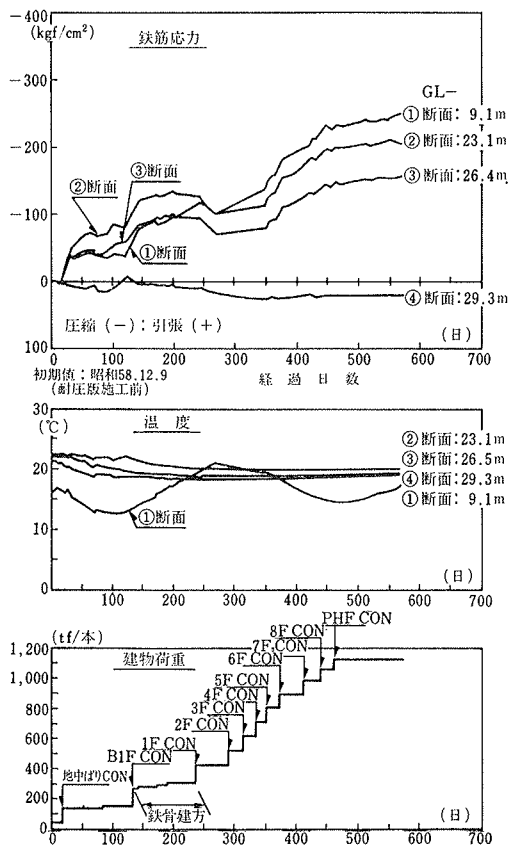


図-7 躯体施工時の鉄筋応力・温度・建物荷重

図-8によると、耐圧版施工時から鉄骨建方終了時までの躯体工事前半では、①断面（杭頭）の荷重が②断面（杭中間）および③断面（掘底部天端）の軸力より下まわっているものの、建物荷重とほぼ同等の軸力が各断面に発生している。これに対して、地上部分施工時の挙動は複雑である。例えば、1階床施工によって建物荷重が約120 tf 増えているにもかかわらず、いずれの断面においてもその到達軸力は逆に100 tf 程度減少している。しかし、2階床施工以後になると、再び到達軸力は増加し始め、躯体工事が終了時には、①断面で650 tf、②断面で600 tf、そして③断面で500 tf 程度となっている。この時点における建物荷重は固定荷重 (1,127 tf) によるものと考えられ、計測杭頭部に作用する荷重はこれより約500 tf 少ない。今回の調査では、計測杭の沈下および耐圧版下の地盤反力の測定を行っていないので断定はできないが、1階床打設後（建物荷重: 約400 tf）で、基礎杭に沈下が生じ始め、このため、建物荷重に対する基礎杭の荷重分担率が変わったのではないかと考えられる。すなわち、図-9①-1に示すように、耐圧版、B1階床および鉄骨重量などの躯体工事前半における建物荷重は、その大半が基礎杭によって負担されている。しかし、1階床より上方の地上部分施工時には、増加荷重の一部が、耐圧版下の地盤および外周山留め壁を通じて周辺地盤へ流れ、基礎杭の荷重分担率が大幅に減少したものと推定される（図-9①-2参照）。また、根切り期間中稼働していたディープウェルによる排水をB1階躯体工事中に停止しており、図-9①-3に示すように、地下水水位回復による浮力の影響も無視できない。なお、回復地下水水位をGL-3mとすると、基礎底面には5 tf/m²の浮力が働き、これに計測杭の分担面積を乗じると300 tf/本の揚力となる。

4.2.3. 周面摩擦力 図-10は、躯体構築中の到達軸力分布をまとめたものである。杭頭荷重にあたる①断面の軸力と建物荷重との差は、前項でも説明したように、地下部分施工時とその後の地上部分施工時では大きな違

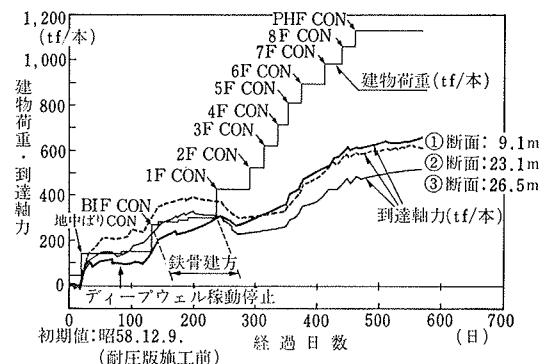


図-8 到達軸力・建物荷重

いがみられる。

図-10で、斜線を施した部分は土質調査結果をもとに、建築学会基礎構造設計規準の提案式によって算出した周面摩擦力を示したものである。この提案式によると①～②断面間には $q_u/2$ に相当する 2.5 tf/m^2 、②～③断面間は $N/5$ に相当する 4 tf/m^2 の周面摩擦力となり、①～③断面間にはこれに杭周面積を乗じた約 275 tf の周面摩擦力が働くことになる。

これに対して、竣工時（昭和60年7月5日）の鉄筋応力から求めた到達軸力は、①断面で 650 tf 、③断面で 500 tf となっており、①～③断面間の周面摩擦力は上記周面摩擦力の約55%にあたる 150 tf しか発生していない。また、この周面摩擦力もその70%が②～③断面間で発生しており、①～②断面間では少ない。今回の測定結果でこのような周面摩擦力分布を示したのは、図-11に示すように、群杭効果による杭相互間の地盤の拘束が原因と考えられる。すなわち、単一杭の鉛直載荷試験時とは異なる、複数の

杭、耐圧版および周辺の山留め壁などによって拘束されている上部の地盤は、杭の変形に追随し、周面摩擦力が十分に移動しない。このため、建物荷重に対して周面摩擦力が移動するのは、群杭効果による拘束の少ない杭先端部分に限られたものと考えられる。

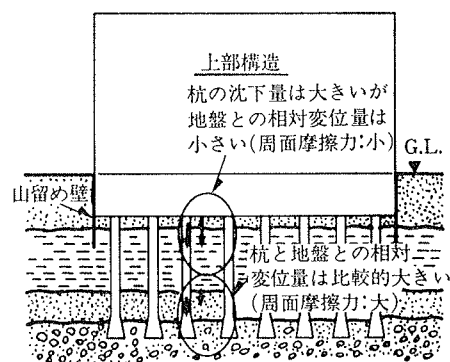


図-11 基礎杭の状況

5. まとめ

2年半にわたる掘底杭の応力測定結果から判明した項目についてまとめると以下のようなになる。

(1) 杭打設直後のコンクリートの水和熱により、杭鉄筋には圧縮応力が発生する。今回の測定でこの圧縮応力は 1°C の温度上昇に対して約 10 kgf/cm^2 であった。

(2) 地下部分と地上部分施工時では基礎杭の荷重分担率が異なる。地下部分施工時には、建物荷重の大半がそのまま基礎杭によって分担されるのに対して、地上部分施工時には基礎杭の沈下によって、建物荷重の一部が耐圧版下の地盤にも流れ、基礎杭の荷重分担率が減っている。また、地下水位の高い場合には、その変動による浮力の影響も無視できない。

(3) 基礎杭上部の周面摩擦力は、杭先端部分に比べて少ない。複数の杭、耐圧版および周辺の山留め壁などによって拘束されている杭上部の地盤は、基礎杭との相対変位量が少なく、周面摩擦力は十分に働かない。これに対して、杭先端部付近の地盤は杭上部に比べて拘束も少ないため、大きな周面摩擦力が働く。

今回は、建物施工時の基礎杭の支持力機構に関する定性的な現象の報告にとどまった。なお、竣工後2年経過した現在もこの測定は継続している。機会をみて、長期荷重下における基礎杭の挙動についても報告したい。

謝辞

ここで紹介した基礎杭の応力測定は、郵政大臣官房建築部設計課で立案・計画されたものである。また、この報告のとりまとめにあたり、貴重な御指導・御助言をいただいた同設計課担当の方々には深く感謝の意を表します。

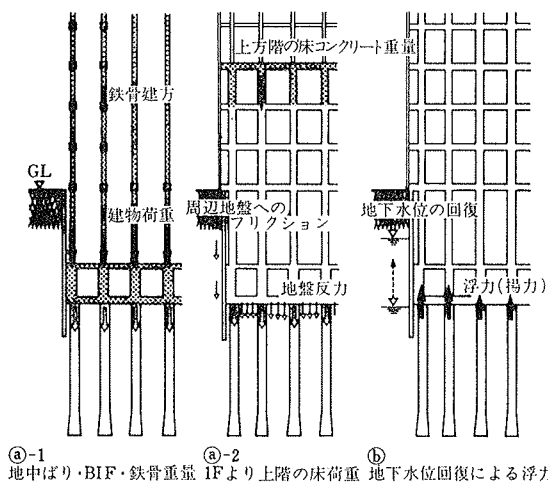


図-9 基礎杭の荷重分担状況

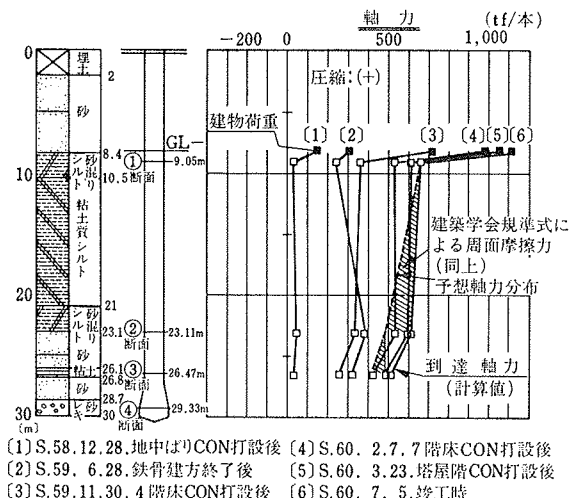


図-10 到達軸力分布