
第3編 調査と載荷試験

第 3 編 調査と載荷試験

第3編 調査と載荷試験	1
3.1 調査全般	1
3.1.1 一般	1
3.1.2 調査の種類	1
3.2 地盤調査	2
3.2.1 調査計画	2
3.2.2 ボーリング	6
3.2.3 サウンディング	6
3.2.4 サンプルング	10
3.2.5 土質試験	10
3.2.6 物理探査法	11
3.2.7 孔内水平載荷試験	12
3.3 載荷試験	14
3.3.1 試験の目的と種類	14
3.3.2 鉛直載荷試験	15
3.3.3 水平載荷試験	28

第3編 調査と載荷試験

本編の構成にあたっては、主に以下の諸基準によっている。

(公社)日本道路協会

「道路橋示方書・同解説、I編～V編」(平成29年)(以下「道示」という)

「杭基礎設計便覧」(令和2年)(以下「杭基礎設計便覧」という)

(公社)日本港湾協会

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(平成30年)(以下「港湾基準」という)

(一社)日本建築学会

「建築基礎構造設計指針」(2019)

(公社)地盤工学会

「地盤調査の方法と解説」(令和2年)

「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」〔第一回改訂版〕(2002)

「杭の水平載荷試験方法・同解説」〔第一回改訂版〕(2010)

(公財)鉄道総合技術研究所

「鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物」(平成24年)

3.1 調査全般

3.1.1 一般

調査は、杭基礎を安全かつ経済的に設計・施工・維持管理するために必要な情報を得る目的で実施する。必要とされる調査の程度は、計画されている構造物の規模や重要度、対象地盤の状況、施工箇所の立地条件などを総合的に判断したうえで決定しなければならない。

なお、最新の道示、杭基礎設計便覧、港湾基準では、維持管理の観点が新たに加えられており、維持管理条件に関する調査項目などが追加されている。

3.1.2 調査の種類

基礎の設計にあたっては、いくつかの条件が示される。それらの条件は、次の5つに大別される。

- 1) 敷地条件 (位置、広さ、高低、将来の条件変化など)
- 2) 環境条件 (隣接構造物、騒音・振動などの対策、空中架線、地下埋設物など)
- 3) 地盤条件 (土層構成、土質性状、地下水の状況、地下障害物など)
- 4) 上部工構造の条件 (用途、規模、形状、構造、剛性など)
- 5) 維持管理の条件 (使用・管理条件、点検診断・維持補修工事への配慮、耐久性への配慮など)

これらの条件は、いずれも施工性や経済性に関連しており、調査結果をもとに基礎形式を選定することになる。そのため、手戻りを防ぐためにも調査は慎重に行い、得られた結果を十分に把握する必要がある。

3.2 地盤調査

3.2.1 調査計画

1. 一般

地盤調査は、杭基礎の設計および施工を、合理的かつ安全に行い、さらにそれを有効に機能させるために、地盤の諸性状について正確な情報を得ることを目的に実施するものである。杭基礎を採用するのは、一般に重要構造物あるいは重量構造物である場合が多く、十分な調査が望まれる。

2. 調査順序

調査は通常、予備調査と本調査に分けて行われ、必要に応じて補足調査を実施する。

予備調査は、資料調査を主体とし、必要に応じて現地調査を行う。その成果は、計画、比較設計などの資料として用いられるとともに、本調査での適正な内容を決定する手掛りとなるものである。

本調査は、詳細設計および施工に必要な資料を得るために行うものであり、予備調査の結果を踏まえたうえで、より具体的な地盤の諸情報を得るのが目的である。基礎の設計は、所要の性能を確保できるよう施工が行われることを前提としており、施工時に不具合が生じないように、施工の安全性、確実性等に十分配慮がなされた設計をするため、調査は綿密に行う必要がある。

補足調査は、本調査で十分把握できなかった点の再調査や、調査漏れのあった項目の追加調査などをいう。橋梁基礎設計における調査フローの例としては、杭基礎設計便覧の P.47 に記載されている図-Ⅱ.1.1（調査フロー）が参考になる。なお、必要となる調査は分野で異なるため、道路、鉄道、建築、港湾構造物における諸条件に応じた適切な方法を個別に検討する必要がある。

3. 調査方法の選定

地層構造、地盤の工学特性を把握するためにボーリング、サウンディング、室内土質試験、地下水調査、室内土質試験、物理探査などの調査が行われる。基礎の設計に必要な調査・検討事項とその評価方法については、杭基礎設計便覧の P.63 に記載されている表-Ⅱ.1.6（基礎の設計・施工に際して必要な調査項目と調査手法の関係）や P.75 に記載されている表-Ⅱ.2.1（主な地盤調査方法）が参考になる。これらの調査により、設計に用いる地盤定数の特性値を適切に求める必要がある。

4. 調査範囲と調査深度

前述のとおり、地盤調査は通常、予備調査と本調査に分けて行われる。いずれも現地の状況を系統的にかつ効率的に把握するために、設計の進捗に応じて計画的に実施しなければならない。また予備調査から本調査へと段階的に調査の密度や精度を高めていくことが一般的である。

杭基礎のための地盤調査には、標準貫入試験、試料土のサンプリングなどを併用したボーリング調査が最も有効な手段である。ただし、ボーリング調査はあくまで点的な調査であるため、調査結果をもとに施工位置における地盤条件を二次元的・三次的に正確に把握するには、適切な調査位置・数量を決定することが重要である。

(1) 調査範囲

予備調査は、主として計画地点の地盤構成を把握することを目的として行われる。資料調査（地質図、地形図、土地利用図、災害記録等）や現地踏査、ボーリング等による調査を、計画地の条件に照らし合わせ適切な範囲で行う必要がある。

ボーリング位置の選定にあたっては、あらかじめ地形図、航空写真、計画地周辺の既存の地質資料を収集し、その内容を踏まえ、不足する情報や必要な情報を得ることを考慮して選定する。地層の傾斜や地形の状況の複雑さなどによっては、ボーリング位置を密にする。予備調査では、最小限必要なボーリング調査を実施し、その結果をもとに追加の必要性や以降の本調査に適切に引き継いでいくことが重要である。

本調査は、一般に計画位置やその基礎形式等の条件が決定された段階で実施されるものであり、各地層の地盤定数、分布、支持層の状態等について、詳細設計に必要な情報を得る必要がある。

(2) 調査深度

基礎の支持地盤について支持力や沈下の検討を行うためには、少なくとも構造物荷重の影響が及ぶ深さまでの地盤条件を把握しておく必要がある。

杭基礎の場合には、予想される杭先端位置を荷重作用面と考え、その位置から構造物基礎幅の1.5～2倍の深さまでの調査を行うことが基本となる。ただし、洪積層あるいはそれより古い時代の地層を支持層とする支持杭においては、支持層下に有害な沈下を生じるような地層が存在することは希であり、杭先端位置から5～10m程度の深さまで支持層が連続していることを確認すれば十分である場合が多い。一方、沖積層を支持層とする場合には、たとえその層がN値50以上の層であっても、その下部に軟弱な層が存在する可能性があるため、沖積層全層にわたって調査を行っておく必要がある。

地盤調査の範囲や深度は、地盤の堆積環境により異なる。また道路、鉄道、建築、港湾の対象構造物ごとに目安等が定められている。基本的には、それら基準に示された調査方法をもとに計画し、実行していくことが必要である。ここでは、各基準の調査の目安を[図3.2.1](#)、[表3.2.1](#)～[表3.2.4](#)に示す。なお、基準により予備調査は概略調査や先行調査として記載されている。

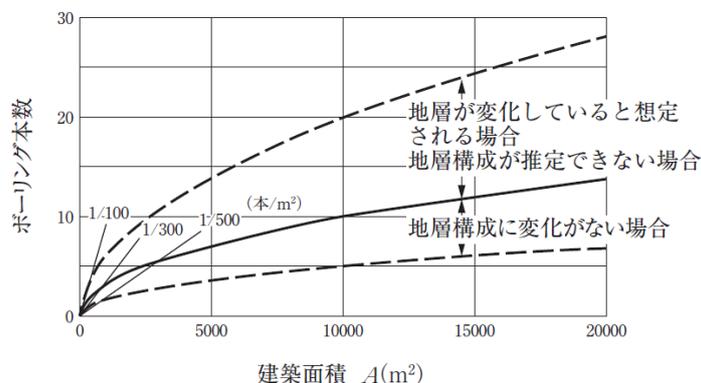


図 3.2.1 ボーリング本数の目安 (出典 3-①)

表 3.2.1 建築構造物基礎、橋梁基礎の調査密度

	調査地点の配置密度	調査深度
建築構造物基礎	・ 建築面積が小さい場合でも 2 本以上	・ 杭先端から杭先端径の 5 倍程度の深さ ・ 群杭の沈下を検討する場合、杭先端から建物幅の 1.5~2.0 倍の深さ
橋梁基礎	・ それぞれの橋脚および橋台位置での調査が原則 ・ 支持層の傾斜が確認される場合は、1 基につき数箇所	・ 基本的には杭先端から杭径の 3.0 倍の深さ (ただし、全ての下部構造の設置位置で調査する必要はない) ・ 支持層が洪積層以前の場合は杭先端から 5~10m の深さ ・ 支持層が沖積層の場合は沖積層全層の深さ

表 3.2.2 港湾におけるボーリングおよびサウンディングの調査位置の間隔の目安 (出典 3-②)

(成層状態が水平方向にも鉛直方向にも比較的均一な場合)

(単位 : m)

		法線方向		法線直角方向			
		配置間隔		配置間隔		法線からの距離 (最大)	
		ボーリング	サウンディング	ボーリング	サウンディング	ボーリング	サウンディング
概略調査	広範囲の地域	300~500	100~300	50	25	50~100	
	小範囲の地域	50~100	20~50				
詳細調査		50~100	20~50	20~30	10~15		

(成層状態が複雑な場合)

(単位 : m)

		法線方向		法線直角方向			
		配置間隔		配置間隔		法線からの距離 (最大)	
		ボーリング	サウンディング	ボーリング	サウンディング	ボーリング	サウンディング
概略調査		50 以下	15~20	20~30	10~15	50~100	
詳細調査		10~30	5~10	10~20	5~10		

表 3.2.3 河川における調査の標準的な位置および頻度 (出典 3-③) に加筆修正)

調査の段階 地盤調査の種類	概略調査	詳細調査	
		軟弱地盤調査	透水性地盤調査
サンプリング および 土質試験	—	計画線に沿って 1 箇所/100m 規模の小さな軟弱地盤の場合は代表点で 1 箇所 深さ方向 1 個/2m または土層の変化が著しい場合は 1 個/土層	計画線に沿って 1 横断/100m 横断方向で 表のり先 1 箇所 裏のり先 1 箇所 深さ方向 1 個/2m または土層の変化が著しい場合は 1 個/土層
現場透水試験	ボーリング 1 孔に 1 箇所	—	計画線に沿って 1 横断/100m 横断方向で 表のり先 1 箇所 裏のり先 1 箇所 深さ方向 1 個/土層

表 3.2.4 鉄道構造物における先行調査、本調査の間隔の目安（出典 3-④）

構造形式		場所	先行調査間隔	本調査間隔
高架橋		広い平野	500m	100～250m 以下
		狭い平野	200m	50～100m 以下
		谷間	100m	20～50m 以下
		台地、丘陵地	200m	50～100m 以下
橋梁	長大橋梁		両橋台のほか、300m 程度の間隔の基礎位置	残りの基礎位置
	小橋梁		橋台 1 点	他方橋台 1 点

5. 特殊な条件における地盤調査

軟弱地盤、地震時に不安定となる地盤、山地部、地すべり地で建設が予定されている場合や、近接施工となる場合など、特殊な条件における調査にあたっては、既存資料、地形・地質、周辺環境などに特に留意する必要がある。これらの特殊条件下における地盤調査の概要を表 3.2.5 に、液状化の可能性による地盤分類は、道示 IV 下部構造編の P.15 に記載されている表-解 2.4.1（地形区分と液状化の可能性）が参考になる。

表 3.2.5 特殊条件下における地盤調査の概要

	調査・検討内容		
	既存資料	地形・地質・地盤	周辺地盤・施工条件
軟弱地盤	<ul style="list-style-type: none"> 土質柱状図・地層断面図 周辺での工事例 構造規模 土質定数の評価 施工方法 	<ul style="list-style-type: none"> 圧密沈下 負の周面摩擦力 側方移動 土留めや締切り壁の安定 	<ul style="list-style-type: none"> 振動伝播 地盤変位の増大 地下水の汚濁 地下埋設物 近接構造物
地震時に不安定となる地盤	<ul style="list-style-type: none"> 液状化を判定するための調査。 既存の地震時における地盤変状。 臨海部の水際線近傍で側方流動が生じる可能性がある地点で計画する場合は液状化や流動化する可能性のある地層の分布状況、護岸の構造諸元、現地形および将来の土地の利用状況、地下水位等の調査を行う。 		
山岳地盤	<ul style="list-style-type: none"> 地すべり 斜面崩壊 土石流 周辺の災害事例 	<ul style="list-style-type: none"> 正確な地形状況 岩盤の評価 	<ul style="list-style-type: none"> 工法 機械の選定 仮設作業台の必要性 資機材の搬入搬出経路
地すべり地	<ul style="list-style-type: none"> 周辺の地形 周辺の地質 周辺の地盤構造 既存の災害履歴、地盤変状 	航空写真により以下の内容について判読する。 <ul style="list-style-type: none"> 地すべりの現象・前兆・痕跡 地質・地質構造 植生の状況 地すべり機構と地下水状況についての地質調査および地すべりの状況を把握するための計測調査を行う。	
近接施工	<ul style="list-style-type: none"> 既存構造物の変状事例 対策事例 現場計測事例 	<ul style="list-style-type: none"> 既設および新設構造物周辺の地盤状況の十分な把握 対策工のための調査試験 	<ul style="list-style-type: none"> 既設構造物の諸元 既設構造物の許容変位の決定 老朽化による耐力低下の確認

3.2.2 ボーリング

ボーリングは、地層構成や地下水位の把握に加え、後述するサンプリング、サウンディングなどの調査を行うための手段でもある。したがって、ボーリングの方法や孔径は、実施するサンプリング方法、原位置試験方法に応じて適切に選定する必要があり、一般的には乱れが少ないとされるロータリー式のものが使用されている。図3.2.2にロータリー式ボーリングマシンの概要図を示す。

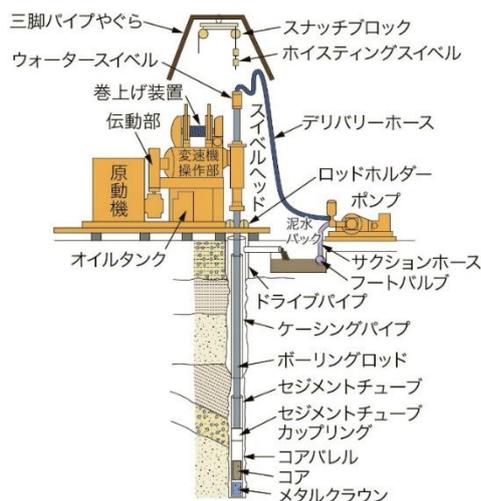


図 3.2.2 ロータリー式ボーリングマシン概要図 (出典 3-⑤)

3.2.3 サウンディング

サウンディングとは、ロッドに取り付けた抵抗体を地中に挿入し、回転・貫入・引抜きなどの抵抗から土層の性状を調査する方法であり、標準貫入試験、各種のコーン貫入試験、スクリューウェイト貫入試験 (旧スウェーデン式サウンディング試験)、原位置ベーンせん断試験などがある。図3.2.3に標準貫入試験装置の概要図を、図3.2.4にコーン貫入試験装置の概要図を示す。

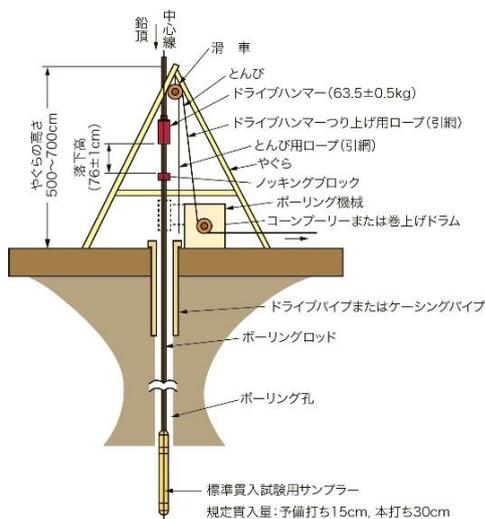


図 3.2.3 標準貫入試験装置概要図 (出典 3-⑥)

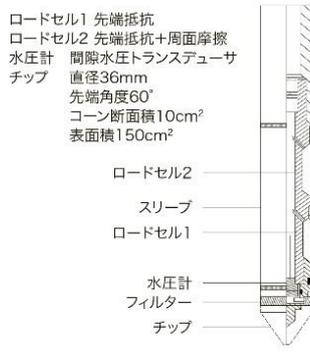
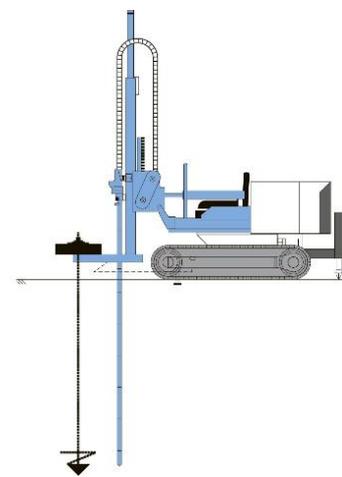


図 3.2.4 コーン貫入試験装置概要図



サウンディングは、その簡便さと経済性から地盤調査の諸試験の中で最初に実施されることが多く、地盤の概況を把握し、ボーリング調査の補足を行うものであり、標準貫入試験が最も一般的である。標準貫入試験の結果は、原位置での土の硬軟、締まり具合、土層構成の判定に用いられる。また、測定されたN値から種々の土質定数を経験式により推定することが可能である。

標準貫入試験（JIS A 1219）は、質量 $63.5\text{kg} \pm 0.5\text{kg}$ のハンマーを高さ $760\text{mm} \pm 10\text{mm}$ から自由落下させ、サンプラーを 30cm 貫入させるのに要する打撃回数を測定する試験であり、この打撃回数をN値として表す。また、打ち込むサンプラーから土試料の採取が可能であり、肉眼による観察および物理試験用試料として利用することができる。標準貫入試験で得られるN値と土質定数の関係は、表 3.2.6(1)、(2)に示す。

コーン貫入試験（Cone Penetration Test）は、図 3.2.4 に示す先端が円錐状のコーンプローブを静的に地盤に貫入させることで、標準的には先端抵抗 q_c 、周面摩擦 f_s および間隙水圧 u の3成分を計測する地盤調査方法である。これらの計測値から、土層構成や厚さ、地盤強度を簡便かつ連続的に求めることができる。日本ではあまり一般的ではないが、国際的には定着した原位置試験方法であり、コーンを機械的に貫入し電気式計測により人為的なばらつきの少ないデータを得ることができる特徴がある。試験結果からは、土質分類をはじめ支持力、圧密沈下、液状化などの検討をすることもできる。また、近年では3成分以外のセンサーを組み合わせることにより、PS 検層や地盤汚染調査などが同時に実施できる多成分コーンも開発されている。

表 3.2.6(1) N 値と土質定数との関係

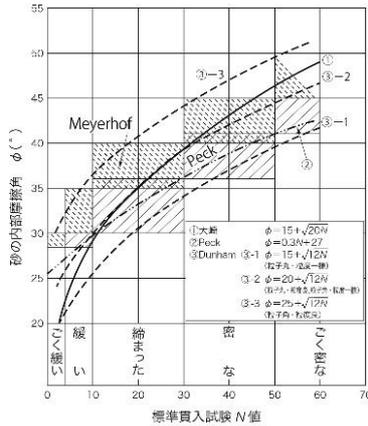
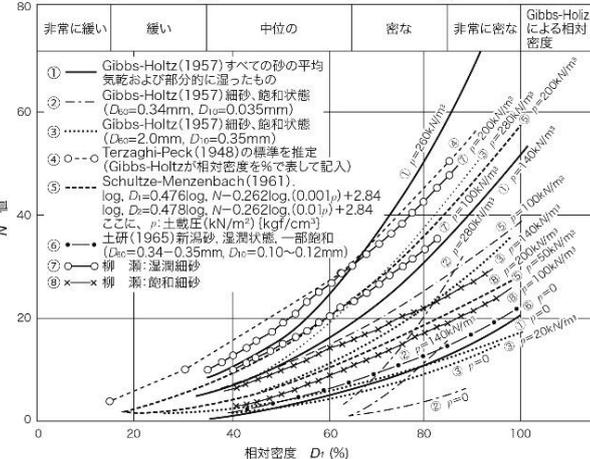
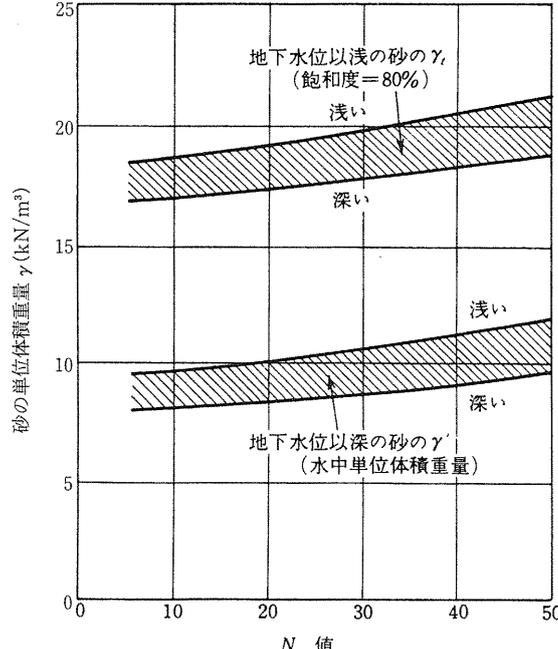
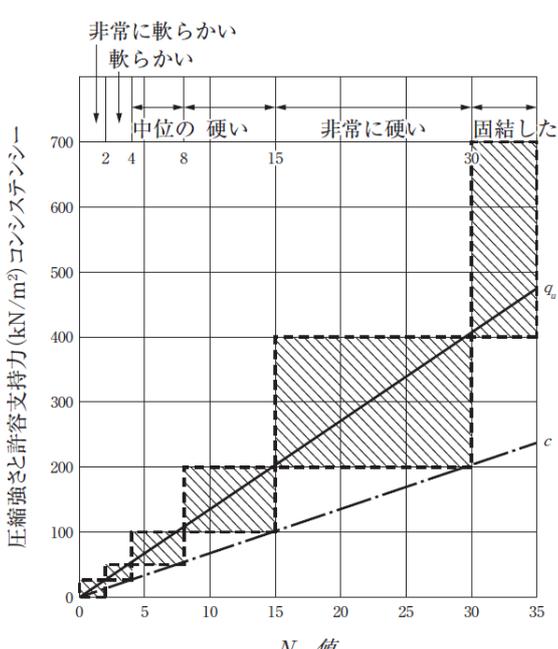
項目	内容																										
① 砂地盤のせん断抵抗角、相対密度の推定	<p>Terzaghi&Peck Meyerhof Dunham 大崎 他 の各式のまとめ</p> <p style="text-align: center;">砂の相対密度、せん断抵抗角と N 値との関係 (出典 3-⑦) に加筆修正)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">N 値</th> <th rowspan="2">相対密度 (relative density) $D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$</th> <th colspan="2">内部摩擦角 ϕ (度)</th> </tr> <tr> <th>ベックによる</th> <th>マイヤー-ホフによる</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0~4</td> <td>非常に緩い (very loose)</td> <td>0.0~0.2</td> <td>28.5以下</td> </tr> <tr> <td>4~10</td> <td>緩い (loose)</td> <td>0.2~0.4</td> <td>28.5~30</td> </tr> <tr> <td>10~30</td> <td>中位の (medium)</td> <td>0.4~0.6</td> <td>30~36</td> </tr> <tr> <td>30~50</td> <td>密な (dense)</td> <td>0.6~0.8</td> <td>36~41</td> </tr> <tr> <td>50以上</td> <td>非常に密な (very dense)</td> <td>0.8~1.0</td> <td>41以上</td> </tr> </tbody> </table>  <p style="text-align: center;">砂のせん断抵抗角 ϕ と N 値との関係 (出典 3-⑧)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>(1) 道路橋示方書</p> $\phi = 4.8 + \ln\left(\frac{170N}{\sigma'_v + 70}\right) + 21 \quad (N > 5)$ <p>(2) 港湾の施設の技術上の基準</p> $\phi = 25 + 3.2 \sqrt{\frac{100N}{70 + \sigma'_v}}$ <p>(3) 鉄道構造物等設計標準基礎構造</p> $\phi = 1.85 \left(\frac{N}{0.01\sigma'_v + 0.7}\right)^{0.6} + 26 \quad (N > 5)$ <p style="text-align: center;">$\phi = 0.5N + 24$ (地震時の上限値)</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>(4) 建築基礎構造設計指針</p> $\phi = \sqrt{20N_1 + 20} \quad (3.5 \leq N_1 \leq 20)$ $\phi = 40 \quad (20 < N_1)$ <p>ただし、$N_1 = \sqrt{98/\sigma'_v} \times N$</p> <p>ここに、 ϕ : せん断抵抗角 (°) σ'_v : 有効上載厚 (kN/m²)</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">有効上載厚を考慮した N 値とせん断抵抗角の関係 (出典 3-⑨)</p>	N 値	相対密度 (relative density) $D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$	内部摩擦角 ϕ (度)		ベックによる	マイヤー-ホフによる	0~4	非常に緩い (very loose)	0.0~0.2	28.5以下	4~10	緩い (loose)	0.2~0.4	28.5~30	10~30	中位の (medium)	0.4~0.6	30~36	30~50	密な (dense)	0.6~0.8	36~41	50以上	非常に密な (very dense)	0.8~1.0	41以上
N 値	相対密度 (relative density) $D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$			内部摩擦角 ϕ (度)																							
		ベックによる	マイヤー-ホフによる																								
0~4	非常に緩い (very loose)	0.0~0.2	28.5以下																								
4~10	緩い (loose)	0.2~0.4	28.5~30																								
10~30	中位の (medium)	0.4~0.6	30~36																								
30~50	密な (dense)	0.6~0.8	36~41																								
50以上	非常に密な (very dense)	0.8~1.0	41以上																								
藤田の提案	 <p style="text-align: center;">N 値・有効上載厚と砂の相対密度との関係 (出典 3-⑩)</p>																										

表 3.2.6(2) N 値と土質定数との関係

項目	内 容																						
②砂質土の単位体積重量の推定	福岡の資料より	 <p>N 値と砂の単位体積重量の関係 (出典 3-11)</p>																					
③粘性土のコンシステンシーと強さ	Terzaghi&Peck の提案	<p>コンシステンシー、N 値および一軸圧縮強さの関係 (出典 3-12) に加筆修正)</p> <table border="1" data-bbox="598 1075 1380 1176"> <thead> <tr> <th>コンシステンシー</th> <th>非常に軟らかい</th> <th>軟らかい</th> <th>中位の</th> <th>硬い</th> <th>非常に硬い</th> <th>固結した</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N 値</td> <td>2 以下</td> <td>2~4</td> <td>4~8</td> <td>8~15</td> <td>15~30</td> <td>30 以上</td> </tr> <tr> <td>q_u (kN/m²)</td> <td>25 以下</td> <td>25~50</td> <td>50~100</td> <td>100~200</td> <td>200~400</td> <td>400 以上</td> </tr> </tbody> </table>  <p>N 値と粘土のコンシステンシー、一軸圧縮強さとの関係 (出典 3-13)</p>	コンシステンシー	非常に軟らかい	軟らかい	中位の	硬い	非常に硬い	固結した	N 値	2 以下	2~4	4~8	8~15	15~30	30 以上	q_u (kN/m ²)	25 以下	25~50	50~100	100~200	200~400	400 以上
コンシステンシー	非常に軟らかい	軟らかい	中位の	硬い	非常に硬い	固結した																	
N 値	2 以下	2~4	4~8	8~15	15~30	30 以上																	
q_u (kN/m ²)	25 以下	25~50	50~100	100~200	200~400	400 以上																	

3.2.4 サンプリング

サンプリングは、原地盤の一部を採取し、試料の観察と各種試験に供するために行う。使用するサンプラーには様々な種類があり、それぞれに特徴や適性地盤があるため、調査目的や予想される土質に応じて最適のものを選定する。地盤工学会で基準化され、一般的に広く採用されている固定ピストン式シンウォールサンプラーのうち、水圧式サンプラーによる試料採取の概要図を図3.2.5に示す。また、基準化はされていないものの、比較的実績の多い凍結サンプリングの方法例を図3.2.6に示す。

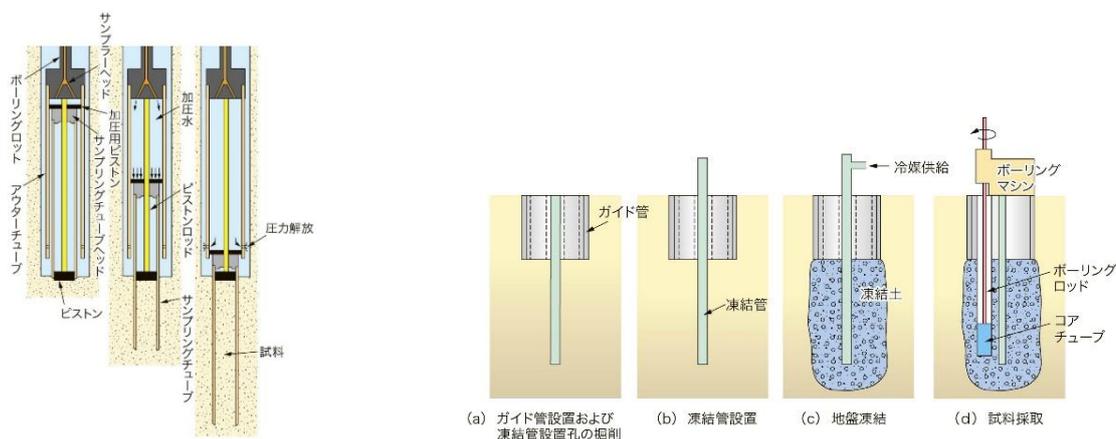


図3.2.5 水圧式サンプラー概念図 (出典 3-14) 図3.2.6 凍結サンプリング方法例 (出典 3-15)

土の性質が深さに応じて変化する場合には、同一のボーリング孔においても、それぞれの土質に応じて最適のサンプラーを組み合わせる使用することが合理的である。

なお、「港湾基準」では、性能照査に必要な各種定数を得るためには、粘性土に対してはサンプリングを、砂質土に対しては標準貫入試験を行うことが望ましいとされている。

3.2.5 土質試験

土質試験は、土粒子の比重、含水比、粒度、コンシステンシー、土の単位重量および間隙比などの土の物理的性質を求める試験、粘着力、土のせん断抵抗角、変形係数などの力学的性質を求める試験、および圧縮指数、圧密係数などの土の圧密特性に関する試験が一般に行われており、場合によっては土の透水試験や地震時の挙動を明らかにする目的で液状化試験も行われる。

物理的性質を求める試験は、複雑な土を判別・分類するとともに、他の試験値、測定値と照合して総合的な判定に役立つため、同一性状を示すと判断される層ごとに実施するのがよい。

力学的性質を求める試験は、地層の連続性や層厚などを考慮して試験位置を決める。同一の地層では、水平方向よりも深さ方向に性質が変化する傾向があるため、代表的な位置で深さ方向に連続して試験を行うのがよい。

圧密試験は、構造物による地中応力の増加や地下水の変動などにより生じる圧密圧力の増大によって、圧密沈下の発生有無を検討するために用いられる。

これらの土質試験結果は、土の不均一性、サンプリング、試験による乱れなどの影響を受けてばらつきが生じるため、土の物理的性質との相関を調べるなど、総合的に検討して用いることが重要である。

表 3.2.7 によく使用される土の性質を示す。また、橋梁基礎の概略設計において使用可能とされている土の単位重量は、道示 I 共通編の P.119 表-解 8.7.2 (土の単位体積重量) に記載されている。

表 3.2.7 土の性質

用語	簡単な説明	用途と概数値
土の単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	湿潤状態における土の単位体積重量 $\gamma_t = W/V$	土圧の計算、圧密の計算、安定の計算
一軸圧縮強さ q_u (kN/m ²)	一軸圧縮試験により求めた強度、即ち側圧を受けない供試体の最大圧縮応力度	土のせん断強さ、支持力、斜面安定土圧などの計算 粘性土地盤での概数値： 非常に軟らかい 40 軟らかい 60 中位 70 硬い 100
せん断抵抗 ϕ (度)	土中に働く垂直応力とせん断抵抗との関係を表す図において、直線と垂直応力の軸とのなす角	支持力、安定、土圧などの計算 砂質土地盤での概要値： ゆるい 25 中位 40 密な 45
粘着力 c (kN/m ²)	せん断面に働く垂直応力とせん断抵抗との関係を表す図において、垂直応力が零のときのせん断抵抗が粘着力である。	軟らかい 10~30 中位 30~60 かたい 40~100

3.2.6 物理探査法

物理探査とは、弾性波や電流などの物理現象を媒介して、地盤の内部の物理的性質や状態を地表から間接的に調査する方法をいう。また、一般的にはボーリング孔を利用して行う物理探査のことを物理検層または検層と呼称している。このような物理探査には、測定対象となる物理現象に応じて多種多様な方法が考案されており、現在も研究、開発が続けられている。ただし、これらの探査および検層で測定される各種物理量は、地盤の力学的、工学的性質を直接示すものではなく、あくまで地盤全体の状態を表す指標であることを認識しておく必要がある。そのため、他の調査と併用し、解釈に誤りが生じないように検討することが重要である。

図 3.2.7 に弾性波探査法の概要図を、図 3.2.8 に音波探査法の概要図を示す。

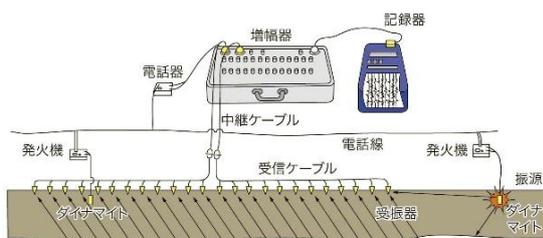


図 3.2.7 弾性波探査法概念図 (出典 3-16)

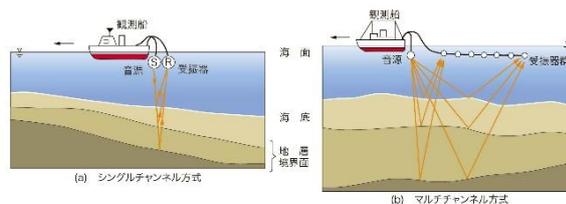


図 3.2.8 音波探査法の概要図 (出典 3-17)

3.2.7 孔内水平載荷試験

1. 試験方法の概要

孔内水平載荷試験は、ボーリング孔内において孔壁を加圧することにより、地盤の変形係数、降伏圧力、極限圧力を求める試験であり、原位置試験の中でも比較的信頼性の高い手法で、地盤の水平方向の変形特性を決定するために広く用いられている。試験の基本構成図を [図 3.2.9](#) に示す。

近年では、軟弱粘性土地盤や砂地盤において [図 3.2.10](#) に示すセルフボーリングプレッシャーメーター (SBP) を用いることで、高精度な試験結果が得られるようになってきている。SBP は自己掘削型の孔内水平載荷試験機であり、削孔を行った後、削孔部を引き抜かずそのまま孔内水平載荷試験を実施するものである。また、孔内水平載荷試験と類似するものとして、原位置せん断摩擦試験法 (SBIFT : Self Boring Typed In-situ Friction Test) がある。この試験は地盤の変形係数、せん断ばね定数、摩擦強度を一体的に測定することが可能である。[図 3.2.11](#) に SBIFT 試験の概略図を示す。

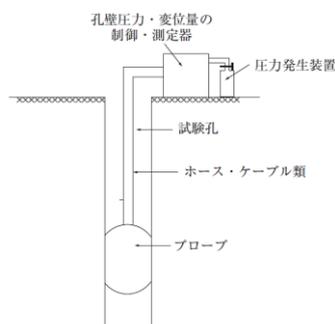


図 3.2.9 孔内水平載荷試験基本構成図 (出典 [3-18](#))

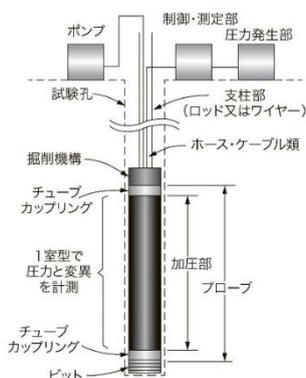


図 3.2.10 セルフボーリング型のプレッシャーメーター試験装置 (出典 [3-19](#))

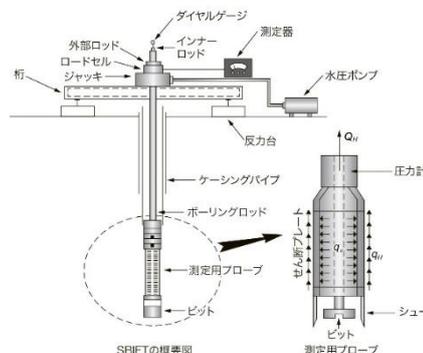


図 3.2.11 SBIFT 試験概要図 (出典 [3-20](#))

2. 試験結果の利用

孔内水平載荷試験から得られる測定値の性質や応用例については、これまで数多くの研究が行われており、これらによって得られた土質定数は、各種設計に広く利用されている。ここではその代表的な土質定数である変形係数 E について、以下にまとめる。

変形係数は、試験から直接得られる定数であり、標準貫入試験や室内土質試験との関係について、多くの研究がされてきた。標準貫入試験から得られる N 値と変形係数との関係の一例を [図 3.2.12](#) に示す。地盤材

料によらず $E = 700N$ (kN/m^2 ただし、 N は標準貫入試験から得られた対象地盤における N 値) という関係が近似的に示されている。

また、三軸試験や一軸試験から得られる変形係数と、孔内水平載荷試験から得られる変形係数の比較例を [図 3.2.13](#) に示す。両者は地盤材料によらず、良好な相関を示している。

なお、「道示」において、杭基礎の設計に用いる鉛直方向地盤反力係数および水平方向地盤反力係数は、各種の調査・試験結果により得られた変形係数を用いて、基礎の載荷幅などの影響を考慮して定めることが原則とされている。推定方法の一つとして、孔内水平載荷試験から得られた変形係数を用いて地盤反力係数を求めることが可能であるが、地盤反力係数は基礎の変位や地盤反力を算定するために必要な設計上の基本的な定数であるため、各種の調査・試験結果を十分検討して定めなければならない。

地盤反力係数の推定算出方法は本書第4編を参照されたい。

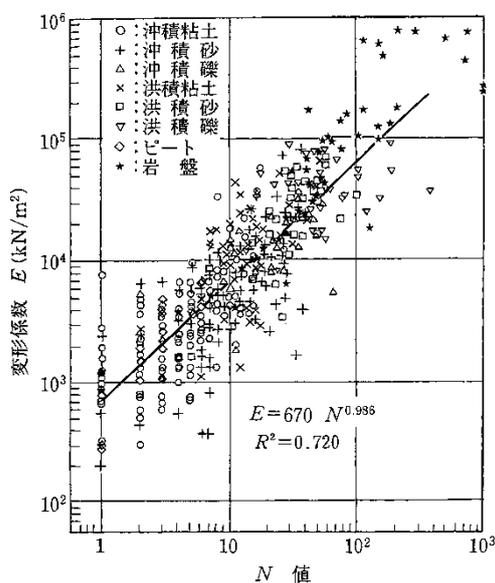


図 3.2.12 孔内水平載荷試験より得られた変形係数と N 値との関係 (出典 [3-21](#))

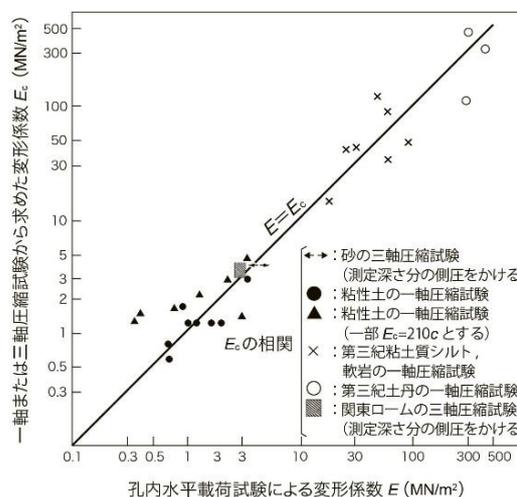


図 3.2.13 孔内水平載荷試験および室内試験から得られた変形係数の関係 (出典 [3-22](#))

3.3 載荷試験

3.3.1 試験の目的と種類

1. 試験の目的

基礎杭の載荷試験は、原位置試験の一種であり、杭の支持力を直接計測する手段である。現時点において、支持力を把握するための最も信頼性が高い方法とされている。前節までに述べた地盤調査による結果を基に、経験式などを用いて杭の支持力や荷重—沈下特性を精度よく予測することは、非常に困難である。そのため、現場で実際に施工された杭に対して載荷試験を実施することは、杭の設計において大きなメリットがある。

一般に載荷試験を実施する場合には、極めて重要な構造物や不同沈下が構造物の機能や性能に著しい影響を与える基礎杭、中間層で支持される基礎杭、支持層岩等で大きな支持力を期待する基礎杭の設計段階や施工時の確認としてや、杭の打設で異常が生じた場合の確認などがある。また、杭の支持力特性が基準化されていない杭施工法や、例えば大口径等、基準の適用範囲を超えて採用する場合には、載荷試験を行い、支持力特性を確認する必要がある。

載荷試験の実施にあたっては、以下の点に留意する。

- ① 試験杭は、調査、設計、杭打ち試験などの結果から、多数の杭を代表するにふさわしいものを選ぶ。
- ② 砂質地盤では、載荷後に比較的速やかに排水されるため、土の構造骨格の変化や力の伝達・再配分に多少の時間を要するものの、沈下量や降伏荷重が載荷時間によって大きく変化することはないとされる。一方、粘土層などの軟弱地盤では載荷時間の長短が排水に影響し、それによって沈下量、降伏荷重が変化するため、試験目的に応じて載荷時間を設定する。
- ③ 載荷にあたっては、試験杭の打込み後十分な養生期間（砂質土で5日以上、粘性土で14日以上を目安）をとり、杭周辺地盤が安定してから行う。

なお、載荷試験結果と併せて、地盤の状態や杭の施工記録を整理・保存しておく必要がある。これらの記録は、実杭施工時の施工プロセスや打ち止め判定および施工管理の根拠資料となる。

2. 試験の種類

基礎杭の試験としては大別して以下の2つがあり、次節以降で説明する。

- ① 鉛直載荷試験
- ② 水平載荷試験

3.3.2 鉛直載荷試験

1. 鉛直載荷試験の目的

鉛直載荷試験の目的は、杭の鉛直支持力特性に関する資料を得ること、または既に定められた杭の設計鉛直支持力の妥当性を確認することである。試験の種類によって若干異なるものの、基本的には以下の2項目に分けることができる。

(1) 特性調査試験

特性調査試験は、杭の施工方法開発や、本杭の実施設計に先立って行われる現地での基礎的な現地調査であり、鉛直支持力および引抜き抵抗力特性に関する資料を得ることを目的とする。この試験では、第2限界抵抗力まで載荷するのが一般的であり、杭施工法の開発や大きなプロジェクトにおいて事前に設計支持力を決めるために実施される場合が多い。

(2) 確認試験

確認試験は、施工された本杭が設計支持力および引抜き抵抗力を満足しているかどうかを確認することを目的とする。この試験は、既に設計された杭に対して、地盤の特殊性やオーソライズされていない工法を採用した場合に、設計の妥当性を確認するために実施され、設計荷重に安全率などの支持力低減ファクターを考慮した荷重以上を載荷するのが一般的である。

2. 鉛直載荷試験の種類と概要

地盤工学会「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」では、鉛直に設置された1本の基礎杭を対象として鉛直方向に荷重を載荷する試験方法として、杭の押込み載荷試験方法（JGS1811-2002）、杭の先端載荷試験方法（JGS1812-2002）、杭の引抜き試験方法（JGS1813-2002）、杭の鉛直交番載荷試験方法（JGS1814-2002）、杭の急速載荷試験方法（JGS1815-2002）、杭の衝撃載荷試験方法（JGS1816-2002）の6つの載荷試験方法が基準化されている。前者4種類が静的に荷重を載荷する試験であり、後者2種類は動的な荷重載荷による試験となる。

① 静的載荷試験：押込み載荷試験、先端載荷試験、引抜き載荷試験、鉛直交番載荷試験

② 動的載荷試験：急速載荷試験、衝撃載荷試験

ここでは、鋼管杭で比較的良好に採用されている試験方法として、鉛直下向きに杭頭部(天端)に荷重を載荷する杭の押込み載荷試験方法、杭の急速載荷試験方法、杭の衝撃載荷試験方法の3種類について、その概要と適用性を示す（[表3.3.1](#)）。

表 3.3.1 各載荷試験の特徴

	作業性	試験の前提	試験結果	得られる情報
押し込み試験	<ul style="list-style-type: none"> 反力杭が必要 試験装置が大掛かりで組立や解体に時間がかかる(組立1~10日、解体1~3日) 試験時間は1日(計器チェック1日) 	<ul style="list-style-type: none"> 載荷中の杭体は全圧縮 地盤の抵抗は静的 	<ul style="list-style-type: none"> 最も精度良く支持力を確認でき、測定結果をそのまま設計に利用できる。 測定結果の分析から、第1限界抵抗力および第2限界抵抗力などの杭の鉛直支持力に関する特性値を求めることができる。 	<ul style="list-style-type: none"> 荷重—時間関係 変位量—時間関係 荷重—変位量関係 荷重—弾性戻り量関係 荷重—残留変位量関係 および <ul style="list-style-type: none"> 第1限界抵抗力 第2限界抵抗力
急速載荷試験	<ul style="list-style-type: none"> 反力杭が不要 押し込み試験よりも比較的簡易な試験装置のため、組立・解体の時間は短い(組立0.5~3日、解体0.5~2日) 試験時間は1日 	<ul style="list-style-type: none"> 載荷中の杭体は全圧縮 杭体が慣性抵抗を持つ 地盤の抵抗は動的 相対載荷時間(T_r) $5 \leq T_r < 500$ $T_r = \frac{t_L}{2L/c}$ t_L: 載荷時間、L: 杭長、c: 杭の縦波伝播速度 	<ul style="list-style-type: none"> 除荷点法解析により杭体の慣性力、地盤の動的抵抗を補正する 除荷点抵抗力(第1、第2限界抵抗力の判定は注目する要素荷重—変化量曲線の形状から判定する) 	急速荷重による <ul style="list-style-type: none"> 荷重—時間関係 変位量—時間関係 加速度—時間関係 速度—時間関係 荷重—変位量関係 および 除荷点法による最大静的抵抗成分
衝撃載荷試験	<ul style="list-style-type: none"> 反力杭が不要 現場のハンマーが利用可能で大掛かりな試験装置は不要 試験時間が短い(0.5日) 	<ul style="list-style-type: none"> 杭体の波動理論に基づく 杭体が慣性抵抗を持つ 地盤の抵抗は動的 相対載荷時間(T_r) $T_r < 5$ 	<ul style="list-style-type: none"> CASE法により全抵抗(動的+静的)を推定する 波形マッチング解析により静的な荷重—変位量曲線を推定する 	衝撃力による <ul style="list-style-type: none"> 荷重—時間関係 速度—時間関係 加速度—時間関係 杭頭ひずみ—時間関係

(1) 押し込み試験 (SLT : Static Load Test)

押し込み試験は、従来から行われている油圧ジャッキによって杭頭に荷重を載荷する静的載荷試験であり、最も精度の高い載荷試験方法とされている。押し込み載荷試験の概要図を [図 3.3.1](#) に示す。現状の設計では、動的な性質を含む荷重であっても静的な荷重に置き換えて計算することが一般的であり、押し込み試験の結果は、設計上の支持力関連の数値と直接対応させることができる。

試験装置には、反力杭やアンカーなどの反力装置が必要となり、一般的に大掛かりで時間と費用を要する。

載荷方法については、現行基準では1サイクル方式や連続載荷方式も可能であるが、過去の試験との対照評価という面では多サイクル、段階載荷方法がよい。[表 3.3.2](#) に、1サイクル方式と多サイクル方式の特徴を示す。

表 3.3.2 1 サイクル方式と多サイクル方式の比較

1 サイクル方式	<ul style="list-style-type: none"> ・ $P-S$ 曲線図において、繰返し荷重による不連続性がないため、なめらかな曲線が得られ、第1 限界抵抗力、第2 限界抵抗力の判定がしやすい。
多サイクル方式	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷重—弾性戻り量曲線、荷重—残留変位量曲線が求まる。 ・ 除荷、再載荷時の荷重—変位曲線は、地震時外力、活荷重などの短期的かつ繰返し荷重に対する評価を行ううえで有用である。 ・ 0 荷重時にて装置、計器のチェック、盛替えが可能である。

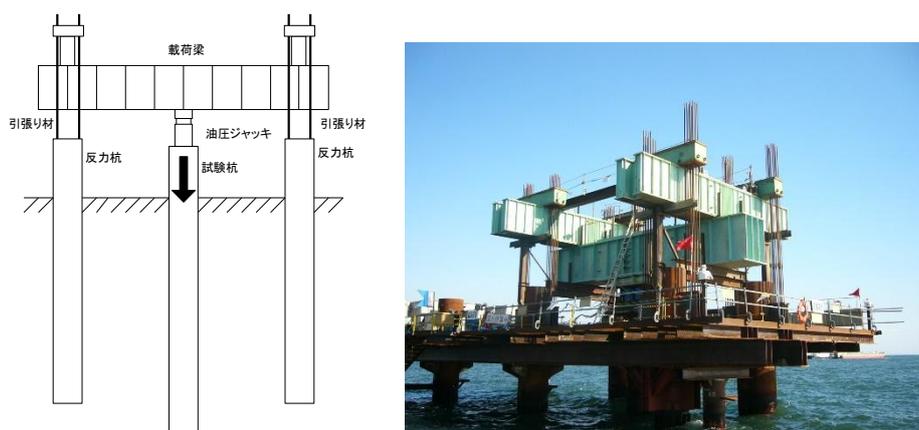


図 3.3.1 押し込み試験装置の概要

(2) 急速載荷試験 (RLT : Rapid Load Test)

急速載荷試験は、荷重作用が比較的長い動的荷重 (相対載荷時間 $5 \leq T_r < 500$) を載荷する試験方法である。押し込み試験との違いは、急速載荷試験中の杭体の軸方向の応力状態は静的と見なせるが、押し込み試験に相当する値を得るためには、載荷中の杭体の慣性力と地盤の動的抵抗成分を解析により補正する必要がある点にある。そのため、押し込み載荷試験よりも静的支持力の評価精度はやや劣る。

試験装置については、国内導入初期には重錘を推進燃料の燃焼ガス圧で打ち上げるスタナミック方式試験が主流であったが、現在では段階載荷が容易な重錘落下軟クッション方式が一般的である。載荷する急速荷重の大きさは、一般的には $0.1 \sim 30\text{MN}$ (静的抵抗成分 : $0.1 \sim 25\text{MN}$ 程度) である。図 3.3.2 にスタナミック方式の、図 3.3.3 に重錘落下軟クッション方式の概要図を示す。

急速載荷試験は、反力杭などの反力装置を必要としないため、海上杭や短杭の試験に適用しやすい。また実プロジェクトでの設計支持力検証などの確認試験の目的で用いられることも多い。

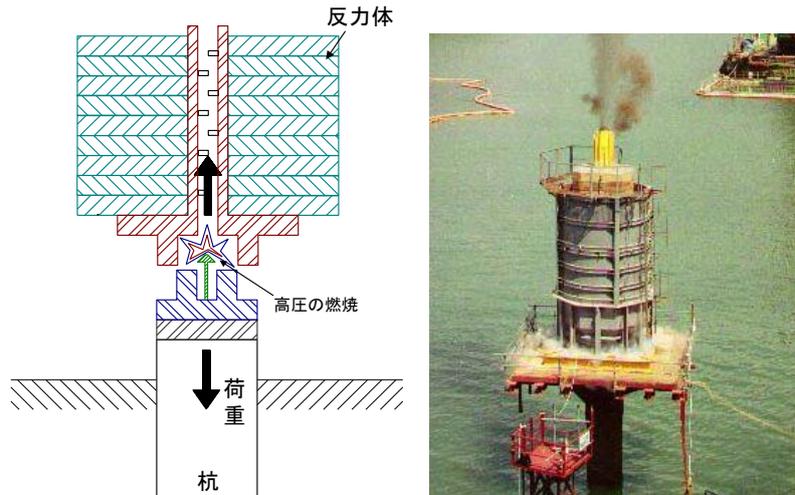


図 3.3.2 スタナミック方式

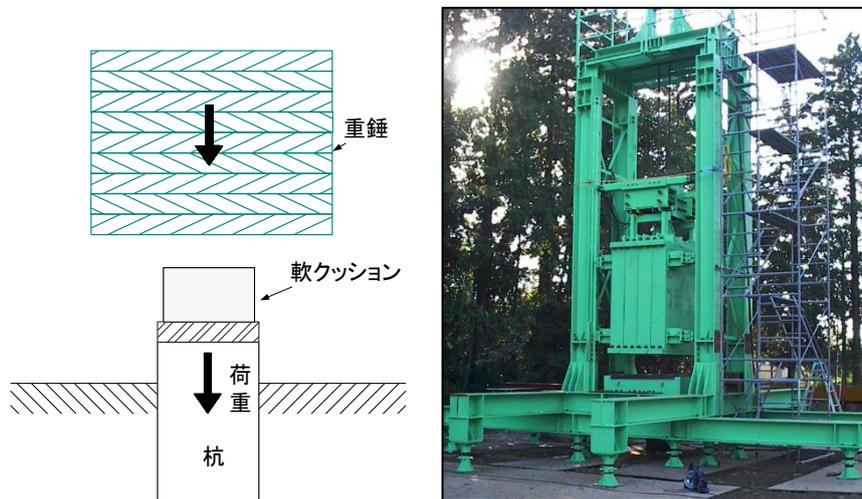


図 3.3.3 重錘落下軟クッション方式

(3) 衝撃載荷試験 (DLT : Dynamic Load Test)

衝撃載荷試験は、打撃杭の施工管理手法から発達したもので、ハンマの打撃力などの作用時間が短い時間の動的荷重 (相対載荷時間 $T_r < 5$) を載荷する試験方法である。急速載荷試験との主な違いは、杭体に生じる波動現象を無視できるかどうかであり、相対載荷時間が長いほど、すなわち載荷時間内に応力波が杭体を往復する回数が多いほど、杭体に生ずる波動現象の影響は小さくなる。衝撃載荷試験では、一次元波動理論に基づく必要があるため、相対載荷時間は短時間に限定される。試験結果の解析では、一般的には一次元波動理論に基づいた波形マッチング解析と呼ばれるシミュレーション解析を経て、杭の沈下に対する地盤抵抗を評価する。そのため、他の載荷試験に比べて静的な支持力との関係が不明確なこともあり、試験結果の精度が劣ることから、「確認試験」として採用される場合が多い。

試験装置は、施工に使用しているハンマを載荷装置として利用できれば非常に安いコストで実施できる。ただし、養生後に衝撃載荷試験 (再打設) を行う場合、杭先端地盤まで変形させるために施工時より大きな

エネルギーが必要となる。このため施工時のハンマーを衝撃載荷試験の載荷装置として用いる場合は、事前にハンマーエネルギーから確認可能な支持力を検討しておく必要がある。打撃工法以外の杭や施工ハンマーでの確認ができない場合は、十分なエネルギーを有する重錘落下装置を用いれば試験は可能となる。その場合の装置は、急速載荷試験の重錘落下軟クッション方式に近い構成となるが、載荷時間が短い分だけ急速載荷試験よりも低いエネルギーの装置で対応できる。図3.3.4に衝撃載荷試験の試験装置の概要図を示す。



図 3.3.4 衝撃載荷試験の試験装置の概要

3. 各載荷試験の適用性

鉛直載荷試験には複数の方法があるが、試験の目的が「特性調査試験」および「確認試験」である場合には、現行の設計体系の中では設計上の荷重や支持力の値と載荷試験結果を直接確認することのできる押し込み試験を選択し、極限支持力が把握できるまで十分な静的載荷を行うことがよい。過去の実績も踏まえると最も信頼性が高い方法とされており、先端抵抗と周面抵抗を分離することができるような試験計測・結果評価が望まれる。ただし、費用や時間、現場条件などの制約により、動的載荷試験である急速載荷試験、衝撃載荷試験を選択する場合もある。

動的載荷試験である急速載荷試験や衝撃載荷試験には、経済的かつ短期間に実施できる特長がある。このため、杭の種類が多い場合や地盤の構成が一樣でない場合などでは、押し込み試験に加えて動的載荷試験を併用すれば、各杭の種類や地盤条件におけるバラツキなどを確認できることから、基礎全体の支持力性能を確認する目的で選択されることもある。

なお、衝撃載荷試験は、杭施工時の杭と地盤の挙動を測定できる唯一の試験方法であり、打撃鋼管杭の支持

力管理手法として用いられている。

載荷試験を実施するにあたっては、各種載荷試験の特性を理解したうえで適用することが重要である。表 3.3.3 に載荷試験の適用性についてまとめたものを示す。

表 3.3.3 載荷試験の適用性

試験の種類	極限状態の調査 (特性調査試験)	設計の安全性確認 (確認試験)	複数杭への対応	動的な抵抗特性
押し込み試験	◎	◎	△	×
急速載荷試験	○	○	○	○
衝撃載荷試験	△	○	◎	○

◎：最適、○：適、△：不適、×：不可

4. 試験結果の評価方法

表 3.3.4 に、各基準の評価方法を示す。試験結果は、分野によらず「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」に準じた判断が行われ、一般的には押し込み載荷試験で得られた極限支持力あるいは第2限界抵抗力（沈下量が杭径の10%に達したときの荷重）に対して部分係数（あるいは安全率）を考慮して設計支持力が算定されることが多い。

ただし、評価方法の詳細については分野ごとの基準により異なる。最も大きな違いは、道路分野での第2限界抵抗力の判定において、杭頭部を基準に沈下量が杭径の10%に達した状態としているが、鉄道・港湾分野では杭先端沈下量を基準とする点にある。建築分野では杭先端沈下量を基準としながらも、杭頭沈下量で代替することも認めている。

また、第1限界抵抗力の評価については、道路分野ではワイブル曲線を利用することを前提に、極限支持力の特性値の0.65倍とする方法が規定されている（他分野では本規定は見当たらない）。また、鉄道では第2限界抵抗力を支持力算定の基準支持力として定義することとしており、第1限界抵抗力を用いることにはなっていない。

さらに詳細な評価方法については、本書の当該部分あるいは各分野の基準・指針などを参照されたい。なお、静的な荷重であっても現行基準に定められた杭の押し込み試験ではクリープなど地盤の長期的な特性を評価できないことに留意する必要がある。また圧密沈下によりネガティブフリクションが作用する場合や、杭間隔の狭い群杭となる場合などでは、単杭の載荷試験では実際の挙動を直接的に評価することが困難であるため、これらの影響を考慮し適切に補正を行うことが、設計支持力の評価において不可欠である。

表 3.3.4 載荷試験結果の評価方法

基準	第1 限界抵抗力	第2 限界抵抗力
道路	<ul style="list-style-type: none"> 杭の降伏支持力の特性値に相当。 極限支持力の特性値の 0.65 倍とする。 	<ul style="list-style-type: none"> 杭の極限支持力の特性値に相当。 杭頭部の荷重と沈下量の関係において、沈下量の軸に平行と見なせる荷重。 杭頭部の沈下量が杭径の 10%に達したときの荷重とする。
鉄道	<ul style="list-style-type: none"> 特に規定なし 	<ul style="list-style-type: none"> 基準支持力と定義する。 杭先端の沈下量が杭径の 10%に至る状態。
港湾	<ul style="list-style-type: none"> 目的によっては特性値としてもよい。 杭頭荷重 P と杭頭変位量 S との $\log P$-$\log S$ 曲線の明確な折れの荷重とする。 	<ul style="list-style-type: none"> 杭の軸方向押込み力の特性値に相当。 杭頭荷重の最大値とする。 杭先端変位量が杭先端直径の 10%以下の杭頭荷重の最大値を用いる。
建築	<ul style="list-style-type: none"> 杭頭荷重 P と杭頭変位量 S との $\log P$-$\log S$ 曲線の明確な折れの荷重とする。 	<ul style="list-style-type: none"> 押込み抵抗が最大となったときの荷重。ただし、杭先端沈下量が先端直径の 10%以下の範囲とする。 杭先端の沈下量の代わりに杭頭沈下量を採用してもよい。

5. 押込み試験の実施例

(1) 試験概要

本試験は道路橋基礎杭の載荷試験例である。試験を実施した杭はφ1,500mmの大径杭であり、また、支持層となる砂礫層が2～3mと薄いため、その支持力特性を正確に把握する目的で、押込み載荷試験を行った。杭の諸元を表3.3.5に、地層図を図3.3.5に示す。また、試験杭の打設記録を表3.3.6に示す。

なお、杭打設から試験実施までの養生期間は35日であった。

表 3.3.5 試験杭の諸元

使用材料	形状、寸法 (mm)	数量	断面積 (cm ²)	質量 (kg)	断面係数 (cm ³)	断面二次モーメント (cm ⁴)
鋼管	φ1,500×t22 L58,000	1	1,022	46,516	—	—
溝形鋼	200×80×7.5/11	4	125	5,215	—	—
山形鋼	90×90×7	2	24	1,017	—	—
計			1,171	52,748	42,000	3,142,000

表 3.3.6 打設記録 (打ち止め時)

リバウンド K (cm)	貫入量 S (cm)	ハンマ重量 W _H (kN)	ハンマ落下高 H (cm)
0.7	0.2	72	239

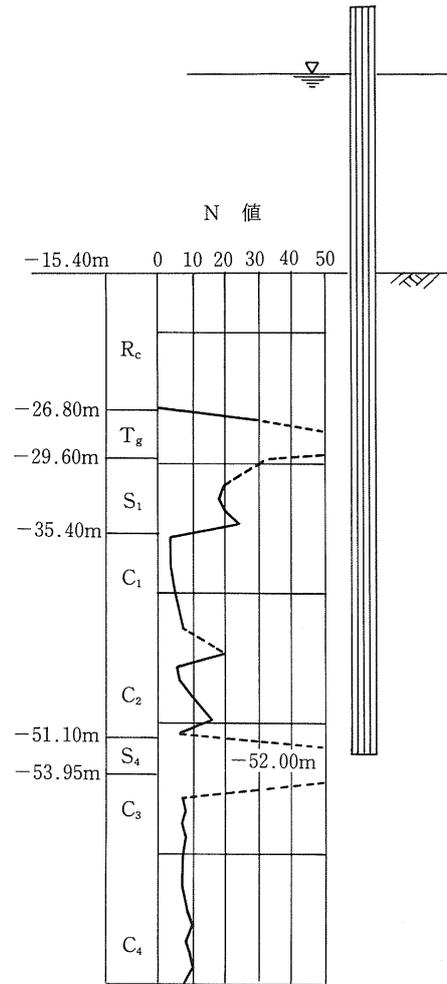


図 3.3.5 地層図

(2) 試験内容

1) 試験装置

載荷には、5,000kNの油圧ジャッキ6台を使用し、反力としては周囲の杭の引抜き摩擦抵抗力を利用した。反力杭の数は4本である。ジャッキ荷重を直接受ける主桁と反力杭との連結は、テンション材を介して引抜き力が4本に均一に伝わる構造とした。載荷装置の概要を図3.3.6に示す。

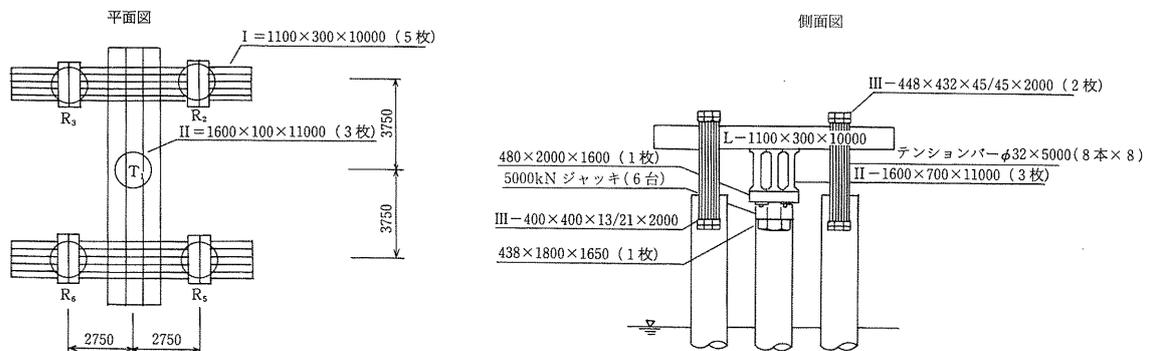


図 3.3.6 試験装置

2) 試験方法

試験は「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」に示す方法に準じて実施した。

荷重保持時間は新規荷重で一律2時間、ゼロ荷重で一律1時間とした。

荷重ステップおよびサイクルは表3.3.7のとおり実施した。

表3.3.7 荷重ステップ

サイクル	荷重ステップ (kN)
1	0 - 1,000 - 2,000 - 3,000 - 2,000 - 0
2	0 - 1,000 - 3,000 - 4,000 - 5,000 - 6,000 - 3,000 - 0
3	0 - 2,000 - 4,000 - 6,000 - 7,000 - 8,000 - 9,000 - 6,000 - 3,000 - 0
4	0 - 2,000 - 4,000 - 6,000 - 8,000 - 9,000 - 10,000 - 11,000 - 12,000 - 8,000 - 4,000 - 0
5	0 - 2,000 - 4,000 - 6,000 - 8,000 - 10,000 - 12,000 - 13,000 - 1,000 - 8,000 - 4,000 - 0

3) 測定方法 (荷重、変位、ひずみ、時間)

荷重 : 荷重の測定は、ジャッキ部に取付けた圧力変換器を荷重制御装置のデジタル荷重指示計に連結した。荷重の増減は手動によって行い、定荷重の保持は自動制御装置により行った。

変位 : 差動トランス型変位計をデジタルひずみ測定器に連結し遠隔自動記録した。変位量の測定位置は試験杭頭4ヶ所、杭先端の変位測定2ヶ所、反力杭は各1ヶ所とした。また試験杭の傾斜をチェックするため90度方向水平2ヶ所で測定した。

測定時間は 荷重 (新規荷重と完全除荷時) の場合は0、1、2、5、10、15分に測定し、以後15分間隔で測定した。その他の荷重では0、2分に測定した。

ひずみ : 測定は変位と同じくデジタルひずみ測定器で自動記録した。

測定時間は変位と同じ要領で測定した。測定位置を図3.3.7に示す。

時間 : 測定時の時間指示はデジタルオートタイマーによった。

(3) 試験結果

図3.3.8に試験実績図を示す。試験杭の最大荷重は13,000kNであり、その時の杭頭沈下量は44mmであった。第2限界抵抗力は荷重-変位曲線において、急激に変位量が増大する時の荷重であり、本試験では12,000~13,000kNであると考えられる。なお、荷重-変位曲線は、判定結果の人為的誤差を排除するためにWeibull分布関数によって近似もしくは外挿した曲線を利用することがある。Weibull曲線の定義や活用については土木研究所資料「杭の軸方向の支持力及びばね定数推定式の見直しと推定精度の評価に関する研究」国立研究開発法人土木研究所、平成30年3月」に纏められているので参照されたい。

第1限界抵抗力を判定するための $\log P_0 - \log S_0$ 、 $P - \Delta S_0 / \Delta \log t$ 、 $S_0 - \text{Log} t$ 図を図3.3.9、図3.3.10、図3.3.11に示す。これらの第1限界抵抗力をまとめると表3.3.8になる。本試験での第1限界抵抗力は最小値をとって10,300kNとした。

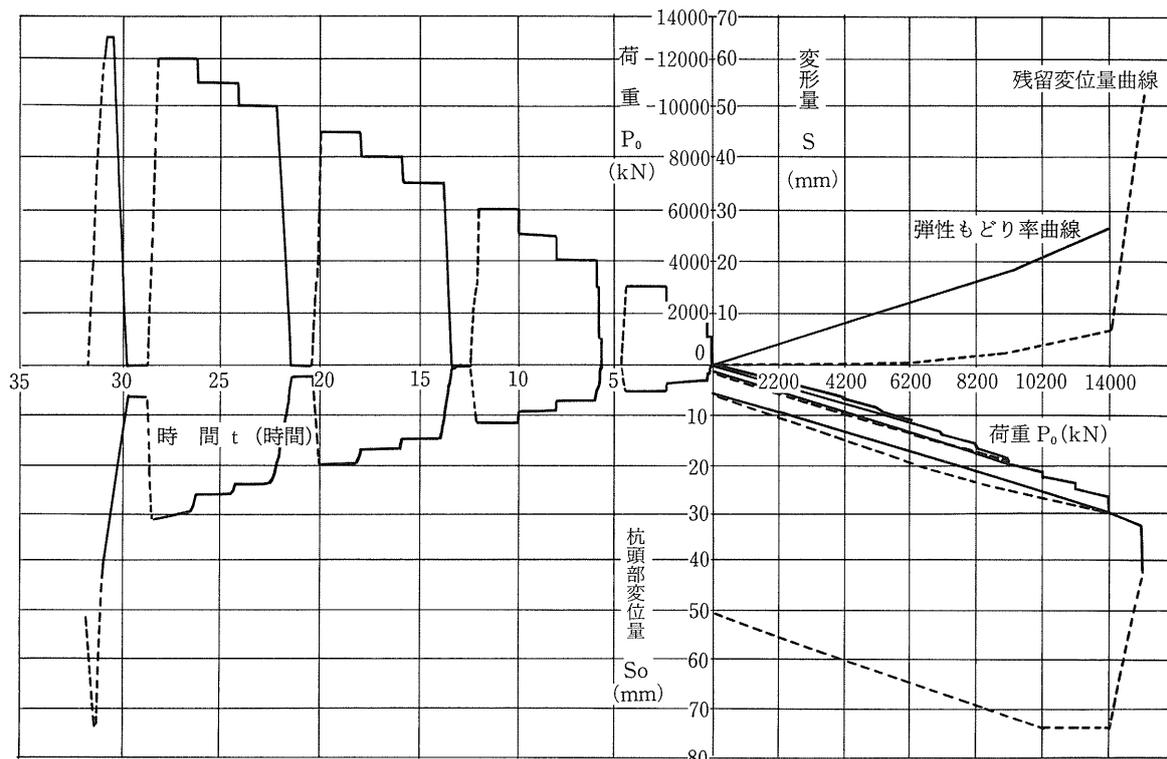


図 3.3.8 試験実績図 荷重—時間—変位

表 3.3.8 第1 限界抵抗力および第2 限界抵抗力

	第1 限界抵抗力 P_y (kN)	第2 限界抵抗力 P_d (kN)
T1 杭		
☒ 3.2.9 $\log P - \log S$	10,300	12,000
☒ 3.2.10 $P - \Delta S / \Delta \log t$	11,000	〃
☒ 3.2.11 $S - \log t$	—	〃

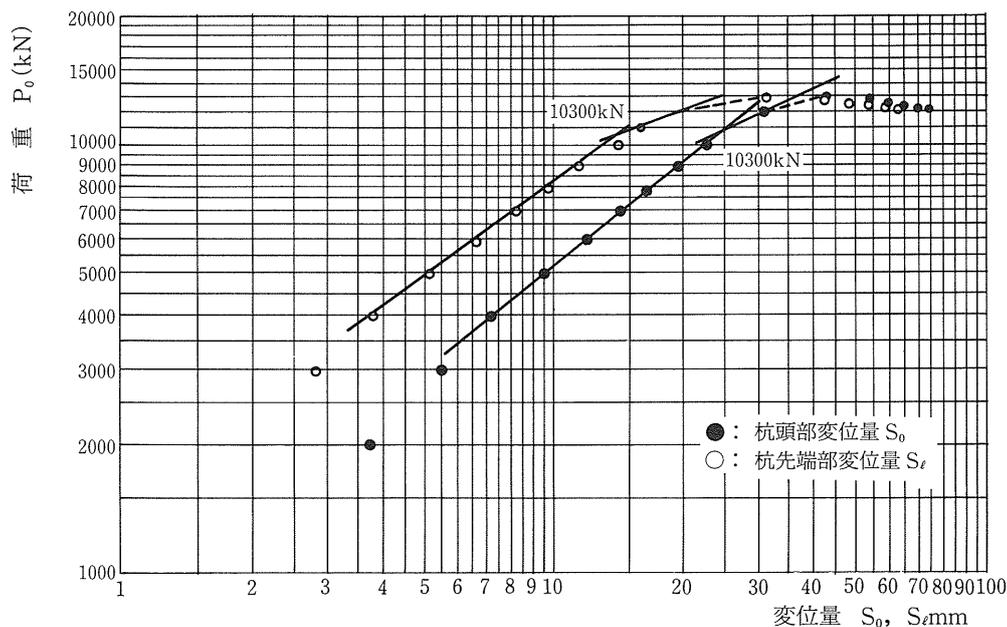


図 3.3.9 $\log P_0 - \log S_0, S_l$

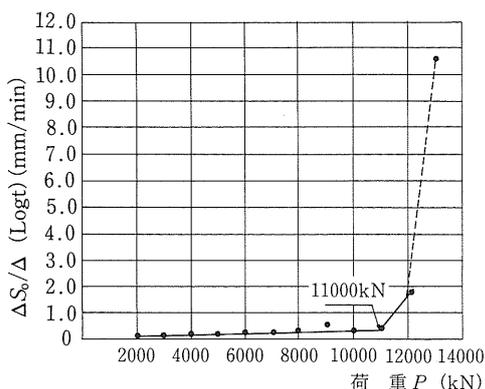


図 3.3.10 $P - \Delta S_0 / \Delta \log t$

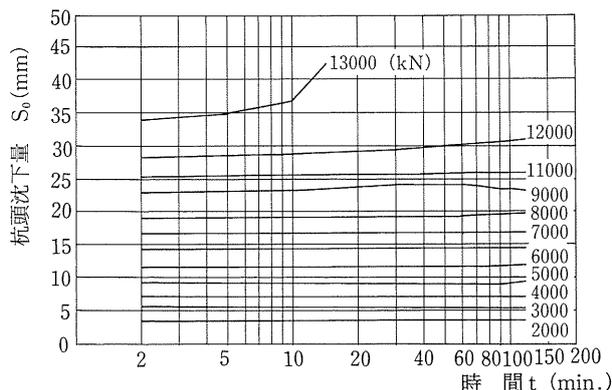


図 3.3.11 $S_0 - \log t$

本試験のひずみ分布を [図 3.3.12](#) に示す。ひずみ分布から、各地層における軸力の低減状況より各地層の周面抵抗力度 ([図 3.3.13](#)) を求めることができる。周面抵抗力度の分布図を [図 3.3.14](#) に示す。これらの資料と、静的支持力式、動的支持力式などの先端支持力や周面抵抗力と比較することにより、一層、正確な杭の支持力特性を把握することができる。

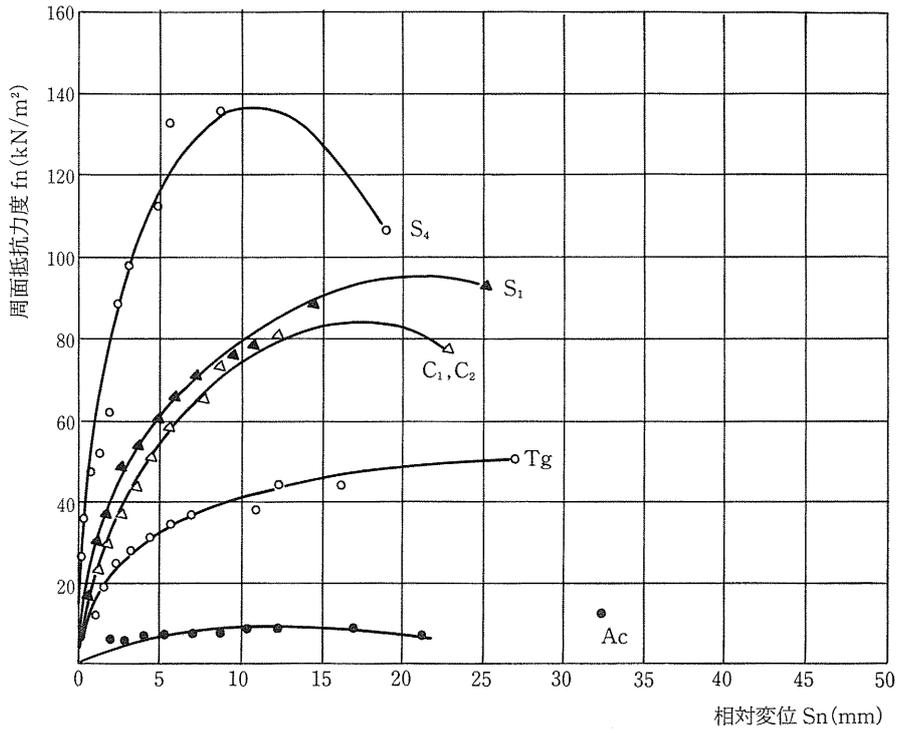


図 3.3.13 相対変位—周面抵抗力度

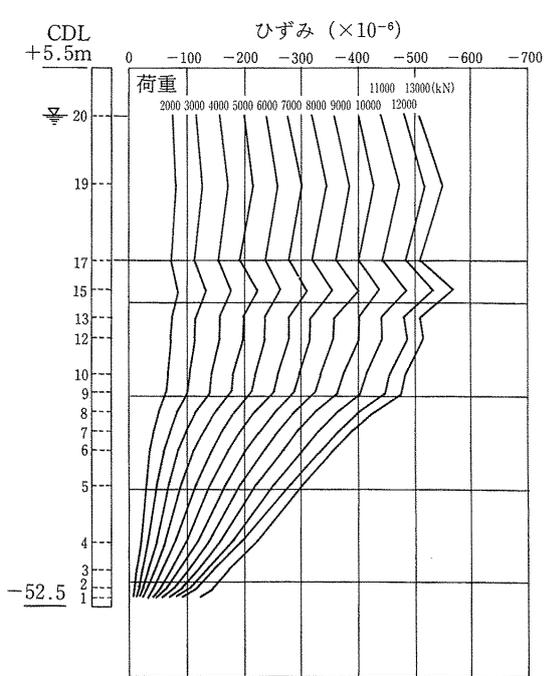


図 3.3.12 ひずみ分布

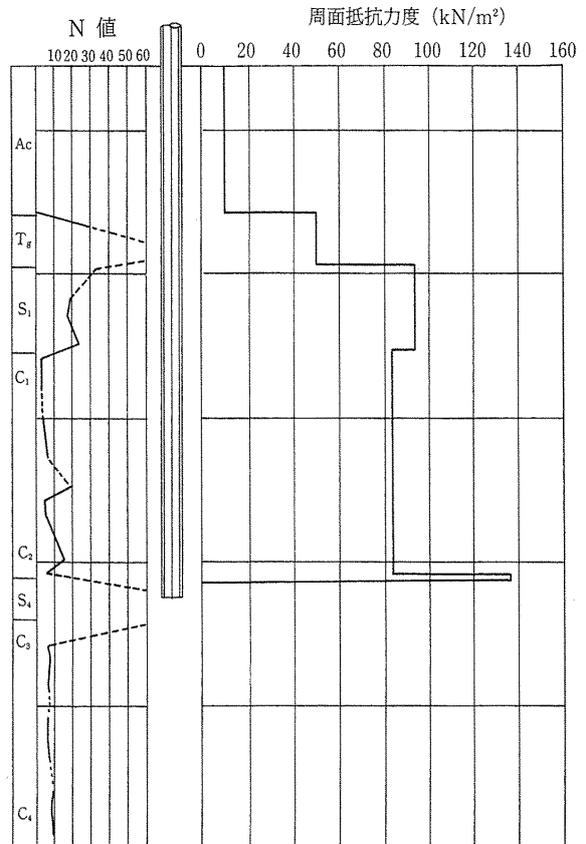


図 3.3.14 各地層における周面抵抗力度分布

3.3.3 水平載荷試験

1. 水平載荷試験の目的

水平載荷試験は、杭の水平抵抗特性に関する資料を得ること、または既に定められた杭の水平地盤反力係数などの設計値の妥当性を確認するために実施する。

水平載荷試験で得られる情報は、荷重—杭頭変位量、荷重—杭頭傾斜角、荷重—杭体応力度の各履歴特性、杭体の応力分布、地盤の反力特性などである。以下に、水平載荷試験の目的を示す。

① 杭の水平特性に関する資料の収集（特性調査試験）

新しい杭工法の開発や、杭の設計に先立つ調査として、荷重—変位特性、水平抵抗の特性値、水平地盤反力係数などの資料を得ることを目的として実施する。

② 設計値の妥当性の確認（確認試験）

既に施工された本杭について、水平抵抗力が設計値を満足しているか、または設定された水平地盤反力が妥当であるかを確認することを目的として実施する。

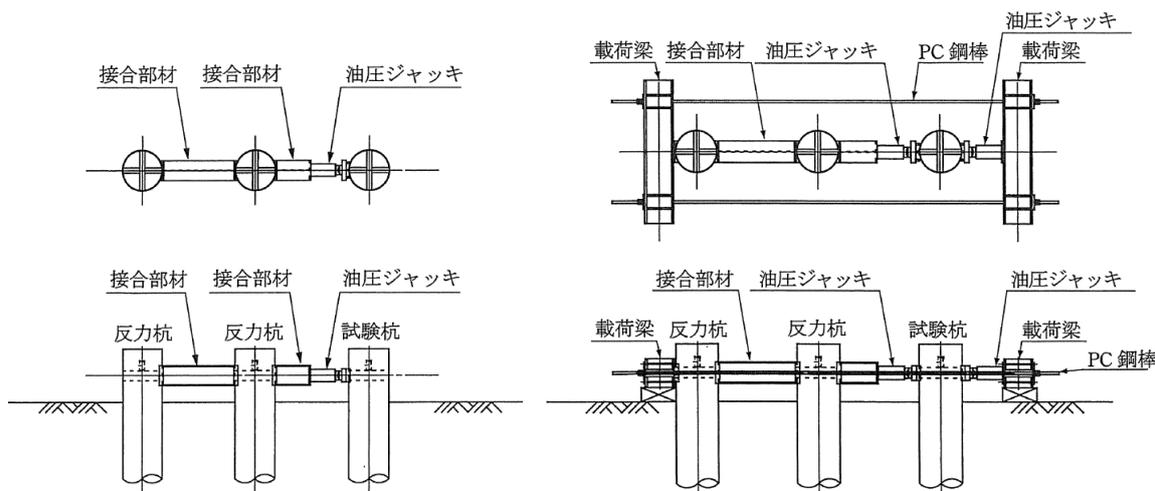
2. 水平載荷試験の概要

(1) 載荷試験装置

水平載荷試験の載荷装置の一例を [図 3.3.15](#) に示す。[図 3.3.15\(b\)](#) の装置は反力杭を 2 本使用している例であるが、大きな荷重や正負交番載荷試験を計画する場合には、このように複数本の杭から反力を取ることもある。

加力装置には一般的に油圧ジャッキが用いられ、その加力能力は計画最大荷重の 120% 以上とする。また、ストロークについては計画最大変位に対して十分な余裕があるか、あるいはゼロ荷重でストロークを容易にかつ迅速に再調整できるように配慮する。

海上部などで載荷試験を行う場合は、載荷点高さと現地盤面との間隔が大きいと、突出部分の杭の変形量が非常に大きくなり危険であることから、海底面載荷を検討するなど、載荷位置を工夫する必要がある。



(a) 一方向で試験杭を押し出す場合の載荷装置

(b) 正負交番載荷試験による載荷装置

図 3.3.15 載荷装置の例（出典 [3-23](#)）

(2) 試験杭

試験杭は、その変形に影響を及ぼすと考えられる範囲内に構造物や反力杭が存在しないよう、注意して配置する必要がある。試験杭の変形に影響を与える可能性が高い範囲を図 3.3.16 に示す。試験杭は、原則として本杭とは別に計画する。ただし、確認試験においては、杭体の強度に十分な余裕があり、試験後の杭および地盤の残留変形が構造物に悪影響を与えないと判断される場合には、本杭を試験杭としてもよい。この場合、試験後も本杭としての機能が要求されるため、最大荷重および最大変位量の設定には十分注意する必要がある。

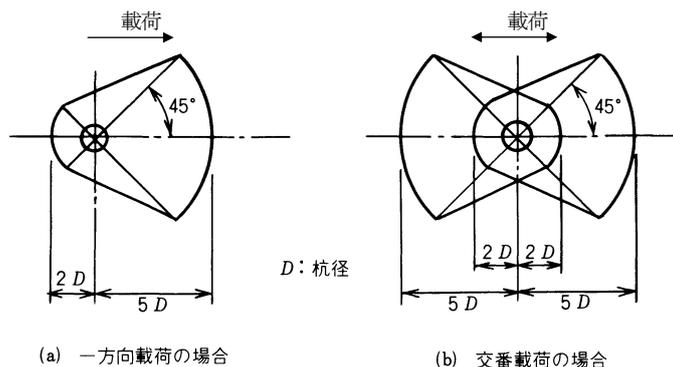


図 3.3.16 試験杭の影響範囲 (出典 3-24)

(3) 載荷方法

水平載荷試験の載荷方法には、表 3.3.9 に示すものがあり、対象とする構造物の種類および試験の目的を考慮して決定する。

① 載荷型式

載荷型式には、一方向載荷と正負交番載荷があり、試験の目的に応じて選定する。一方向載荷試験型式は相対的に試験装置が簡易で試験時間も短く済むことが多いため、杭の水平地盤反力係数などの設計値を設定・確認する際に用いられることが多い。一方、正負交番載荷試験型式は、地震力のような繰り返し荷重に対する影響を検討するため、復元力特性や履歴減衰特性の把握が必要となる場合に行われることが多い。

② 載荷サイクル

載荷サイクルには、単サイクルと多サイクルがある。試験の目的が、設計で用いた水平地盤反力係数の妥当性確認のみである場合には、単サイクル試験で十分だが、より多くの情報を得るためには多サイクル試験が適している。

③ 載荷方式

載荷方式には、段階載荷方式と連続載荷方式がある。試験の主目的が水平地盤反力係数の確認である場合には、試験時間を短縮できるという点で連続載荷方式が適している。一方、杭の変形が大きくなることによって試験装置の安全性が損なわれることが危惧される場合や、従来データとの整合性を特に重視する場合には、段階載荷方式を採用するのがよい。

表 3.3.9 載荷方法

載荷型式	載荷サイクル	載荷方式
一方向載荷型式	単サイクル試験	段階載荷方式
正負交番載荷型式	多サイクル試験	連続載荷方式

(4) 養生期間

試験杭施工直後は、周辺の地盤が乱れているため、地盤状態が安定するまで一定期間放置する必要がある。その期間は、地盤条件や杭の施工方法によっても異なるが、砂質土で 5 日以上、粘性土で 14 日以上の養生期間を設けることが、「杭の水平載荷試験方法・同解説」において原則とされている。

水平載荷試験に関する計画や試験方法についての詳細は、「杭の水平載荷試験方法・同解説」を参照されたい。

3. 試験結果の評価方法

杭の水平載荷試験は、水平抵抗特性を評価するうえで有用であるものの、通常的设计で想定するような杭頭固定条件および鉛直荷重が作用した状態を試験で再現することは難しい。そのため水平載荷試験は、杭の水平抵抗特性を代表する杭の水平方向地盤反力係数などや降伏変位量、残留変位を求めるための試験として位置づけるのが適切である。また試験結果の評価は、載荷幅依存、ひずみあるいは変位量依存、深さの評価および初期有効圧力などを考慮して実施する必要がある。

水平方向地盤反力係数の設定は各分野によって異なる。いずれの分野の基準でも水平方向地盤反力の非線形を考慮しているが、建築分野では変形量に応じて地盤反力係数が変化することが前提となっており、港湾分野では深度方向に一定の場合と増加する場合が想定されている等の特徴がある。このため杭の水平載荷試験の評価においては、各基準における水平方向地盤反力係数の定義や算定方法を踏まえたうえで、適用用途に応じた評価が必要となることに留意されたい。各分野における水平載荷試験の取り扱いについては「杭の水平載荷試験方法・同解説」の巻末付録 3~6 に詳しく纏められており、参照されたい。

4. 水平荷重試験実施例

(1) 試験地の地盤状況

図 3.3.17 にボーリング柱状図を示す。

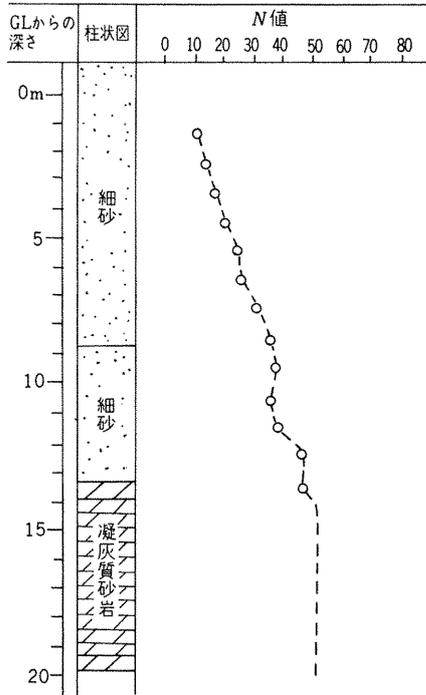
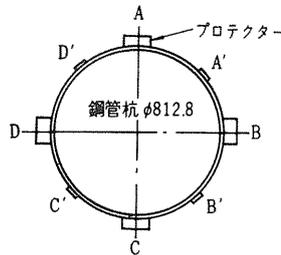
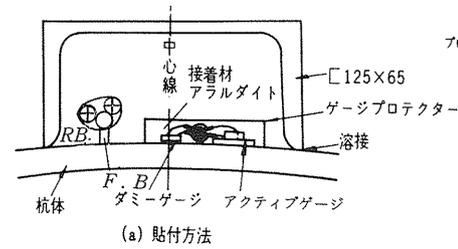


図 3.3.17 ボーリング柱状図



(b)水平加力，打撃応力測定用杭

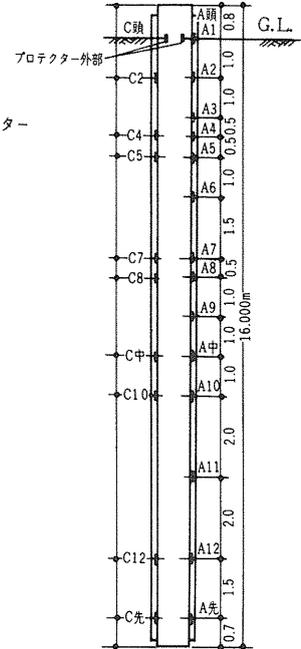


図 3.3.18 ストレインゲージの貼付け方法と位置

(2) 試験結果

本試験では、杭体の地表面変位を実測し、これを基にして Chang の式から地中部の杭体変位、曲げモーメントおよび水平方向地盤係数を算定し、これとワイヤストレインゲージによる応力測定の結果を比較検討した。図 3.3.18 にゲージの貼付け方法と位置を示す。試験は、最大水平力 500kN を 10 サイクルに分けて、1 サイクル 50kN ピッチの緩速繰返し加力方式で行なった。試験結果を図 3.3.19、図 3.3.20 に示したが、本杭の降伏荷重は 375kN で、この時の杭頭の水平変位量は 13mm であった。

次に、各荷重段階における地表面変位から Chang の式を用いて曲げモーメント、地中部杭体変位および水平方向地盤係数を算定し、この結果を図 3.3.21～図 3.3.23、表 3.3.10 にまとめた。

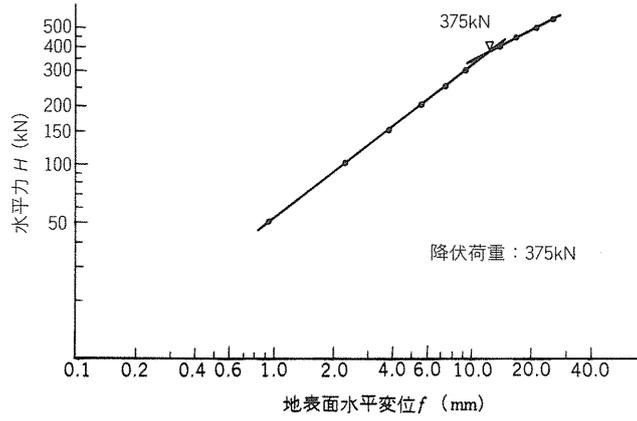


図 3.3.19 $\log H - \log f$ 曲線

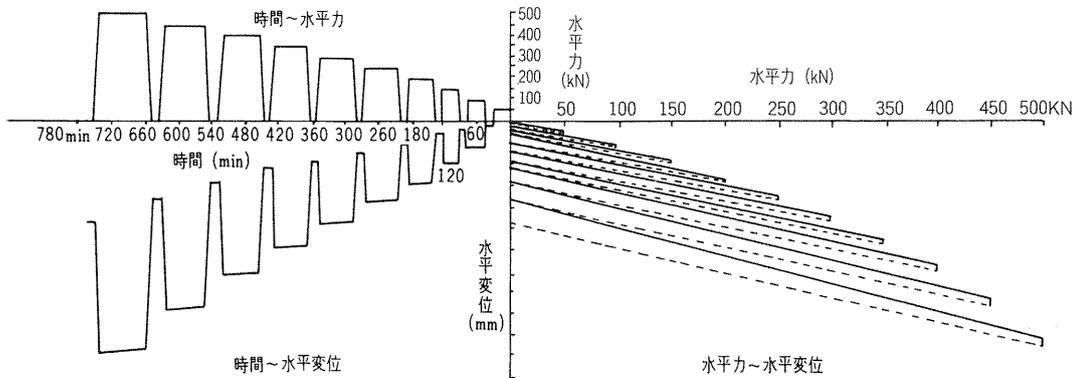


図 3.3.20 水平載荷試験結果図

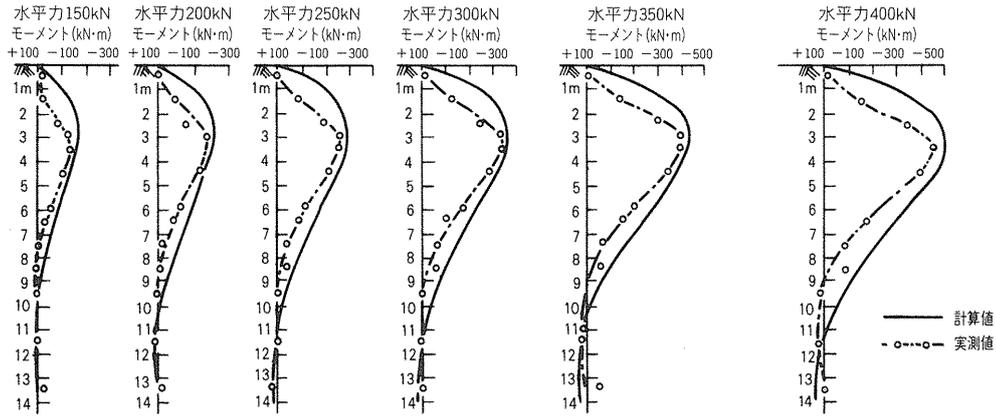


図 3.3.21 杭頭変位から算定した地中部曲げモーメントと実測値との比較

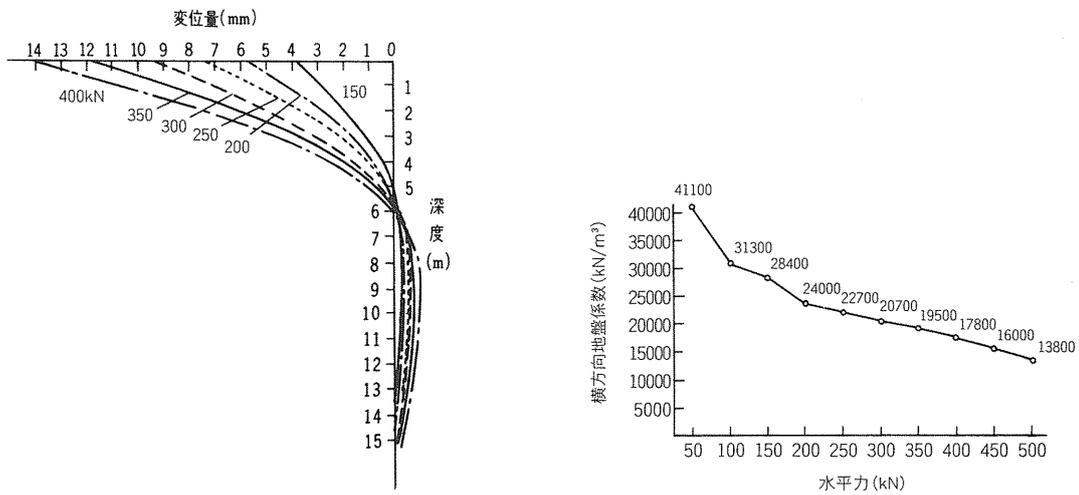


図 3.3.22 杭頭部変位量とそれから求めた杭の地中変位 図 3.3.23 水平力と水平(横方向)方向地盤係数の関係

表 3.3.10 試験結果一覧表

水平力 (kN)	拘束状態	杭頭変位 (mm)	第1不動点 (m)	地中部 M_{max} 計算値 (kN·m)	地中部 M_{max} 実測値 (kN·m)	特性長 $1/\beta$ (m)	水平方向地盤反力係数 k_H (kN/m ³)
150	杭頭自由	3.80	5.42	166.8	139	3.45	28,400
	杭頭固定	1.90	8.12	53.8	—		
200	杭頭自由	5.68	5.68	231.9	208	3.60	24,000
	杭頭固定	2.84	8.48	74.8	—		
250	杭頭自由	7.42	5.73	294.2	260	3.64	22,700
	杭頭固定	3.71	8.60	94.9	—		
300	杭頭自由	9.50	5.86	360.9	329	3.73	20,700
	杭頭固定	4.75	8.79	116.4	—		

これによると、当地盤の特性長 ($1/\beta$) は、水平力 150~300kN の間で 3.45~3.73m の範囲にあり、地表面からこの深さまでの地盤が杭の横抵抗に支配的な影響を与えるものと考えられる。

また、水平方向地盤係数は、[図 3.3.23](#) に示したとおり水平力 50~500kN の間で 41,100~13,800kN/m³ と変化している。

[図 3.3.21](#) は、地中部杭体曲げモーメント分布の計算値と実測結果を比較したものであるが、この種の現場実験としては良く一致していた。したがって、[図 3.3.22](#) に示した杭体の地中部変位および[表 3.3.10](#) に示した杭頭固定とした時の計算値も実用的なもの判断できる。なお、[表 3.3.10](#) の杭頭固定とした時の計算値は、杭の地表面変位を杭頭自由の時の 1/2 と仮定して求めたものである。

出典

- 3-① 日本建築学会：建築基礎のための地盤改良設計指針案，p301 図 3.1.4，2006年11月
- 3-② 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，上巻 p301 表-1.2.1，2018年5月
- 3-③ 国土技術研究センター：河川土工マニュアル，p18 表 2.1.3，2009年4月
- 3-④ 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物，p23 表 2.1.2.3-1，p26 表 2.1.2.4-1，2012年1月
- 3-⑤ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p193 図-3.3.3，2020年3月
- 3-⑥ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説（2004年改訂），p251 図-6.2.1，2007年5月
- 3-⑦ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p305 表-2.5.2，表-2.5.3，2020年3月
- 3-⑧ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p306 図-2.5.20，2020年3月
- 3-⑨ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p306，2020年3月
- 3-⑩ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p305 図-2.5.19，2020年3月
- 3-⑪ 日本建築学会：建築基礎構造設計指針（1988年改定），p61 図 1.4.1，1988年1月
- 3-⑫ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p308 表-2.5.4，2020年3月
- 3-⑬ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p308 図-2.5.26，2020年3月
- 3-⑭ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p234 図-4.3.1，2020年3月
- 3-⑮ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説（2004年改訂），p232 図-5.10.3，2007年5月
- 3-⑯ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説（2004年改訂），p97 図-3.4.3，2007年5月
- 3-⑰ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説（2004年改訂），p113 図-3.7.1，2007年5月
- 3-⑱ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p665 図-1，2020年3月
- 3-⑲ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p671 図-3，2020年3月
- 3-⑳ 白戸 真大，前田 良刀：地盤調査と地盤乗数の評価方法，基礎工，Vol. 30，No. 5，総合土木研究所，p13 図-4，2002年5月
- 3-㉑ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説（2004年改訂），p324 図-6.9.2，2007年5月
- 3-㉒ 地盤工学会：地盤調査の方法と解説（2004年改訂），p324 図-6.9.3，2007年5月
- 3-㉓ 地盤工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説〔第一回改訂版〕，p18 図-4.4 図-4.6，2010年6月
- 3-㉔ 地盤工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説〔第一回改訂版〕，p14 図-3.1，2002年5月