

# 1. 杭の鉛直載荷試験の区分

## 1.1 地盤工学会基準における杭の鉛直載荷試験





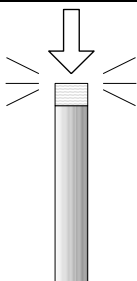
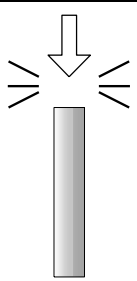
土木や建築の基礎構造として用いらている基礎杭の鉛直支持力性能を確認するために杭の鉛直載荷試験（以下載荷試験）が実施されます。載荷試験は原位置試験の一つで杭の鉛直支持力特性を調べる試験方法です。実杭の支持力を測定することから、杭の支持力を確認するのに最も信頼性の高い方法です。

以前は載荷試験と言えば静的載荷試験のことでした。しかし、最近では急速載荷試験や衝撃載荷試験と呼ばれる動的な荷重を使う動的載荷試験が普及してきています。

地盤工学会においては2002年に6種類の載荷試験方法が基準化されています。試験の区分はまず荷重の性質により静的載荷試験と動的載荷試験に分けられます。さらに、静的載荷試験は、載荷方向と載荷位置により押し込み試験、引き抜き試験、鉛直交番載荷試験および先端載荷試験に分けられます。動的載荷試験は荷重の載荷時間の違いにより急速載荷試験と衝撃載荷試験に分けられます。表 1-1 に地盤工学会で基準化されている杭の鉛直載荷試験方法の種類を示します。

本稿では入門編として、実施する機会の多い表中の杭頭に押し込み方向に載荷する押し込み試験（SLT: Static Load Test）、急速載荷試験（RLT: Rapid Load Test）および衝撃載荷試験（DLT: Dynamic Load Test）について、それぞれの特徴および適用性について説明します。

表 1-1 杭の鉛直載荷試験の種類

|        | 杭の鉛直載荷試験の種類   |   |   |   |  |   |
|--------|---|---|---|---|--|---|
|        | 静的載荷試験<br>静的荷重：ゆっくりの荷重  |   |   |   | 動的載荷試験<br>動的荷重：速い荷重  |   |
| 種類     | 押し込み試験  | 引き抜き試験  | 交番載荷試験  | 先端載荷試験  | 急速載荷試験   | 衝撃載荷試験  |
| 基準     | JGS 1811-2002   | JGS 1813-2002   | JGS 1814-2002   | JGS 1812-2002   | JGS 1815-2002  | JGS 1816-2002   |
| 荷重     | 静的荷重  |   |   |   | 動的荷重<br>(0.1s 程度)  | 動的荷重<br>(0.01s 程度)  |
| 載荷方向   | 押し込み  | 引き抜き  | 押し込み<br>引き抜き<br>両方  | 押し込み  | 押し込み   | 押し込み  |
| 載荷位置   | 杭頭  | 杭頭  | 杭頭  | 杭先端   | 杭頭   | 杭頭  |
| 加力装置   | 油圧ジャッキ  | 油圧ジャッキ  | 油圧ジャッキ  | 油圧ジャッキ  | 重錘+軟クッション<br>反力体慣性力  | ハンマー<br>重錘  |
| 載荷イメージ |  |  |  |  |  |  |

## 1.2 動的荷重による杭、地盤の挙動

鉛直載荷試験は荷重の性質によって区分されます。押し込み試験は静的な荷重を掛ける静的載荷試験であり、急速載荷試験と衝撃載荷試験は動的な荷重を掛ける動的載荷試験です。図 1-1 に示すように静的な荷重とは油圧ジャッキなどによって掛ける長い時間の荷重です。動的な荷重とは時間の短い荷重です。現在国内では重錘を杭頭に落下させて動的荷重を作り出しています。さらに急速載荷と衝撃載荷の違いは、動的載荷でも載荷時間が比較的長い場合が急速載荷で短い場合が衝撃載荷です。

重錘落下方式による動的試験は、油圧ジャッキを用いる押し込み試験と比較して装置が簡易であり、時間も費用も経済的です。打ち込み杭のように施工ハンマーを載荷装置として用いることが出来れば、非常に安価に試験を実施できます。この経済性の良さが動的載荷試験を普及させる要因となっています。

一方、荷重の性質の違いによって載荷中の杭の周りの地盤の抵抗状態と杭体の挙動が異なり、動的載荷試験の結果を静的載荷試験と全く同じとして扱うことは出来ません。以下に出来るだけ平易に動的荷重による挙動について説明します。

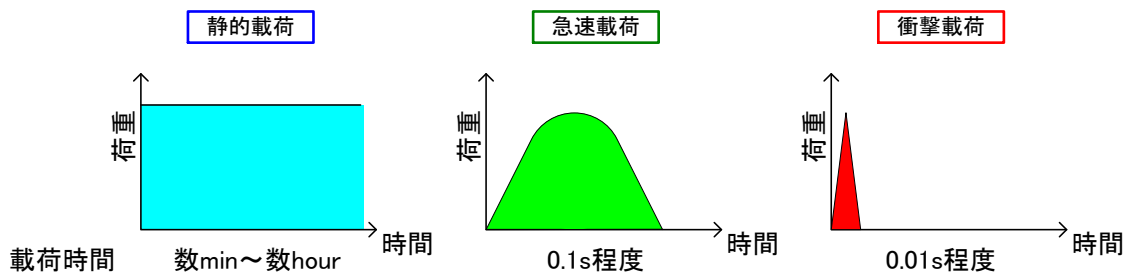


図 1-1 載荷時間

### (1) 地盤の抵抗状態

#### (a) 地盤のダンピング抵抗

地盤の抵抗状態は、静的な荷重に対しては静的な地盤抵抗が発現され、動的な荷重に対しては静的とは異なる動的な地盤抵抗が発現されます。載荷時に動的な地盤抵抗を発現するか否かが静的載荷と動的載荷の区分になります。

静的な地盤抵抗状態では変位に依存する抵抗のみが発現します。しかし、動的な荷重を受けた場合は、地盤には変位に依存する抵抗に加えて、ダンピング抵抗と言われる速度に依存する抵抗が発現します。速度に依存する抵抗の例としては水に飛び込むときの抵抗をイメージして下さい。プールに梯子を使ってゆっくり入る場合はほとんど抵抗を受けません。一方高い飛び込み台から飛び込んだ場合は強い抵抗を受けます。この抵抗は人が速度を持って水にぶつかることから生じます。杭が地盤に速度を持って貫入する場合にも同様の速度に依存する抵抗が発現されます。

このような動的静的な抵抗をバネでダンピング抵抗をダッシュポットで表現すると、単純なモデルでは静的載荷時の地盤の抵抗はバネのみ（通常は地盤の破壊状態を表すプラスチックスライダーを直列につなげる。）で、

動的載荷時はバネとダッシュポットの並列モデルで表現されます（表 1-2）。

地盤の動的な抵抗には、他にも加速度に依存する抵抗や間隙水圧に依存する抵抗がありますが、現状は全部ひっくるめてダッシュポットでモデル化しています。

表 1-2 杭に作用する地盤抵抗モデル

|         | 静的                                  | 動的（急速、衝撃）   |
|---------|-------------------------------------|---|
| モデル     | <p>杭<br/>プラスチック<br/>スライダ<br/>バネ</p> | <p>杭<br/>プラスチック<br/>スライダ<br/>バネ<br/>ダンパ<br/>(粘性減衰 + 逸散減衰)</p> |
| 抵抗変位量関係 |                                     |   |

(b) 間隙水圧の影響

粘性土地盤に施工された杭に対して動的な荷重を載荷した場合、上記のダンピング抵抗とは別に地盤中の間隙水圧の影響があるとされています。図 1-2 は動的荷重を受けた場合の杭先端の地盤を模式的に表したものです。杭の先端が地盤に大きな速度で動的に貫入する場合に、砂のような透水性の高い地盤では貫入中に間隙水圧の消散が進み、発現される抵抗は土の抵抗のみとなります。一方粘土のような透水性の低い地盤では貫入中に間隙水圧の消散がされず、発現される抵抗は土の抵抗に間隙水圧の抵抗が加わることとなります。実際の杭の先端地盤の破壊挙動は図のように単純ではなく未だ解明されていませんが、粘土地盤中の杭に対する動的載荷試験結果が静的より大きくなるという報告や杭の先端地盤の透水性能に依存して動的試験の結果が静的試験より大きくなるという報告があります。

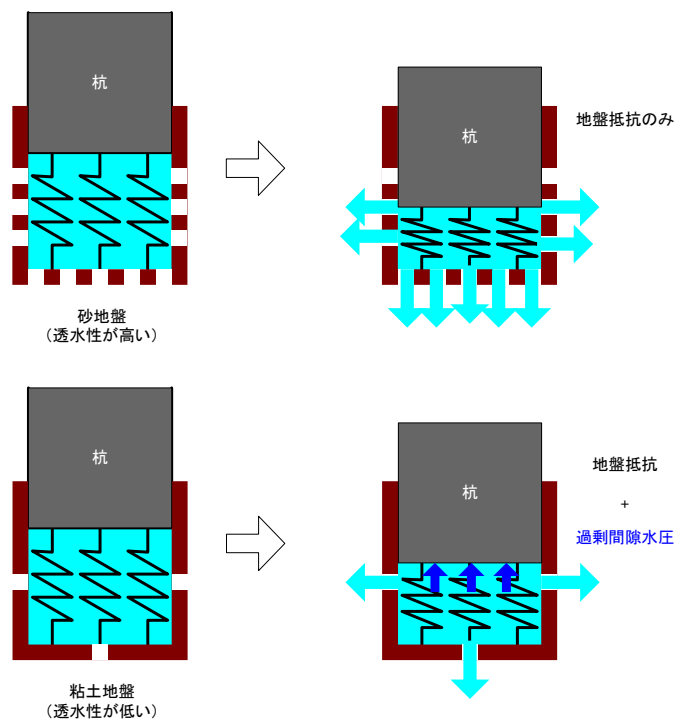


図 1-2 載荷試験時の間隙水圧の挙動のイメージ

(2) 杭体の挙動

静的な荷重状態では杭体の挙動は静的な力の釣り合い状態となります。床上に立てた棒（杭）の頭に静的な圧縮力を加えた場合は杭先端も同じ圧縮力が発生し、応力分布は等分布です（全圧縮状態）。一方非常に時間の短い荷重である動的荷重（衝撃荷重）を杭頭に加えた場合は、杭頭に加えた圧縮力が先端に伝わるまでに時間が掛かるために杭頭と杭先端で生じる応力が異なる現象が起きます。このように荷重中に応力の不均一となる状態を波動現象と呼びます。短時間の荷重の波が杭体を行ったり来たりしている現象です。杭体に波動現象が起きると杭の各部の動きが異なることとなります。

動的荷重であっても比較的長い時間を荷重する急速荷重試験では、杭体の波動現象は起こらず静的荷重と同様に等分布の応力状態になります。ただし急速荷重時には杭体全体が速度を持つことからその際に生じる加速度による杭体の慣性力が生じます。慣性力とは電車などの乗り物で動きだした時に体がぐらっとさせられる力で加速度×質量で表されます。

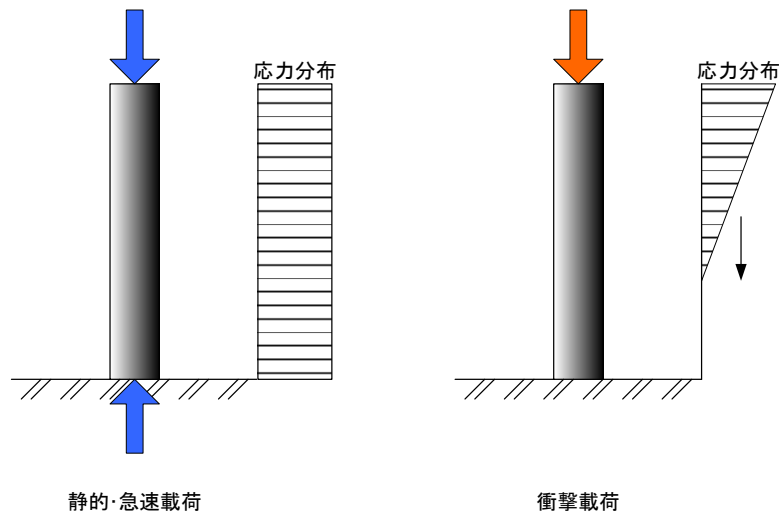


図 1-3 荷重中の杭体の応力分布

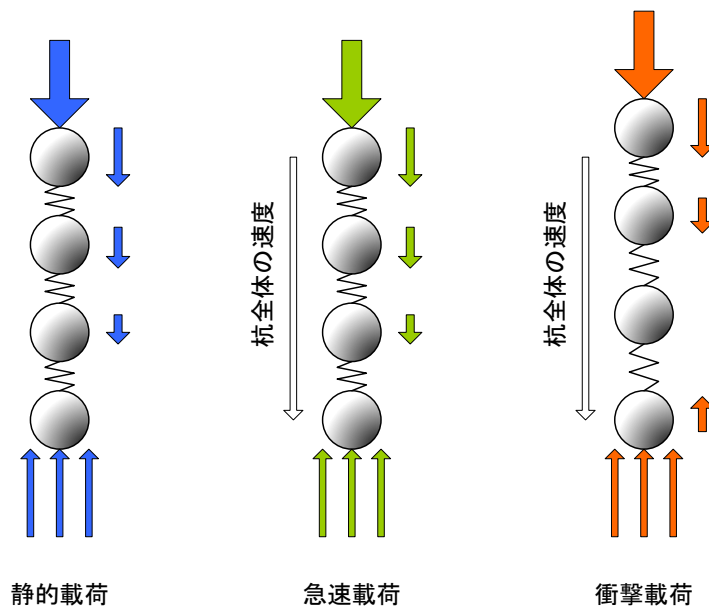


図 1-4 荷重中の杭体の挙動のイメージ

(3) 荷重~変位置曲線

荷重中の地盤抵抗状態や杭体の挙動が異なれば荷重試験で得られる荷重~変位置曲線も異なります。静的荷重の場合は静的な抵抗と変位置の関係曲線ですが、急速荷重の場合は静的な地盤抵抗に加えて動的な地盤抵抗および杭体全体の慣性力が加わり荷重~変位置曲線が膨らむ形になります。衝撃荷重の場合は杭体の挙動が波動現象を伴いますので杭頭変位置と発現される地盤の抵抗力が相関しない状態となり、いわゆるきれいな荷重~変位置曲線は描けません。

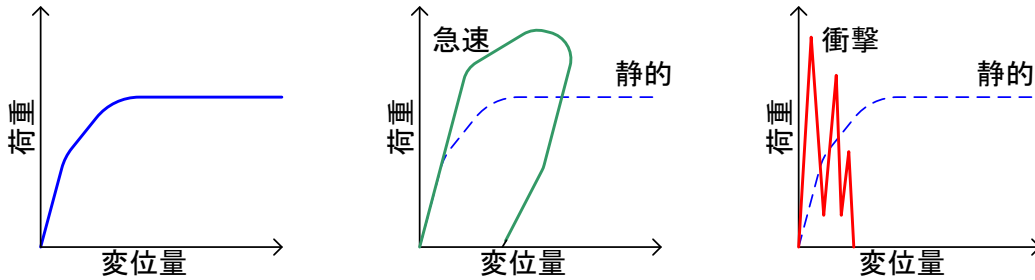


図 1-5 荷重~変位置曲線

上記の地盤抵抗、杭体の挙動の違いについてまとめると表 1-3 と図 1-6 になります。

表 1-3 荷重中の現象の違い

| 荷重中の現象 |                | 荷重の種類 |             |             |
|--------|----------------|-------|-------------|-------------|
|        |                | 静的    | 動的          |             |
|        |                | 押し込み  | 急速          | 衝撃          |
| 地盤抵抗   | 変位に依存する抵抗      | 有り    | 有り          | 有り          |
|        | 速度, 加速度に依存する抵抗 | 無し    | 有り          | 有り          |
|        | 過剰間隙水圧         | ほぼ無し  | 有り<br>(粘性土) | 有り<br>(粘性土) |
| 杭体挙動   | 全圧縮状態          | 全圧縮   | 全圧縮         | ならない        |
|        | 杭体を一質点とみなした慣性力 | 無し    | 有り          | 一体でない       |
|        | 波動現象           | 無し    | 無し          | 有り          |

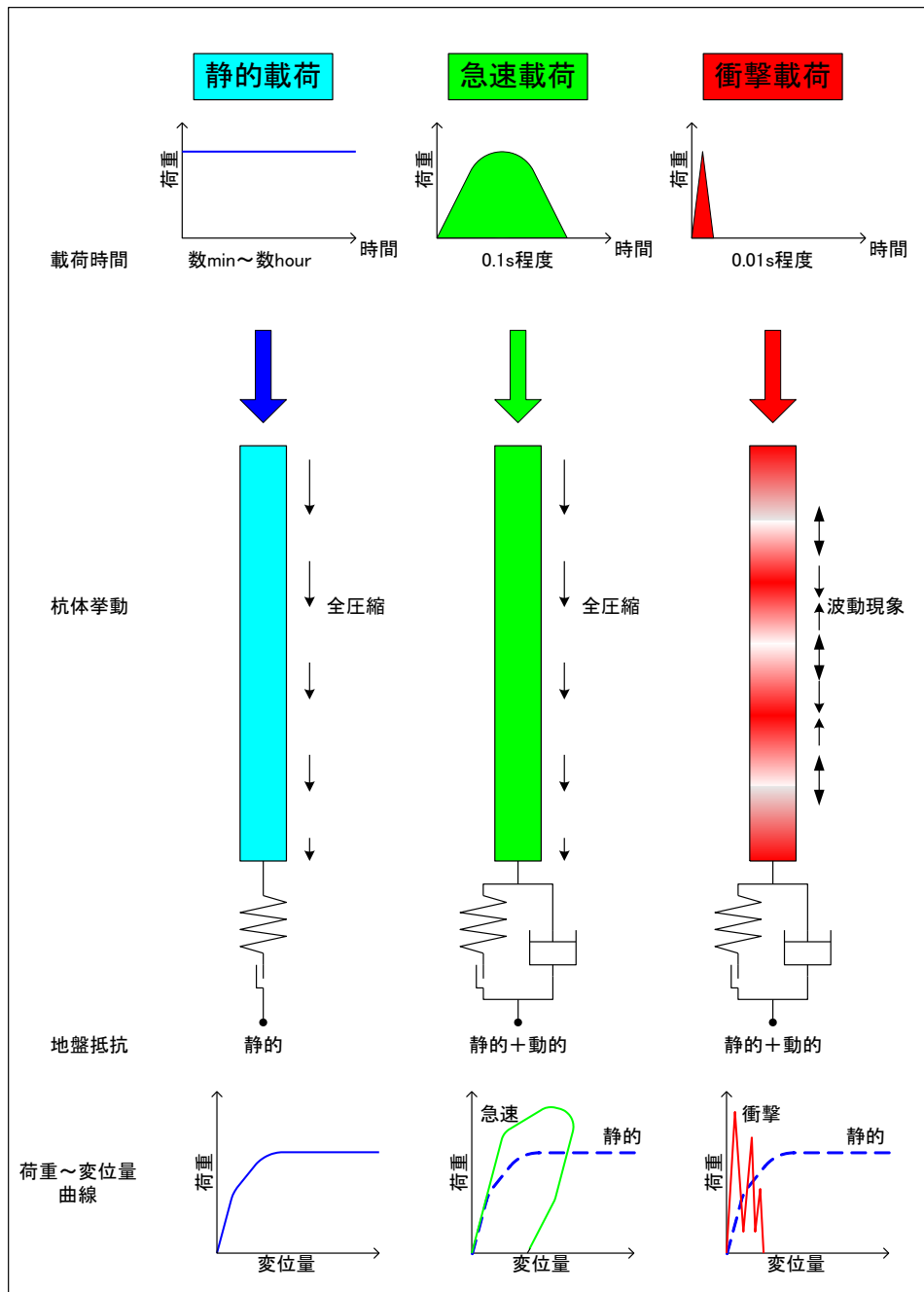


図 1-6 载荷中の現象の比較

#### (4) 相対载荷時間

静的载荷、急速载荷および衝撃载荷は载荷時間の長さにより区分されると述べましたが、同じ载荷時間の荷重であっても杭が長いほど圧縮力が先端まで伝達するのに時間を要し波動現象が生じ易くなります。反対に短ければ圧縮力が短時間で先端まで達しますので波動現象が生じ難くなります。したがって波動現象が起こるかどうかの载荷時間の長さは絶対的な時間の長さではなく、杭体の長さに対する相対的な時間長さとなります。地盤工学会の基準ではこの相対的な時間長さを相対载荷時間として定義しています。

具体的には相対载荷時間は、载荷の時間中に応力波が杭体を往復できる回数で定義されます。相対载荷時間の定義を  $Tr = \frac{T}{\left(\frac{2L}{c}\right)}$  ・ ・ 式 1.1 よび図 1-7 に示します。また基準の中で相対载荷時間による载荷の区分を表 1-4 に示します。

$$Tr = \frac{T}{\left(\frac{2L}{c}\right)}$$

・ ・ 式 1.1

$T$  : 荷重時間

$2L/c$  : 応力波が杭体を1往復する時間

$L$  : 杭長

$c$  : 縦波伝搬速度

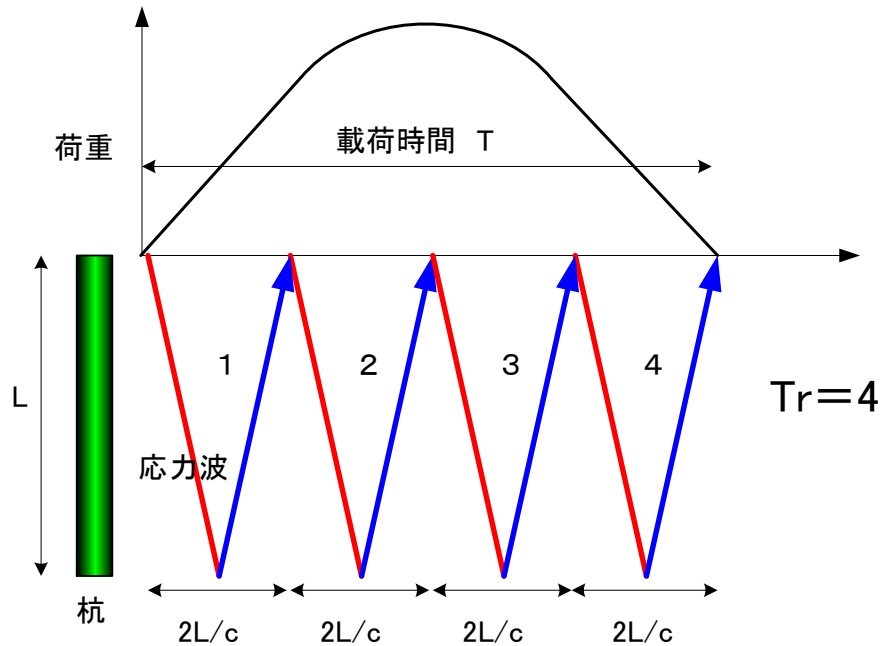


図 1-7 相対荷重時間の定義

表 1-4 相対荷重時間による荷重の区分

| 荷重の区分 | 相対荷重時間            |
|-------|-------------------|
| 静的    | $Tr \geq 500$     |
| 急速    | $500 > Tr \geq 5$ |
| 衝撃    | $5 > Tr$          |

相対荷重時間を具体的にイメージするために図 1-8 に示す三角形状の荷重を例にして考えます。これらの三角形状の荷重が杭頭に入力され荷重の頂点が杭頭に差し掛かった時点での杭体の応力分布を図 1-9 に示します。厳密には先端からの反射があるので図とは異なりますが、これを見れば相対荷重時間が長いほど応力分布が静的条件に近づくことをイメージできると思います。

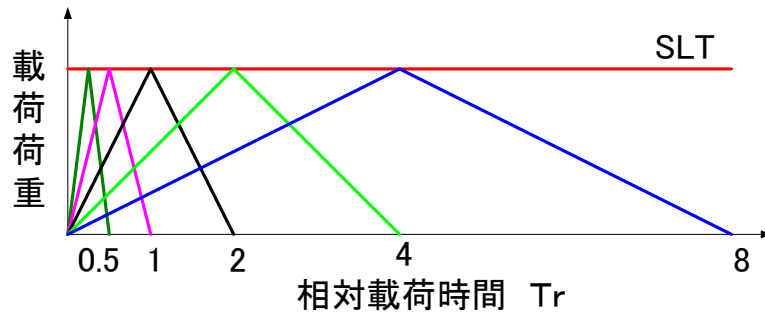


図 1-8 相対載荷時間の異なる荷重

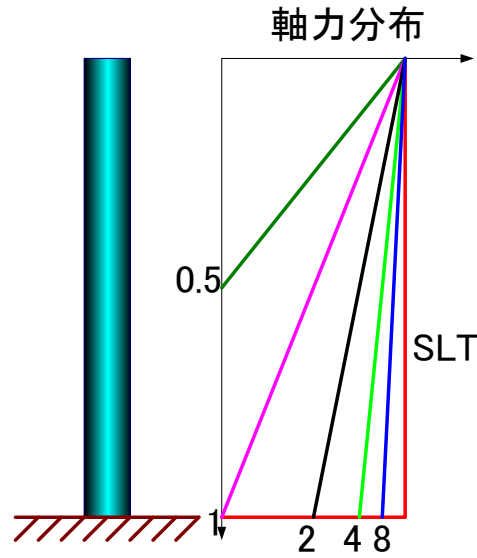
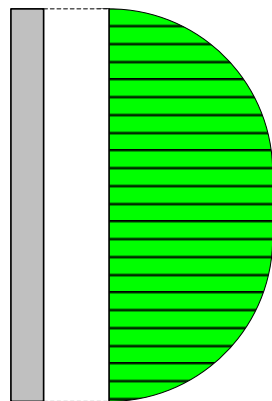


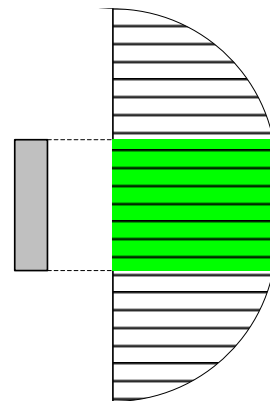
図 1-9 相対載荷時間が異なる場合の応力分布の比較

長い杭



応力分布  
(波動現象)

短い杭



応力分布  
(全圧縮)