

現場試験結果に基づく軟クッション重錘落下方式の急速荷重試験における動的効果の傾向

杭, 急速荷重試験, 動的効果
Pile, Rapid load test, Dynamic effect

地盤試験所 国際会員 ○亀井 秀一 国際会員 林 世峻
正会員 小林 剛 正会員 吉國 将大
国際会員 山下 久男 正会員 高野 公作
坪井 秀樹 国際会員 山本 伊作

1. はじめに

2002年に改定された杭の鉛直荷重試験方法・同解説(以後、2002基準と呼ぶ)では、新たに動的荷重試験(急速荷重試験(RLT)・衝撃荷重試験(DLT))が追加された。これにより数多くのRLTが実施されデータが蓄積されてきた。前回の発表(亀井他 2020)では、国内におけるRLT装置の変化(反力体慣性力方式→軟クッション重錘落下方式[ハイブリッドナミック試験])による試験結果の傾向や特徴を把握するため、63例のRLT結果より急速荷重 F_{rapid} と除荷点抵抗力 R_{ulp} (静的地盤抵抗力 R_w)の関係について考察した。本稿では、地盤抵抗力 R_{soil} との関係も着目し、その後実施した37例を加え、合計100例の軟クッション重錘落下方式で実施したRLTの傾向について改めて考察した。

2. 一質点系モデル解析法

杭の急速荷重試験で荷重-変位量関係を求める解析法のうち、最も多く用いられているのが一質点系モデル解析法である。同解析法は図-1に示すように、杭体を剛体一質点、地盤の抵抗をばねとダッシュポットでモデル化して、杭の挙動を解析する方法である。

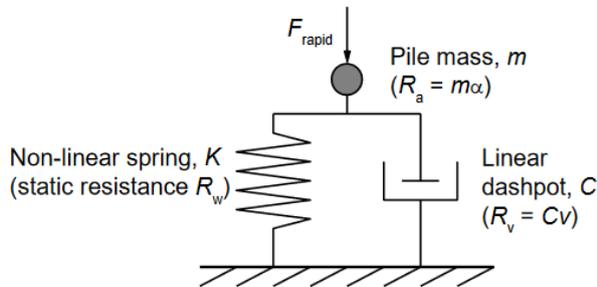


図-1 急速荷重試験中の地盤と杭のモデル化

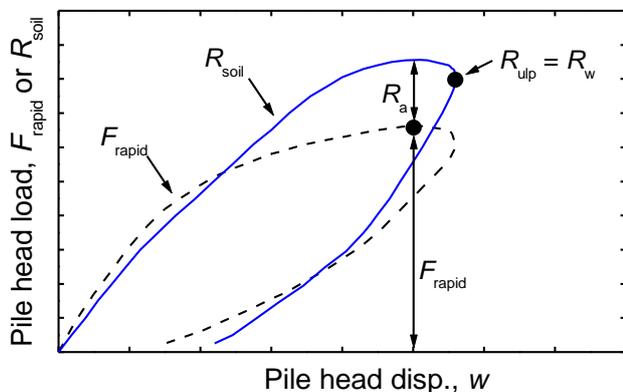


図-2 杭頭荷重・地盤抵抗力と杭頭変位量の関係の模式図

図-2にあるような急速荷重 F_{rapid} と変位量 w のデータより、式(1)~式(4)を用いて、最終的に静的抵抗成分 R_w を得ることができる。軟クッション重錘落下方式RLTによって、重錘落下高を段階的に上げることにより落下回数分の除荷点を得ることができるため、これらの点を結び連続的な静的荷重-変位量関係を得る解析方法へと発展した(大石他 2005)。この方法は除荷点接続法(ULPC法)(中山, 林他 2022)と呼ばれ、多くの結果解析に用いられている。

$$F_{rapid} = R_a + R_v + R_w = m \alpha + C v + R_w \quad (1)$$

$$R_{soil} = F_{rapid} - m \alpha \quad (2)$$

$$R_w = R_{soil} - C v \quad (3)$$

$$R_{soil \text{ at ULP}} = R_{ulp} = R_w \quad (4)$$

ここで、 F_{rapid} : 急速荷重, R_a : 杭体慣性力 ($= m \alpha$), R_v : 地盤の動的抵抗成分, R_w : 静的抵抗成分, R_{soil} : 地盤抵抗力, m : 杭体質量, α : 杭体加速度, C : 減衰定数, v : 杭体速度, R_{ulp} : 除荷点抵抗力

3. 試験事例

今回の検討には100の試験事例をとりあげた。表-1~表-2に工法, 杭種, 杭径, 杭長, 杭先端 N 値, 先端地盤種別に区分した事例の一覧を示す。

表-1 試験事例一覧(工法・杭種・杭径)

工法	打撃	中掘り プレボーリング	その他 (回転・振動等)		
試験数	9	29	62		
杭種	鋼管杭	PHC杭, SC杭	場所打ち杭, 他		
試験数	71	24	5		
杭径 (mm)	~ 300	301~ 600	601~ 1000	1001~ 1500	1501~ 非円形
試験数	11	34	36	13	3 3

表-2 試験事例一覧(杭長・先端 N 値・先端地盤)

杭長(m)	~10	11~20	21~40	41~60	60~
試験数	14	35	27	20	4
先端 N 値	~29	30~39	40~49	50~	不明
試験数	21	9	5	50	15
先端地盤	砂質土	粘性土	礫質土	岩	不明,他
試験数	27	10	15	29	19

Trend of dynamic effects in falling mass type rapid load test based on results of field tests

Kamei S., Lin S., Kobayashi G., Yoshikuni M., Yamashita H., Takano K., Tsuboi H., Yamamoto I. (Jibanshikenjo Co.)

4. 急速荷重・除荷点抵抗力・地盤抵抗力の関係

図-3～図-4 に、一質点系モデル解析から得られた除荷点抵抗力 R_{ulp} と最大急速荷重 $F_{rapid(max)}$ 、最大地盤抵抗力 $R_{soil(max)}$ の関係を示す。各図中の(a)は 100 例の重錘落下方式 RLT の結果、(b)は反力体慣性力方式で 2002 基準の解説の記載である。重錘落下方式 RLT は段階的な重錘落下により複数の R_{ulp} が得られるが、これらの図では一連の打撃から得られた R_{ulp} の最大値を採用している。

(a), (b)の図を比較すると、重錘落下方式に装置が変わった(a)では荷重規模が大きくなっていることがわかる。反力体慣性力方式の場合、国内では 30MN 用装置が最大であったが、軟クッション重錘落下方式では 40MN 程度の急速荷重 F_{rapid} の荷重が実施されている。現在では重錘質量の増加により（最大重錘質量 $m_h = 180 \text{ ton}$ ）、計算上 50MN 以上の急速荷重 F_{rapid} が荷重可能である。

・ $F_{rapid(max)} - R_{ulp}$ 関係 (図-3(a))

除荷点抵抗力 R_{ulp} は最大急速荷重 $F_{rapid(max)}$ と同程度である場合がほとんどであるが、中には $F_{rapid(max)}$ に対して R_{ulp} が -20%程度となる事例がある。これらの多くは荷重-変位量関係が弾性的な傾向を失い降伏状態に遷移する場合や、 R_{ulp} が頭打ちとなっている場合（極限支持力状態）である。このような傾向を確認するまで荷重するのであれば、2002 基準と同様、試験計画時には $F_{rapid(max)}$ は確認支持力に対して、20%程度荷重を割増すのがよいと考えられる。

・ $R_{soil(max)} - R_{ulp}$ 関係 (図-4(a))

除荷点抵抗力 R_{ulp} は最大地盤抵抗力 $R_{soil(max)}$ より低い値であり、ほとんどの場合 R_{ulp} は $R_{soil(max)}$ の 80%以上という結果であった。 $R_{soil(max)}$ 時も R_{ulp} と同程度の静的抵抗成分 R_w が含まれているとした場合、式(3)に示す関係から、最大地盤抵抗力 $R_{soil(max)}$ のうち動的抵抗成分 R_v が占める割合は 20%以下であったと言える。衝撃載荷試験 (DLT) では、施工時の実績ではあるものの R_v は R_{soil} の概ね 50%とされており（菊池他 2009）、試験方法の違いによる R_v の割合の傾向が明瞭に表れている。これは 2002 基準 (図-4(b)) と同様の傾向である。

また、図-4(a)にて -20%以下にプロットされている事例は、図-3(a)における R_{ulp} が -20%程度となる事例と同様の荷重-変位量関係の場合である。

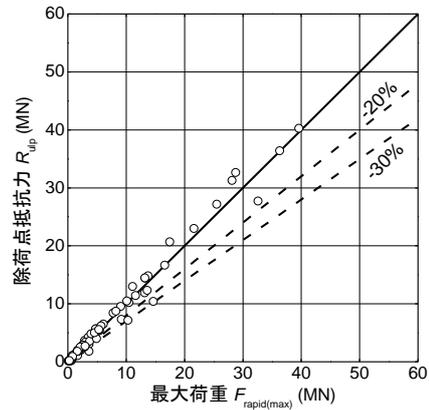
5. まとめ

軟クッション重錘落下装置による 100 例の急速載荷試験の結果から、載荷装置が軟クッション重錘落下装置に変わっても、2002 基準で示されている動的効果の傾向と大きな差異は無いことがわかった。また、ULPC 法で得られた荷重-変位量関係を検討することで動的効果の杭変位依存性のある程度示すことができた。

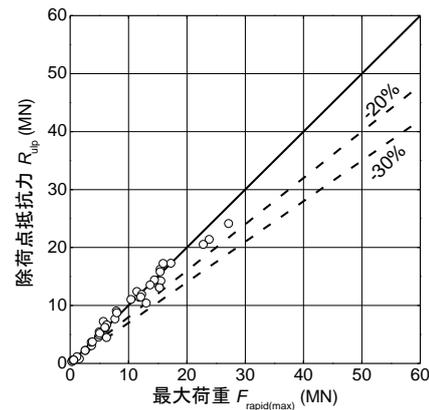
今後は、急速載荷試験の新たな解析法 (ULPC_CM 法 (中山, 林他 2022)) の場合について同様の検討を行い、解析法の違いによる傾向を考察していきたい。

参考文献

JGS 1815-2002 杭の鉛直載荷試験方法・同解説 (第一回改訂版) 杭の急速載荷試験方法, 地盤工学会.
 亀井 他 (2020): 軟クッション重錘落下方式で行う急速載荷試験の計画荷重の考え方, 第 55 回地盤工学研究発表会.
 大石 他 (2005): 重錘落下方式急速載荷試験 その 1 荷重-沈下量計測の信頼性, 第 40 回地盤工学研究発表会.
 中山, 林 他 (2022): Case 法を援用した除荷点接続法による杭の荷重-変位関係の推定法について (その 1) (その 2), 第 57 回地盤工学研究発表会.
 菊池喜昭, 水谷崇亮, 森川嘉之 (2009): 港湾空港技術研究所資料 No.1202, p.66.

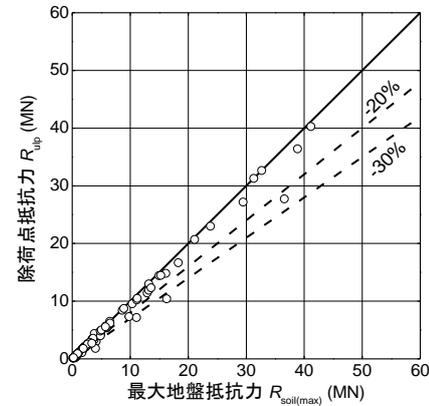


(a) 重錘落下方式データ (ハイブリッドナミック試験)

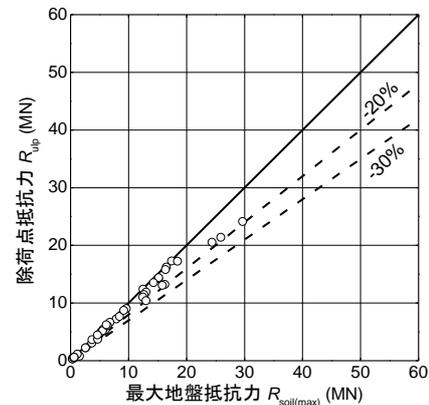


(b) 反力体慣性力方式データ (2002 基準)

図-3 最大急速荷重 $F_{rapid(max)}$ - 除荷点抵抗力 R_{ulp}



(a) 重錘落下方式データ (ハイブリッドナミック試験)



(b) 反力体慣性力方式データ (2002 基準)

図-4 最大地盤抵抗力 $R_{soil(max)}$ - 除荷点抵抗力 R_{ulp}