

1. まえがき

杭の打撃応力の算定式に関しては、従来いくつかの方法が提案されてきた。これらのうち、規準や指針などで多く用いられている波動方程式に基づく打撃応力の算定式は、ハンマーの重量の考え方が一般技術者には理解しにくい面があった。鋼管杭協会、施工分科会（山肩分科会委員長）では「鋼管杭の打撃応力と適性ハンマ¹⁾」と題した技術書を出版した。これは主として、ハンマの選定に関する観点から杭の打込み時に杭頭に発生する打撃応力の算定式について論じたものである。本報告では、鋼管杭の打込み時に杭の各部に生ずる打撃応力の考え方とその算定式について筆者らの見解をまとめたものである。

2. 杭に発生する打撃応力の考え方

すでに筆者らはこの種の向題に関していくつかの報告を行なっているが、その基本的な考え方は次のようなものである。その詳細はそれぞれの文献を参照されたい。

① 杭に発生する波動は一次元波動理論によって取扱うものとする。²⁾

② 打撃応力 σ と杭体の変位速度 v との関係は、Thomas Young の基本式が成立する。²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

$$\sigma = \frac{C_p \rho_p}{g} v \quad (1) \quad \text{ここに、} C_p \text{ は杭の弾性波速度、} \rho_p \text{ は単位体積重量、} g \text{ は重力加速度である。}$$

③ 杭の形状から生ずる断面の不連続面においては、波動の反射と透過の現象を考える。このとき、波動の反射と透過の割合は、反射係数 α 、透過係数 β としてそれぞれ(2)式、(3)式で表わされる。²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

$$\alpha = (-1 + A_{p2}/A_{p1}) / (1 + A_{p2}/A_{p1}) \quad (2) \quad \beta = 2 / (1 + A_{p2}/A_{p1}) \quad (3)$$

ここで、 A_{p1} は波動の入射側の杭の断面積、 A_{p2} は透過側の断面積をそれぞれ表わす。

④ 杭頭に発生する打撃応力は、剛体のハンマによって打撃された場合について解いたSt.Venant解によって近似できる。すなわち、断面積 A の杭を重量 W のハンマが h の高さから自由落下するとき、杭に発生する打撃応力の時間変化は(4)式で表わされる。⁸⁾

$$\sigma = \sigma_0^* e^{-\frac{E_p A_p}{W h} C_p t} \quad (4)$$

ここで、

$$\sigma_0^* = \frac{C_p \rho_p}{g} v = \frac{C_p \rho_p}{g} \sqrt{2gh} \quad (5)$$

である。

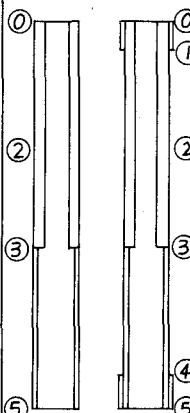
①②③④の種々の関係は、筆者らの基礎実験により十分満足すべきものであることが確認されている。⁴⁾

これらをもとに、鋼管杭の打込み時に、杭の各部に発生する打撃応力の算定式について考察する。

3. 杭に発生する打撃応力のまとめ

3.1 杭頭打撃面付近の局部応力 σ_0 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾

杭頭に生じる打撃応力は偏心打撃によって、きわめて大きくなることも考えられるが、実測例が少ない。従って、現時点ではSt.Venant解をそのまま用

鋼管杭	名称	打撃応力の算定式	備考
	① 杭頭部	① $\sigma_0 = \sigma_0^* e^{-\frac{A_p \rho_p}{W h} C_p t}$	杭頭打撃面付近の局部応力
	② 杭体部	② $\sigma_1 = \frac{2}{1 + \frac{A_{p2}}{A_{p1}}} \sigma_0 \quad (A_{p1} > A_{p2})$	断面変化による局部応力
	③ 杭体部	③ $\sigma_2 = \sigma_0^* e^{-8.04 \frac{A_p}{W h}}$	杭体に発生する応力
	④ 杭先端部	④ $\sigma_3 = \frac{2}{1 + \frac{A_{p2}}{A_{p1}}} \sigma_2 \quad (A_{p1} > A_{p2})$	断面変化による局部応力
	⑤ 杭先端部	⑤ $\sigma_4 = \frac{2}{1 + \frac{A_{p1}}{A_{p2}}} \sigma_2 \quad (A_{p1} < A_{p2})$	断面変化による局部応力
		⑤ $\sigma_5 = (1 + \alpha) \sigma_2$	杭先端部に発生する局部応力

σ : 打撃応力(kg/cm^2), $\sigma_0^* = E_p / C_p \sqrt{2gh}$, A_p : 杭の断面積(cm^2), A_{p1} : 波動の入射側, A_{p2} : 波動の透過側, ρ_p : 杭の単位体積重量(kg/cm^3), E_p : 杭の弾性係数(kg/cm^2), C_p : 杭の弾性波速度(m/sec), t : 時間(sec), W_h : ハンマー重量(kg), h : ハンマーの落下高さ(m)
 α : 杭先端における杭体への反射係数($-1 \leq \alpha \leq 1$) $\alpha = -1$: 自由端, $\alpha = 1$: 固定端

図-1 鋼管杭各部の打撃応力算定式のまとめ

いて、(6)式で推定しておくといよい。

$$\sigma_0 = \sigma^* e^{-\frac{A_p \rho_p}{W H} c_p t} \quad (6)$$

3.2 杭頭部の断面変化による局部応力 $\sigma_1^{5)}$

杭頭における補強バンドの下部では、短時間ではあるが局部的な応力集中が生ずる。(2)式の関係を用いて、(7)式で推定してよい。ただし、この応力の継続時間は短時間である。

$$\sigma_1 = 2\sigma_0 / (1 + A_{p2}/A_{p1}) \quad (A_{p1} > A_{p2}) \quad (7)$$

3.3 杭体部に発生する打撃応力 $\sigma_2^{4)8)9)}$

(5)式で与えられる St. Venant 解と実測波形を比較すると、実測波形の最大応力は、フッション、キャップなどの影響を受けて 2 msec 程度遅れて発生する。(5)式の $t = 2 \text{ msec}$ を代入して整理し、(8)式で推定してよい。

$$\sigma_2 = \sigma_0^* e^{-0.04 \frac{A_p}{W H}} \quad (8)$$

3.4 杭体部の断面変化による局部応力 $\sigma_3^{5)}$

上杭と下杭の断面積が異なる場合に、下杭に応力集中が生ずる。(2)式の関係を用いて、(9)式で推定してよい。

$$\sigma_3 = 2\sigma_2 / (1 + A_{p2}/A_{p1}) \quad (A_{p1} > A_{p2}) \quad (9)$$

3.5 杭先端部の断面変化による局部応力 $\sigma_4^{5)}$

杭先端にフリクションカッターあるいは補強バンドなどによる断面変化があるとき、その上側に応力集中が生じる。(10)式により推定してよい。

$$\sigma_4 = 2\sigma_2 / (1 + A_{p1}/A_{p2}) \quad (A_{p1} < A_{p2}) \quad (10)$$

3.6 杭先端に発生する局部応力 $\sigma_5^{6)}$

杭体を伝はしてきた応力は、杭先端では地盤への透過と杭体への反射が生ずる。杭先端部に発生する局部応力は(11)式により推定してよい。

$$\sigma_5 = (1 + \alpha) \sigma_2 \quad (11)$$

ここで、 α は、杭体への反射係数で、 $-1 \leq \alpha \leq 1$ の範囲にあって、岩盤のような固い地盤の場合には、かなり大きな応力が生じることになる。このような地盤では、相当大きな支持力が得られているので、むしろ過剰な打撃をしないように、施工上の配慮が必要になる。これらの関係をまとめたものが図-1である。

4. まとめ

以上、波動理論を基にして、杭に生じる打撃応力について述べたが、もとより鋼管杭は鋼板を円環状に加工されるものであり、板厚や径などの断面形状を考慮して、今後更に検討を進めるべきものと考えられる。

これには、打撃時の杭の動的な運動や応力などを正確に測定しうる測定器系を使用し信頼しうるデータを数多く収集することが大切なものと思われる。

本文では、杭の各部に生じる打撃応力の考え方とその算定式について筆者らの見解をまとめた。これには、鋼管杭協会、施工分科会、山崎委員長はじめ各委員の方々の貴重な御意見を参考にさせていただいた。ここに厚く謝意を表します。

参考文献 1) 鋼管杭協会施工分科会；鋼管杭の打撃応力と適正ハンマ、鋼管杭協会、S57.3.

2) 宇都一馬；ワイの打込み、橋梁と基礎 1-1, 1967.

3) 宇都・冬木他；シンクロスコープを用いた打撃応力の観測、第23回年次学術講演会、土木学会、1968.

4) 宇都・冬木他；波動理論による打込み時くい頭部応力の算定式について、第30回年次学術講演会、土木学会、1975.

5) 宇都・冬木他；打込み時にくい体発生する打撃応力の算定式について、第31回年次学術講演会、土木学会、1976.

6) 宇都・冬木他；くい打撃応力に及ぼす先端地盤の影響、第32回年次学術講演会、土木学会、1977.

7) 宇都・冬木他；くい偏心打撃に関する実験、第4回関東支部年次研究発表会、土木学会、1977.

8) 宇都・冬木他；くい打撃応力におよぼすハンマーの重量について、第5回関東支部年次研究発表会、土木学会、1978.

9) 宇都・冬木・福原；鋼管杭打込み時の打撃応力の算定式、第17回土質工学研究発表会、1982.