

東海大学工学部 正会員 宇都一馬

正会員 冬木 衛

正会員 近藤 博

1. まえがき くいの打ち時にくいに発生する打撃応力の算定式の考え方には、大きく分けて、つぎの2つの立場がとられている。① エネルギーのつり合いによる方法 $\sigma_p = \sqrt{2E \frac{E_p W_h h}{A_p L_p}}$ ----(1) (建築学会・鋼ぐい規準)

② 波動方程式によるもの $\sigma_p = \frac{\alpha \sqrt{2E_p E_p h}}{(1 + \frac{A_c E_c h}{A_p E_p h})(1 + \frac{A_p E_p h}{A_c E_c h})}$ ----(2) (建築学会 鋼ぐい規準) あるいは、 $\sigma_p = \frac{e \sqrt{2E_p h}}{1 + \frac{A_p E_p h}{A_c E_c h}}$ ----(3) (道路協会 ぐい基礎の施工)

筆者らは、くいの打ち込みに関する一連の研究を行なっており、(2)式の誘導過程の誤り³⁾、(3)式の考え方⁵⁾についてはすでに報告した。今回の報告では、(1)式の問題点、これと波動方程式によるものとの関係、さらにこれらの算定式におけるハンマー重量の影響などについて考察した。

2. 打撃エネルギーのつり合いによる打撃応力の算定式の問題点

この考え方はハンマーのもつ位置エネルギー($W_h \cdot h$)と打撃時にくいおよび地盤が吸収するエネルギーのつり合いから求めるもので、その誘導過程は文献(1)に詳しい。(1)式は、地盤やくいなどの微小変形量を無視して単純化したもので、実用的には、ドロップハンマー、ギンゼルハンマーの各々について経験的な効率 e や修正係数 α で補正して用いられる。また、この考え方は、各種のいわゆる動的くい打ち公式の基本原理となっているものでもある。一方、(1)式はまた初等材料力学の教科書で扱う縦衝撃の解とも一致する。

すなわち、図-1(a)に示すように、弾性樁(くい)を剛性支持台(剛性地盤)の上にせ、重量が W_h である剛体(ハンマー)を高きから自由落下させた場合、樁の内部に生ずる最大応力 σ_{max} は $\sigma_{max} = \sqrt{\frac{E_p W_h}{A_p L_p}} \cdot v_0 = \sqrt{2 \frac{E_p W_h h}{A_p L_p}} = \frac{E_p v_0}{C_p} \sqrt{\frac{W_h}{W_p}} = \sigma_0 \sqrt{m}$ ----(4) で与えられる。ここに、 $\sigma_0 = \frac{E_p v_0}{C_p}$ 、 $m = \frac{W_h}{W_p}$ である。(1)式で $e=1$ とおいたものと一致する。ここで注意すべきことは、弾性樁内における応力は、衝突の瞬間に樁全体に一律に分布すると仮定し、さらに、樁に生ずるエネルギーは必ずみエネルギーのみを考えていることである。したがってこのモデルは、弾性樁を図-1(b)のように重量のないバネ K におきかえたものに等しい。この仮定の妥当性を調べるため、図-1(a)の問題を3で述べる波動理論で解いた厳密解から得られる最大応力 σ_{max} と比較したものが図-2である。¹⁰⁾ 図では応力の表示は σ_{max}/σ_0 で無次元化しており、厳密解の近似式も示してある。これより、(4)式から求まる最大応力 σ_{max} は重量比 m が非常に大きな場合(たとえば1000)には厳密解に近似的だが、くい打ちの実用範囲($m=1 \sim 10$)においては両者の差は無視できない。

これから、打撃エネルギーのつり合いによる打撃応力の算定式の問題点として、つぎのことがいえる。① この解は重量比 m が非常に大きな場合の近似解ではあるが、くい打ちの実用範囲では大きな誤差がみこまれる。② この原因は、くい体に発生する応力が打撃の瞬間にくい先端で一様に分布するとし、しかもくいの必ずみエネルギーのみ考え、運動エネルギーを無視していることによるもので、いわゆる真の意味の動的エネルギーのつり合いはとれていないことにある。③ したがって、さらに複雑な先端条件を有する実際のくい打ち現象においては、3で扱う波動理論により、くい体の運動エネルギーまで含めた

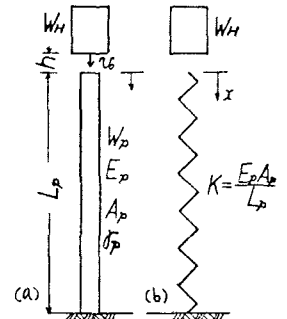
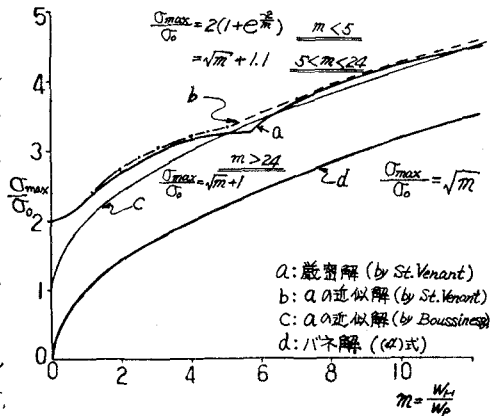


図-1 解析モデル



a: 厳密解 (by St. Venant)
b: a の近似解 (by St. Venant)
c: a の近似解 (by Boussinesq)
d: バネ解 (α式)

図-2 先端を剛体で支持された弾性樁の縦衝撃の解

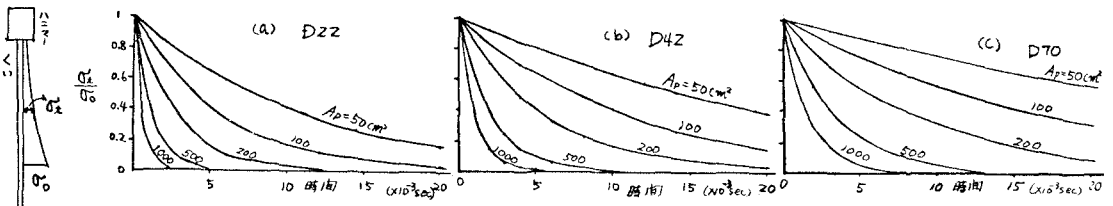


図-3 打撃応力波形におよぼすハンマー重量の影響—St. Venant 解の基本波形による (鋼ぐいの場合)

扱いがより妥当となる。

3. 波動方程式による打撃応力の算定式 この考え方の理論的な扱い^{3), 5), 6)}、模型実験⁴⁾、現場実験^{7), 8)}などの詳細はそれぞれの参考文献を参照されたい。2. で扱ったエネルギーのつり合いによるものとの主な相違点は、①エネルギーのつり合いをとる場合は、運動エネルギーとひずみエネルギーの和で考える。②打撃応力は重量比 m のみでは決定されず、ハンマーとぐいのそれぞれの形状、材料定数が重要な要素となる。③ハンマー、ぐいのいずれも、それに発生する応力波の重複反射を考慮する。④③式($e=1$)によって与えられる衝突時のピーク応力が、必ずしも最大応力とは限らない。

⑤ハンマー重量の相違は、打撃応力の大小よりも、応力波の波長^{図-4}の長短により大きな影響となって現われる。なごである。

4. 打撃応力におよぼすハンマー重量の影響 ぐいに生じる打撃応力の基本波形は、St. Venant 解 $\sigma_z = \sigma_0 e^{\frac{z}{h} \sqrt{\frac{E_p}{E_g}}}$ で近似できる。これによれば、ハンマーの落下高さ h が一定(ひが一定)ならばピーク応力 $\sigma_0 = \frac{E_p v_0}{h}$ は一定で、ハンマーの重量はその波長に關与することがわかる。図-3は、デゼルIIにマーD22, D42, D70に相当する応力波形(ただし、爆発力の影響は入っていない)を種々の鋼ぐい断面積に關して、⑤式で求めて画いたものである。 $A_p = 200 \text{ cm}^2$ のぐいに注目すれば、ハンマー重量が大きいものは波長が長くなるのがわかる。また、同一ハンマーに注目すれば、打ち込むぐいに与える応力波形の推定ができ、さらに爆発力などの定量的な見積りができれば、実際の施工におけるハンマー容量の選定に有効な情報となり得る。図-4は、このような観点から実測応力波形とSt. Venant 解の基本波形⑤式の比較を行なったものである。

まとめ ①ぐいに発生する打撃応力におよぼすハンマー重量の影響は、応力の絶対値よりもその波長の長短により大きく現われる。②いわゆるエネルギーのつり合いによる打撃応力の算定式では、真の意味の動的エネルギーのつり合いはとれておらず、したがって経験的な補正式の適用にもおのずから限界がある。③また、この考え方に基礎を置く、各種の動的ぐい打ち公式も厳密には動的な問題を扱っているわけではない。④ぐい打ち現象は波動理論によって、応力のピーク値のみでなく波長まで考慮した厳密な取り扱いが必要となる。⑤ハンマーの容量の選定、施工地の判定などは応力の絶対値のみでなく波長まで考えに入れることが重要で、St. Venant 解の基本波形を基準にすることが有効となる。

なお、基礎的な実験結果については、発表当日スライドで説明する予定である。

参考文献 1) 建築鋼ぐい基礎設計施工規準, 日本建築学会 2) 道路橋下部構造設計指針ぐい基礎の施工編, 日本道路協会 3) 宇都部他; クイの打ち込み(弾性波としての打撃応力について)橋梁と基礎 Vol. 1 No. 7 (1967) 4) 宇都部他; シンクロスコープを用いた打撃応力観測, 第23回土木学会 (1968) 5) 宇都部他; 波動理論による打ち込み時ぐい頭部応力の算定式について, 第30回土木学会 (1975) 6) 宇都部他; 打ち込み時にぐい体に発生する打撃応力の算定式について, 第31回土木学会 (1976) 7) 宇都部他; ぐいの偏心打撃に関する実験, 第4回土木学会関東支部 (1977) 8) 宇都部他; ぐいの打撃応力に及ぼす先端地盤の影響, 第32回土木学会 (1977) 9) たもとら S. T. Timoshenko, 材料力学(後) コロナ社 (1955) 10) たもとら S. T. Timoshenko; 工業振動学, 東京図書 (1966)

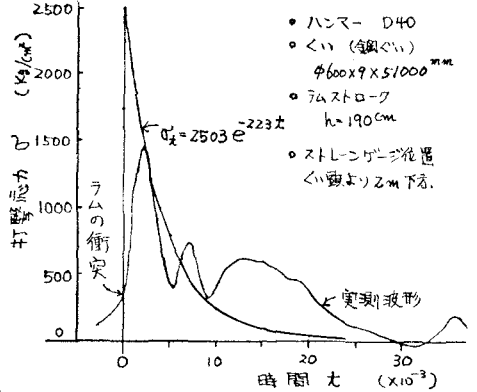


図-4 実測波形と St. Venant 解の基本波形との比較 (鋼ぐい)