

九州大学工学部 正員 水野高明

九州工業大学 正員 渡辺 明

○ハ橋製鉄(株) 正員 清永定光

1. まえがき

クイの動的解析については、すでにいろいろな研究報告がある。筆者らは、E・A・L Smithの提唱したモデル^①を用いて、クイ打ち時、クイ内を伝播する衝撃波を波動方程式で表わす方法で、数値計算によって任意点応力を求め又打ち止め付近の計算から支持力を算定したのでその結果を報告する。

2. 数値計算法

棒が一端に衝撃をうけた場合伝わる波動は $\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 D}{\partial x^2}$ ……① で表わされる。これをクイに適用する場合には、土による外部抵抗を付加することによって、 $\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \pm \frac{g}{w} R$ ……② となる。

これを階差法を用いて書きなおすと $D_m = 2d_m - d_m^* + \frac{g \Delta t^2}{w_m} [(d_{m-1} - d_m)K_m - (d_m - d_{m+1})K_m - R_m]$ ……③

Smithは図-1の様にクイを1.5~3mの小部分に分割し、その間

図-1

をバネで結んだモデルを提唱した。これを用いると

$$D_m = d_m + v_m \Delta t \quad \dots \textcircled{4} \quad F_m = (D_m - D_{m+1})K_m \quad \dots \textcircled{5}$$

$$v_m = v_m + (F_{m-1} - F_m - R_m) \frac{\Delta t g}{w_m} \quad \dots \textcircled{6}$$

ここに大文字は時間tにおけるもの、小文字は時間t-1におけるものを表わす。特に d_m^* は時間t-2における変位である。

D, d: wの最初の位置からの変位, v, v: 速度 F: 力

K: バネ定数, R: 抵抗 Δt: 時間間隔, g: 重力の加速度

④~⑥式を一つの式にまとめると③式となることから、結局

④~⑥式は波動方程式と全く同一のものであることがわかる。

さて、地盤の最大弾性変位をQとすると、地盤のバネ定数は

$$K_m' = \frac{R_m}{Q} \quad \dots \textcircled{7} \quad D_m' \text{を時間tにおける地盤の塑性変位}$$

量とすると、 $R_m = (D_m - D_m') K_m' \quad \dots \textcircled{8}$

さらに瞬間抵抗は速度に関係するのでその影響を考慮すると

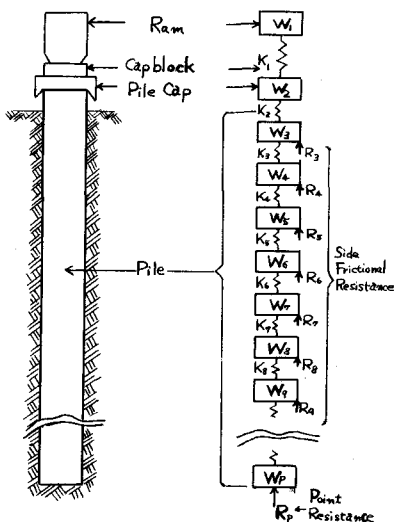
$$R_m = (D_m - D_m') K_m' (1 + J' v_m) \quad \dots \textcircled{9}$$

特にクイ先端(Point)では、 $R_p = (D_p - D_p') K_p' (1 + J' v_p)$ ……ここにJ, J': 減衰定数

実際の数値計算は、④式において、まずラムの衝突速度 U を与え、⑤、⑥式を用いて、 $D \rightarrow F \rightarrow v$ の順に計算し、新しく得られた v から前記同様の計算を一回の打撃が終わるまでくりかえすことになる。

3. 適用例

以上の各式を用いて、遠心力コックリー トバイル JIS 15-500 (長さ15m, 外径500mm, 断面積1054cm², 厚さ80mm, 重量4.11t) を種々の条件のもとで打ちこんだ際の解析を試みた。



1.5 m クイを10等分したので単位長さ $\Delta l = \frac{1}{10} = 1.5 \text{ m}$ $W_1 = 2200 \text{ kg}$ (ラム, D-22 ストローク 1.5m)
 $W_2 = 400 \text{ kg}$, $W_3, W_4 \dots W_{12} = \frac{4110}{10} = 411 \text{ kg}$ $K_1 = 6.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}$, $K_2, K_3 \dots K_{11} = A \frac{E}{\Delta l} = 2.5 \times 10^6 \text{ kg/cm}$
ただし $E = 3.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とした。 $Q = 0.25 \text{ cm}$ $\Delta t = \frac{1}{4000}$ $J = 0.15$ $J' = 0.05$
以上の数値を用いて計算は電子計算機(OKITAC 5099)を使用した。

1) 抵抗の分布を変えた場合

抵抗の分布は図-2に示すごとき三種類について検討した。

I の場合で $R_p = 20 \text{ t}$ の時の時間-変位曲線を図-3に示す。

D'_p はクイ先端位置での地盤の塑性変位量を表わし

$D'_p = D_p - Q$ である。 D'_p の最大値がいわゆる "Permanent Set" であり、図-3の場合には、1打撃あたり 0.15 cm という計算となる。換言すれば 1 cm あたり 6.7 回というりくつとなる。

そこで種々の抵抗値に対する Permanent Set を求め、回數/cm を計算したのが図-4である。

これから打止りでの沈下量と打撃回数を測定すればそのクイの支持力が算定できることになる。抵抗値の違いによるクイ内の応力の差違は、クイ先端を除いては認められず、クイ頭で 400 kg/cm^2 前後、クイ中央で 390 kg/cm^2 、およびクイ先端では 360 kg/cm^2 ($R_p = 10 \text{ t}$) ~ 540 kg/cm^2 ($R_p = 400 \text{ t}$) となった。

II の場合はクイ先端のみならず用辺部にも摩擦抵抗の存在する場合である。図-5はクイ各点での最大圧縮応力を示す。同図によれば、クイ頭での応力はほぼ等しいが、先端の応力は用辺抵抗の大きいほど小さくなっている。クイ頭より約 10 m の点に急変点の認められる理由は、先端からの反射波の影響によるものと考えられ、用辺抵抗の小さいほど変化が著しい。

図-2

	I	II	III
先端抵抗 (t)	20, 40, 60, 80, 100 150, 200, 300, 400	40	0
用辺抵抗 (t)	0	ΣR_m 10, 20, 30, 40, 80	ΣR_m 5, 10, 30, 50

図-3

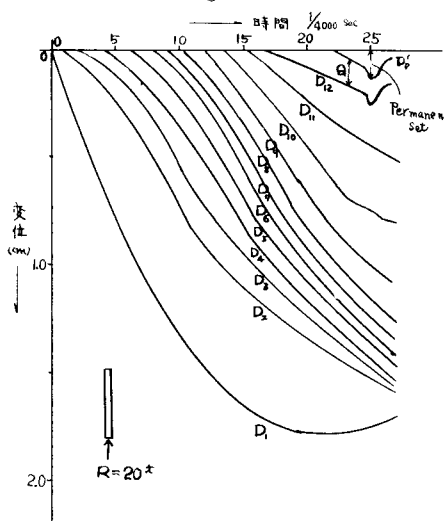
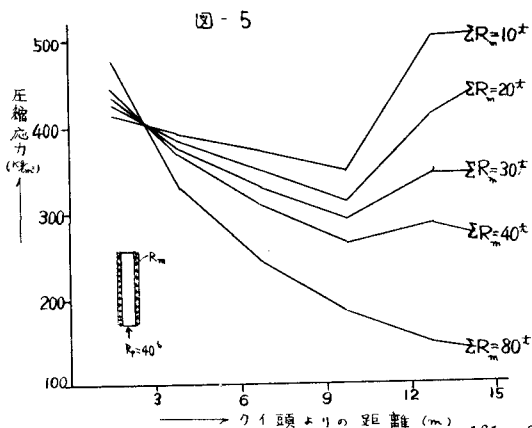
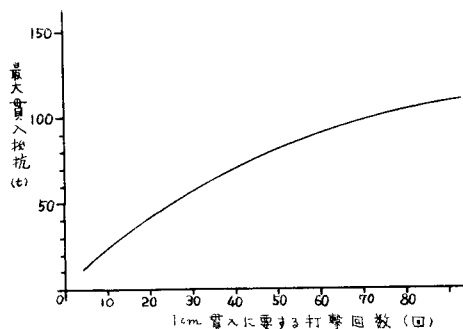


図-4



Ⅱの場合はクイが固い層をつらぬいた様な場合である。図-6にクイ各点の最大圧縮、最大引張応力を示す。クイ頭での応力は拮抗値のいかんにかかわらずほとんど一定値 405 kg/cm^2 になるがクイ先端応力は拮抗値の大きいほど小さくなっている。これはⅡの場合と同様、周辺拮抗が大きいと、それによる応力波の減衰が大きいと考えられる。

クイに生ずる圧縮応力のピークは、クイ頭より約 7 m 、すなわち周辺拮抗のある部分の始端付近に生じている。

さて応力波が先端に到達すると、先端拮抗がないので、棒の自由端におけると同様、波は引張となりはねかえってくる。この為、先端の方から順にクイに引張応力が生じ、周辺拮抗が小さい場合はクイ頭まで引張応力が生じるりくつとなる。同図によると、計算上ではクイ頭より約 11 m あたりに 235 kg/cm^2 の引張応力が生じるので、この場合、当然クイは引張破壊をおこすことになる。

図-7は周辺拮抗5トンの場合の時間-応力曲線を示したもので、これによると応力波の伝わり方がよくわかる。

iii) 前記Ⅰの状態では K_1, V_1 を変えた場合

K_1 (クッション)、 V_1 (ラムの衝突速度) の大きさがクイ内応力に与える影響を調べるため、

$K_1 = 2.0 \times 10^6, 1.2 \times 10^6, 1.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}$ の三種、

$V_1 = 500, 800, 1000 \text{ cm/sec}$ の三種につき、

拮抗は先端に 40° のみが作用する場合で計算した。その結果は図-8、図-9に示す通りである。先ず図-8の V_1 の影響についてであるが、値が増すにつれて各点の応力は一様に増している。

その割合はほとんど速度に比例すると考えてよい。

図-6

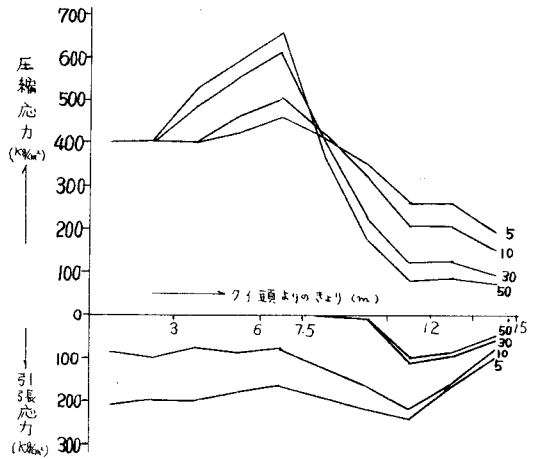


図-7

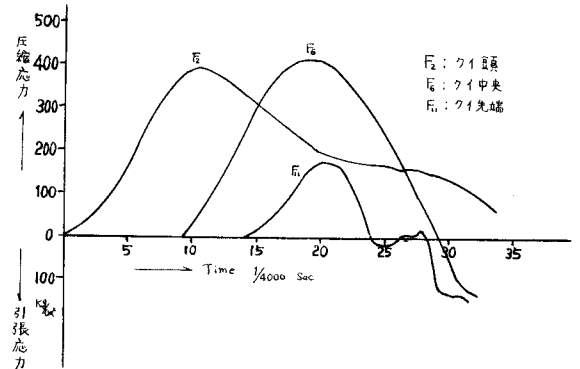


図-8

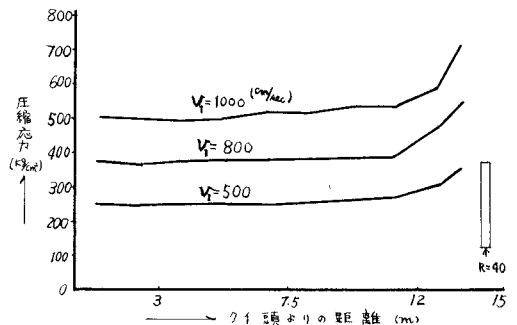
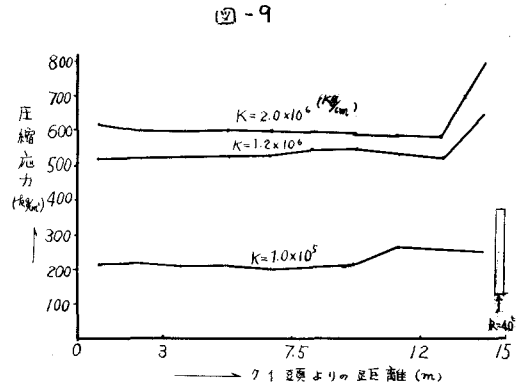


図-9は K_1 の影響を表すグラフであるが、これも
 ①と同様の傾向が認められるが、比例関係はな
 い。

なおこの場合、先端抵抗 40^t は比較的大きな値
 であるので引張応力は生じていない。



4. 結果考察

- i) 支持グイの場合、先端抵抗値の差違がクイ応力におよぼす影響については、反射波の影響の大きなクイ先端のみられる程度で、他の部分ではほとんど同じ値である。
- ii) クイ先端にも周辺にも抵抗のある場合には、その最大圧縮応力は、周辺抵抗が小さい時にはクイ先端に、周辺抵抗が大きくなった場合にはクイ頭部に生じる。
- iii) 一例として、固い層をつらぬいて急に軟弱な地盤へクイが進む場合、クイに引張応力が生じやすくクラックを生じ、さらに破断する危険がある。
- iv) ラムの衝突速度とクイ応力は比例する様であるが、クッションとクイ応力の間には、比例関係は認められない。

参考文献：① E. A. L. Smith "Pile Driving Analysis by the Wave Equation"
 Transactions, ASCE, 1962