

くい基礎の特性を考慮した橋梁等の計画について

正員 阿部 洋七郎*

要 旨

昨今のくい基礎工法の発達に伴って、水平荷重をもくい基礎で支持するとして設計するケースが多くなって来た。

筆者は実際に取り扱う土木作工物についてのくい基礎の設計に対する支配的要素を明らかにする事により、効果的なくい基礎の選択法について説明し、此の種の橋梁の計画上の問題について言及する。

尚、組ぐいの支持機構に関する理論式は最近種々発表されているが、実験的にも確かめられつつある竹下氏の組ぐい解法によった。

項 目

1. くい基礎設計上の仮定
2. くい基礎選択の支配的要素
 - 2-1 慣用設計法との比較
 - 2-2 基礎に作用する諸外力 (V, H, M の性状)
 - 2-3 くい群の構成による支持効果
3. 作工物の種類によるくい基礎の選択
 - 3-1 実際の作工物に対する効果的くい基礎型式
 - 3-2 設計細目
4. 橋梁計画上の問題点
 - 4-1 支持層の深い場合の橋梁計画の一般的傾向
 - 4-2 橋台型式と橋長のとり決め方
 - 4-3 こ線橋等の線形
5. 結 び

1. くい基礎の設計上の仮定

土木作工物のくい基礎の設計上の仮定としては、在来はくい頭ヒンジで軸方向部材として扱っている例が多かったが、本報文では実際の構造物に合せて条件を取り決めた。即ち

- 各くいの頭部は剛なる底版に埋設されている。
- 各くいとも軸方向力、曲げに抵抗出来るものとする。
- 土の反力係数は深さ、荷重条件に拘らず一定とする。
- 各くいとも軸方向及び軸直角方向に弾性支持されている。

○ くいの長さは横方向支持効果については半無限長と考える。

と仮定し、竹下氏の組ぐい解法により検討をすすめる。(参考文献-1)

尚、用いる記号は

V : くいに作用する外力の鉛直方向の成分

H : " " 水平 "

M : " モーメント

N : くい軸方向力

Q : くい軸直角方向力

$\mathfrak{M}$: くい頭モーメント

B : 2本組ぐりの場合の前ぐいと後ぐいの距り

k : 土の反力係数

D : くい材の径

A : くい材の断面積

EI : くい材の曲ぐ剛度

T : 相対剛性率 $T = \sqrt[4]{\frac{EI}{kD}}$

n : くいの本数

P_a : くい1本当りの許容軸方向支持力

2. くい基礎選択の支配的要素

2-1. 慣用設計法との比較

慣用法の仮定では、水平力 (H) に対しては、地盤と作工物との間の摩擦力によって抵抗すると考えられて居る為くい材には軸方向力 (N) より作用しなかった。従ってくい材は設計上では軸部材として扱っていた。又仮に、くいで水平力 (H) に抵抗するとしても、杭頭をヒンジと考えるならば、水平力 (H) により生ずる曲げモーメント ($\mathfrak{M}$) は、其の値は少なく、しかも、くい頭では0であり、其の最大値をとっても軸方向力 (N) に比較して僅少である。何れにしても水平力 (H) はあまり支配的要素にはならなかった。しかしながら、指針では原則として水平力 (H) はくいで受け持つように規定されて居り、又、我々が通常設計する作工物をヒンジとして取り扱う事は無理であり、実状よりみて、固定と考えて検討をすると、慣用法との間に著しい差が認められる。しかも、慣用法により設計する場合に危険側となる事に注意する必要がある。

* 北海道開発コンサルタント株式会社

慣用法との著しい差異は

(1) 水平力 (H) に依る杭頭モーメント (M) の値が大きい。

(2) 水平力 (H) に依っても各杭に軸方向力 (N) を生ずる。の2点である。

(1) 水平力 (H) に依るくい頭モーメント (M)

(H) と (M) の関係は平行組杭の場合について論ずる。平行でない型式については傾向として同一であるので省略する。前者の場合の一般式で示せば、

$$M = \frac{1}{n} \cdot \frac{\mu_h}{\mu_m} \cdot H \cdot T \cdot \sec \theta \quad (1)$$

(1) 式であり $\mu_h/\mu_m = 1/\sqrt{2} \approx 0.707$ 又通常 $\sec \theta$ の値は施工条件より、1に近く、近似的に(2)式で表わされる。

$$M \approx 0.7 \cdot \frac{T}{n} \cdot H \quad (2)$$

即ち杭頭モーメント (M) は杭の本数 (n) と、相対剛性率 (T) と水平力にのみ、関係する判断してよい。

(2) 水平力 (H) に依る杭軸方向力 (N)

前項同様にして、大略の傾向を把握する為、平行組杭について説する。外力 V, H, M による N は (3) 式で表わされる。

$$N = \frac{1}{n} (N) + \frac{1}{n \cdot r} \cdot \frac{\mu_m}{1 + j\mu_m} \cdot \frac{X_\xi}{T} \cdot (H) + \frac{1}{n \cdot r} \cdot \frac{\mu_m}{1 + j\mu_m} \cdot \frac{X_\xi}{T} \cdot (M/T) \quad (3)$$

第二項が水平力 (H) に関係するもので、其の M に対する比は (3) 式より $T(H)/(M)$ で表わされる。通常の橋では、 $T(H)/(M)$ は、0.3~0.8であるので、(H) に依る影響はかなり大きい事が知れる。実例で説明するならば、橋台等の杭基礎では、此の方法で設計すると、慣用法で設計した場合に比較して、前趾部のくいには押し込み力が増大し、後趾部では引抜力が増加する。

以上の大きな相違点の結果より見て、くい基礎の応力性状を確めるには、三種の外力 $V \cdot H \cdot M$ についての相互の関係を把握する必要がある。

2-2. 基礎に作用する外力 ($V \cdot H \cdot M$) の性状

外力の性状を括一的に把握するに必要な事項としては、

- (1) $H/V, M/V$ の値
- (2) 常時と地震時の関係

の二つである。

我々が通常設計する作工物は、次の三つに分けられる。

(1) 主として鉛直力のみを受ける基礎

例 通常の橋脚

(2) 三外力が夫々作用する基礎

例 橋台、よう壁

(3) 主としてモーメントの作用する基礎

例 送電線の鉄塔の基礎

以下此の3種の基礎について、前記の2項目について検討する。

(1) 主として鉛直力のみ作用する基礎

H/V は、常時0で地震時では0.15~0.30

M/V は、常時0で地震時では高さの1/3~1/5である。

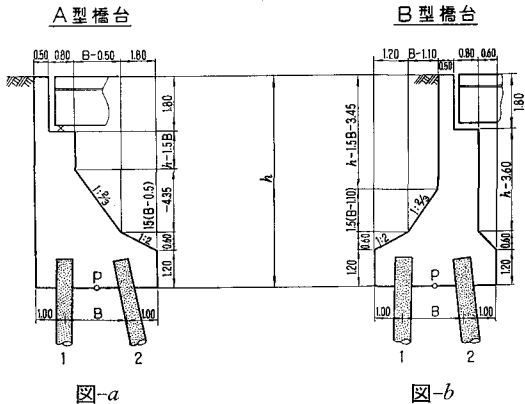


表 - 1

荷重の比	荷重状態	A 型 橋 台	B 型 橋 台
H/V	常 時	0.2~0.3	0.1~0.2
	地震時	0.4~0.6	0.3~0.5
M/V	常 時	高さの $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{5}$	高さの $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{5}$
	地震時	高さの $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{3}$	高さの $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{2}$

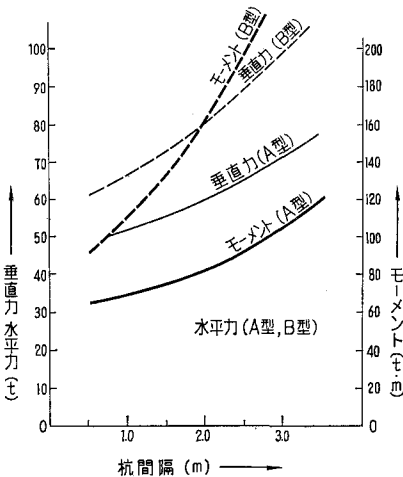


図-2 杭間隔 (B) と橋台に作用する外力の関係 (常時) (モーメントは直杭の中心に対して求めた)

(2) 三外力が夫々作用する基礎

H/M , M/V は橋台の底版幅と、型式により大きく相違が有り、実例として、支間 35 m の合成桁を支持する A 型橋台 (図~1, a) B 型橋台 (図~1, b) に分けて各種外力の底版幅に依る変化を図~2, 3, 表~1, に示した。此等の図表より、一般に A 型を用いた方が諸外力の値は小さく、特に地震時のモーメント (M) は、B 型橋台では著しく不利になっている事が知れる。

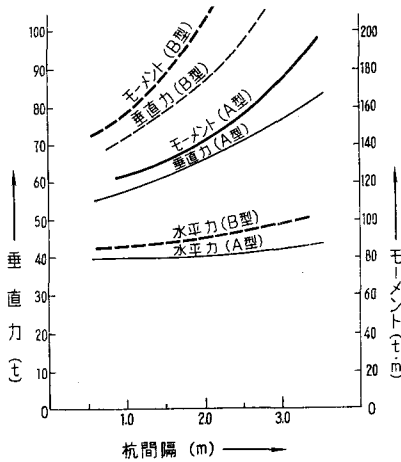


図-3 杭間隔 (B) と橋台に作用する外力の関係 (地震時) (モーメント及び直杭の中心に対して求めた)

(3) 主としてモーメントの作用する基礎

H/V は常時で 0.1~0.2, 1 線断線で 0.2~0.3

M/V は常時で高さの 1/5, 1 線断線時で高さの 1/-程度である。

2-3. くい群の構成による支持効果

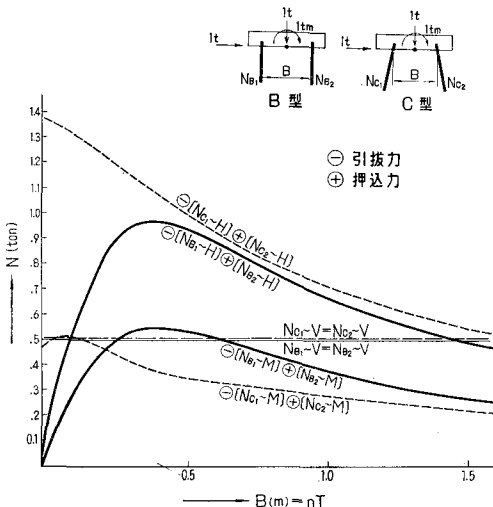


図-4 $V \cdot H \cdot M$ による垂方向力影響値 (N)

(1) 単位の諸外力 ($V \cdot H \cdot M$) によるくい頭力 (N, Q, M) と杭頭変位 (δ, θ) の影響値

杭頭力 (N, Q, M) と杭頭変位 (δ, θ) の値は構成するくい群の二次モーメントに主として関係する。今の典型的例として、2 本組杭の場合について、其の変化の動向を調べるのに、二次モーメントのパラメーターとして、前杭と後杭の間隔を取って見る。図-4, 5, 6, 7, 8 で直杭、斜杭とも共通している事は

① $B=0 \sim 0.5 T$ の区間では各影響値の変化は、急激で

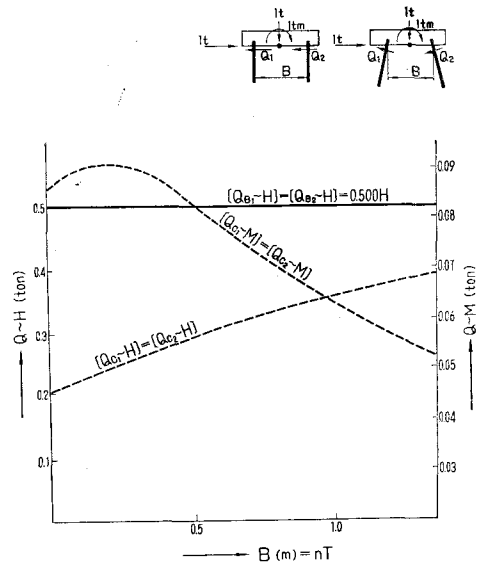


図-5 $V \cdot H \cdot M$ による軸直角方向力影響値 (Q)

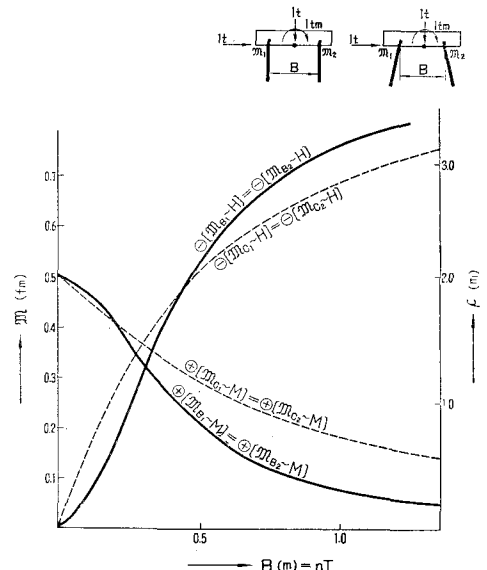


図-6 $V \cdot H \cdot M$ による杭頭モーメント影響値 (M)

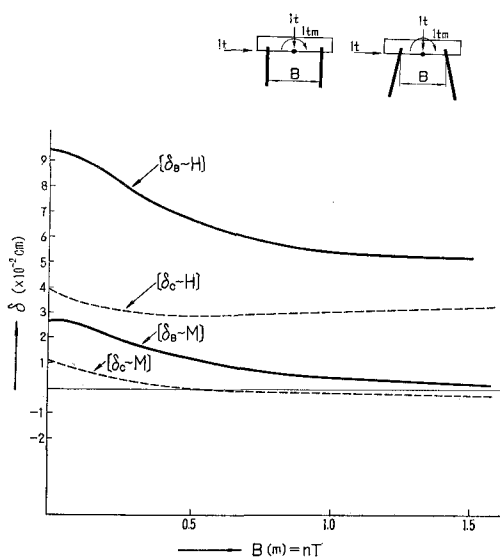


図-7 $V \cdot H \cdot M$ による底版変位影響値 (δ)

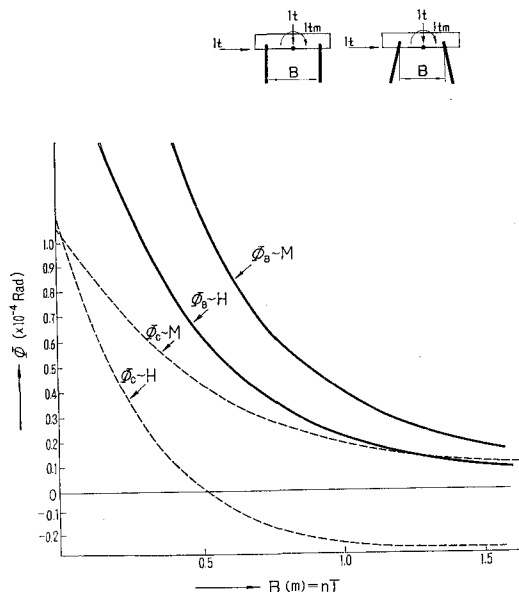


図-8 $V \cdot H \cdot M$ による底版回転角影響値 (ϕ)

あり、設計上の問題も多い。

② $B = 0.5 T$ 以上になると、各影響値共其の変化は緩くなり且つ、漸減する傾向にある。

次に直杭型式と斜杭型式の根本的相違は、杭頭作用力よりも其の変位の動向にある。

即ち、 ϕ, δ 共直杭型式では、 B の増加につれて漸減するだけであるが、斜杭型式では、 B の値が $0.5 T$ 以上になって来ると、外力の (H)、と (M) による変位の符号が異なり相殺する方向に働く事である。

(2) 斜杭の効用

一般に水平力を斜杭の軸方向力で受けもつと云う考え方で設計している場合があるが、前述の図よりその効果は少ない事に注目したい。此の事は実験的にも確められている。(参考文献-2)

設計上の斜杭の効用は変位の多ない事、深底部支持層の拡大と云う事であって、杭頭モーメントの減少をあまり期待してはならない。

(3) 空中突出しぐいの特性

空中突出しぐいの型として図-9, 10, 11, の3種類が考えられるが、

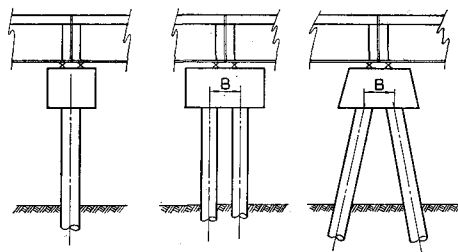


図-9

図-10

図-11

(a) 図-9, の単ぐいは、免震構造としての高度の照査を要する基礎で、濫用をさけたい。

(b) 図-10, 11, の型は簡易橋梁の基礎に用いられているが、空中に突出する事により、水平力 (H) に依る杭頭モーメント (M) は地中の場合より減少し、杭は殆んど軸部材として設計して良いが、平行杭の場合 (図-10) は、変位が増大する事に注意を要する。

3. 作工物の種類によるくい基礎の選択

前節までくい基礎に作用する外力の性状、各種のくい基礎の特性を述べたが、此等を基にして作工物の種類によってのくい基礎の選択を試みる。

3-1. 実際の作工物に対する効果的くい基礎型

(1) 橋脚 (単純桁)

可動、固定端とも軸方向部材としてくいの員数を $V/N\alpha$ として決め、その配置は、地震時のモーメント (M) に対して必要幅 B をとればよい。

くい材は、くい頭モーメントが少ないため特に大きい EI は要求されない。

(2) 橋台

最も支配的なものは土圧による水平力 (H) とモーメント (M) である。

先づ大略のくい員数は EI の大きい大口径鋼ぐいをを用いる以外は、くい頭のモーメント M によって決る。

従って EI の大きい部材を用いるのが得策である。

案としては

(a) 軀体高さ 3 m 未満、木ぐい、RC ぐいの組ぐい又は

φ 500 mm の鋼ぐいの単ぐい。

(b) 軀体の高さ 3~8 m では RC 組ぐいで其の径は軀体高さの 1/18 以上、鋼ぐい使用の場合は 6 m 以下は φ 400 mm, 6 m 以上は φ 500 mm がよい。

(c) 軀体の高さ 8~11 m では RC ぐいは頭部の補強を充分に行なう必要があり、径の大きい場所打ぐいを採用したい。鋼ぐいでは φ 500, 12 を使用するがよい。

(d) 軀体の高さが 11 m 以上のものについては場所打ぐい又は、φ 600 以上の鋼ぐいが効果的である。

此等のくい間隔 B の値については高さ 30% 以上とる必要があり、又軀体の型式としては A 型の方が効果的である (文献 3 参照)。

(3) 擁壁

擁壁の場合は橋台と其の傾向は類似しているが著しく異なる点は、上部反力がない為、鉛直力 (V) が少ない。

此の事は、地震時の引抜力に対して危険測に作用する為橋台の場合よりくい間隔 B を大きくとることにより、反力の均等化を企てる必要がある。

(4) 鉄塔の基礎

基本的には (1) 橋脚の場合と同一であるが、 B の値を大きく採る必要がある。

以上くい基礎の選択方法を記述したが、旧来の観念と著しく異なる点は、外力 H によるくい頭曲げモーメント M によって材料の選択をして、その員数は M と N より求まる。又底板幅は、外力 V, M, H によって決ると云う事である。

3-2. 設計細目

くい材の応力性状が明確になれば、設計細目として重要な問題点は

- (1) くい頭旋着の方法
- (2) 曲げモーメントに対する断面変化

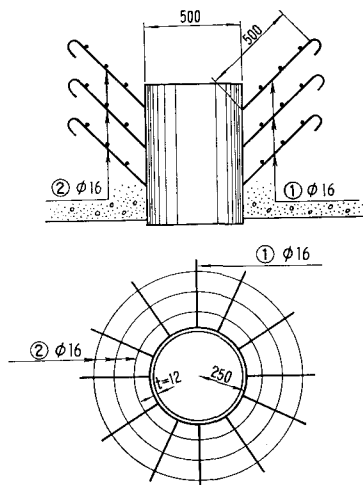


図-12

(3) 継手の問題

(4) 先端の形状

である。

此等については、標準化されたものは (3), (4) だけであり、(1) については RC ぐいでは、付着長を充分とったくいの主鉄筋を底板に旋着する必要がある、又鋼ぐいでは、未解決の問題も多いが、くい径の 2 倍程度埋め込み鋼ぐい断面積の 1/2 程度の鉄筋を図~12 のように溶接すればよい。

(2) については、RC ぐい、場所打ちぐいでは圧縮部分まで鉄筋を延ばして旋着する必要がある、鋼ぐいでは、くい頭固定の通常の基礎の場合、頭部より 3 T 程度まで板厚の厚いものを使用する。

4. 橋梁計画上の問題点

4-1. 支持層の深い場合の橋梁計画の一般的傾向

支持層が深い場合の橋梁計画は、今迄は井筒、ケーソン工法等工費の嵩む工法を用いていた為、橋梁型式は、深い基礎と長大支間の組み合わせで計画されていた。

ところがくい工法の発達に伴って、基礎工費は著しく低減された為、橋梁の経済的支間割についても再検討する必要がある。水深、その他の施工上の制約がなく橋長が 10 支間以上とすれば、くい工法の低廉化により支持層の深さ 40 m の場合で経済的支間割は 25 m, 支持層の深さ 60 m の場合で経済的支間割は 35 m 程度と考えられ、殆んどの橋梁は桁橋型式でよい。

次に橋長が 2~3 支間の橋梁では橋台の影響の為多少支間割は大きくとった方が経済的である。

4-2. 橋台型式と橋長のとり決め方

橋長の決定方法で、旧来の傾向として上部工工費の節減の為なるべく短かくとり決めていた。此の為に B 型橋台を用いる例が多かったが、くい基礎では B 型橋台を用いると基礎工費は増加する為、上下部全体工費の低減を考えて橋長を決定する必要がある。

一般に支持層の深さが 6 m 以上の場合には橋長を延長して A 型橋台を用いた方が全体の工事は低減する。特に軀体の高さの高い場合に其の傾向は著しい。

4-3. こ線橋等の線形

最近の交通事情の変化によって、道内でも毎年数多くこの線橋が計画実施されているが、くい基礎を用いる場合のこ線橋の計画に当って特に注意を要することは、こ線橋の工事費の内下部費は 50% 以上を占め、特に支持層の深い基礎を用いるときは 80% 以上にも及んでいる。

こ線橋を経済的に計画するには、下部工事の節約に主眼を置いて設計するのがよい。

此等の支配的要素になるものは、

(1) こ線橋の斜度

(2) 支持層の深さ

(3) 軌道中心線よりの幅の制限

の3つであり支持層の深い場合で斜度の甚しい場合は、下部工事の節減に着目して直橋型式で計画の方が経済的である。又、こ線橋近辺の道路の中心線は地質の悪い場合には成るべく直角に交叉する様に選点すべきである。

此等の大略の関係は単線区間の跨線橋で支持層の深さが10 m 以内では45°以上、10~20 m では60°以上、20 m を超える場合は直橋にした方が経済的である。

5. 結 び

くい基礎の設計方針より説明し、最終的には橋梁計画について言及したが、在来下部工事は、上部工事に併せて安易に設計されている傾向があり、経済的道路計画を考えるならば、地質の悪い場合はむしろ下部工事の特性をよく把握して計画立案する必要がある。

此の目的の為にくい基礎の特性と云う大きな命題で論じ

てみたが、多分に独断的な解釈になった傾向もあり、今後此の種の工法の発展の為に、此の報文に御批判を戴き度いと思います。

最後に後本報文の中には開発局関係の工事の設計途上に於て討論されたものがあり、ことに資料を提供願いました開発庁の竹下技官、釧路開発建設部の小坂技官に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 竹下 淳：組ぐい解法，土木技術 19-8. 9. 10.
- 2) 小坂久基：組ぐい解法の実験的照査について，土木学会北海道支部技術資料第20号.
- 3) 阿部洋七郎・小坂久基・赤木正文：鋼管組ぐい基礎の一解法と実験的照査，第7回日本道路会議論文集.
- 4) 北海道開発局発註：北海道開発 コンサルタント株式会社作成，岩見沢こ線橋計画概要書，呼人と線橋計画概要書.