

斜面上の深礎杭の水平支持力に関する検討

01A3711 大崎 実
01A3718 二宮 寛史
指導教員 前田 良刀

1. はじめに

国土の約75%の山岳地であるわが国において急峻な斜面上に高速道路橋などの重要な構造物基礎を建設する機会は非常に多い。斜面上の基礎は平坦地と異なり山側と谷側の左右の地盤抵抗が異なるためそれらの影響を考慮した安定計算法が必要である。斜面上の深礎杭では安定性の検討のうえで特に水平支持力の評価が重要である。本文で検討する斜面上の深礎杭の水平抵抗問題は昭和40年代から日本道路公団において研究がなされ実際の設計に適用されているが、今後の更なる経済的な設計のためには深礎杭の水平抵抗見直しが必要と考えられる。

そこで本研究では以下の点に留意して研究を進める。
①現行の水平方向地盤支持力に用いられている極限釣合い法での釣合いモデルを見直す、②三次元有限要素解析法を用いて幾つかの試算を行い見直した修正釣合いモデルの妥当性を確認する。

以上の、技術的検討を行い斜面上の深礎杭においてより合理的な杭の水平支持力を求めるための破壊メカニズムを検討し新しい支持力評価法を提案する。

2. 極限釣合い法による地盤の水平支持力式

2.1 現行の釣合いモデルと地盤支持力式

現行の基準で仮定する塑性化領域のすべり面の形状を図-1に示す。図-1は日本道路公団の研究により始めて提案されたものであり、一般のクーロンの受働土圧において斜面角が内部摩擦角より大きい場合に計算不能になる点を改良したものである。極限水平支持力は、図1に示す直線すべり面のせん断抵抗力の最小値として、次式より求める。

$$R_q = \frac{W(\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \tan \phi) + cA}{\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \tan \phi} \quad \dots (1)$$

ここに、 R_q ：極限水平支持力(kN)、 W ：すべり面より上の地盤の重量(kN)、 A ：すべり面の面積(m^2)、 ϕ ：地盤の内部摩擦角(度)、 C ：地盤の粘着力(kN/m^2)、 α ： R_q が最小となる角度とする。 β ：すべり面のひろ

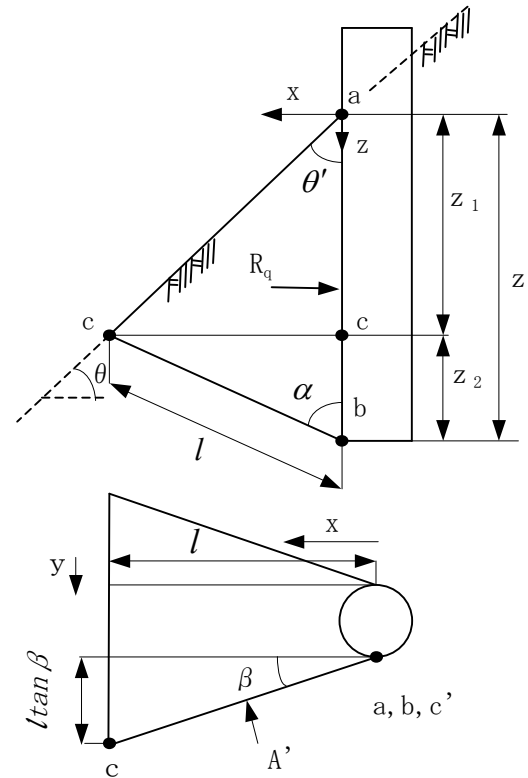


図-1 塑性化領域のすべり面（極限釣合い法）

がり角で一般に土砂・軟岩で $\beta = 30 + \phi/3$ 、硬岩で $\beta = \phi/3$ 、が採用される。

このすべり面形状を用いた極限釣合い法による水平支持力はこれまでに多くの実績があるが、図-1に示すすべり面の側面で点a, b, cからなる三角形のせん断抵抗を無視しているため多少支持力の過小評価の可能性はある。

2.2 修正極限釣合いモデルと地盤支持力式

本研究では、図-1に示すすべり面で点a, b, cからなる三角形の側面せん断抵抗を新たに考慮する。

ここで $\triangle abc$ の面積 A' は、 $A' = \frac{1}{2}|ab|cc'|$ 、また $|ab| = z$ 、および $cc' = \sqrt{(l \sin \alpha)^2 + (l \tan \beta)^2}$ 、から三角形の面積 A' は、

$$A' = \frac{1}{2} z \cdot l \sqrt{\sin^2 \alpha + \tan^2 \beta} \left(l = \frac{\sin \theta'}{\sin(\theta' + \alpha)} \cdot z \right) \quad \cdots (2)$$

以上により，すべり面 bc に沿う土楔のせん断抵抗は，
 $(R_q - cA' \cos \beta) \sin \alpha - W \cos \alpha$

$$= \{W \sin \alpha + (R_q - cA' \cos \beta) \cdot \cos \alpha\} \tan \phi + cA$$

$$R_q \sin \alpha - R_q \cos \alpha \cdot \tan \phi$$

$$= W(\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \tan \phi)$$

$$+ cA'(\cos \beta \cdot \sin \alpha - \cos \beta \cos \alpha \cdot \tan \phi) + cA$$

これから，極限水平支持力は次式で求められる．

$$R_q = \frac{W(\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \tan \phi) + cA' \cos \beta (\sin \beta - \cos \alpha \cdot \tan \phi)}{\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \tan \phi} + \frac{cA}{\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \tan \phi} \quad \cdots (3)$$

2.3 支持力の相互比較とその考察

極限釣合い法による水平支持力について幾つかの条件で計算を行った．表-1 に計算に用いた諸条件を示す．杭径は斜面上の深礎杭でもっとも多く用いられる杭径 $D=2.0\text{m}$ で，水平支持力を求める位置は深さ $Z=10.0\text{m}$ と固定した．また，地盤条件は斜面角 θ と粘着力 c を変化させる一方で，単位堆積重量 γ と内部摩擦角 ϕ を一定の値とした．これは，今までの実績から水平支持力には斜面角と地盤の粘着力が最も敏感であることが分かっていることによる，なお，地盤の内部摩擦角 ϕ が斜面角 θ より小さく，かつ，粘着力 c が小さい場合，斜面が安定せず地盤の支持力が求められないことから斜面角 $\theta=30^\circ, 40^\circ$ では粘着力 $c=200\text{kN/m}^2$ 以上としている．また，表中で網掛けした部分は比較のために後述の三次元 FEM においても解析する．

なお，実際の設計では水平支持力は深さ毎に異なり着目する位置で支持力の合力として R_q が求められる．

図-2 は斜面角と地盤の水平支持力の関係を示したものである．斜面角 θ が大きいほど，粘着力 c が小さいほど支持力 R_q は小さくなる．また，この傾向は現行法，提案法のいずれも同じである．支持力の低下の程度は後述から指摘されているように粘着力 c に非常に敏感

であることがわかる．

図-3 は，水平支持力比として提案法と現行法の支持力の変化を調べたものである．ここで，水平支持力比 η は，次式で定義している．

$$\eta = \frac{\text{提案法による地盤の水平支持力}}{\text{現行法での地盤の水平支持力}} \quad \cdots (4)$$

水平支持力比 η の傾向は地盤の粘着力 c により多少異なるが，すべり土楔の側面のせん断抵抗を考慮した修正極限釣合い法では現行の水平支持力に比較して概ね $\eta=1.5 \sim 2.5$ 倍の水平支持力が見込まれる．ただし，これは経験的に静定化された単なる力の釣合いのみを仮定しているので，本研究で提案する修正モデルが妥当であるか否かは又別な方法（実験や数値解析など）で確認する必要がある．

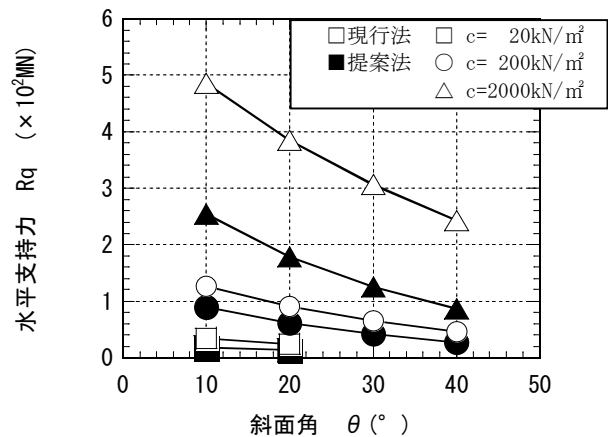


図-2 斜面角と地盤の水平支持力の関係

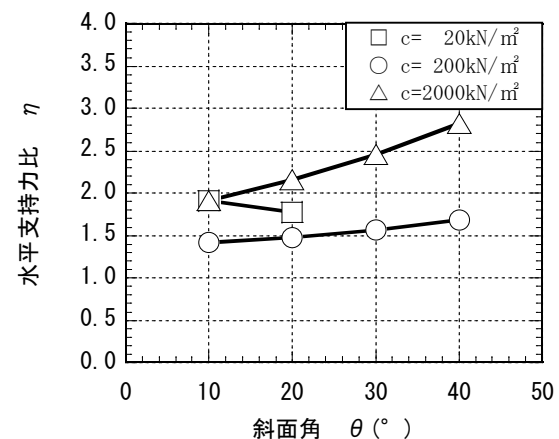


図-3 提案法と現行法の支持力の比較

表-1 計算式一覧表

杭径	D (m)	2.0									
根入れ深さ	z (m)	10									
斜面角	θ (度)	10	20		30		40				
単位体積重量	γ (kN/m ³)	20	20		20		20		20		
粘着力	c (kN/m ²)	20	200	2000	20	200	2000	200	2000	200	2000
地盤の内部摩擦角	ϕ (度)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
変形係数	E (kN/m ²)	70000									

3. 地盤破壊の三次元性を考慮した FEM 解析法

3.1 解析に用いる三次元 FEM 解析法とその概要

近年、大幅なコンピューターの進歩や地盤工学の分野でもいろいろな数値解析法の発展と計算手法の開発に伴って、より詳細に地盤の破壊に至るまでのメカニズムを明確にでき、実務においても活発に適用されるようになってきている。中でも、特に有限要素法(FEM)は地盤の複雑な力学的性質、ならびに境界条件を忠実に解析に取り込むことができるため、実務においても活発に適用されるようになってきている。

そこで、支持力解析ソフト(Mr. SOIL3D)を用いて三次元モデルを作成し解析を行い、現行法や提案法との比較検討を行った。

3.2 解析モデル

図-4 は、解析に用いた軸対象の有限要素分割図の例として、斜面傾斜角(θ) = 30° の場合を示している。要素は 8 節点六面体要素とし、要素数は 4301、節点は 5106 となった。解析領域の境界条件は、底面(図中①)は Y 方向変位、側面(図中②③)は X 方向変位、正面(図中④⑤)は Z 方向変位を固定した。

表-2 に解析に使用した物性値を示す。この内、上層の物性値は極限釣合ひ法との支持力比較を行うため、表-1 と同じ値としている。杭体は弾性体とした。地盤は、図-5 に示すような降伏条件がモール・クーロン材料を基準とするバイリニア型の弾塑性モデルとしている。モールの応力円の中心からクーロンの式への垂線 h と応力円の半径 r との関係より、 $h \leq r$ の場合は弾性係数を E 、 $h = r$ の場合は弾性係数を $E' = E/100$ とした。また、図-6 に示すように、杭と地盤の境界面には 3 次元非線形バネ要素を配置し、はく離現象とすべり現象が考慮できるようにした。

解析は、地盤の初期応力状態を自重解析で求めた後、杭中心の深度方向に等分布荷重を斜面方向に载荷させた(図-6)。1 ステップの荷重値は 5MN とし、15 ステップまで载荷させた。

3.2 解析結果とその考察

(1) 地盤の破壊メカニズム

図-7、8 は、斜面傾斜角 $\theta = 30^\circ$ 、荷重ステップ 4 とステップ 7 における地盤の塑性化領域を示したものである。図中に、現行基準における塑性化領域のすべり面も併せて示す。また、極限水平支持力を現行法と提案法で求めた結果、それぞれ 42MN と 65MN であった。

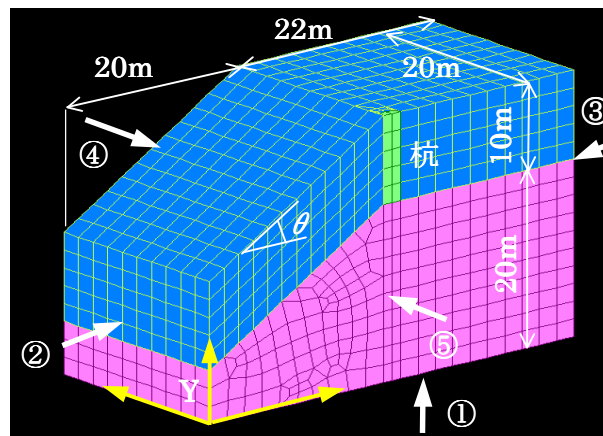


図-4 解析モデル図($\theta = 30^\circ$)

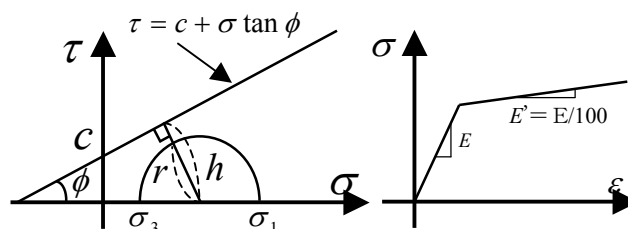


図-5 地盤要素の非線形特性

表-2 解析に使用した物性値

	γ kN/m ³	E MN/m ²	ν	c kN/m ²	ϕ 度
杭	24.5	25000	0.3		
上層	20.0	70	0.3	200	30
下層	20.0	300	0.3	2000	30

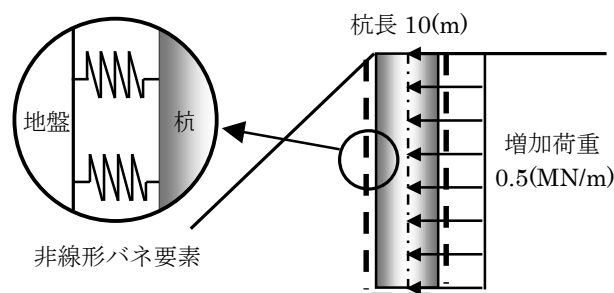
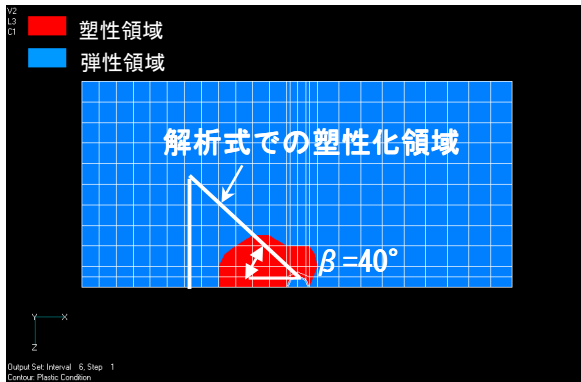


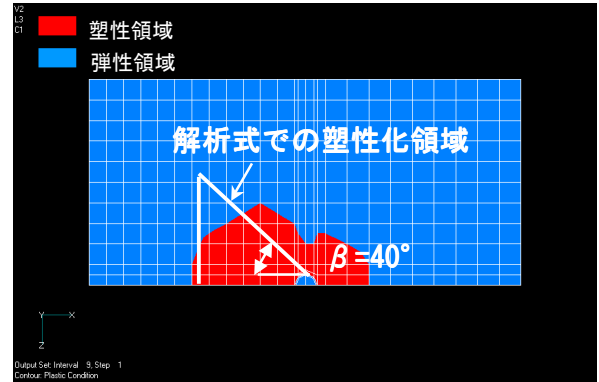
図-6 杭境界面のモデルと载荷状態

ここで、有限要素法では軸対象モデルで解析を行っているので、ステップ 4、7 の杭全体としての作用荷重は、それぞれ 40MN、70MN になる。

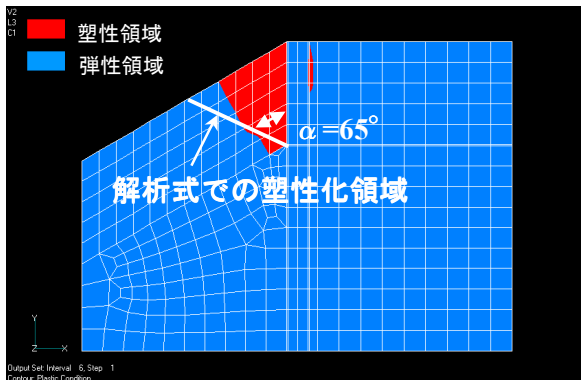
FEM 解析により荷重ステップが進むにつれ、上層で塑性化領域が拡大していく挙動が再現された。X-Y 平面のすべり線は杭先端より杭鉛直方向に対してステップ 4 で約 45° 、ステップ 7 で約 65° となっている。一方、X-Z 平面では、杭側面から X 軸方向に対して約 40° で広がり、荷重ステップが進んでも、このひろが



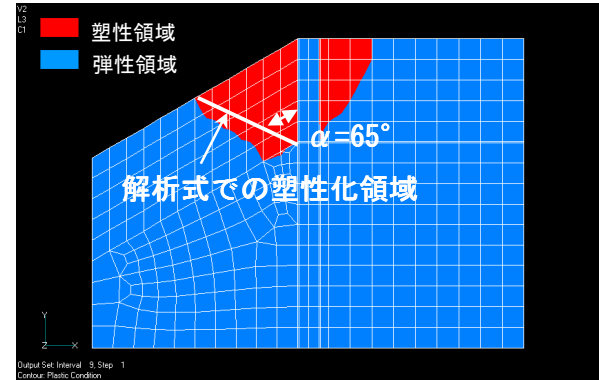
(a) X-Z 面



(a) X-Z 面



(b) X-Y 面



(b) X-Y 面

図-7 塑性領域 ($\theta = 30^\circ$, ステップ 4)

図-8 塑性領域 ($\theta = 30^\circ$, ステップ 7)

り角に大きな違いは見られない。また、杭背面でも塑性化領域が見られる。これは杭と地盤のはく離現象や杭体の回転の影響によるものである。

現行法の極限水平支持力と同程度の荷重であるステップ 4 では、塑性化領域が基準で仮定している領域と異なり領域体積が小さくなっている。一方、提案法の水平支持力程度の荷重であるステップ 7 においては、解析による塑性化領域と仮定している領域とがほぼ一致している。これは、他の傾斜角の解析結果でも同様であった。

(2) 水平支持力

図-9 は傾斜角 ($\theta = 20, 30, 40^\circ$) における杭体の載荷荷重と解析により求めた杭頭部の変位の関係を示したものである。また、現行法と提案法で算出した極限水平支持力も図示している。FEM 解析では、図から分かるように、明確な水平支持力の極限值までは得られていない。このことから、提案法で算出した極限支持力でもまだ余裕があると判断できる。また、現行法での極限支持力は解析値の降伏荷重程度であり、安全側に地盤水平支持力を見積もっていることが確認できた。

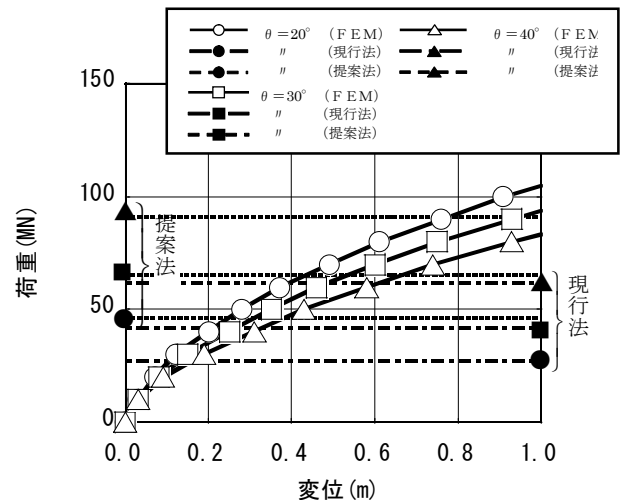


図-9 水平支持力比較(極限釣合い法/FEM)

4. まとめ

現行の水平方向地盤支持力に用いられている極限釣合いモデルを見直し、三次元有限要素解析法を行い、見直した修正釣合いモデルの妥当性を検証した。その結果、塑性化領域の評価法として、側面のせん断抵抗を考慮している提案法が妥当であることが確認できた。

<参考文献>

(財) 高速道路調査会：基礎構造物に関する調査研究
研究一昭和 47 年度報告一，1973. 2