



埋設管に作用する最大地盤反力の近似計算

鈴木崇伸¹⁾

1) 東洋大学理工学部, 教授 博士 (工学)

E-mail: tsuzuki@toyo.jp

要 約

本報告は埋設管を地盤に押し込むときに圧縮力が増大する受働領域の範囲を設定してランキンの塑性化応力を合成した近似値は実験で得られる最大地盤反力におよそ一致していることを述べている。管を水平に押す場合と上向きに押す場合についていくつかの実験結果と対比した結果を示しているが、管に作用する最大地盤反力は管の口径、埋設深さ、土の単位重量、内部摩擦角と粘着力により評価することができると考えられる。

キーワード： 最大地盤反力, ランキンの塑性化応力, 埋設管, 弾性支持されたはり

1. はじめに

地中に埋設される構造物には表面力として地盤の圧縮力に起因する力が作用する。地盤拘束力あるいは地盤反力等と呼ばれるが、杭などの基礎構造の場合には支持する構造物を安定させる役割を担っている。これらの線状構造の場合、通常は地盤の弾性的性質を近似してバネモデルとされることが多く地盤バネと呼ばれる分布バネとはりモデルを組み合わせて設計計算が行われている。地盤あるいは構造物の変位が小さい場合にはバネモデルがよい近似となるが、変位が大きくなると地盤反力は変位に比例しなくなり、上限値をもつことが実験的に確認されている。地盤反力特性の非線形性を上限値と降伏変位を使ってバイリニア型のモデルが杭や埋設管の設計指針において採用されている。

線状構造をはりモデルを使って解析する場合、軸変形とたわみ変形の方程式があるため地盤反力特性を別々に設定する必要がある。このはりモデルが制約となって地中構造物の地盤反力特性が理解しにくい体系になっていると思われる。対象構造物によって定義と名称が異なっている点も影響していると考えられる。はり解析を行う線状構造に作用する地盤反力は根拠とする実験や解析は異なっても地盤の特性値として設定されるべきであり、個別の実験あるいは解析結果によらないことが望ましいと考える。

はりモデルとした地中構造物と地盤が大きく変形する場合に、地盤反力の上限値が支配要因となる。バネ値の設定がはりの断面力に及ぼす影響は小さく、限界状態において地盤と構造物の最大の相互作用力を考慮して設計する必要がある。一定変位において上限値となる場合には地盤反力を低減することにもなるため、上限値の設定には合理性が求められ、実験あるいは解析の個別の事実だけで設計を行うことには懸念がある。杭の設計においては杭の構造種別に関係なく地盤の特性として地盤反力が設定されている。一方埋設管の場合には管種や用途によって地盤反力の設定が異なっており、統一的な説明が必要とされると考える。

本報告は杭の地震時保有水平耐力の設計計算において受働土圧強度が上限値の基本になっていることに着想して埋設管に作用する地盤反力の上限値について分析した結果をまとめている。ランキンの受働

土圧強度を補正した結果はいくつかの実験結果と整合していることを述べている。なお受働土圧強度を補正する計算方法は別報として投稿中であり、本報告では計算式の紹介だけになっていることを付記しておく。

2. 線状地中構造の地盤反力特性

杭や埋設管などの線状の地中構造の設計では分布バネにより支持されたはりモデルが標準的に用いられている。地盤反力特性に関して多くの実験が行われており、バイリニア型の反力特性が採用されている。図1に地盤反力 R の特性図を示す。地盤と構造物の相対変位 Δ の増大に伴い、地盤反力は図中の点線で示したカーブのように変化する。構造物の接触面から徐々に地盤の破壊が進行し、上限値に達すると反力の増加が見られなくなる特徴がある。実験により得られる上に凸のカーブは双曲線などで近似することができるが、設計計算を簡単に行うために、地盤反力と変位を比例関係とする部分と上限値を結合してバイリニア型の特性格関数に変換される。

鈴木(2001)はバイリニア型の地盤反力としたはりに関して地盤変位の大きさで場合分けをした解析解とその近似計算法を提案している。その分析結果によれば、地盤と構造物の相対変位が大きい場合にはりの断面力を決める主たる要因は地盤反力の上限値であり、地盤反力係数はあまり影響しないことが示されている。地盤反力係数ならびに地盤反力の上限値は地盤の性質によって決まると考えられ、構造種別によらないことが望ましい。実験データは設定した実験条件に対して真値であり、実際の埋設条件に合わせた条件であれば設計数値として採用できる。しかし埋設条件に合っていない場合には合理的に補正をする必要がある。

杭基礎の設計においても埋設管と同じたわみの基礎方程式が用いられており、地盤反力の問題が扱われている。例えば道路橋示方書・同解説(2017)によれば、レベル2地震時に対する地震時保有水平耐力による杭基礎の照査のように杭の変位が大きくなる場合には、杭の軸直角方向の地盤抵抗特性は地震時受働土圧強度を補正した値を上限値とするバイリニア型の抵抗特性が用いられている。単杭の場合には水平載荷試験結果の解析に基づき、受働土圧の1.5倍が水平地盤反力度の上限値とされている。群杭の場合にはさらに補正係数が加わるが、杭種別によらず地盤の抵抗特性が定められている。

埋設管を実験土槽に埋設して加力することにより地盤反力特性を計測できる。前述のように地盤反力係数の評価、降伏点の評価、地盤反力の上限値の評価が研究主題であり、多くの実験結果が発表されている。今回の研究ではTrautmann et al.(1985,1985)の2種類の実験、安藤他(1995)の実験、島村他(2002)の実験、緒方他(2023)の実験における地盤反力の上限値に注目して分析を行う。いずれの実験においても降伏変位は埋設深さの2~3%程度であることが指摘されており、上限値を決めることによりバイリニア特性を設定することができる。

3. 塑性化応力を使った最大地盤反力の定式化

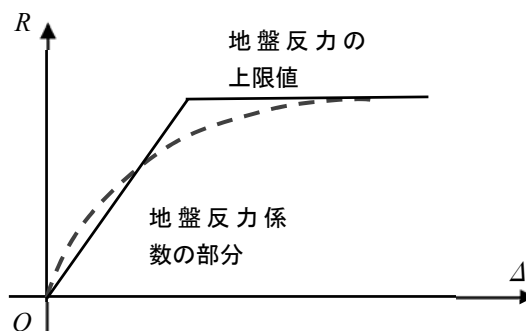


図1 地盤反力特性のモデル図

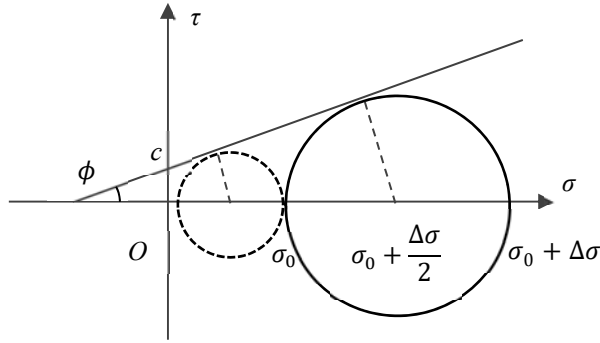
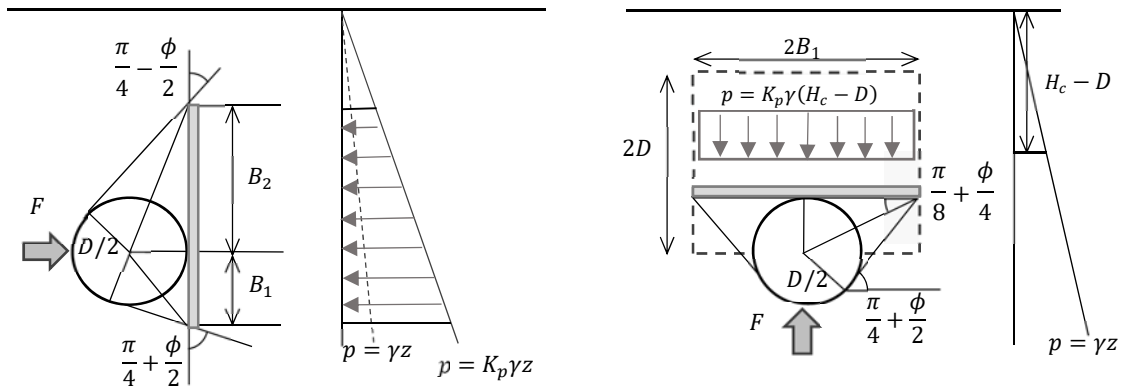


図2 せん断破壊状態のモールの応力円



(a) 管を横方向に押すモデル

(b) 管を上方向に押すモデル

図3 管を押す力と塑性化応力のつり合い

ランキンは平面ひずみを仮定して水平に広がる地盤において応力変化が生じたときの塑性平衡状態になる地中応力を定式化している。土質力学の教科書に載っている式であるが、初期応力を σ_0 、応力の増分を $\Delta\sigma$ 、内部摩擦角を ϕ 、粘着力を c として塑性平衡状態のモールの応力円を図2に示す。また最大主応力となる $\sigma_0 + \Delta\sigma$ の計算式を以下に示す。

$$\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{2 \cos \phi}{1 - \sin \phi} \cdot \frac{c}{\sigma_0} = K_p + \sqrt{K_p} \frac{c}{\sigma_0} \quad (1)$$

よく知られたランキンの受働土圧係数 K_p となるが、この式は力の作用方向によらず初期応力と塑性平衡状態となる応力の増分に関して成り立つ関係式である。

地盤を平面ひずみの条件として円盤を押し込む場合、円盤に押し込まれる地盤は一定の範囲において応力が増加して塑性化する範囲が広がっていく。一方で応力が増加する範囲の外側では緩みを生じるため初期応力よりも小さな応力となる。応力が増加する範囲を剛塑性モデルのすべり線の範囲と仮定して、円盤に接する剛体板に作用する力を合成する。塑性平衡状態における最大主応力が剛体板に作用する最大の力となる。

図3に管を横方向に押す場合と上方向に押す場合の解析モデル図を示している。解析モデルに関して別報として発表予定であるが、横方向に押す場合には管の上の領域が主働状態になることと、管の下の領域は初期状態であることから剛体板の長さを決めている。また上方向に押す場合には押し込まれる左右の領域が主働状態になることから剛体板の長さを決めている。2種類の長さの計算式は管の口径を D 、内部摩擦角を ϕ として以下となる。

$$2B_1 = D \cot\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4}\right) \quad 2B_2 = D \cot\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\phi}{4}\right) \quad (2),(3)$$

横方向に押す場合には深さを z として初期応力 $\sigma_0 = \gamma z$ として剛体板に作用する最大主応力を合成する。合成力 F は単位長さ当たりの力となり、管中心位置の受働土圧を補正した計算式となっている。粘着力がない場合には $c=0$ として計算する。

$$F = \int_{H_c - B_2}^{H_c + B_1} (K_p \gamma z + \sqrt{K_p} c) dz = (B_1 + B_2) \left\{ K_p \gamma \left(H_c + \frac{B_1 - B_2}{2} \right) + \sqrt{K_p} c \right\} \quad (4)$$

また上方向に押す場合には塑性化する領域は管頂部のやや上の領域になることから、初期応力を $\sigma_0 = \gamma(H_c - D)$ として長さ $2B_1$ の剛体板に作用する最大主応力を合成する。

$$F = 2B_1 \{ K_p \gamma (H_c - D) + \sqrt{K_p} c \} \quad (5)$$

いずれの計算式も埋設深さが浅い場合には適用することができない点に留意する。

なお円盤の前面に板を置いて地盤を押すモデルを使って単杭の地盤抵抗の上限値を考えると、杭径の1.5倍の受働土圧になるメカニズムを定性的に説明できる。

4. 提案式の評価

3章において提示した最大地盤反力の計算式を5編の実験的研究の結果と対比する。表1に対比する実験の概要を整理している。それぞれの論文で示された実験条件として管の口径、土の単位重量、内部摩擦角、埋設深さの条件をまとめている。なおTrautmann et al. (1985)は2編の論文をまとめて整理している。最大地盤反力の実験結果が示されている場合にはそれを引用し、示されていない場合には論文中に示されたグラフから読みとって実験値とする。

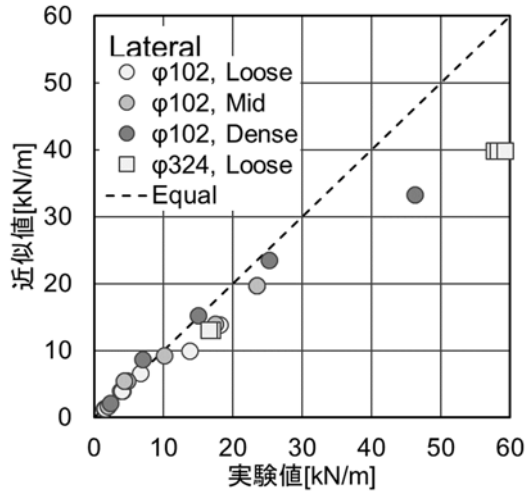
4.1 Trautmann et al. の実験

Trautmann et al.は乾燥砂を用いて緩詰め、中程度の締固め、密な締固めの3種類の地盤条件を設定して口径102mmと口径324mmの鋼管を水平移動させる実験と上方移動させる実験を行い、2編の論文(1985)を発表している。両ケースとも数多くの実験が行われており、埋設深さと内部摩擦角の違いにより地盤反力が系統的な変化があることを明確にしている。この実験結果はアメリカにおいて水道管の設計データとして用いられているほか(2005)、日本においてもガス導管の設計データとして用いられている(2013)。またこの実験結果を解析的に再現する研究も試みられている(2004,2013)。

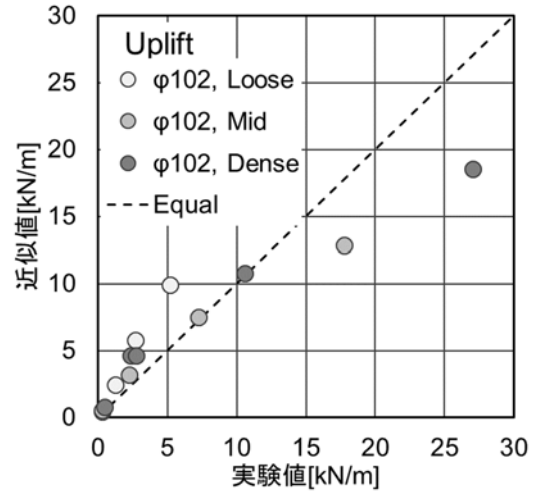
図4(a)に水平移動の最大地盤反力の実験値と3章で述べた近似計算結果を対比している。最大地盤反力の実験値は土被り圧に対する比率としてまとめられているので単位長さあたりの地盤反力に換算してグラフにしている。地盤反力が30kN/m以上になると近似値は実験値よりも過小になっているが概ね一致しているといえる。図4(b)は上方移動の実験結果と近似計算結果を対比している。この場合、埋設深さが浅く地盤反力が小さいと近似値は過大評価となっており、地盤反力が大きくなると近似値が過小評価になっている。初期応力の設定の影響と考えられ改良の余地はあるが、2種類の実験結果と近似値は概ね一致していることが確認できる。

表1 引用する実験の概要

Trautmann et al. (1985)	管の口径 $D=102, 324$ mm, 土の単位重量 $\gamma=14.8, 16.4, 17.7$ kN/m ³ , 内部摩擦角 $\phi =31, 36, 44^\circ$, 埋設深さ $H_c=0.15\sim 1.3$ m
安藤他(1995)	管の口径 $D=165.2, 318.5, 609.6$ mm, 土の単位重量 $\gamma=17.3$ kN/m ³ , 内部摩擦角 $\phi =45.8^\circ$, 埋設深さ $H_c=1.5$ m
島村他(2002)	管の口径 $D=318.5, 609.6$ mm, 土の単位重量 $\gamma=18.1\sim 21.2$ kN/m ³ , 内部摩擦角 $\phi =46, 47^\circ$, 埋設深さ $H_c=1.96, 2.1$ m
緒方他(2023)	管の口径 $D=60.5, 114.3, 165.2$ mm, 土の単位重量 $\gamma=15.3$ kN/m ³ , 内部摩擦角 $\phi =34^\circ$, 粘着力 $c=11$ kPa, 埋設深さ $H_c=0.15\sim 0.74$ m



(a)水平移動の実験結果



(b)上方移動の実験結果

図4 Trautmann et al.の実験結果の評価

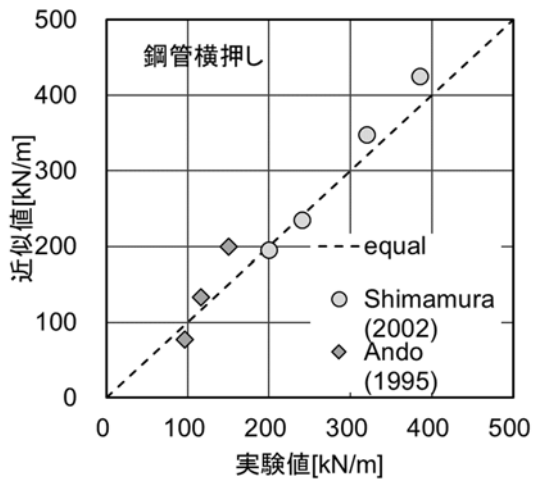


図5 安藤他, 島村他の実験結果の評価

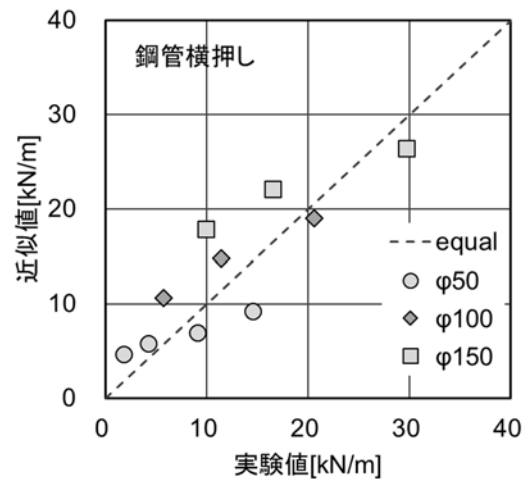


図6 緒方他の実験結果の評価

4.2 東京ガスの実験

前述のTrautmann et al.の実験は小口径管を浅く埋設した条件であり、口径の大きな管を深く埋設する場合に適用するには懸念があったため、東京ガスは大型の実験土槽を用いて検証実験を行いその結果を報告している。安藤他(1995)は管中心を1.5mとして3種類の管を水平移動させる実験を行っている。また島村他(2002)は埋設深さを約2mとして2種類の管を2種類の砂を使って水平移動させる実験を行っている。実験結果はTrautmann et al.の実験と整合的であり、提案されている最大地盤反力の土被り圧に対する比率は口径、埋設深さによらないことが確認された。

図5は2編の論文の実験条件に合わせて近似計算を行った結果を示している。図4(a)に比べて10倍ほどの地盤反力となっているが、口径・埋設深さによらず実験値と近似計算結果はよく一致しているのが確認できる。

4.3 緒方他の実験

緒方他は小口径の埋設管の地盤反力特性を明確にする土槽実験を行い分析結果を報告している(2023)。

この研究の主眼は地盤反力係数の分析に置かれているが、降伏変位と上限値に関する分析結果が報告されている。一連の実験では粘着力を見込んだ実験が行われており、粘着力を見込んだ最大主応力の計算式と対比する。

図6は3種類の鋼管を水平移動させる実験値と近似計算結果を比べている。地盤反力が大きくなると近似値はやや過小になる点は図4(a)と同様であるが、埋設深さを変えた3種類の管の地盤反力の上限値はおよそ一致しているのが確認できる。なお口径ごとのプロットが連続して並ぶのが確認されたが、近似計算式の特徴と考えられる。

5. まとめ

本報告は管を地盤に押し込むときに圧縮力が增大する受働領域の範囲を設定してランキンの塑性化応力を合成した近似値は実験で得られる最大地盤反力におよそ一致していることを述べている。管を水平に押す場合と上向きに押す場合についていくつかの実験結果と対比した結果を示しているが、管に作用する最大地盤反力は管の口径、埋設深さ、土の単位重量、内部摩擦角と粘着力により評価することができると考えられる。簡単なパラメーターにより計算できる最大地盤反力の近似値は大きな地盤変位が作用する埋設管のはり解析に応用することができる。今後は解析的評価を進めるとともに実際の埋設条件の評価を検討していく予定である。

謝 辞

本論の作成に当たっては、日本地震工学会「地中埋設物の地盤反力に関する研究小委員会」の各委員から貴重なご意見をいただきました。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 鈴木崇伸：非線形なばねで支持されたはりの近似解析法、土木学会論文集No.689/I-57, pp. 109-116, 2001.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV下部構造編 12章 杭基礎の設計, 2017.
- 3) Trautmann, C. H. and O'Rourke, T. D.: Lateral Force-Displacement Response of Buried pipe, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 9, pp. 1077-1092, 1985.
- 4) Trautmann, C. H., O'Rourke, T. D. and Kulhawy, F. H.: Uplift Force-Displacement Response of Buried Pipe, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, 9, pp.1061-1076, 1985.
- 5) 安藤宏和, 小林実央, 小口憲武：地震時の側方変位により埋設管に作用する拘束力の検討, 第23回地震工学研究発表会, pp. 409-412, 1995.
- 6) 島村一訓, 竹之内博行, 福澤小太郎, 三木千壽：実大実験による埋設パイプラインの管軸直角水平方向地盤ばね特性の研究, 土木学会構造工学論文集, 48A巻2号, pp. 489-496, 2002.
- 7) 緒方太郎, 鉦田泰子, 大室秀樹, 長谷川延広：埋設管水平方向載荷実験による管軸直角方向地盤ばねのモデル化, 日本地震工学論文集 第23巻, 第2号, pp. 23-39, 2023.
- 8) American Lifeline Alliance: Seismic Guidelines for Water Pipelines, 2005.
- 9) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針, 2013.
- 10) Yimsiril, S., Soga, K., Yoshizaki, K., Dasari, G. R. and O'Rourke, T. D.: Lateral and upward soil pipeline interactions in sand for deep embedment conditions, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 8, pp. 830-842, 2004.
- 11) Jung, J.K., O'Rourke, T.D., Olson, N.A.: Uplift soil-pipe interaction in granular soil. Can. Geotech. J. 50 (7), pp. 744-753, 2013.

Approximate Calculation of Maximum Subgrade Reaction Force Acting on Buried Pipe

SUZUKI Takanobu¹⁾

1) Professor, Toyo University, Dr. Eng.

ABSTRACT

This report proposes that the approximate value obtained by synthesizing Rankine's plasticizing stress by setting the range of the passive region where the compressive force increases when the tube is pushed into the ground is roughly consistent with the maximum ground reaction force obtained in the experiment. The results of comparing the results of several experiments when the pipe is pushed horizontally and upward are shown, and it is considered that the maximum ground reaction force acting on the pipe can be evaluated by the diameter of the pipe, the burial depth, the unit weight of the soil, the internal friction angle, and the adhesive force.

Keywords: Maximum subgrade reaction force, Rankine's plasticizing stresses, Buried pipe, Spring-supported beam