逆打ち工法を用いた山留め挙動

(その1 解析方法と RC 山留め壁の解析例)

BEHAVIOR OF AN EARTH RETAINING STRUCTURE FOR EXCAVATION
BY THE SAKAUCHI METHOD

(Part 1 Calculation method and behavior of an RC-wall)

風間 了*

Satoru KAZAMA

This paper presents, at first, an easy-to-use calculation method for an earth retaining structure constructed by the Sakauchi method. It takes into account a rotation spring, in addition to a lateral spring of the strut, to evaluate rotation of a wall restrained by the strut. Then, the author works out a theoretical analysis of mechanical behavior of an RC earth retaining structure by the Sakauchi method, in order to discuss the influence of the strut's rotation spring on it. Also, the author compares behavior of the earth retaining structure by the Sakauchi method with that of the same structure as was calculated ignoring the strut's rotation spring.

Keywords : *Sakauchi method, Excavation, Earth retaining wall, Rotation spring of strut*

逆打ち工法、根切り、山留め壁、切梁の回転ばね

1. 序

近年、地下構築のための山留め工事において、建築工事期間の短縮、山留め壁の変形抑制、工事の安全対策のために、逆打ち工法が採用される事例が増加している。しかしながら、逆打ち工法を用いた山留め解析には、通常の鋼製切梁を用いた切梁工法の解析方法が適用されているのが実状であろう。

一方、逆打ち工法を用いた山留め解析方法に関する研究には、筆者らの研究¹⁾もあるが、明解な解析方法を示した研究は数少ないと言える。なお、文献1)では、対面する山留め壁を対象とし、逆打ち工法の解析で最も問題となる後打ちスラブ・梁(以下、切梁)が山留め壁の回転を拘束する効果を、切梁の回転ばねで評価している。この切梁の回転ばねの評価には、対面する山留め壁間の支柱(本体柱)は無視されている。

本研究では、逆打ち工法を用いた山留め挙動の実用的解析方法に主眼を置き、切梁の回転ばね定数の実状に即した評価方法を検討するとともに、逆打ち工法と従来の切梁工法による山留め挙動の相異を解析事例を通して考察している。

さらに、逆打ち工法の場合、山留め壁の曲げ剛性は後打ち本体壁により部分的に増加するが、これが山留め挙動に与える影響についても事例解析を通して検討している。

2. 後打ち本体壁のスラブおよび大梁の回転ばね定数

本山留め解析では、切梁工法の切梁に相当する後打ち本体壁のスラブ(スラブまた大梁)が山留め壁の回転を拘束する効果を、文献1)の場合と同様に、切梁の回転ばねの導入により評価している。

2-1 単独に取り出したスラブおよび大梁の回転ばね定数

図-1(a)に、山留め壁と後打ち本体壁の柱、大梁、スラブの配置平面の、同図(b)には断面の一例を示した。また、以下の切梁の回転ばね定数の検討では、同図(a)のスラブ(S)または大梁(G)部分を単独に取り出し、同図(c)の如く、モデル化している。

同解析モデルではA端をローラーで支持し、またA端に曲げモーメント M_{AB} を作用させた時のA端の回転角を θ_A とする。

本研究の切梁の回転ばね定数(K_R)は、上記の M_{AB} および θ_A の関係を適用した(1)式で定義している。なお、 θ_A は、山留め解析時に、切梁位置の山留め壁の回転角に、また M_{AB} は切梁に発生する曲げモーメントに相当する。

$$K_R = M_{AB} / \theta_A \quad (1)$$

上記の切梁の回転ばね定数は、スラブおよび大梁部分の場合とも、B通りより右側の後打ち本体壁にほとんど影響されず、B通りをFixとした場合が最大となり、またPinとした場合が最小になると判断されよう。

* 早稲田大学理工学総合研究センター 教授・工博

Prof, Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Dr Eng

そこで、以下には、B通り支持条件をFixおよびPinとした場合の切梁の回転ばね定数について検討する。

図-1(c)に示した切梁の基本方程式は、(2)式で与えられる。

$$M_{AB} = K(2\theta_A + \theta_B) - C_{AB} \quad M_{BA} = K(2\theta_B + \theta_A) - C_{BA} \quad (2)$$

ここで、 M_{AB} 、 M_{BA} ：A、B 端の曲げモーメント、 $K = 2EI/L$ 、 EI ：切梁の曲げ剛性、 L ：切梁の長さ、 θ_A 、 θ_B ：A、B 端の回転角、 C_{AB} 、 C_{BA} ：A、B 端の固定端モーメント。

山留め解析は、本体躯体の切梁が打設された後が対象となるため、(2)式において固定端モーメントを零とし、同式に(3)式のB端の支持条件を導入すると、回転ばね定数(K_R)は(4)および(5)式の如く求められる。

<B 端の支持条件>

$$\text{Fix: } \theta_B = 0, \quad \text{Pin: } M_{BA} = 0 \quad (3)$$

<回転ばね定数>

$$\text{B 端Fix: } K_R = M_{AB}/\theta_A = 4EI/L \quad (4)$$

$$\text{B 端Pin: } K_R = M_{AB}/\theta_A = 3EI/L \quad (5)$$

B 端の両支持条件の回転ばね定数は、B 端の回転角(θ_B)に無関係に、A 端の回転角(θ_A)の関数となる。さらに、 K_R の値は、B 端の支持(拘束)条件に大きく影響されず、 $3EI/L$ (最小)～ $4EI/L$ (最大)の範囲にある。そこで、6 章以降の山留め解析での回転ばね定数は、 θ_A のみの関数で与えられる(4)式の値を採用している。

2-2 3 辺固定スラブのスラブ中央の回転ばね定数

上記のスラブ(S)部分[図-1(c)]を単独に取り出した(4)式の K_R の値は、実際のスラブが周辺の梁で支持されているため、過小評価されていることになる。そこで、以下には、スラブ周辺の梁が(4)式のスラブ中央位置の K_R の値に与える拘束効果を、解析例を通し概算的に検討した。

図-2に、解析を行ったスラブの平面および断面を示した。

三辺固定スラブの中央(C.L.)位置の回転ばね定数は、以下に示す解析条件を適用し、2次元FEMの弾性解析により求めている。

<解析条件>

スラブ平面：正方形、一辺の長さ： $L=5, 7, 9(\text{m})$ 、スラブ厚： $t=20(\text{cm})$ 、材：コンクリート、材のヤング率： $E=21(\text{kN/mm}^2)$ 、要素分割：25cm角の正方形、外力：A通りに等分布の曲げモーメント(Nm/m)

上記の解析条件より求めたC点の回転角(θ_C)より、スラブ中央部分の回転ばね定数(cK_R ： Nm/rad./m)は、下式で評価している。

$$cK_R = M/\theta_C \quad (6)$$

図-3には、スラブを単独に取り出した場合の(4)式の K_R に対する(6)式の cK_R の比($\alpha = cK_R/K_R$)とスラブ一辺の長さ(L)との関係を示した。

α の値は、 L が長くなるほど、わずかに減少する傾向は認められるが、 $L=5 \sim 9 \text{ m}$ の範囲では、2前後の値を示している。すなわち、本解析例の3 辺固定のスラブ中央の回転ばね定数は、スラブを単独に取り出した値の約2倍を示すことが判明した。

なお、図-1の大梁部分の回転ばね定数は、大梁断面がかなり大であることより、大梁の EI を採用した(4)式で評価出来よう。

そこで、6 章以降の山留め解析における切梁の回転ばね定数には、解析がスラブ位置の場合はスラブの EI を用いた(4)式の2倍の値を、大梁位置では大梁の EI を用いた(4)式の値を採用している。

図-1 片持ちスラブ、梁の回転ばね定数

図-2 3 辺固定スラブ中央の回転ばね定数

図-3 $\alpha - L$

3. 山留め挙動解析における切梁の回転ばねの導入

本章では、前章で示した切梁の回転ばねを山留め解析に導入する方法について述べる。

図-4に、山留めの挙動解析に切梁の回転ばねを導入する際の基本的考え方および山留め壁と切梁の節点における曲げモーメント分布を示した。

本解析では、山留め壁と後打ちの切梁は剛結合としている。この条件より、撓み角法におけるA接点周りの曲げモーメントは、下式を満足する必要がある。

$$M_{AB} + M_{AC} + M_{AD} = 0 \quad (7)$$

ここで、 M_{AB} 、 M_{AC} 、 M_{AD} ：A 節点のAB、AC、AD 部材の曲げモーメント。

ここで、切梁を前章で述べた切梁の回転ばね定数(K_R)に置換し、A接点の回転角を θ_A とすると、(7)式の M_{AB} は(8)式で与えられる。この結果、A接点においては、(9)式が成立する。

$$M_{AB} = K_R \cdot \theta_A \quad (8)$$

$$M_{AC} + K_R \cdot \theta_A + M_{AD} = 0 \quad (9)$$

なお、次章の逆打ち工法の山留め挙動の解析方法では、切梁位置の山留め壁と切梁の曲げモーメントの釣り合い条件に(9)式を適用している。

4. 逆打ち工法による山留め壁挙動の解析方法

4-1 基本方程式と解析方法

山留め挙動の解析には、地盤反力の非線形性状を導入した $E_s - y$ 法^{2) 3)}に切梁の回転ばねによる(9)式を追加し、適用している。

本解析方法では、深さ方向の地盤反力およびその変形に応じた非線形性状、また深さ方向で異なる山留め壁の曲げ剛性を導入するため、地盤および山留め壁を層分割している。また、根切り底以浅の山留め壁が背面側に押し戻された場合には、背面側の地盤反力も解析に導入している³⁾。

各層の基本方程式は、(10)～(12)式で与えている。なお、各層内での山留め外力は直線分布としている。

<根切り底以浅>

①山留め壁背面側に地盤反力が作用しない層(i層)

$$EI_i \frac{d^4 y_i}{dx^4} = a_i x + b_i \quad (10)$$

②山留め壁背面側に地盤反力が作用する層(j層)

$$EI_j \frac{d^4 y_j}{dx^4} - E_{sj}(y_j) \cdot (y_{0j} - y_j) = a_j x + b_j \quad (11)$$

<根切り底以深(k層)>

$$EI_k \frac{d^4 y_k}{dx^4} + E_{sk}(y_k) \cdot y_k = a_k x + b_k \quad (12)$$

ここで、 EI : 曲げ剛性、 E_s : 地盤の変形係数、 x : 層上端からの深さ、 $a \cdot x + b$: 外力、 y : x における変形、 y_0 : 過去の根切り段階で根切り側に発生した最大変形。

本解析方法では、地盤の変形係数(E_s)を変形(y)の関数で与えているが、同一層内では一定としている。そこで、(10)～(12)式の一般解を求め、壁頭、壁先端の境界条件および各層境界における変形(y)、回転角(θ)、曲げモーメント(M)、せん断力(Q)の連続条件を導入することにより、解は求められる。しかしながら、地盤反力に非線形性状を導入しているため、実際の解は収斂計算により求めている^{2), 3)}。

4-2 逆打ち工法における切梁位置の連続条件

逆打ち工法の解析で切梁工法の場合と大きく異なる点は、切梁位置の曲げモーメントの連続条件である。そこで、以下には、主として、切梁の回転ばねが関係する切梁位置の曲げモーメント連続条件を、せん断力の連続条件と対比して示す。

図-5に、切梁工法と逆打ち工法の、切梁位置に着目した曲げモーメント(M)およびせん断力(Q)分布を示した。

また、(13)式および(14)式には、切梁位置の層境界における連続条件を示した。なお、切梁位置以外の層境界の連続条件は、両式において、 $K_R = 0$ 、 $K_H = 0$ とした式で与えられる。

図-4 切梁の解析モデル

図-5 切梁位置の曲げモーメントとせん断力

<切梁位置における連続条件>

(i) 切梁工法

$$y_{K+1} = y_K, \theta_{K+1} = \theta_K$$

$$M_{K+1} = M_K$$

$$Q_{K+1} = Q_K + K_H \cdot (y_{K+1} - y_0) \quad (13)$$

(ii) 逆打ち工法

$$y_{K+1} = y_K, \theta_{K+1} = \theta_K$$

$$M_{K+1} = M_K - K_R \cdot (\theta_{K+1} - \theta_0)$$

$$Q_{K+1} = Q_K + K_H \cdot (y_{K+1} - y_0) \quad (14)$$

ここで、Suffixの K 、 $(K+1)$: K 層下端、 $(K+1)$ 層上端、 y 、 θ 、 M 、 Q : 変位、回転角、曲げモーメント、せん断力、 K_R : 切梁の回転ばね定数、 θ_0 : 切梁設置時の切梁位置の山留め壁の回転角、 K_H : 切梁の水平ばね定数、 y_0 : 切梁設置時の切梁位置の山留め壁の変形。

切梁工法の場合、せん断力のみが、切梁位置の K 層下端と $(K+1)$ 層上端で、切梁に発生する軸力により不連続となる。

一方、逆打ち工法の場合、切梁位置の曲げモーメントも、(14)式の如く、切梁に発生する曲げモーメント $[K_R \cdot (\theta_{K+1} - \theta_0)]$ により、不連続となる。なお、切梁に発生する曲げモーメントは、切梁軸力の場合と同様に、切梁設置時からの増分回転角に比例する。

以上の如く、逆打ち工法の解析において、山留め壁の回転を拘束する効果を切梁の回転ばねで評価することにより、切梁位置の曲げモーメントの連続条件は、せん断力の場合と同一形式となり、解析が極めて単純化される。

5. 山留め架構の解析モデルおよび解析条件

以下には、次章以降の解析例における山留め架構の解析モデルおよびその解析条件について述べる。なお、同山留め架構および地盤条件は、文献4)のNo.1事例(平面：約40×40m、最終根切り深さ：約14m、山留め壁：厚さ60cmのRC連続壁)を参考にして定めている。

5-1 解析モデル

図-6に、解析対象とした地盤および山留め架構を示した。

地盤は、上記文献4)の地盤を一部修正している。また、山留め解析時の変形 $y=1$ cm時の基準変形係数($E_{s1} : *10 \text{ kN/m/m}$)は、同図に示す如く設定している。

逆打ち工法の山留め架構を支配する地下室は、地下3階、地下底面G.L.-14m、階高約4m、柱間隔7m、スラブ厚25cm、大梁断面を70×100cmと仮定している。

山留め壁は、厚さ60cmのRC連続壁とし、後打ち壁(本体躯体)の壁厚は25cmとしている。また、各根切り時の後打ち壁は、最下段切梁以深約2mまで打設されるものとする。切梁位置は、ほぼ各階のスラブ位置としている。

5-2 解析条件

山留め挙動の解析は、スラブ中央部分および大梁部分[図-1の(S)、(G)]を単独に取り出し、山留め幅1m当たりについて、それぞれ別個に行っている。解析条件は、以下のように与えている。

山留め壁の曲げ剛性、切梁の水平ばね定数および回転ばね定数は、材を弾性としたコンクリート断面の値で評価している。なお、ヤング率は、 $E=23(\text{kN/mm}^2)$ とした。

後打ち本体壁部分の曲げ剛性は、解析対象がスラブ位置および大梁位置の場合(図-1)とも、山留め壁($t=60\text{cm}$)と後打ち壁($t=25\text{cm}$)が一体化された合成壁($t=85\text{cm}$)の値としている。

切梁の水平ばね定数および回転ばね定数の両値は、切梁断面をスラブ中央位置ではスラブ断面(100×25cm)、大梁位置では大梁断面(70×100cm)として算出している。

切梁の水平ばね定数(K_H)は、切梁長さを $L=20\text{m}$ (山留め架構の辺長/2)として(15)式より求めている。

$$K_H = AE/L \quad (A : \text{切梁の断面}) \quad (15)$$

一方、切梁の回転ばね定数(K_R)の算定に当たっては、 $L=7\text{m}$ 、B端を固定(図-1)とし、(4)式より求めている。なお、スラブ中央位置を解析対象にした切梁の回転ばね定数は、先の2-2項で述べた如く、(4)式の値にスラブ周辺の大梁の拘束条件を考慮した $\alpha=2$ (図-3)を乗じた値としている。

上記の解析条件を適用して求めた切梁の水平ばね定数(K_H)および回転ばね定数(K_R)の値を以下に示した。

＜切梁の水平ばね定数＞

$$\text{スラブ} : K_H = 2.86 \times 10^5 (\text{kN/m/m})$$

$$\text{大梁} : K_H = 8.05 \times 10^5 (\text{kN/m/m}) \quad (16)$$

＜切梁の回転ばね定数＞

$$\text{スラブ} : K_R = 3.42 \times 10^4 (\text{kNm/rad./m})$$

$$\text{大梁} : K_R = 7.67 \times 10^5 (\text{kNm/rad./m}) \quad (17)$$

上記の如く、大梁位置の水平ばね定数はスラブ位置の値の約2.8倍であるが、前者の回転ばね定数は後者の値の約23倍と非常に大きくなる。

図-6 解析モデル

6. 切梁工法と逆打ち工法の山留め挙動の解析例

本章では、壁の曲げ剛性を後打ち本体壁を無視した山留め壁の値とした場合の、切梁工法(山留め壁と切梁：ピン結合)と逆打ち工法(剛結合、 K_R 導入)の山留め挙動の解析例を対比して示す。なお、両工法の切梁の水平ばね定数には、(16)式の値を採用している。

6-1 スラブ中央位置

図-7には、スラブ中央位置[図-1の(S)]を解析対象とした、切梁工法と逆打ち工法の、変形曲線、曲げモーメント分布およびせん断力分布を対比して示した。なお、Pは側圧分布である。

逆打ち工法の変形は、わずかではあるが、切梁工法の値に比して減少している。また、逆打ち工法の切梁位置における曲げモーメントには、切梁の回転ばねによる不連続性がわずかに認められる。

しかしながら、逆打ち工法の変形、曲げモーメントおよびせん断力の各値は、切梁の回転ばねを導入しない切梁工法の値とほぼ一致し、最終根切り時においても大差が認められないことが解る。

6-2 大梁位置

図-8には、大梁位置[図-1の(G)]の、切梁工法と逆打ち工法の変形曲線、曲げモーメントおよびせん断力分布を対比して示した。

切梁工法の山留め挙動に与える(15)式の切梁の水平ばね定数の影響をみるため、本項の各値と前項(図-7)の各値を比較してみると、切梁の水平ばね定数の増加(約2.8倍)による各値の減少率は約6%以下と小さい。これは、切梁の軸剛性がある程度大きくなると、根切りの進行に伴う切梁位置の増分変形が小さくなるためである。

逆打ち工法の最大変形は、2次根切り以降、切梁工法の値に比してかなり減少し、最終根切り時には約30%減少している。このように、切梁の回転ばね定数が大きくなると、同ばねによる山留め壁の回転を拘束する効果が明確に現れることが判る。

逆打ち工法の切梁位置の曲げモーメント分布には、2次根切り以降、切梁の回転ばねによる不連続性が、前項の解析対象がスラブ中央位置の場合(図-7)に比較して明確に現れている。

また、切梁下端位置の値は切梁工法の値に比して2倍程度大きくなる場合もあるが、最終根切り段階における最下段切梁以深の最大曲げモーメントの値は、変形の場合ほど顕著では無いが、切梁工法の値に比して約18%減少している。

一方、せん断力分布の場合、両工法による差異は、特に最下段切梁以深部に現れ、逆打ち工法の値が切梁工法の値に比してかなり大きくなる。なお、最下段切梁以深部では、両工法の差異は小さい。

(a) 変形曲線

(b) 曲げモーメント分布

(c) せん断力分布

図-7 切梁工法(——)と逆打ち工法(——)、スラブ中央位置

(a) 変形曲線

(b) 曲げモーメント分布

(c) せん断力分布

図-8 切梁工法(——)と逆打ち工法(——)、大梁位置

以上、スラブ中央部分を解析対象にした逆打ち工法の山留め挙動は、切梁工法のそれと大差が認められない。これに対して、大梁部分を解析対象とした場合には、両工法の差異は、特に最下段切梁以浅あるいは根切り底以浅に明確に現れてくる。さらに、逆打ち工法におけるスラブ中央位置と大梁位置の山留め挙動の相異は、切梁の回転ばね定数に大きく支配されることが判明した。

7. 逆打ち工法の山留め挙動に与える後打ち本体壁の影響

本章での逆打ち工法の挙動解析には、大梁位置の解析においても、合成壁(山留め壁+本体壁: $t=85\text{cm}$)の曲げ剛性を後打ち本体壁部分に導入し、合成壁が逆打ち工法の山留め挙動に与える影響を考察している。なお、後打ち本体壁は、2次根切り以降、最下段切梁以深2mまで打設されたとしている。

7-1 スラブ中央位置

図-9には、スラブ位置を解析対象とし、壁の曲げ剛性を山留め壁の値(以下、山留め壁)および後打ち本体壁部分のみを合成壁の値(以下、合成壁)とした、逆打ち工法の変形曲線、曲げモーメント分布およびせん断力分布を対比して示した。

変形曲線の場合、山留め壁と合成壁による変形の差異はほとんど認められず、後打ち壁による曲げ剛性増加の効果は極めて小さい。

また、曲げモーメントおよびせん断力分布の場合、山留め壁と合成壁による差異は特に最下段切梁以浅に現れているが、上記の変形の場合と同様に極めて小さい。

この結果、切梁の回転ばね定数が小さいスラブ位置では、合成壁の効果はあまり期待できないと言える。

7-2 大梁位置

図-10には、大梁位置[図-1の(G)]を解析対象とし、壁の曲げ剛性を山留め壁および合成壁の値とした場合の変形曲線、曲げモーメント分布およびせん断力分布を対比して示した。

最終根切り時の合成壁の最大変形は、山留め壁の同値に対して約15%減少し、変形には後打ち本体壁の抑制効果が認められる。

曲げモーメント分布の場合、最下段切梁以浅の合成壁の曲げモーメント分布は、山留め壁の同分布が壁背面側に平行移動した性状を示し、その結果、最下段切梁以浅の合成壁の最大曲げモーメントはかなり大きな値となる。一方、最下段切梁以深では、両者の値に大きな差異が現れていない。

図-9 逆打ち工法[——：山留め壁、——：合成壁]、スラブ中央

また、最終根切り時の、合成壁の最大値は2段切梁位置で発生し、同以深の最大値の約1.7倍となるが、合成壁部分の曲げ耐力は後打ち壁により増加するため、設計上特に問題にならないと判断される。

せん断力分布の場合も、合成壁と山留め壁の値の差異は最下段切梁以浅に現れ、また同以深ではほとんど認められない。なお、最下段切梁以浅の合成壁と山留め壁のせん断力の差異は、上記曲げモーメントの場合と比較して減少する性状を示している。

さらに、上記の大梁位置の値(図-10)を前項のスラブ位置の値(図-9)と比較すると、前者の最終根切り時の最大変形は、後者の値に対して約36%、合成壁以深の最大曲げモーメント、せん断力は約26%および約20%減少し、逆打ち工法の山留め挙動は切梁の回転ばね定数の値に大きく影響を受けることが解る。

なお、上記スラブ中央位置の山留め挙動は、その位置が大梁に近づくに従い、徐々に大梁位置の挙動に移行するものと推察される。

8. 結 語

以上、逆打ち工法を適用した山留めの挙動解析方法を提示し、また解析例を通して同工法の山留め挙動の基本的性状を検討してきた。

図-10 逆打ち工法[——：山留め壁、——：合成壁]、大梁

逆打ち工法を適用した山留め挙動解析に切梁の回転ばねを導入した本解析方法は、解析が単純化され、実用的解析方法と言えよう。

また、逆打ち山留め挙動に与える切梁の回転ばね定数、後打ち本体壁の影響についても、基本的性状が明確になったと判断される。

謝 辞

本研究の2-2項の解析にご協力戴きました(株)大林組技術研究所、コンサルタント2部、部長 秋野矩之氏に心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 古藤田、風間、加藤：対面する山留め壁の同時解析法(山留め壁と切梁の接合条件の影響)、第22回土質工学研究発表会講演集、pp. 875～878、1975. 6
- 2) 古藤田、風間、加藤：山留めおよびくいの水平抵抗に関する研究(その3 山留め壁の挙動)、第10回土質工学研究発表会講演集、pp. 1269～1270、1987. 6
- 3) 宮崎、風間、村田：偏圧が作用する山留め架構の実挙動とその解析、日本建築学会構造系論文報告集 第439号、pp. 121～131、1992. 9
- 4) 風間：実測変形から見た軟弱地盤における山留め外力(その2. 根切りの進行に伴う外力分布)、日本建築学会構造系論文報告集 第532号、pp. 95～102、2000. 6

(2000年3月21日原稿受理、2000年6月5日採用決定)