

山留めに作用する側圧荷重について

こ とう だ 古 藤 田
き く お 喜 久 雄*

1. 山留め工法および構造の多様化

従来の一般的な工法による山留めは、土圧に抵抗するための比較的簡易で仮設的な壁であったが、今日では市街地における根切り工事に際しての山留めは、単にいわゆる山(崩壊)がこないよう土圧に抵抗し、掘削壁面の土砂をささえて安定保持するだけでは不十分であって、山留め壁の変形に伴う周辺地盤、ひいては隣接する構造物の沈下などの障害を最小限度にとどめることが、大切な機能とされている。

このことは、山留め壁を従来のたわみやすい壁から、なるべく剛な壁に変える動機となり、ほかに矢板などの打ち込みに際しての振動、騒音の防止の要求からも、鋼矢板などによる山留めに代わり、場所打ちコンクリートによるRC山留め壁が多く利用されるようになった。

また、仮設の腹起こし切バリでささえながら、まずオープンカットした後、基礎から地下室へ、すなわち下部から上部に向かって構造物を築き上げてゆく、いわば順打ち工法に代えて、地下室本体のハリや床版で山留め壁をささえながら、掘削につれ本体工事を進めてゆく逆打ち工法、あるいはその併用工法も行なわれている。

以上、山留めに作用する土圧および水圧などによる側圧荷重の問題に関連して、今日ますます多種多様化してきた掘削から山留めおよび基礎と地下室の本体工事を含めた地下部分の施工と、山留め構造に関する諸条件をいかに整理するかが問題である。

なかでも根切り地盤がある程度以上の硬さを有する場合で深く掘らない間に、設計切バリ反力値に近い大きい値のプレロードを切バリに加えるか、タイバックアンカーを利用するような場合には、山留め壁の支点変位は小さくなると考えられるが、このような工法による場合の側圧分布については一般の場合に増してわからない要素が多い。

また、山留め壁にRC壁を使用するようになってからは、たとえば連続壁と呼ばれるような山留め壁を、そのまま深い地下室本体の外壁とくに耐震壁として兼用すること、さらには地下室の外壁回りのハリや柱、あるいはそれらの一部をRC山留め壁に内蔵するといった工法も考案され、すでに実用の域に達している。

このような地下あるいは基礎構造本体と兼用の山留め壁については、設計に際しての側圧荷重の採り方のほかに、掘削時における壁の残留変形や応力の問題がある。

2. 建築基準法および学会基準の背景

根切り山留めに関する法規制としては、建築工事の場合、建築基準法施行令第7章の2「工事現場の危害防止」の第136条の3がまず適用される。

この法律で規定されている主な事項をあげると下記のとおりである。

- i) 地盤および近接する工作物に対する調査
- ii) 根切り、山留めおよび排水などに関する施工図の作成
- iii) 近接工作物の補強対策
- iv) 山留めの根入れ、支保工各材の構造計算
- v) 土圧および近接工作物の荷重による影響の算定
- vi) 支保工各材の許容応力度
- vii) 施工中の点検
- viii) 矢板の抜き取りに際しての周辺地盤の沈下防止の措置

上記の内、(vi)の材の許容応力度を除く他の項目については具体的な規定はなく、単なる注意の喚起にとどまるが、これは法律の性質また技術面の実情からみてむしろ当然であろう。土圧の取り方や、根入れ長さおよびヒービングに対する算定などに関しては、建築主事による行政指導の面においても、実情としては日本建築学会の基礎構造規準の第7章「根切り工事」の中の48条「山止め」、49条「下部地盤の回り込み(ヒービング)」などの各条項が重視されているようである。したがって、規準には単に学会の推薦というより重大な社会的責任が負荷されている。

山留めの場合は従来は仮設構造物であったが、先に述べたとおり、今日では必ずしも仮設物ではなく、本体構造物としての山留めもあり、工法が多様化していることから側圧の取り方一つを取り上げて規定するのも容易ではない。すなわち山留めに作用する側圧については、山留めがもとより不静定次数の高い構造物で、しかも山留めの変形条件などがただちに土圧分布などに影響することが知られており、地盤状態のほか山留めの構造および掘削や排水などの

* 早稲田大学理工学研究所 教授

論 説

施工条件が、山留め設計の荷重である土圧および水圧の分布と密接に有機的に関係するため、ケースバイケースの要素があまりにも強い。

上記の建築基準法施行令の元は、昭和34年施行の政令として生まれたもので、現行の学会規準は昭和35年の刊行であるが、これに先立って行なわれたのが、後に述べる昭和31年から昭和33年にかけての建築学会における特別委員会の研究である。

ただし、建築の分野においても根切り工事の安定性に関しては、実施面において古くから関心が強かったようであって、文献¹⁾によれば既に昭和の初期においてかなり高度な工法が開発され、地下室全体をオープンケーソンとする大規模な竹中ケーソンも実施され、昭和14年1月には日本建築協会によって山留め工法の一般の考え方なり計算法について「仮設土留工事構法」が刊行された。

戦時中の長い空白期間を経た後、昭和30年頃から急速な建築ブームの復興をみるに至って、根切りやクイ打ちなど基礎工事に伴う地盤沈下などいわゆる建設公害の発生が問題とされるに至った。そこで、昭和31年および昭和33年度には、建設省建設技術研究補助金を得て、下記の表題についての研究が日本建築学会の受託研究として行なわれた。

- i) 施工に伴う地盤沈下による公害とその防止に関する研究
- ii) 基礎の安全施工法に関する研究

建築学会内にはそのための特別委員会（主査：故内藤多仲）が設けられ、最上武雄、南和夫、竹山兼三郎、大崎順彦の諸氏をはじめ、業界からも故久良知丑二郎、故甲野繁夫および大内二男、永井久雄、箕曲在信らの諸権威の下に遠藤正明や筆者（委員会幹事）らがこれに参加した。

i) の課題については、この問題に関しての諸外国における法規や行政指導の実情についての調査をはじめ、根切りに伴う沈下などの障害の実態およびその原因の分類などについて調査研究が行なわれた。

外国の関係法規の中で、根切りに伴う沈下障害の補償なり責任限界について、既存建物の隣接地で根切りが行なわれ、その深さが10～12フィート以下である場合には、むしろ既存建物の所有者が自主的に建物を保護すべきであるということを義務付けている例があるのは、都市の公共性を優先させたことによるものと解され、興味をひいた。

沈下などの障害の実例については、業界側委員の積極的な協力によって、多数の既存の事故例が収集され、また当時施工中の多数の現場における調査も進んだ。その結果は、根切り事故の原因分類として今日でも多く引用されているが、中でも注目すべきことは、塑性粘土地盤における根切り工事に伴う周辺地盤の沈下は、土砂くずれなどによる場合を除けば、主として山留め壁の変形に起因し、変形土量と沈下土量との体積がほぼ等しいという事実を見いだした。

これは後に第7回国際土質基礎工学会議（メキシコ、1969年）におけるペック（Peck）の一般報告²⁾の中で述べられたことと一致している。

しかし、障害の対策としては、十分な矢板根入れ、適当深さの掘削と切バリ架設、切バリ架設に際してのプレロードの有効性などが指摘されたが、切バリ反力の測定などの工事中の点検調査の必要性が強調された。

切バリ反力の測定計器の開発については、昭和32年にも同委員会の自主的研究が継続され、現場における測定としてはカールソンヒズミ計などによるよりも、直視式の方が実用的であるということから、主として遠藤正明らの努力で今日一般に見られる油圧式反力計が開発され、昭和33年度の研究においては、この油圧式反力計を用いた測定調査³⁾が行なわれた。

このほか、上記の研究ではチェボタリオフ（Tschebotarioff）の実験方法にならって、可とう壁に対する土圧についての乾燥砂を用いた、模型実験などによる基本的実験⁴⁾も行なわれ、先述の「工事現場の危害防止」の政令案に関する検討、および基礎の安全施工に関する指針の作成が行なわれた。

先述の建築学会規準の「根切り工事」の各条項および解説の原案は、山門明雄の努力による苦心の作である。内容については諸氏の大方が承知されていることと思うので省略するが、山留めに対する土圧の取り方についての背景についてその要点を述べると、地盤を砂質地盤と粘土質地盤とに分けて、砂質地盤についてはテルツァーギ-ペック（Terzaghi-Peck）の現場実測に基づく台形分布を、粘土質地盤についてはチェボタリオフの実験に基づく理論的考察を尊重して、土圧係数 $K=0.5$ とする三角形分布、また粘土の硬さに応じて下部の土圧分布を低減するチェボタリオフの提唱式を採用している。

上記規準の刊行の時代からすでに10年以上を経た今日、内外の研究資料も多くなりとくにわが国内ではこの間に多数の切バリ反力の実測が行なわれ、資料は集積されている。建築学会規準は近く改訂の時期に当たり、この点では規準改訂の背景として好都合であるが、一方では施工の実際面において、とくに近年になって急速な工法の変遷なり、多様化が目立ちそのため山留めに作用する側圧の取り方などがますます複雑になってきたことに問題がある。

3. 山留め壁の変形状

山留めに作用する土圧の分布が壁の変形状態と密接な関係を有し、互いに因果関係にあることは衆知のことである。しかし、壁の変形状態に関しては、下記の事項が要素としてあげられ、全体的には施工条件の影響が大きいと思われる。

- i) 地盤状態および根切り場周囲の地表面荷重の状態
- ii) 山留めの構造および材料による剛性

iii) 切バリなどの各段におけるサポートの架設に際しての掘削深さ、および掘削底面より下部の地盤の剛性

iv) H型鋼などを親グイとする工法においては、親グイの打込み、あるいはせん(穿)孔後の建込みによるかなどの施工上の条件

v) 根切り底面下にあらかじめ設ける既製グイおよび場所打ちグイによる土のかく乱などの影響、その他

山留め壁の材料による剛性について、場所打ちコンクリートを用いた厚さ 50～80 cm の RC 壁を山留め壁として利用する例が多くなり、RC 壁の曲げ剛性 EI (ただし E : ヤング係数, I : 断面二次モーメント) を鋼矢板ⅢおよびⅣ型のそれと比較すると、20～30 倍の大きさである。したがって、剛壁としての山留め壁に対する土圧分布が問題になっている。しかしながら、RC 壁の変形調査によると、鋼矢板などを用いる場合に比して変形量は概して小さくなるが、一般にその変形量は全根切り深さ H に対し $H/1000$ より大きい値を示す例が多く、変形の状態も掘削底面より下方の土が軟弱である場合には、深部からの曲げ変形を示す例が多いことからみても、また、壁面における側圧実測値の動きによっても、RC 山留め壁もまた一般的には鋼矢板の変形性と大差はないとみて差しつかえないようである。側圧分布に関する RC 壁の変位もまた支点位置の変位の大きさに支配されるとみられる。

RC 山留め壁と鋼矢板との相違点は、従来の鋼矢板などに対する場合、壁に作用する土圧や水圧の分布はさして問題ではなく切バリや腹起こし材に対する荷重の大きさが問題であったが、RC 山留め壁に対しては壁体応力の関係から壁に作用する側圧の分布が直接的な問題となることである。

したがって、切バリ荷重の推定値として、テルツァーギ (Terzaghi) およびベック (Peck) らによる切バリ反力の実測例に基づく山留め土圧の提唱式とは別に、直接的な壁面側圧荷重の分布が問題である。

山留め壁に作用する土圧の分布については、一般に可とう性の壁あるいはタワミ壁に対する土圧分布の問題と解釈されてきたが、土圧分布に関しては壁自体の剛性のほかに、切バリなどによる支点位置の変位量もまた大きな要素とみるべきである。これは、支点位置における変位に比して支点間スパンの部分の変位がきわめて大きくなる、いわゆるタワミ壁において認められる土圧の再分布現象、すなわち支点位置での土圧集中は支点に変位を与えることによって消滅し、土圧は三角形分布にもどるといふ実験結果によるものである。

先に RC 山留め壁の変形性状もまた鋼矢板のそれと大差がないと述べたのは、RC 壁に対してもかなり掘削した後、切バリなどのサポートをかけるといった工法による場合には、支点位置における変位が一般に上記の土圧再分布消滅に必要な量に達し、全体的には壁は下部を中心とした

回転の動きをするということで、この状態は、根切りに際しての鋼矢板の一般的な動きと大差がないという意味である。

可とう性の壁に作用する土圧については、本学会の第14回シンポジウム(昭和44年度)と、これに関連して論述された市原松平の論文が有益な資料である。

市原⁵⁾は、壁の変位に応ずる土圧変化についての模型実験について、ダルウィン(Darwin)(1882)の実験をはじめテルツァーギの古い実験(1920)、デンマークにおけるアンカー矢板岸壁設計規準の基となったストロイヤー(Stroyer)の実験(1933)、時代を下って、チェボタリオフ(Tschebotarioff)のプリンストン大学における実験(1949)またロウ(Rowe)の一連の実験(1952～1955)などについて、研究の目的と実験方法および結果の要旨などを沿革史的に論述し、とくにロウの研究結果については、矢板岸壁設計法との関係において論じているのでわかりやすい。

このようなアンカー矢板などタワミ壁に作用する土圧分布については、下記の理由による土圧再分布の現象が注目される。

- i) 上下段の支点間における鉛直方向アーチング
- ii) 支点位置の壁背面とスベリ面外の土の間における水平アーチングによる下部土圧の減少
- iii) 根切り底面境界部における土のせん断抵抗による土圧伝達
- iv) 壁下部のはらみ出しによる壁上部の受働側への変位に伴う上部土圧の増加——壁の連続バリ効果

アーチングをはじめとして土圧再分布の原因に関しては、テルツァーギ⁶⁾ およびチェボタリオフ⁷⁾ の見解がとくに注目される。

模型実験の多くはアンカー矢板、もしくはあらかじめ取り付けたサポートで支持される矢板に対する実験で、しかも乾燥砂に対する実験である。したがって支点位置での土圧の集中は容易に認められた。なお、乾燥砂に対する実験においても、アンカーあるいはサポートをゆるめて支点位置における変位を許すと、土圧の集中は減少することが認められる。これに対して、実際の山留め壁の場合には、土質についても、また支点変位の点についても模型実験による場合とはかなり条件が異なり、チェボタリオフが指摘したとおり、サポートの取り付け以前に変位するため土圧の再配分なり上部での集中は生じにくいはずである。

しかしながら、これまでの切バリ反力の実測によっては、切バリの反力の荷重支配面積を上下左右に相隣る切バリまでの距離の1/2で囲まれる範囲と仮定するなどして、切バリ反力実測値から荷重分布を推定した場合、この推定側圧荷重分布を先に述べた建築学会基礎規準式と比較すると、砂質地盤においては、規準式が実測値に比しておおむね安全側で比較的良好一致をみるのに対して、粘土質地盤における実測例では、規準式がとくに上部で危険側である例が多いと指摘されてきた^{8),9)}。また事故例としても上段切バ

論 説

リの破壊の例が多かった。

この問題について、砂質地盤に関する規準式はもとより切バリ反力実測値に基づくテルツァーギーベック式であり、粘土質地盤に関する規準式はチェボタリオフが模型実験および理論的に求めた式であることに、その原因があるものと考えられた。一方、RC 山留め壁の出現によって、壁中に埋設した土圧計による直接的な側圧の測定結果¹⁰⁾が増えてきたが、これによると多くの場合、側圧荷重の分布はほぼ深さに比例した三角形分布で側圧係数が $K=0.5$ に近い値を示している。そこで、RC 壁が剛壁と思われたこともあって、チェボタリオフのいう静止土圧ではないかという見方が強くなってきた。したがって、鋼矢板にはタワミ壁の側圧分布を、RC 壁には静止土圧分布という区別が必要ではないかという意見も強くなってきた。

しかしながら、鋼矢板に対しても RC 壁と同様に土圧計なり間ゲキ水圧計を取り付けて、切バリ反力と直接的な側圧の分布を測定した実験例によると、鋼矢板と RC 壁も共に切バリ反力については、従来の結果と同様な結果を得、上段切バリの反力が比較的大きい値を示しながらも、その時点で水圧を含む側圧の分布は、測定開始後から減少して、前記同様の $K=0.5\sim 0.6$ 程度の三角形分布を示し、むしろチェボタリオフの提唱になる分布形に近い結果を得ている例が多い。

チェボタリオフに相違することとしては、チェボタリオフが粘土質地盤におけるアンカー矢板についても自立高は認められないと指摘したのに対して、仮設切バリ腹起こしによる山留めの場合には自立高が認められることである。これはアンカー矢板の支点変位は小さいのに対して、切バリ腹起こしによる場合にはその架設前に相当量の支点変位を許すことによるものであろう。

上記の切バリ反力と壁面側圧分布に関しての矛盾は、切バリ反力の側圧荷重の支配面積の取り方の問題に帰結するものと考えられる。

切バリ反力の支配面積は、壁の変形と掘削底面下部における土の受働抵抗の問題に帰結されるようであり、野尻明美¹¹⁾の修正分割法と山留め壁の変位および応力、各掘削段階の累加の考え方が今後の問題として注目される。

またチェボタリオフは支点変位の予知のむずかしさから、可とう性壁の問題を連続バリとして解くことの意義は小さいと指摘した。これは既に 1/4 世紀前の見解として当然で

あるが、計算機時代の今日、解法としては山肩那男の理論解¹²⁾など注目すべきものも多い。ただし、実用的には壁の根入れ部の土の受働抵抗など反力分布の性状と数値が明かでない点その他施工条件などとの関係について今後の問題が残されている。

なお、現段階で結論を述べれば、下記のようなことになると考える。

- i) 一般的な工法による場合、RC 山留め壁と鋼矢板の壁の剛性の差は、土圧および水圧などによる側圧分布にとってあまり問題ではなく、支点変位が支配的要素となる。
- ii) 切バリ反力の推定については、切バリの側圧荷重負担の支配面積の取り方について十分な資料が得られるまでの間は、テルツァーギーベックなどの反力実測に基づく推定式²⁾によるべきである。
- iii) RC 壁など壁応力算定のための側圧荷重の分布としては、チェボタリオフの提唱式にならい、係数については地盤状態に応じて多数の資料を検討して決める。

参 考 文 献

- 1) 谷口尚武：建築基礎工法の発展過程，建築基礎工法と実例編集委員会（委員長，山肩那男），日本建築協会，昭和47年1月
- 2) Peck, R.B.: Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground, Proc. 8th. I.C.S.M.F.E. Mexico, Vol. 3, pp. 147~151
- 3) 古藤田喜久雄・箕曲在信・遠藤正明・川崎孝人：山留めの切梁に作用する土圧の測定，土と基礎 35号，Oct. 1959, pp. 26~37
- 4) 古藤田喜久雄・山下丞二：矢板模型実験，土と基礎 34号，Aug. 1959, pp. 4~9
- 5) 市原松平：矢板岸壁の設計について，土と基礎 146号，April 1970, pp. 15~28
- 6) K. Terzaghi: Theoretical Soil Mechanics, Wiley, 1948, pp. 69~76
- 7) 石井増丸訳：チェボタリオフの土質工学（上巻），技報堂，pp. 288~291
- 8) 古藤田喜久雄・花村昌彦ほか：切ばり反力実測値と規準値との比較，日本建築学会論文報告集，号外，昭和40年6月，pp. 350
- 9) 玉置 脩・中川誠志ほか：多数の切ばり反力実測値から求めた山留土圧について，土質工学会，第7回土質工学研究発表会講演集，昭和47年6月，pp. 495~498
- 10) 金谷祐二・宮崎祐助ほか：RC 山留壁にかかる側圧（その1，その2），日本建築学会大会学術講演概集，昭和47年10月，pp. 851~854
- 11) 野尻明美：掘削工事における山留架構の構造計算，土質工学会第7回土質工学研究発表会講演集，昭和47年6月，pp. 495~498
- 12) 山肩那男・吉田洋次ほか：掘削工事における土留機構の理論的考察，土と基礎 139号，Sept. 1969, pp. 33~46

（原稿受理 1973.3.13）

*

*

*