

16. 地下掘削・山留め

まる おか まさ お
丸 岡 正 夫
(株)竹中工務店技術研究所

1. はじめに

本誌通巻3号の「土圧研究の方向性について」と題した一般報告(石井 1953)では、矢板壁、土留め壁に作用する土圧や設計法に関する Terzaghi (テルツァーギ), Tschebotarioff (チェボタリオフ), Rowe (ロウ)らの欧米における過去20年間の研究成果と顕著な進展を紹介しながら、「土圧の問題に関する限り、吾々は20年、否それ以上の立遅れを肯定しなければならぬのである。」と大戦の影響を説明するとともに、土圧の問題は欧米においてもまったく未開の分野であり、「研究すべき題材は無限に広がっていると言っても過言ではなからう。」と述べている。

敗戦の混乱と戦災の傷跡から今だに脱し切れていなかったと想像される50年前、我が国の地下掘削・山留めに関する技術の状況はどうであったかを知ることが出来る資料はそう多くはない。その中でも本誌創刊号(1953)を始めとして、講座「建築基礎工法(Ⅱ), (Ⅲ)」(1955, 1956)や建築工事標準仕様書・解説(1953)などからある程度は伺い知ることが出来る。当時の山留め工法としては、矢板は、木製矢板、鋼製矢板、親杭はレールが用いられている。腹起し、切梁、支柱などの支保工は木製がほとんどで、鋼製は高価なためほとんど用いられていなかったようである。地下室の掘削工法は、法切りオープンカット工法、水平切梁工法、アイランド工法が用いられている。特殊な工法としては、戦前に行われ始めていたケーソン工法や、トレンチカット工法が深い掘削工事で採用されている。排水工法は、釜場排水がほとんどであり、最上教授によってウェルポイント工法が日本に紹介されるのが1952年である。掘削機械についてみると、土工工事については、パワーショベルなどの大型土工機械が導入され機械化が進んでいったが、建築工事においては市街地での施工条件などもあり、立ち遅れている状況にあった。山留めの設計技術に関しては、日本の土質工学研究の緒とされる鉄道省の土質調査委員会(1934)の設置や内藤多仲を会長とする建築基礎研究会の会誌「基礎研究」の発刊(1935)等が行われ、土質工学に関する研究が始まった直後における大戦であり、その当時の欧米における華々しい研究成果は知ることが出来なかったものと思われる。つまり、山留め設計に関しては、古典的土圧論による土圧を基本にしながら、多くは経験によって設計がなされていたものと想像される。現在、その重要性が認知され掘削工事におい

ては何らかの形で実施されている情報化施工に関しては、実施例は少ないにしても、土圧計などによる掘削工事の安全管理が50年前においてすでに行われている。

以下では、主にその後の「土と基礎」に掲載された論文を頼りにしながら、山留め工法、設計・解析技術、情報化施工技術について最近までの50年間の歩みについて顧みることにしたい。

2. 山留め工法

敗戦からの10年間は、我が国全体が復興と昭和30年代からの高度経済成長への準備期間とも言える時期にあたる。山留め工法においても戦前からの工法をそのまま引き続き用いながら、欧米の技術紹介と導入がなされた時期である。1950~1951年にかけて日比谷交差点の東北の一角にオープンケーソン工法によって施工された日活国際会館は、地下4階の地下室を一体にして-17.3 mまで沈降させた工事として(大内 1953)、当時のニュースでも報道され注目を浴びた。このオープンケーソン工法は、昭和11年(1936)の朝日新聞名古屋支社にはじまり松坂屋の銀座店、上野店(1938)の地下室工事に採用されていたものである。また、昭和30年代後半から採用が増え出す逆打ち工法も、東京の第一生命保険相互会社ビル(1934)において、ウォールケーソン工法と木田式深礎工法との併用によって-20.5 mの地下工事を行ったことに始まるとされている。

欧米からの技術導入については、アースドリル工法(1952)、プレパクトCIP工法(1954)、ベノト掘削機(1955)、プレパクトMIP工法(1956)、プレパクトPIP工法(1960)等が昭和20年代から30年代前半に導入され、これらが後の30年代における柱列式山留め壁の開発と発展につながって行く。

昭和30年代に入り、我が国の急激な経済成長と国土・都市開発、それに伴う建設需要の増大に対応して山留め工法も各種の工法が開発され発展をとげてゆく。

山留め壁工法では、市街地における深い地下室の増加や密集地での周辺地盤・構造物への影響防止、騒音振動に対する配慮から、杭や鋼矢板の打撃工法に代わる工法としてベノトやアースドリルなどの場所打ちコンクリート杭を連ねた柱列壁、MIPやPIP技術を基に、我が国独自技術として開発されたオーガーパイル工法(竹中工務店 1957)、プレボーリング工法(清水建設 1960)、TAW工法(大成建設 1960)、ソイルパイル工法(竹中工務店 1960)等の柱列壁工法が登場する。これら初期のころの柱列壁工法は、杭体を1本ずつ施工していたために水密性と施工性の点で難点があった。しかし、1976年に多軸の施工機械が開発されたことにより、止水性能と施工率が飛躍的に増大し、現在最も多く採用されているソイルセメント柱列壁工法につながって行くことになる。最近のソイルセメント柱列壁工法には、低重心でかつラップのない壁を連続的に作る工法や、心材のH鋼を後打ち躯体の鉄筋コンクリート壁と一体化させて合成構造の地下外壁として本体利用するなど、安全

性、止水性、経済性の向上が図られてきている。

RC連続地中壁工法（以下、連続壁と略す）も柱列壁工法と同様の要求から、昭和30年代より我が国への導入と普及が図られていった。連続壁は、1959年イタリア ICOS 社から初めて日本に導入されたのち、建設施工会社を中心に技術導入と実用化開発の努力がなされている。連続壁は工費が高いのが欠点であったが、仮設山留め壁としてだけでなく本体構造物の地下外壁、耐震壁、支持杭として兼用するための開発・実用化がなされ、昭和40年代後半から剛性が高く止水性にも優れた信頼性の高い工法として広く採用されるようになってゆく。昭和50年代に入り、大規模なエネルギー備蓄タンクに連続壁が採用されるようになってからは100 mを超える大深度掘削機の開発と適用がなされ、さらに昭和60年代になると海洋での大規模構造物や大深度の地下空間施設への利用を目的に最大壁厚 3 m、最大掘削深度150 m以上の掘削機も開発されている。また、最近では大深度でも大きな壁厚を必要としない高耐力のSRC連続壁や鋼製連続壁の開発がなされている。このように連続壁は大深度掘削工事への要求に応えられる高耐力・高品質の山留め壁工法として大きく発展してきた。

山留め支保工では、1959年頃から溝型鋼の複合材による腹起こし、切梁がそれまでの木材に代わって用いられるようになり、昭和30年代後半にはI型鋼、H型鋼および鉄筋コンクリートが一般的に用いられるようになっていく。また、地下室の建設では、逆打ち工法も広く採用されるようになっていた。本誌の論説（西嶋1965. 8）によれば、現在のプレロード工法に近いものが既に採用されていたことがわかる。昭和40年代になると、グラウンドアンカー工法が建築の山留め工事を主体に用いられるようになり、スピンドル式ロータリー削孔機や、ロータリー・パーカッション削孔機（1972ころ）の開発・導入に伴いアンカーの施工性と信頼性が増し、50年代には公共土木工事にも多く用いられるようになった。土質（現・地盤）工学会からは「アースアンカー設計・施工基準」（1976. 9）および、その改訂版「グラウンドアンカー設計・施工基準」（1988. 11）が発行され、日本建築学会からは「建築地盤アンカー設計施工指針・同解説」（1991）が発行されている。市街地における除去式アンカーの開発と利用、土木・建築における永久アンカー工法の開発と利用、また最近では、地下水位が高い地盤におけるグラウンドアンカーの施工においても止水方法が考案され、施工品質の向上と適用範囲の拡大がなされてきている。

3. 設計・解析技術

ここでは、山留めにおける最も基本的な、山留め壁に作用する側圧（土圧+水圧）の問題と山留めの応力・変形の設計法について顧みることにしたい。山留めに作用する側圧の問題を論じる上での出発点は、Terzaghiの擁壁土圧に関する模型実験結果（1934）とそれに基づいた論文（1936）といえるであろう。この論文は、そ

の後に続く多くの研究のきっかけとなり、矢板壁に関するStroyer（ストロイヤー、1935）、Tschebotarioff（1948）、Rowe（1952）らの模型実験と矢板壁の設計法の提案、山留めの切梁反力に関するSpilker（スピルカー、1937）、van Bruggen（ファンブルゲン、1941）、Peck（ペック、1943）の現場での観測、そして、切梁反力に関する著名なTerzaghi、Peckの側圧分布（1948）¹⁾、Tschebotarioffの側圧分布（1952）²⁾の提案へとつながってゆく。

我が国においては、戦後しばらくは、これら欧米の研究成果の導入時期にあたり、本誌講座「建築基礎工法」のNo. 12（1955）において、掘削底面および法面安定の検討方法、No. 13（1956）においてTerzaghi-Peck（砂地盤）およびTschebotarioff（粘土地盤）の側圧分布、ウェルポイント工法を含む排水工法の紹介と解説がされている。この講座が後の建築基礎構造設計規準・同解説（1960年版）のA・7章「根切り工事」の原案になったといわれている。Terzaghi-Peckの側圧分布は、切梁反力の実測値を切梁の荷重負担面積で除した値で、かつ多数の実測値を包絡する分布形であったのに対し、Tschebotarioffの三角形の側圧分布は、矢板壁に直接作用する側圧に近いものであった。この両者の違いがその後の多くの側圧分布に関する議論と側圧の考え方に対する混乱を生じることになった。これら側圧分布の日本の地盤での適用性を検討する目的で、切梁軸力の実測結果に基づく間接的な測定と、山留め壁に設置した土圧計による直接的な測定の両面からの研究が行われている。切梁軸力の測定は、遠藤、古藤田ら（No. 35, 1959）による油圧式土圧計の開発と工事の安全施工を目的とした東急溜池ビル掘削工事（1958）への採用以後急速に普及し、多くの研究報告がなされるようになった。それらの結果から、砂地盤におけるPeckの台形分布は、おおむね妥当な値を与えること、粘土地盤においては、三角形分布は上段切梁において危険側の値を与える傾向があることが確認された（古藤田1962）³⁾。そしてTerzaghi-Peckは、これら日本での実測結果も含めてその後、1948年の自身の提案分布に修正を加えるとともに（1967）⁴⁾、1969）⁵⁾、その分布は実際の側圧分布でなく、見掛けの側圧分布であることを明記した。その分布形が建築学会基礎構造設計規準・同解説（1974年版、1988年版）に採用されている。また、玉置らは（1973. 5）、Terzaghi-Peckのデータにさらに我が国の切梁反力を中心にした総数66の実測データをもとにした分布形を提案している。

壁面に土圧計を取り付けて土圧を直接計測したのは、北川・市原・大津留による宇部港9 m重力式岸壁の土圧測定（1952）が初めてといわれている。掘削工事における壁面土圧計による計測は、営団地下鉄丸の内線新宿駅構内工事での横矢板背面の土圧測定が初めてであり（No. 34, 1959）、その後、鋼矢板（田中ほか1964）、鋼管矢板（山肩・八尾1967. 5, 6）、RC連続壁（金谷・宮崎1966）⁶⁾など山留め壁に直接作用する土圧・水圧を測

地盤工学50年の歩みと展望

定しようとする試みがなされている。山肩らは鋼管矢板の変位と土圧、背面地盤の間隙水圧、および切梁軸力など、総合的な計測を実施し、実測値は Tschebotarioff の三角形分布 ($K=0.5$) に近く、主働土圧、受働土圧ともランキンの土圧に近かったこと、そして Terzaghi-Peck の台形分布は適切ではないと結論している。1960年代後半からの連続壁の普及と土圧計設置方法の開発や改良により、山留め壁に作用する土圧・水圧の測定結果の報告例が多くなされるようになる。それに従い、山留め壁背面の側圧は、土圧の再配分の傾向は見られるものの、おおむね深さに従って増大する三角形分布に近いこと、掘削前の側圧から掘削の進行に従って減少する性状などが明らかにされていった。山留め壁に作用する土圧の大きさと分布形状に関する問題については、第5回ヨーロッパ会議での Bjerrum (ベーラム) らの研究現況報告 (1972)⁷⁾において詳細に論じられている。そのなかで、土圧の合力については、今日はほぼ明らかになったが、分布形状については、壁の変形形状や支点の緩みなど施工上の影響が大きく全く不明であるとしている。また、軟弱地盤の場合には、掘削深さだけでなく下部の硬質地盤までの深さが山留め壁の変形や切梁軸力の算定に重要であることを指摘している。つまり、山留め壁の応力・変位や切梁軸力は、山留め壁と切梁および根入れ部の地盤の抵抗も含めた、山留め壁と地盤との相互作用によって決まる値であることを示唆したものであった。

山留めの設計法としては、古くから山留め壁を切梁あるいは地盤中の仮想の支持点で支持される単純梁、あるいは連続梁として応力を求める方法が用いられてきた。山留めの応力・変位を山留め架構と地盤との相互作用として求める方法に関する提案は、1960年代後半からなされるようになった (Turabi 1968, Haliburton 1968)。山肩らは (1969. 9)、現在「弾塑性法」と呼ばれる掘削底面以下の抵抗土圧ならびに掘削に伴って切梁が上段より順次設置されてゆく施工過程を考慮した計算法を提案した。山肩らは計算の仮定として、矢板は無限長、切梁設置後の切梁支点は不動、下段切梁設置後の上段切梁の軸力は一定などを設けたが、中村らは (1972)⁸⁾さらに一般化して、切梁支点を弾性支承、山留め壁が有限長とする「拡張弾塑性法」と呼ばれる方法を提案した。また、古藤田・風間らは (1982)⁹⁾抵抗土圧に上限を設けずに地盤ばねに非線形性を取り入れた弾性法と呼ばれる方法を提案している。切梁のプレロード効果の評価法について、丸岡ら (1982)¹⁰⁾、古藤田・風間ら (1982)⁹⁾は、プレロードを弾性床の梁に作用する集中荷重として扱う方法を提案している。

1980年代以降は、これらの解析モデルが実際の工事に適用されてゆくに連れ、解析に用いる背面側の側圧や根入れ部に作用する側圧の評価が重要であることが認識され、実測データを基にした背面側に作用する側圧 (丸岡 1980. 3, 柳田 1981¹¹⁾, 金谷・宮崎 1984¹²⁾), 掘削面側に作用する側圧 (青木 1982¹³⁾, 1984¹⁴⁾), 三橋 1986¹⁵⁾), 田中 1994¹⁶⁾) に関する研究成果が多く報告さ

れるようになる。これらの研究成果として、最近では、弾塑性法による設計法では背面側の側圧にはランキン式やクーロン式による側圧、あるいは実測側圧に基づく三角形分布、掘削側の極限の受働抵抗は、ランキン式やクーロン式による側圧が一般的に用いられるようになってきている。

設計施工規準類では、日本建築学会「建築基礎構造設計規準・同解説」(1960)、首都高速道路公団「仮設構造物設計規準」(1971)から始まり、最近では、先端建設技術センター「大深度土留め設計・施工指針」(1994)など多くの規準類が発行されている。これら規準類で用いられている設計法の違いや弾塑性法(梁ばねモデル)と慣用法(単純梁法)の事例に基づいた計算結果の違いなどが「根切り・山留めの設計・施工に関するシンポジウム」発表論文集(地盤工学会, 1998年2月)の委員会報告I(設計法)にまとめられている。

4. 情報化施工

工事現場における観測や計測の重要性については、Terzaghi-Peck (1948, 1967) がその著書の中で“Observational Procedure”と表現して、地盤と関連する工事における有効な施工管理技術として明確に位置付けている。我が国においては、名鉄ビルでの地下掘削工事の安全管理に間隙水圧と土中土圧の測定が行われており、本誌 No. 3 (1953) において「この工事の意義は、…土圧や間隙水圧の測定が単なる研究対象としてでなく、完全に施工を進めるための必要欠くべからざる手段であることを認識したいと思う。」と述べられている。さらに、日本放送会館増築工事での地下掘削工事(村上 1954)においても、安全管理を目的にした測定が行われ、工事途中において当初の計画である三段切梁の支保工を、一部分斜め二段切梁の支保工に節約することが出来たことが報告されている。当時すでに、現在における情報化施工の目的としていることが認識され、実際の工事現場で実践されていたことが注目される。その後の掘削・山留めに関する現場計測の事例について1960年代の「土と基礎」を基に追ってみると、現場における土圧計測と安全管理を容易で信頼性の高いものにした油圧式土圧計の開発と、東急溜め池ビルでの安全施工のための木製切梁の軸力測定(遠藤ら 1958)、大阪市の世界長ビルでの切梁軸力、背面土の水平変位・沈下の測定(山肩ら 1964)、川崎製鉄水島製鉄所のスケールピットでの鋼管矢板に作用する土圧、水圧、切梁軸力、鋼管矢板の曲げひずみと変形、背面土の変形の測定(山肩ら 1964~1965)、RC連続地中壁面への油圧ジャッキ方式による計測の設置と土圧・水圧の初めての測定(金谷ら 1966)、シート方式によるRC連続壁への土圧・水圧の設置と測定(川崎ら 1969)などが報告されている。これら昭和30年代から40年代にかけての報告は、現場計測に適した測定法の開発や改良、ならびにそれらの結果に基づく山留め土圧問題の解明を主な目的にした内容となっている。上記のような現場計測は、現在の情報化施工に不可

欠の計測技術の基盤作りと、さらに山留らの弾塑性法の提案につながってゆく重要な役割を持っていたといえる。

昭和40年代後半～50年代にかけては、マイクロコンピュータ制御の測定器の登場とコンピュータ能力の向上により、従来人手で行っていた計測とその処理・図化の自動化と結果の積極的な利用に向けた研究が行われるようになっていった。青森電話局機械棟増築工事(1973～1977)では、電話回線を利用した「オンライン自動計測解析システム」¹⁷⁾の開発と適用がなされ、計測データの採取から処理までの自動化と、作業所だけでなく仙台、東京といった計測データの遠隔地への電送と大型コンピュータを利用した処理・解析など、工事関係者が一体となった工事管理が行われている。富永らは(1978)¹⁸⁾、現場の自動記録装置から紙テープに打ち出されたデータを大型コンピュータに入力し、山留めの変形・応力を解析し、土質パラメーターの推定と次段階以降の予測を行う解析システムを開発している。この設計に使う土質パラメーターの推定と次段階以降の予測方法がその後いくつか提案されている。大きくは二つの方法があり、計測結果と解析結果との差が最小になるような入力定数を逆解析し、そこで得られた定数を基に次段階以降を予測する方法(柳田ら 1982¹⁹⁾、丸岡ら 1984²⁰⁾)と、確率論的立場から入力値を推定・予測する方法(斎藤ら 1985²¹⁾)である。昭和60年代以降はこのような計測データの積極的な活用を目的にした情報化施工技術を掘削現場に適用して、工事の安全と合理化に効果を上げた事例の報告が多く見られるようになる。また、そこで得られた計測データと設計に用いる入力定数に関する検討が、山留め設計技術とその予測精度の向上にとって大きな貢献をしてきた。最近では、パソコンが普及し現場での自動計測処理、逆解析、予測解析さらにはネットワークによるデータの伝送などが可能となり、日常の施工管理技術として一般化されつつある。また、市街地における近接施工では、既設構造物の安全性を保証するための施工管理技術としての情報化施工の役割がより重要で、不可欠なものとなっている。

5. おわりに

地下掘削・山留め技術に関する50年の歩みについて振り返ってみると、その時々、社会的・経済的な背景や要請、技術的基盤および先人たちの必死の努力によって技術開発がなされ、また要請の変化や技術の進展に従って工法も移り変わってきたことが分かる。そのような観点から地下掘削・山留めに関する今後の技術的課題を考えると以下の項目が挙げられる。

- ① 廃液・掘削汚泥などの産業廃棄物や排土の減量化を目標にした施工技術と再利用技術
- ② 大規模な掘削工事や大深度地中構造物の増加による、難易度の高い競合工事や近接施工の増大に対応できる数値解析技術、対策・施工技術、情報化施工技術
- ③ 再開発工事、建替え工事における既設地下構造物の解体・再利用を伴う山留め技術

- ④ 建設におけるコスト削減要求に対応できる山留め工法の合理化技術、および砂の強度定数評価など調査技術の開発や情報化施工を利用した物性評価技術
- ⑤ 地下掘削工事の90%近くを占め、かつトラブルが多い地下1階程度以下の、浅い掘削工事における設計法や安全管理を主眼にした点検・計測技術

参考文献(本誌「土と基礎」以外の文献のみを示す)

- 1) Terzaghi, K. and Peck, R. B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, 1st Edition, John Wiley and Sons, 1948.
- 2) Tschebotarioff, G. P.: Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures, McGraw-Hill, Toronto, London, 1952.
- 3) 古藤田喜久雄:シルトおよび砂地盤中の切梁反力実測値と土圧合力, 日本建築学会論文報告集, 第76号, pp. 180, 1962.
- 4) Terzaghi, K. and Peck, R. B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd Edition, John Wiley and Sons, 1967.
- 5) Peck, R. B.: Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground, Proc. 7th Int. Con. SMFE, State of the Art Volume, pp. 225～290, 1969.
- 6) 金谷祐二・宮崎祐助・山口 功:剛壁にかかる土圧測定, 日本建築学会論文報告集, 号外, pp. 368, 1966.
- 7) Bjerrum, L. Frimann Clausen, C. J., Duncan, J. M.: Earth Pressures on Flexible Structures, A State of the Art Report, Proc. Vol. 2, 5th European Conf. SMFE, 1972.
- 8) 中村兵次・中澤 章:掘削工事における土留め壁応力解析, 土質工学会論文報告集, Vol. 12, No. 4, pp. 95～103, 1972.
- 9) 古藤田喜久雄・風間 了・沼上 清:切梁プレロードの効果を考慮した山留め壁の解析法(その1), 第17回土質工学研究発表会, pp. 901～904, 1982.
- 10) 丸岡正夫・幾田悠康・青木雅路:プレロードを伴う山留めの設計法, 第17回土質工学研究発表会, pp. 897～900, 1982.
- 11) 柳田眞司ほか:掘削土留め工の設計用側圧に関する研究, 第16回土質工学研究発表会, pp. 1445～1460, 1981.
- 12) 金谷祐二・宮崎祐助ほか:山留め設計用外力についての一考察, 大林組技術研究所報, No. 28, pp. 108～112, 1984.
- 13) 青木雅路・幾田悠康・丸岡正夫:山止めにおける受働抵抗の評価, 第17回土質工学研究発表会, pp. 869～872, 1982.
- 14) 青木雅路・幾田悠康・丸岡正夫:除荷に伴う実測静止側圧の性状, 第19回土質工学研究発表会, pp. 1347～1350, 1984.
- 15) 三橋晃司ほか:弾塑性法による土留め解析法に関する研究(その1:根入れ部の側圧), 第22回土質工学研究発表会, pp. 1263～1264, 1987.
- 16) Tanaka, H.: Behavior of Braced Excavation in Soft Clay and the Undraind Shear Strength for Passive Earth Pressure, 土質工学会論文報告集, Vol. 34, No. 1, pp. 53～64, 1994.
- 17) 三梨 彰:オンラインによる計測解析システム(AMETOS)について, 土木とコンピュータ, 山海堂, 1985. 6.
- 18) 富永真生ほか:RCCシステムの開発について(第3報), 第13回土質工学研究発表会, pp. 1181～1184, 1978.
- 19) 柳田眞司ほか:山留め壁の諸測定結果に基づく予測計算, 第17回土質工学研究発表会, pp. 773～776, 1982.
- 20) 丸岡正夫ほか:山留めの観測施工法に関する研究(その1), (その2), 第19回土質工学研究発表会, pp. 1097～1104, 1984.
- 21) 斎藤悦郎ほか:拡張カルマンフィルターによる山留め設計パラメータの推定(その1), (その2), 第20回土質工学研究発表会, pp. 1205～1208, 1985.

(原稿受理 1999.7.13)