

無音無振動基礎工法の現状と問題点

やま がた くに お
山 肩 邦 男*

1. ま え が き

無音無振動基礎工法という言葉は、まだ工学的に一般化した定義があるわけではない。したがって本説では、文献¹⁾において筆者らが定義しておいたように、“打撃によるクイ打ち工事や矢板打ち工事と比較して、騒音ならびに振動の程度が大幅に低減された工法”という程度に解釈して、論を進めたいと思う。

同工法は、昭和 43 年 12 月から施行された騒音規制法によって、従来からのクイ打ち工法が始めて規制をうけるようになり、急速に一般の関心が高まってきた感がある。しかし同工法の開発・発展の歴史はかなり古いものであり、特に昭和 30 年頃から、わが国の無音無振動工法の時代が開始されたといっていよい。本説では、この発展過程を顧みて現在の盛況に至った原因を考え、現存する諸工法の現状および問題点について概説し、あわせて今後の発展性とその方向について推論してみたい。

2. 工法の発展過程

基礎工事にともなう公害が社会問題となり、工法の無音無振動化を余儀なくされたという事例は、古く前世紀末にまでさかのぼるようである。R.B. Peck の調査²⁾によれば、シカゴ市内においては 1890 年頃から高層ビルの基礎用のクイ打ち工事が多くなり始めたが、この工事にともなう振動および土の移動が広がり基礎をもった隣接建物へ被害を及ぼし、しばしば訴訟問題をひきおこしたといわれる。この対策としてシカゴケーソン工法（掘削にともなってシースをはめてゆくピヤ工法）が 1894 年（明治 27 年）に開発されクイ基礎に代るものとして用いられたが、この工法の長所が認められて、その後次第に普及するようになったとのべられている。この事実、おそらく文献上に表われた基礎関係の公害問題の最も古い事例ではないかと思われる。しかしながら無音無振動諸工法全体としての海外における開発・発展の初期の過程についてはほとんど明らかでなく、わずかにケーソン工法が 19 世紀の中頃すでに発明されていたと伝えられているにすぎない。

一方、わが国における第 2 次世界大戦以前の無音無振

動工法としては、谷口尚武の調査³⁾によれば、次のようであったことがわかる。すなわち、明治 35 年（1902 年）にはニューマチックケーソン工法が土木工事に始めて導入されたが、その後約 30 年を経て昭和 4 年（1929 年）に井筒工法が、つづいて昭和 5 年に深礎工法が実工事に採用された。さらに昭和 7 年におけるニューマチックケーソンのウォールケーソンとしての建築工事への応用、昭和 9 年には竹中式オープンケーソンの誕生をみ、昭和 13 年の清水式クイ圧入工法の初登場へと順次続いて行なった。同じ谷口の引用³⁾によると、昭和 10 年の内藤多伸の一文に「都会地の建築では杭打ち、コンクリート打ち、リベット打ち等のそう音は最も嫌悪すべきもので、昔の景気のよい「建設の音」といって喜ばれた時代はすでに去って、須らく無音無振動でなければならぬ。都会地においては杭をうつというようなことは将来は取除かれ何れか他の方法で行なわれなければならぬ」とのべている。これらの資料から、第 2 次大戦以前にもすでに深礎・井筒・ケーソンなどの諸工法が、わが国の基礎工事の分野に登場していたこと、またクイ打ちや矢板打ちなどの騒音が、当時においても識者のヒンシュクを買い、公害問題として世にとり上げられるべき芽生えがあったことなどがわかる。

第 2 次世界大戦は、海外諸国の土木建設工事関係の技術に飛躍的な発展をもたらす結果となった。無音無振動工法関係に限っても、米国においてはウィリアムズディッガー工法、プレパクト CIP・MIP 工法、アースドリル工法などの技術が相ついで開発されたが、この開発の気運は戦後においてもベノト（仏）、イコス（伊）、KCC（伊）、プレパクト PIP（米）、HW（独）、リバーサーキュレーション（独）などの諸工法を誕生させてきた。これらの流れを一覧すると、無音無振動工法の新しい開発は米・仏・伊・独の諸国によるところが大きいことがわかる。海外におけるこれらの開発技術は、昭和 30 年頃からわが国に急速に導入され始め、それに刺激をうけた新しい工法も順次生み出されるようになった。これらの過程は、文献¹⁾にかかげた諸工法の経歴年数グラフを参照されたい。

わが国における無音無振動工法が、最近の十数年間においてこのように急速な伸長を示したことの原因として

* 京都工芸繊維大学 助教授・工博

論 説

は、次のような事項が考えられよう。

(1) 昭和30年頃から、わが国経済の飛躍的な発展が相つぎ、それにともなう未曾有の建設ブームがおとづれたこと。

(2) 都市における建物の規模が次第に大型化・重量化し、また掘削深度の増大も要求され出したこと。

(3) これらにともなう、基礎工事におけるクイ打ちや矢板打ちなどの騒音・振動公害、掘削工事における周辺地盤の沈下公害などが次第に社会問題化し、無音無振動工法への技術的要求が高まったこと。

(4) すでにのべたように、海外からの新技術の導入や開発によって、基礎工事関係の関連技術が急速に伸び、建設工事の機械化が促進されたこと。

(5) 土質工学の急速な進歩が、工法開発の工学的裏付けとして役立ったこと。

これらの諸原因が互に影響しあって、今日までのわが国における無音無振動工法の開花期ともいべき時代が展開してきたとみることができる。

3. 工法の現状と問題点

現在わが国で実用に供されている各種の無音無振動工法は、次のように分類することができよう。

3.1 既製グイ工法, 3.2 ピヤ工法

3.3 ピヤ柱列土留め壁工法

3.4 既製グイ列土留め壁工法

3.5 連続土留め壁工法, 3.6 ウェル・ケーソン工法

以下、これらの分類順に、工法の現状とそれらが内蔵する問題点について概説する。

3.1 既製グイ工法

既製グイを主として掘削・圧入などによって沈設する工法である。沈設法としては、プレボーリング方式・中掘り方式・ジェット方式・圧入方式などがあり、また打止め法としては、ハンマー打ちを行なうもの、先端にコンクリート打ちまたはモルタル注入を行なうものその他がある。この工法は、PCグイを中心として、主として昭和36年頃から開発されてきたわが国独自のものであって、現在PCグイおよびRCグイ関係の工法件数は20数件に及んでいる。詳しくは文献^{1), 4), 5)}を参照されたい。これらのほか無騒音性を強調したバイブロハンマーによる沈設工法もある⁵⁾。一方鋼グイに関しては、無音無振動化は立ちおくれの感がつよい。ピヤ工法の一部であるソイルセメント柱の芯材として鋼管やH型鋼グイをそう入する形式のもの、閉端鋼管グイの内部空間を利用してハンマーによる底打ちを行ない騒音の低減をはかったものなどが実用化されている程度である。

掘削による既製グイの沈設は、工法によって多少の差違はあるが、周囲地盤および先端地盤をゆるめる傾向が

あり、打込みグイと比較するとクイの沈下剛性および許容支持力を低下させることは否めない。打止め時にハンマー打ちを行なうことは、このような先端地盤のゆるみを再び締め固める効果があり、かつ打止め沈下量を計測することによって施工管理ができるなどの長所がある。せっきくの無音無振動性を自ら破る結果ともなっているが、ピヤ工法の問題点および施工管理が難しいことなどと対比して考えると、実用的にはやむをえない処置であると思う。

問題点としては、まずハンマーによる打止めを行わず先端部へのコンクリート打ちまたはモルタル注入を行なう場合、載荷試験による以外、先端処理効果の確認がむずかしく、施工管理上の難点となっていることがあげられる。特に大径グイの場合、クイ重量に比較してハンマー重量が過小気味であるため、これら先端処理の必要性が増しているが、ピヤの場合と同様にスライム除去の問題などもからんでくるので、さらに基礎的な実験や調査の必要がある。またハンマー打ちによる打止めを行なう場合についても、従来からのクイ打ち公式をそのまま適用できるかどうか定量的な問題が生じており、載荷試験結果との比較検討資料の蓄積が望まれている。

3.2 ピヤ工法

地盤を掘削し、場所打ちコンクリートによって設ける柱状地業の工法であり、掘削・排土・孔面の安定・コンクリート打ちの各工程にわたって、各種の方法が考えられている。わが国では、深礎工法や清水式クイ圧入工法などが戦前から先駆的役割りを果してきたが、戦後昭和30年頃からアースドリル、ベノト、プレパクトCIP・MIP・PIP、リバーササーキュレーション工法その他が相継いで導入され、またわが国での開発をも刺激してきた。現存する工法は約20件であり、連続土留め壁工法と共に無音無振動工法の主流工法としての立場を確保している。この工法は、単独の基礎地業として使用されるばかりでなく、逆打ち工法においては上部架構の支持台柱となり、また一線上に並べることによってピヤ柱列土留め壁を構成するなど、より総合的な地下工法が開発される動機ともなってきた役割りが大きい、この工法の詳細については、文献¹⁾を参照されたい。

ピヤ工法は、内蔵する問題点が数多い¹⁾、クイ打ち工法が地盤を締め固める効果があるのに対して、ピヤ工法は地盤をゆるめる作用があり、支持力的には好ましいとはいえない。とくに先端支持力に大きく影響するものとしては、土カブリ圧の除去および掘削時のカク乱による先端地盤のゆるみ、スライムの沈積、ボイリング現象、掘削器の引上げ時のサクシオンなどがある。これら影響因子の一部はどうしても避けられないものであって、載荷試験の結果に関する統計的検討でも、荷重～沈下量

曲線の剛性がクイに比べて小さく、かつ許容支持力も Meyerhof 式の計算値の約 1/2 という結果がでている。

しかしながら、これら問題点の実態については各種調査資料が蓄積されてきており、泥水管理法やスライム対策なども考慮されて、かなり改善されてきたといえる。施工のやり方によって影響されるところが大きい工法であるから、当事者としては各工法のおち入りやすい施工上の欠点をよく認識して、それぞれに適した対策および入念な施工管理を行なうことが必要である。

3.3 ピヤ柱列土留め壁工法

ピヤを一線上に連続的に使用して設ける場所打ち土留め壁の工法であって、約 10 件の種類がある¹⁾。大径のものではベノトピヤ柱列・アースドリルピヤ柱列などがあり、また簡易なものとしてはモルタル置換あるいはソイルモルタルによる柱列工法まであって、この工法の適用範囲は比較的幅広い。いずれもコンクリートの硬化時間を勘案して、ピヤの掘削やコンクリート打ちの順序などに工夫をこらしている。大径のものは剛性が大きく曲げ抵抗も大であって、従来の鋼矢板壁に比して、掘削周辺の沈下公害の防止や安全作業の面で有効である。

問題点としては、ピヤ工法に関するものがそのままではまるほか、壁面に沿った水平方向の強度上の連続性に欠けること、止水性も連続土留め壁工法に比して劣ることなどがあげられる。これらのため、耐震壁や地下壁の一部としての利用がむずかしく仮設壁としての工法にとどまっており、施工時間や手間がかかることなどもあって、大規模な土留め壁工法としての主力は連続土留め壁工法に移りつつあるのが現状であるといえよう。

3.4 既製ゲイ列土留め壁工法

既製ゲイ工法を一線上に連続使用した土留め壁工法であって、昭和 43 年頃から自立護岸壁や建築用土留め壁として実用化され出した新しい工法である。文献⁹⁾を参照されたい。とくに建築土留め壁用としての工法は、連続オーガーによって設けたソイルセメント液柱（ベントナイト含有）内に PC ゲイまたは RC ゲイを挿入する方法をとっており、施工能率が高いこと、工費が安いこと、遮水性も比較的よいことなどから、中程度までの掘削深度に対する土留め壁として、現在急速に工法数が増えつつある工法である。材料強度の信頼性が場所打ちコンクリートよりも高いこと、剛性が鋼矢板に比して大きいことなども長所と考えられる。

問題点としては、ピヤ柱列土留め壁工法の場合と同じく、壁面に沿った水平方向の強度上の連続性が弱いこと、仮設壁としての工法であって地下壁としては利用しにくいこと、連続オーガーによる工法のため地盤によって適用性が限定され、とくに地中障害物に対して不適であることなどが考えられる。

3.5 連続土留め壁工法

板状の掘削孔を連続させ、場所打ちコンクリートによって設ける土留め壁の工法であり、イタリアおよびフランスにおいて開発されたものが多い。これらの国ではすでに 15~20 年の施工経歴があるが、わが国に始めて導入されたのはイコス工法の昭和 34 年であり、これを契機として海外諸工法の導入およびわが国での開発が促進された。現在約 10 件と考えられる。詳しくは文献^{11), 12)}ほかを参照されたい。

板状のエレメントを並べるため、壁面にそった水平方向の強度上の連続性および止水性が他の工法より優れていること、曲げ剛性および曲げ強度が従来の鋼矢板壁に比していちじるしく大きく、掘削工事にともなう周辺地盤の沈下障害が防止しやすいこと、地下構造体との結合やエレメント相互間の結合を考慮して、仮設壁としてのみならず地下壁本体として利用し、また耐震壁の役目をも持たせうることなどの長所があり、請負会社の研究所を中心とした開発研究が盛んに行なわれてきた。かくして、現在の大規模地下工事における土留め壁の主流工法としての位置を確保するに至った。

問題点としては、まずエレメントの継手部にマッドが混入して止水上や強度上の弱点となりやすいことがあげられる。この継手部からの漏水にともなう土砂の流出によって、周囲地盤の沈下や隣接建物の不同沈下を招いた例がいくつかある。また地下壁としての利用面からは、壁の鉛直性および平面性の高いことが要求される。したがって実施施工面での管理に十分注意すると共に、掘削工事中に接手部の漏水を発見した場合の迅速な処置が必要である。なお連続土留め壁にかかる土圧の実測結果では、主働土圧よりは静止土圧に近い大きな値を示している。壁としての横変位およびタワミが少ないためと思われるが、設計土圧の採用にあたって考慮が必要である。

3.6 ウェル・ケーソン工法

工法としての歴史は古く、わが国での施工実績は約 40 年とみることができる。橋脚や橋台としてのウェルのほか、ウォールケーソンや大型のオープンケーソンとして数多く用いられており、他の工法と比較して一応完成した工法とみてよい。問題点としては、一たんウェルやケーソンが傾斜すると垂直性の修正がむずかしいこと、深くなると自重のみでは沈下しにくくなり、沈下促進法を考慮する必要のあること、大型ケーソンでは軟弱地盤において周辺部の粘性土が掘削底へ回りこみ、周辺地盤に沈下障害を起こす可能性のあること、人力掘削による場合、潜函病（ニューマチックケーソンの場合）や、地層によっては酸素欠乏症や悪性ガス中毒をおこす恐れのあることなどがあげられる。

論 説

4. 無音無振動工法がもたらした意義と今後の発展性

最後に、これらの無音無振動工法がわが国の基礎工事部門にもたらした意義と、同工法の今後の発展の方向について述べてみたい。

4.1 わが国の地盤条件への適応化の過程

昭和 30 年頃からの諸工法の導入過程は、必ずしも順調ではなかった。諸機械の取扱いの不なれもあったであろうが、諸開発国の大陸的な地盤条件のもとに開発された工法が、わが国の諸都市における地盤条件（厚いチュウ積粘性土層、高い地下水位など）にそのまま適応するとは限らなかった。ピヤ工法に限っても、先端地盤のボーリング、スライムの沈積、掘削具の引上げにともなうサクションなどの諸現象が現実の問題となったのは、やっと昭和 40 年に近い頃になってからであった。その後問題点の諸対策も順次検討され、わが国での施工実績が次第に蓄積されてくるにつれて、わが国の地盤に適合した独自の工法も開発されるに至ったのである。今後はこれらの過程を踏み台とした一層の発展が期待できよう。

4.2 基礎工法の総合的な発展への貢献

無音無振動工法は、単に字義のみの素朴な手段であっただけでなく、従来建設産業の中で最も立おくれていた基礎工事を合理化し、より高度の総合化された工事形態に移行する契機ともなった。具体例としては、ピヤ工法を組合せてより大型のピヤ基礎とする方法、ピヤ基礎と各種土留め壁を併用して、地下工事と地上工事を同時に行なう逆打ち工法、土留め壁を地下構造体に組入れて耐震壁や地下壁として利用する方法などをあげることができる。またこれらの総合された技術によって、地表面下数 10m の洪積層上にベタ基礎を設置するような深い掘削工事や、敷地一杯の地下室工事が行なえるようになったことなど、地下工事の技術的な幅を広げてきた。

4.3 基礎地業の大径化の傾向

基礎地業の今後の傾向の一つとして、大型化の傾向をあげられよう。ピヤ工法については、すでに径 3 m に及ぶピヤ基礎造成の試験工事が企画されたことがあるし、また最近では径 1.5 m のベノトピヤの先端を径 3 m まで拡張する試験施工が行なわれて、成功を収めた。これら大径化の目的は、一柱一ピヤ方式を目ざしたもので工法の合理化、工費の削減や工期の短縮をねらったものである。一方既製グイ工法についても、径 1.2m 程度に及ぶ大径 PC パイルの沈設工事が行なわれており、従来のウエルとの間を次第に縮めつつある。

このような基礎地業の大径化は、上部構造の不同沈下にとっては、決して好ましいことではない。ピヤ工法や既製グイ工法による地業は、すでに述べたように打込み

グイに比して沈下剛性や許容支持力が低く、かつそれらの程度が施工によって大きく変動する。したがって地業が大径化して本数が少なくなるほど、各地業の施工精度がそのまま上部構造の不同沈下に結びつくからである。この対策としては、上部構造の地中バリなどの剛性を大きくし、不同沈下を抑制するような考慮が必要となる。

4.4 施工管理方法の開発

施工管理の方法に関する研究としては、すでに泥水管理面での判定法の研究、超音波による掘削孔の径や厚さなどの測定法、各種のスライム処理法、ピヤを貫通して埋込んだパイプを通じての先端地盤相対密度の測定、廃泥水の処理法に関するいくつかの研究などがみられ、すでに実用化されているものも多い。このような新しい施工管理法開発への方向は、施工の精度を高め工法の信頼性を増大させるものであって、大いに期待したいと思う。将来、管理資料を検討するだけで、ピヤ工法や既製グイ工法による地業の支持力なども判定できるようになってほしいものである。

4.5 自動化・無人化への傾向

産業界は、いまひとしく無人化や省力化を目ざしている時代であるが、基礎工法の分野でもこのような傾向を示唆するような試みが表われてきた。1つは建設省の依頼によって行なわれた無人潜函掘削機の試作品の完成であり、他はベノトピヤにおける拡張掘削機の自動化である。前者は、ニューマチックケーソン内での掘削・排土・圧気の工程を完全に無人化し、テレビカメラによって掘削状況を管理できる構造となっており、近く試験工事が行なわれるという。昨年のお阪木津川における人身事故の例もあり、正に画期的な試みと注目される。後者は簡単な機構によってむずかしい拡張掘削の工程を自動化した点に新らしさが目立った。基礎工事の分野は技術者の判断にたよらねばならない面が多く、自動化・無人化はむずかしいであろうが、危険な工事における人権の尊重、施工精度の向上、人件費の節減といった観点からみて、興味ある課題となるのではないと思われる。

参 考 文 献

- 1) 無音無振動基礎工法研究会：無音無振動基礎工法，鹿島出版会 昭44.5
- 2) R.B. Peck : History of Building Foundations in Chicago, Univ. of Illinois Jan. 1948
- 3) 日本建築協会：建築基礎工法とその実例（近刊予定）
- 4) 山肩邦男：PC ぐいの無音無振動工法の現状と問題，コンストラクション Vol. 6, No. 8 1968.8
- 5) コンクリートポールパイル協会：遠心力コンクリートぐい無騒音工法，山海堂 昭45.2
- 6) 山肩邦男：最近の土留め工法とその問題点，土質工学会関西支部「都市地下工事の進歩と問題点」講習会テキスト，昭46.1
- 7) 山肩邦男：地下連続壁工法の計画と施工（工法の種類），施工技術 第1巻7号 昭43.12

（原稿受付，1971.1.11）