

摩擦杭は地震被害も少ない—摩擦杭の復活(その6)—

(一社)基礎構造研究会代表理事 杉村義広

いしずえ通信96号では「節杭の原点を探る」という題で摩擦杭の代表とも言える節杭について触れたが、その特許〔特許武智式基礎工に就て、S12.8〕の中では、ある権威者が注目してくれているとの記述がある。帝国大学地震研究所長の石本巳四雄博士が行った講演がそれであるが、その部分を抽出して右に引用してみる。

二十五「武智式基礎工に対するその道の権威者の意見」と題しており、最初に工法の説明として〈節をつけたコンクリート杭の周囲を砂利で包むようにして打ち込むこと〉が特徴として指摘されている。その効果は、静力学的には砂利粒子間の摩擦が生じて沈下が阻止されるが〔地下水位以深では間隙水圧が逸散することで生じる地盤の摩擦角の増大が熟知されているようである〕、動力的にも特長があることが地震時に現れるというのである。この種の杭で支持された建物が地震時に大きな振動を繰り返し受けると、この砂利粒子間の摩擦効果が振動を減衰させることに繋がって、建物は大きく共鳴することはないだろうというのである。その根拠は、1) 砂利の最外縁が杭径と見なせることによる支持力の増大、2) 砂利中の間隙水逸散による圧密作用の結果としての摩擦角増大の2点によるが、以下続く文章は余り長くはないので全文を以下に挙げる。

一、昭和十二年五月十四日鐵道博物館に於て開催されたる、地質工學第一回講演會にて、東京帝國大學地震研究所長理學博士石本巳四雄氏の、「地震動の加速度」なる題目でなされた講演中の一節にて、吾武智式基礎工に關するもの左の如し。
例へば此頃よく見る基礎工事で、コンクリート杭にツバのあるもので、其の周圍に砂利を入れて、間接に土地と接して居るものがあります。此れは静力的に見れば、砂利粒の間の摩擦によつて、沈下は阻止されますが、動力的に見ると、又特長がある様であります。
即ち杭の上に建てられた建築物の振動は、以上の砂利層を隔て、地面と接觸して居りますから、大地震の場合で、比較的大きな振幅の振動が來れば、砂利粒間の迂り摩擦が働いて、其の振動は減衰するであります。又建築物の振動も、砂利粒間で勢力が消滅するため、建築物の振動も、共鳴性の大きな振幅に達しないと思はれるのであります。

二十五、武智式基礎工に對する斯道の権威者の意見

二、武智杭の支持力の研究

武智杭の特長は杭中に突縁を有し、之を砂利と共に打ち込む事に在つて、其の爲に杭径は杭周に在る砂利の最外縁を以て表し得る。即ち他の杭に比して支持力を増大せしむる一原因なり。更に地盤の性狀の點より見るに、打込回數の多きこと及砂利を併用する結果、地盤を動揺せしめ間隙水を砂利塊中に析出して壓密固結作用を促し、地盤の比重、摩擦角の増加等物理的力學的性質を著しく改善せらる。

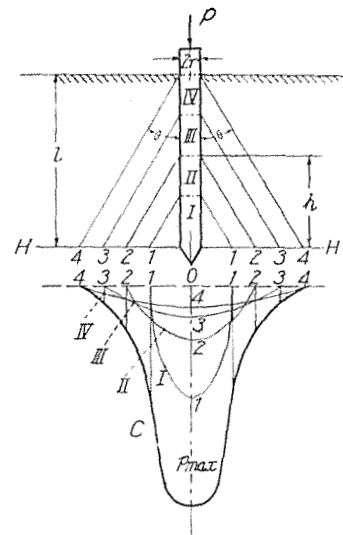
最近の研究に依れば、杭荷重は杭軸と摩擦角 θ なる分布角を爲して杭端水平面に分布し、最大壓力強度 P_{max} は

$$P_{max} = \frac{P}{\pi} \frac{1}{r(r + l \tan \theta)}$$

にて示さる。

- 茲に P=杭荷重
- r=杭半径
- l=杭長
- θ =地盤の摩擦角

なりとす。



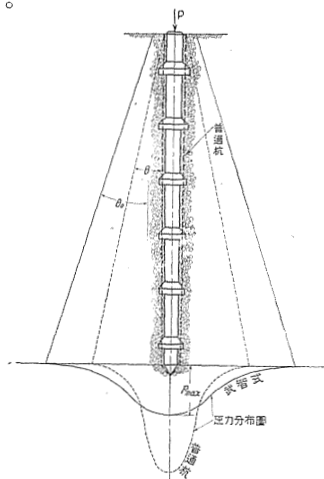
第一圖

圧力分布は圖の如く鐘状を呈する。
 武智杭は他の同長同体積の杭に比して r 及 θ を増大すること甚しきを以て、圧力分布は杭端水平面に廣く擴散し、従つて最大壓力強度は普通杭の僅に數分之一である。之が載荷試験に於て他の杭にては早く限界荷重に達し、武智杭にては容易に沈下を生ぜざる原因とせらる。

又杭の限界支持力は土の單位重量を w とすれば

$$P = \frac{\pi w}{2} r(r + t \tan \theta) t m^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} \right)$$

にて與へらる θ を以て、杭徑 r 摩擦角 θ の増加は急激に支持力の増加すべき所以を知るを得べし。



第二圖

圧力分布は第一図に示すようなものとなるとされる。一般的には、杭頭の力 P が杭体の各部分IV、III、II、Iの軸力となつて側面から周囲地盤に伝わり、杭先端位置の水平面では杭中心位置で最大の P_{max} から周囲に減少する鐘状になるのが普通である。しかし、武智杭は杭頭に近いIVやIIIの部分の周面摩擦力も大きいので圧力分布を広げるとともに平坦化させる傾向があり、 P_{max} はより小さくなり線分 4-4-4

で示される分布になる。杭面がストレートな普通杭と武智杭とを比較すると、第二図のように武智杭の方が地盤の摩擦角 θ が大きくなることで圧力円も大きなものとなり、圧力分布の P_{max} がより小さい平坦な形状になっていることが明確である。これは、杭間隔を普通杭よりも大き目にとっても群杭効果が期待できることを示しているので不同沈下対策として有効である。通常、摩擦杭の場合には沢山の杭を配置して全体として箱状の一樣沈下となることを期待した設計とする試みが多いが、節杭はその目的に最適であることになる。

武智杭の特許では、以上の性質が地震時でも有効に発揮されることが述べられている。例えば[「二十二、長杭による基礎工の欠陥」として以下のような記述がみられる（以下、仮名遣いや旧漢字など可能な限りで用いて時代を感じさせるように抜き書きしてみる）。

「地盤軟弱にして相當の深處に非ざれば硬盤を得る能はざる場合、従来一般に最も安全なりとして実施せられたる基礎工法は、長杭を用ひて其硬盤に達せしめ、以て上部の建造物を支持せしめたるものなり。然るに先年の関東大震災の際に於ける各種建造物の被害程度調査の結果より見るに、その統計に於て、前述の基礎工法により長杭を用ひたる建造物の被害が、短杭を用ひたるものに比し却つて甚大なりしもの極めて多き事実を知る。…」

ここで長杭とは深い支持層まで打ち込まれた支持杭を指しており、次に地震時の状況説明が続くのであるが、要旨だけ示すと、〈長杭で支持されている建物では地震動を繰り返し受けているうちに、上向き動で突き上げられ、次に来る上向き動の際には杭と激突するので、杭は大きく圧縮される〉というのである。そして以下の文章に続く。「之を要するに、長杭を用ひ、其下端が硬盤に達し、上部に来る建造物の荷重大なる時は、其被害著しく破壊的となるものなり。/之に反し、短杭を用ひたる時は上部の建造物の荷重大なるも、其被害の程度僅少なるは上述の理由により疑なき所なり（「上述の理由」とは、冒頭の統計結果で長杭の被害が甚大であつた事実を指している）。/之を以て震災時に於ける被害を極度に軽減せしめんと欲せば、其基礎を弾褥性〔だんじょくせい：今日の言葉では元に戻る「弾性」の性質と、クッションのような柔らかさを併せ持つ特性と解釈できる〕ならしむることを絶対条件とせざるべからず。而して一般に建造物として其の平時に於ける安全を期するは左程困難ならざるも、地震国たる我国に於てはその設計に當り、震災時にありても尚且つ被害を可及的に僅少ならしむる事を特に緊要なる条件とするを要す。/武智式基礎工は前述の理に適ひ其強大なる弾褥作用により地震に起因する被害をして極めて僅少ならしむることを得べき合理的基礎工法なりと謂ふべし」と結ばれている。

時代を感じる表現であるが、主旨は読み取れるであろう。注目すべきは、その後「備考 眞島博士著「地震

と建築物の被害」参照」と付け加えられている点であり、眞島健三郎と言えは剛柔論争の「柔」の提唱者として有名であるので、どのようなことを言っているのか興味が湧くので調べてみたが、その結果は後述する。

この特許では「二十三、地盤自体の沈下に就て」として以下のような記述もみられる。「地層の収縮其他の原因に依り地盤が沈下する場合に、其上に建設されたる建造物が、其基礎と共に、一体に沈下するは、不可抗力の事に属す。之を避くる為に、長杭を用ひ、深處の硬盤に達する施工法（コンポジットパイル採用）を可とするも天然地盤が沈下する時は、其基礎工異状なきも、上部の建造物のみが地上に突出するの觀を現し、其本來の使用目的を不便ならしむる實例枚挙にあらず、其著しき實例を列挙すれば左の如し〔縦書きなので「左」となる。富国徴兵ビル 30cm 以下8例が挙げられているが、表示は省略する〕。/而して上記の場合、地盤の沈下につれ、基礎床盤は地盤と分離し、単に杭を支持さるゝのみとなる處あり、最も寒心事〔「關心時」の誤字ではないかと思われる〕に属す、之を以て建造物が地盤と一体となりて沈下することは、寧ろ待望する處にして、恰も彼の海上に浮べる大鑑の如く、地震等の大激動に対しても、安全を保持し得る處にして、本式の極めて有数なる特徴の事實に留意せざるべからず。」

摩擦杭基礎の特長として〈船のように浮かぶ〉こと、すなわち地盤とともに沈下する点は筆者も従来重要事項と考えていたことであるので、いつかその点を主題にして書くつもりである。ここでは、関東地震（1923）で節杭の被害が少なかったことは豊島光夫の著書〔にっぽん建築技術異聞、日刊建設工業新聞社、2024.3〕でも書かれている興味深い文章を発見したので、それについて触れてみよう。同書の 222 ページ「摩擦杭の元祖」の中にある以下のような文章がそれである。

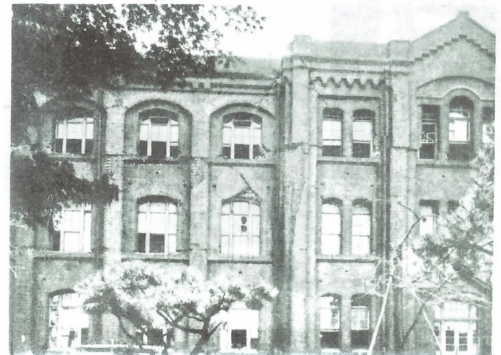
「…当時として太くて長い輸入材の米松を深い堅い層まで打ち込んだビルと、それこそ短い摩擦杭で支えるビルとでは、果たしてどちらが地震に強いのか？ そんな耐震評価論がおこるが、摩擦杭有利とする説がでてきた。関東大地震の前年の大正十一年四月二十六日にちょっとした地震が発生完成間もない丸ビルや工事中の郵船ビル、いずれも杭は長い。そんなビルに被害が目立ち、かなり補強した。それも東の間、翌年の九月には関東大地震が襲来し多くの建物が壊れた。中でも、長尺杭を打つ東京会館は鉄骨柱が十五センチ以上も捻^{ねじ}れてしまうほどだった。それに比べ摩擦杭にのる建物は多少地中に沈んでも、決定的な被害は見受けられないという事実が明らかになった。ビヤ樽みたいなコンプレッソル・パイルとか、数メートル前後の松杭を打った建物などがそれである。/なぜか、震災予防調査会の報告第百号（丙）の弁を借りるとこうなる〔この文献（丙）について筆者は昔調べた経験があるが、調査抜けがあったか、このことについては見落としていたらしく残念である〕。/堅固な地盤まで杭を打った場合、杭の上部は建物と一緒に振動する。つまり、上下振動をおこした杭が建物を急激に突き上げるから被害は大きくなるという。/武智は、この摩擦杭優位説で自信を深めたのは言うまでもない。さらに昭和十五年、今度は、地震学者が武智杭の効能を鳴り物入りで持ち上げてくれた。その学者とは、東京帝国大学地震研究所長石本巳代治先生。彼は、同年五月十四日、万世橋にある鉄道博物館で催された土質学会主催の講演会で次のように述べている。/「…例えば、この頃よく見る基礎工事で、コンクリート杭にツバのあるもので、その周囲に砂利を入れて、間接に土地と接しているものがあります。（注・武智杭を指す）これは、静力学的に見れば砂利粒の間の摩擦によって沈下は阻止されますが、動力的に見ると、また、特徴があるようであります。/即ち、杭の上に建てられた建築物の振動は、以上の砂利層を隔てて地面と接しておりますから、大地震の場合で比較的大きな振幅の振動がくれば砂利粒の間の摩擦が働いてその振動は減衰するのであります。また、建築物の振動も砂利粒間で勢力が消滅するため、共鳴性の大きな振幅に達しないと思われまふ…」/武智杭には免震性が備わっていることをこう強調する。…」

これは前述して来たことと全く同じである。昭和十五年土質学会主催とは土木学会のことかとの疑問が生じるが、深くは詮索せず前記した眞島の文献の方に移りたい。早大理工学研究所の内藤記念館に長く滞在していた山田眞博士が内藤多仲先生の文献類や資料類を整理し、一部は複製本として作成したものもあるが、たまたま筆者にも送ってくれた中に「眞島健三郎：地震と建築、丸善、昭和5年6月」というものがあつた。見開きに「贈呈内藤博士 著者」と記入されているので、当時建築構造の権威となつていた内藤先生に眞島が贈呈したものと推察される。そこにはJ. Naito, June 10th-1930 のサインも入つており、内藤先生がこの書をかなり大切にしていたことが推察できる。題名が武智の特許に書かれているものとは少し違ふが“これに違ひない”と直感したので、この書を調べてみることにした。

内容は耐震構造論が述べられた後に、「第六章 建物震害の考察と耐震構造」があり、木造から始まつて各種構造ごとに述べられているが、剛構造を嫌う典型例〔第三節 壁體建築〕、「第四節 鐵筋混凝土〔コンクリート〕架構建築」と、柔構造を推奨する典型例〔第五節 鐵骨建築〕からそれぞれ該当する部分を少し抜き書きしてみる。

第三節 壁體建築：「煉瓦造や石造壁は頗る剛で、自體の変形能力に乏しく、地動のまにまに全体一様に動かざれば止まざらんとする。随つて其受くる震力は愈々強大で、終には一部の破壊を生ぜざれば、平衡を得がたい性質のものである。されば其被害は最も普遍的で、地震国に此種構造の不適當なるは、つくづく實驗されたのである。然れど幾多優秀なる例外もある、一般に下町地盤の悪い所に建つて居る煉瓦造は成績がよい。例へば司法省や海軍省、警視廳、農商務省、逓信省、馬場先門一帶の事務所建築、赤十字社本社、芝の專賣局工場、各停車場、其他三階位の土藏風の目星しいもので、満足なものが多かつた。然るに地盤の好い山の手方面に於ては、慶應義塾の大講堂や圖書館、麻布の兵營、淀橋の專賣局（写真第五）、士官学校、九段の遊就館、東大の講堂、上野の博物館、其他銀行會社の支店等、人目を惹くものは大概大きな被害があつた様である。下町とは全く反對の結果を呈して居る。…」

第五 東京專賣局淀橋工場



第四節 鐵筋混凝土架構建築：「此種の構造は、煉瓦や石材の壁體建築に、較べると少々撓性を持つて居るが、本來抗張力を無視するを至當とせる脆弱なる混凝土を以て、而も其百分の一にも足らぬ、點在せる鐵筋を包被連續して、柱や梁を構成するものであるから、混凝土は腹材〔ふくざい〕の用もなせば、綴鉄〔とじびょう〕の用も兼ねるものである。而〔しかし〕て兩者の共同作業を助くるものは、主として相互間の膠着力に過ぎないのである。其力は當初から混凝土の配合やら、出來不出來やら、寒暑乾濕で思はぬ大きな不同があるのみならず、力を受けても鐵と全く同じ様に伸びたり縮んだりすることは出來ない、引切れる所も出れば、千割れも出る、筋が伸過ぎると Poisson の比で肌離れもする、銹〔さび〕が喰入つて膨れ出す所もある、常に一定の膠着力を確保するは已〔すで〕に大きな疑問である、況や大きな地震で左右前後に振られる場合、兩者が何時迄も完全に膠付〔ねばりつ〕いて居ると保證が出來ようか。鐵筋混凝土は桁として、又柱として、可なり大きな、且つ數多い試驗もされてあるが、未だ地震に似た様な試驗をやつた例ば〔は〕聞かないのである。之を耐震建築の材料として推奨する學者技術家は少くも先づ之を充分實驗に證すべきであらうと思ふ、又適切とは思はれぬ二三の實驗から直〔ただち〕に廣い範圍の推定を下すが如きは甚だ不謹慎と云はなければならぬ。…」

これらは、さすが柔構造の提唱者眞島の言であると思わせる文章であつて、煉瓦造、石造だけでなく鉄筋

コンクリート造までを含めて剛構造を批判していることがよく理解できる。ただ、煉瓦造の被害程度は地盤の好い山の手で大きいものに対して、下町の軟弱地盤では意外に小さいことに言及しているのは、建物の被害が地盤条件との関係に深く関わっていることに気づいているという点で高く評価される。

第五節 鐵骨建築：「この種構造で硬い壁のついた高い事務所建築から、工場倉庫に至る迄、致命的な負傷を受けたものは一軒もないと云ふてよい。被害の大部分は壁體で、架構本體の受けたものは筋違ひとか持ち送り等の傷んだ位が大きな負傷である。地震の大きかった、平塚、横須賀、横濱方面に於てさへも同様の結果である。東京會館の如き二階の壁は丸で落ちてしまひ、貧弱に見える鐵柱は悉く數吋〔インチ〕曲つたのであるが、尚三階以上を支へ得て倒壊を免れたのである。若し之が鐵筋混凝土柱でもあつたら、日本電氣と同一運命に歸着するの外なかつたのである。丸ビルの負傷も壁と筋違ひである、主たる鐵骨にも地業にも大きな異状は認められない…」

この最後の〈地業にも大きな異状は認められない〉の記述で、眞島は基礎も含めて柔構造がよいとの提唱者であることが明確に現れている。さらに念を押すような以下の記述もある。

「…此種構造〔鐵骨造を指して言っている〕にも無事な例が多くある、場所に依つては震力の相違もあらう、剛に見へて柔なものもあらう、地盤が硬からず又軟からず緩衝的なものもあつたらうと思ふが、大體大きな長い地業杭など使つてないものが良かったのは、一寸不思議の感がある。例へば郵船や丸ビル、有樂ビルは五十尺木杭、東京會館は五十尺 Pedestal Pile で何れも被害が多かつた〔50 尺と言えば約 15m であるので、今日的にいえばそれほど長いとは言えないが、当時としては長い杭と認識されていたことに注意する必要がある〕、然るに近邊の海上ビルは淺い Compressol 基礎で始めから沈下もあつたにかゝらず震害は割合に輕かつた、第一相互生命は約二十尺木杭、千代田生命は十二尺木杭、構造は違ふが住友倉庫は十尺木杭〔今日的には 20 尺=6m、12 尺=3.6m、10 尺=3m であるから短い〕、愛国生命は Compressol 地業、と云ふ短いもので何れも無事であつた。更に前節に掲げた實業の日本社、鐵道協會、商工獎勵館、日本製麻、三菱仲通りの二號、十五號館の如き割栗鐵筋混凝土と云ふ淺い地業のものも皆無事であつた。…/特に七階の有樂ビルは五十尺〔≒15m〕の杭を打ち、隣の鐵道協會は四階であるが割栗混凝土地業と云ふ極端の相違である、之等を對照し尚先の山の手と下町被害の相違を考へると、下底地盤の緩衝作用を認めざるを得ん様である。純理論から云ふも建物の下底は柔なる構造を必要とするのである。…」

この文章を読むと、眞島は耐震問題において上部構造だけではなく、基礎も含めて柔構造の合理性を意識していたことが推察される。軟弱地盤という条件にある場合、深部にならないと支持層が現れない条件にあることが多いので、長い支持杭が設計されるケースが多いが、それよりも短い摩擦杭の方が有利で合理的であることを指摘している点に武智が感激してその著書参照と追記したのであらうと想像される。節杭は支持層が深い位置でしか現れない軟弱地盤でこそ短くてもその効用性を發揮するので、摩擦杭の代表格として使われることが多いからである。

以上、関東地震（1923）の際に摩擦杭支持建物の被害が意外に少なかつたとの事實は、筆者は知らなかつたので、とくに重要事項として挙げておくことにした。