

地震時の杭の挙動 — 地盤が揺れると杭も揺れる —

田蔵 隆 Takashi Tazoh 富山県立大学 工学部 環境工学科

○ 東京スカイツリーの基礎は

話題の「東京スカイツリー」、その高さは武蔵の国の名にちなんで 634m (むさし) とされ、自立式の電波塔としては世界一の高さを誇ることになる。耐震、耐風、耐火、いずれも高い性能を備え、災害時には情報インフラとしての社会的使命も担っている。このように非常に高い建造物の基礎は一体どのようになっているのか、興味を抱いた人も少なくないと思う。

インターネットで調べてみると、深さ 50m の壁状の杭が採用されている (<http://www.skytree-obayashi.com/technique/detail/01/index.html> 参照)。地震や風の力で東京スカイツリーは横揺れを起こすことになるが、そのことによって発生する基礎への大きな押し込み力と引き抜力に対しては、壁状の杭の表面に付けられた節が、地盤との間に生じる摩擦力を増大させて抵抗する構造である。なかなかのアイデアで、感心される方も多はず。

さて、軟弱地盤に立つ建造物の基礎には杭基礎が多く採用されている。杭基礎は施工性と経済性に優れていること、また高強度の杭材の開発に加え、大口径杭や長尺杭の開発、ならびに施工技術の進歩が杭基礎の採用を一段と促進している。

地中に打ち込まれた杭は、地震が発生した場合どのように挙動するのか。大きな地震でも杭は破損しないのか。もし地震によって杭が折れたりしたような場合、その上に建つ建造物はどうなるのか。

○ 研究のきっかけ

藤沢市発注の橋梁工事で、橋脚の杭基礎にひずみ計を設置して行った地震観測が、筆者が杭の地震時の応答に関して研究を行うきっかけである。ひずみ計を杭に設置して杭に発生する地震時の軸力や曲げモーメントを直接計測し、実態を把握しようとする試みは、早稲田大学の濱田政則教授 (当時大成建設) が球形のタンクホルダーの杭基礎に対して行ったのが最初である。我々もそれに負けず劣らずの技術を身に付け、経験を積みたいという野心が藤沢市にそのような提案をさせ、受け入れて貰ったという経緯がある。いまから 30 年以上も前の 1980 年ころの話である。

地震観測から得られた杭の地震時の曲げひずみの分布形状は (杭の断面定数を乗ずれば曲げモーメントに変換できる)、図 1 に示すように杭頭と杭先端 (杭の下端を指す) で大きく杭の中間部では小さいという結果である。この分布形状は、道路橋などの杭の設計基準に基づいて耐震設計を行うことに慣れた人には、かなり奇異に感じる形状である。杭の耐震設

計に用いられる地震外力は上部構造物の慣性力であり、それを杭頭に作用させて得られる杭の曲げモーメントの分布形状は、杭頭で大きく杭の先端に向かっては小さくなるというのが、杭の耐震設計を行って得られる一般的な傾向である。

○ 地盤が揺れると杭も揺れる

地震時には地盤も震動する。地盤が軟弱であればあるほど揺れの振幅は大きくなり、地表付近と地盤下方との揺れの振幅の差は拡大する。深さ方向に揺れの振幅が異なる地盤中に真っ直ぐな杭が打設されているわけであるから、地盤の揺れでも杭に曲げモーメントが発生するのは当然のことである。海に肩まで浸かりつま先立ちでいるとき、近くを通過した船が起こした波で体がユラユラと揺らされたという経験は誰しもお持ちと思われるが、地震で地盤が揺らされると地中の杭にも同様の現象が起きる。地盤と構造物の動的相互作用という研究分野では、このことをキネマチック・インターラクションと称している。一方、上部構造物の慣性力が杭に作用して振動する現象は、イナーシャル・インターラクションという。

地震によって杭は、このキネマチック・インターラクションとイナーシャル・インターラクションという二つの現象によって生じる力に対して応答することになるが、以前は勿論のこと、いまでも多くの杭の耐震設計法ではイナーシャル・インターラクションの効果は考慮されているが、キネマチック・インターラクションによる影響は考えられていない。

たいへん大雑把に言えば、杭頭での曲げモーメントはイナーシャル・インターラクション、杭の深部での曲げモーメントはキネマチック・インターラクションによって発生する。地震観測で得られた杭先端で曲げひずみが大きいという結果は、明らかに地盤の揺れ、すなわちキネマチック・インターラクションによって生じたものである。それまでにキネマチック・インターラクションの実態を示す実証データは全く存在しなかった。そのためこの地震観測は研究者の間で話題に上った。

○ 杭の地震被害

1948年の福井地震による北陸配電ビルの杭の被害（図2参照）が、わが国で報告された杭の最初の被害事例である。杭頭がせん断破壊して建物が沈下した。この被害調査は杭の全長に渡って行われたものではないため、キネマチック・インターラクションによる被害はこれからは確認できない。

杭の全長に渡って被害が調査された事例がいくつかある。1964年の新潟地震による昭和
大橋、Nビル、新潟家庭裁判所、さらには1968年宮城県沖地震による丸吉産業事務所ビル、
1995年兵庫県南部地震による阪神高速道路5号湾岸線の新夙川橋梁、宮川大橋、藤和芦屋
ハイタウンなどである。最も詳細にしかも綿密な調査が行われたのは、Nビルの杭基礎の被

害調査である。

その被害調査結果を図3に示す。これは河村壮一氏（当時大成建設）らによって行われたもので、地震からおよそ20年を経た後の建物の建て替え時に行われた被害調査である。建物はRC造の地上3階建（一部2階建）、地階なしの事務所ビルで、杭は直径30cm、長さ10mの既製RC杭である。

杭頭の被害状況は明らかでなかったが、杭頭から下方に3～3.5m付近と、杭先端から上方に2mほどの位置でコンクリートが圧壊・剥離し、軸方向鉄筋およびスパイラル補強筋が露出した状態であった。杭先端から2mの位置は軟弱な表層と杭の支持層との境界に一致しており、この位置での杭の被害はキネマチック・インターアクションによって発生したものと考えられる。杭の深部でも破損が生じるという実態がこの被害調査で確認されたが、示された被害写真（図3参照）は建設技術者にとっては目を疑うほど衝撃的なものであった。

○ 液状化地盤の側方流動

濱田政則教授（早稲田大学）が1983年の日本海中部地震で、地震前後の航空写真に基づく計測から、液状化した地盤が横方向に数mも動くことを突き止めた。これに関連する研究が同教授らをはじめとする多くの研究者によって精力的に行われ、液状化地盤の側方流動という新たな研究領域が形成されるまでに至った。

同教授は同じ手法によって、1964年の新潟地震で信濃川沿いに生じた側方流動量を分析した。その結果、信濃川の左岸側で最大で8mもの水平移動が発生していたことを明らかにした（図4参照）。このことから、1964年の新潟地震で落橋した昭和大橋（図5参照）は、橋脚の基礎杭が側方流動に伴う液状化地盤の流動圧を受けて大きく変形したことが主因だと結論付けた論文が、何人かの研究者によって発表された。

○ 昭和大橋落橋の目撃者

1964年の新潟地震が発生したのは6月16日（火）の午後1時2分、前日の雨が上がってポカポカ陽気の日であった。人々は信濃川沿いの堤体などに腰を下ろして、昼食や休息を楽しんでいた。地震はその人たちが、職場や学校に戻ろうとした矢先に発生した。そのためかなりの人が昭和大橋の落橋を目撃することとなった。

地震の発生から40年を経た後であるが、われわれは27名の昭和大橋落橋の目撃者を探し出した。地震被害資料などを綿密に調べ、いろいろな伝手（つて）を使って漸く探し出した人たちである。

目撃した人たちに聞いたかったのは、昭和大橋はいつ落橋したかである。地震で橋や地面が大きく揺れているときか、それとも地震の揺れが終わってしばらくしてからか。さらには数mにも及ぶ液状化地盤の水平移動が生じたのは、昭和大橋の落橋前か、それともその後か

ということである。

目撃者の証言をまとめると、昭和大橋の落橋は地震の主要動が終わってから数十秒後であった。また昭和大橋の落橋は、信濃川の堤体が川の方向に“ザッザー”（目撃者が語ったそのままの表現）と動く少し前の時刻でもあった。つまり昭和大橋は、地震による激しい揺れ、つまり橋梁の慣性力で落橋した可能性はきわめて低い。また昭和大橋の落橋は、信濃川の堤体が大きく動き出す前からはじまっていることから、液状化地盤の側方流動によって落橋した可能性も小さい。

新潟地震の観測記録を分析してみると、地震の主要動が終わっても地盤はゆっくりと、しかもかなり長い時間大きく揺れており、落橋はその間に発生している。このことから昭和大橋は地盤の揺れ、つまりキネマチック・インターアクションに起因して落橋した可能性が高いと推察された。

○ 護岸背後の杭基礎構造物の被害

1995年の兵庫県南部地震で一層明確になったことであるが、護岸の背後にある杭基礎構造物の被害は、他の被害と比較してきわめて甚大なものとなる。その理由は液状化した地盤が杭基礎構造物の背後から大きな流動圧として作用したからというのが、現在に至るまでの多くの研究者・技術者の考え方である。

建設に関わる技術者にとって側方流動に伴う地盤の非常に大きな変位は驚異的な値である。そのため構造物の背後から大きな流動圧が作用すれば、想像を超える被害が発生しても不思議ではないと考えがちである。しかし筆者らが行った遠心実験装置を使った杭基礎模型の振動実験の結果からは、護岸背後の杭基礎構造物の被害は、護岸の倒壊に伴う杭基礎の前面地盤の拘束圧の低下が主因であり、杭基礎の背後から作用する土圧の影響は小さいというこれまでの認識を覆す結果が得られた。

○ 液状化地盤の側方流動を正しく恐れて、その対策法を検討することが重要

図6は1995年の兵庫県南部地震による被害写真である。逆立ち状態の車はちょっと押せば簡単に倒れそうに見える。もう一方の写真にあるカラーコーンも、非常に大きな地盤流動があったにも拘わらず、転がりもせず地震後もほぼ一直線状に並んでいる。

この2枚の被害写真から言えることは、液状化した地盤が横方向に相当量動いたことは地盤に大きな亀裂や盛り上がりが生じていることから明白であるが、その移動速度は逆立ちした車やカラーコーンを転倒させないほどのスピードであったと考えられる。液状化した地盤は剛性を喪失するために、水平方向に流動する移動量はきわめて大きい。しかし地盤が移動するスピードが非常にゆっくりしている場合、そこに建設された構造物には力学的にどれほどの影響を及ぼすものなのか、冷静に見極め、液状化地盤の側方流動を正しく恐れ

て、その対策法を検討する必要がある。

○ おわりに

地震で被災した杭基礎を再構築するには、新設の12倍ほどの建設費が必要であることを、阪神高速道路株式会社の足立幸郎氏が1995年の兵庫県南部地震による被災事例に基づいて算出している。つまり1億円で建設した杭基礎が被災した場合、それを修復するには12億円もの費用が必要になる。

杭基礎は今後も構造物の基礎の主流をなすものと考えられる。杭基礎の形態も従来とは大きく異なってきており、上部構造物の大型化、重量化に伴い、それを支持する杭基礎も巨大化している。杭を単に地業の一種とみる時代は過ぎ、当然のことながら杭も重要な構造部材の一部と認識すべきである。

上部構造物が耐震補強はそれなりに進んでいるが、杭基礎の耐震補強が行われることは多くない。上部構造物が耐震補強されることで杭基礎との剛性の相対比率がさらに大きくなり、杭基礎が被災しやすくなるといった指摘もある。懸念される事項の一つである。

なぜ壊れたかという地震被害の原因を考える上で、地震観測や振動実験などの実測データに基づく実証的な研究は今後も重要である。わが国はすでに1923年の関東地震のときのような小さな農業国ではない。都市構造の複雑化に伴い、都市防災に関する研究の多面的な拡がりが必要とされている。

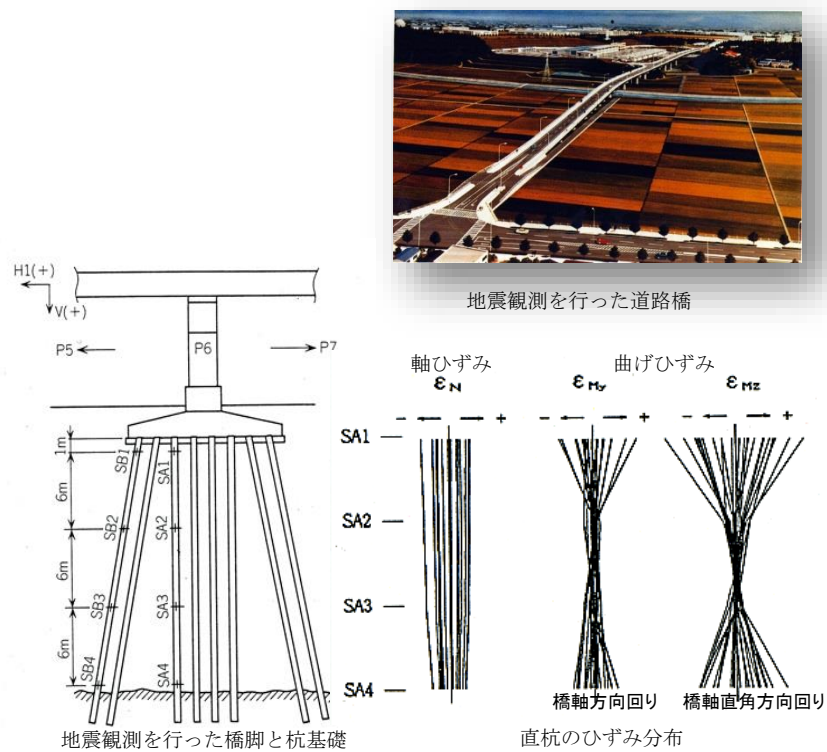


図1 橋脚基礎杭の地震観測と得られた杭の地震時ひずみの分布形状

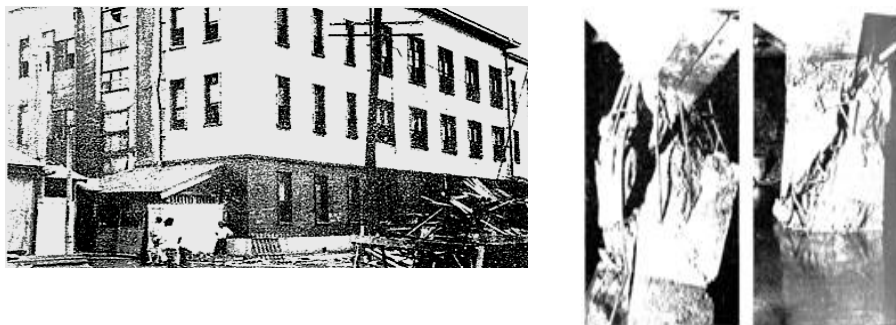


図2 1948年福井地震で被災した北陸配電ビルの杭基礎の被害（谷口仁士編集・解説 よみがえる福井震災、現代資料出版、1998年6月、より引用）

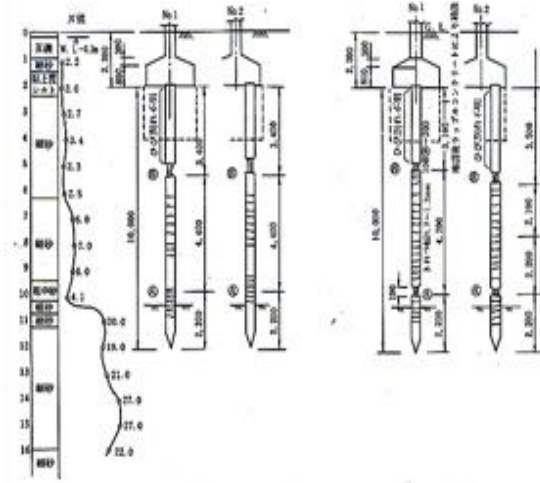
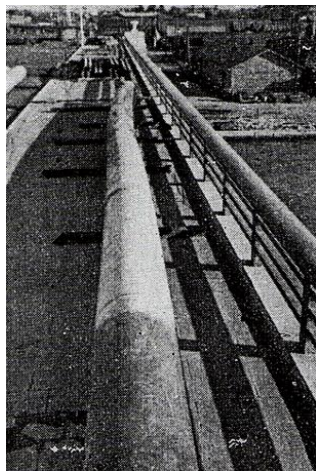


図3 1964年新潟地震によるNビルの杭基礎の被害（写真：河村壮一氏提供、図面：西沢ほか2名 新潟地震時に破損した既製RCぐいの調査と耐震解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、1982年10月、より引用）



図4 1964年新潟地震によって生じた信濃川沿岸の側方流動に伴う川幅の変化：万代橋付近で川幅は23m狭まった（Hamadaほか3名 Study on Liquefaction Induced Permanent Ground Displacements、ADEP, 1986年11月、より引用）



掘り出された杭（写真下方が杭頭）

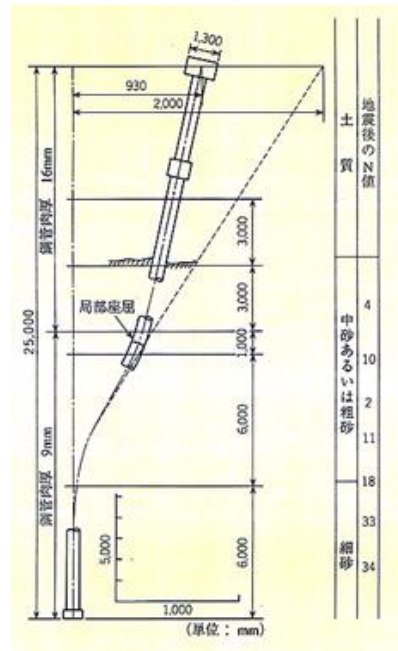


図5 1964年新潟地震で落橋した昭和大橋とP4橋脚の基礎杭の被害（土木学会新潟震災調査委員会編：昭和39年新潟地震震害調査報告、土木学会、1966年6月、より引用）



図6 1995年兵庫県南部地震による護岸付近での被害