

(7) 液状化による地盤の永久変位に起因する杭基礎の被害と解析

飛鳥建設㈱ ○森伸一郎 清水建設㈱ 清水勝美
 ㈱NKK 鈴木信久 大成建設㈱ 高木政美
 佐藤工業㈱ 中村 晋

1. はじめに

1964年 6月16日の新潟地震の際には、新潟市の信濃川流域を中心に液状化による地盤の永久変位が発生したことが、最近、浜田ら¹⁾によって明らかにされた。この地震では構造物の基礎に被害が多くみられたが、被害原因については振動論的な観点や、液状化による支持力低下の観点から説明されてきた。そこで、本研究においては、特に、杭基礎における被害を液状化による地盤の永久変位の観点から見直した。

橋梁については、道路橋²⁾では調査した86橋のうち51橋、鉄道橋³⁾では474橋のうち75橋が被害を受けた。被害状況と地盤の永久変位³⁾とを比較した結果、これらの被害橋梁の内、道路橋で4橋、鉄道橋で1橋の橋梁が液状化による地盤の永久変位と因果関係があると推定された。これらは、著しいものでは落橋に至るなど、いずれも被害が大きいのが特徴的である。

一方、建築物³⁾については、当時新潟市内にあった1530棟のうち、340棟が何らかの被害を受けたが、特徴的なこととして、ほとんどが振動的な被害でなく、液状化による地盤変位に起因すると報告されている。最近、新潟地震の際に液状化によって沈下・傾斜した後も修復して使用していた建物の杭が、河村ら⁵⁾⁶⁾や、栗原ら⁷⁾によって発掘・調査された。これらの杭の被害状況もまた、地盤の永久変位と調和的であることがわかった。

研究対象とした構造物を表-1に示すとともに、図-1に位置を示す。ここで、No. 1, 4, 6, 7 の4ケースを報告する。

2. 地盤の永久変位と杭基礎の被害状況

共通する杭基礎の被害の特徴を要約する。杭が上部工慣性力により被害を被るとすれば杭頭部もしくは杭の上部であろうと思われるのに対し、引き抜かれて調査された杭の残留変形や破損状況からは、杭の下部に大きな曲げ変形あるいは杭のコンクリート脱落という破損がみられた。これらの杭先端に近い下部の曲げによる被害は、上部工慣性力では説明しがたいものであると考えられる。しかし一方で、残留変形の方向と地盤の永久変位の方向が一致し、定性的には、これらの被害は地盤の永久変位によるものであると考えられた。

(1) 昭和大橋：図-2に全体の被害状況を示す。上・下部工ともに、特に左岸側に集中的に大きな被害を受け、上部工は5径間の単純桁が落橋し、杭に残留変形がみられた。図-3にP4

表-1 液状化による地盤の永久変位に起因する基礎の被害

No	構造物	橋長径間等	基礎/杭種	文献
1	昭和大橋	303.9m(12)	鋼管杭(φ609)	2)3)
2	八千代橋	307.4m(14)	RC杭(φ300-600)	2)3)4)
3	万代橋	308.0m(8)	ケーソン(橋脚)	2)3)
4	新潟駅 東跨線橋	229.5m(16)	RC杭(P9:φ300) 木杭	2)3)
5	越後線 信濃川鉄橋	328.3m(15)	井筒(橋脚)	3)
6	建 Nビル	RC3F	RC杭(φ350)	5)
7	築 Dビル	RC3F	RC杭(φ300)	6)
8	物 ホテル新潟	RC3F	RC杭(φ300)	7)

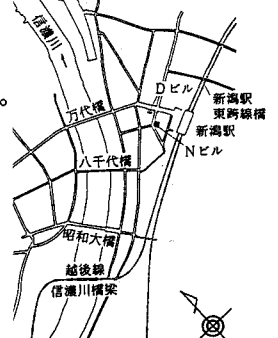


図-1 研究対象の橋梁と建物の位置

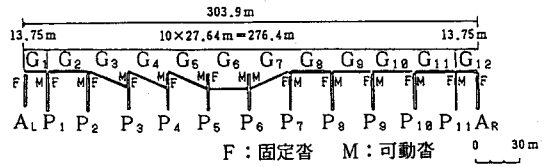


図-2 昭和大橋の被害状況

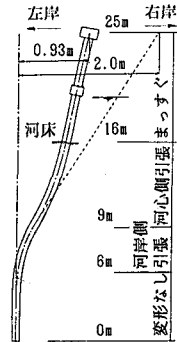


図-3 P4橋脚鋼管杭の残留変形

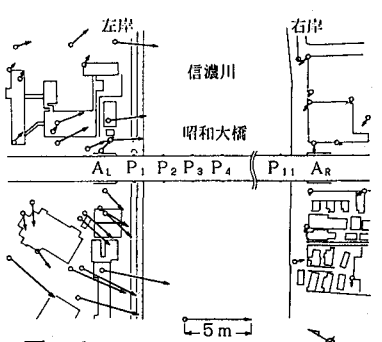


図-4 昭和大橋付近の地盤の永久変位

橋脚杭の残留変形を示す。杭先端より6m付近から河心側に向かうような、9m付近から戻るような曲げ変形があり、杭頭部では河心側に0.93m 変位していた。一方、**図-4**に昭和大橋周辺の地盤の永久変位ベクトルを示すが、左岸側では最大5mにも及ぶ河心側への永久変位が生じているのに対して、右岸側では永久変位はほとんど見られない。すなわち、杭基礎の被害状況は地盤の永久変位と調和的であり、杭基礎の被害は地盤の永久変位によって拡大した可能性が極めて高いと考えられる。

(2) 新潟駅東跨線橋：国鉄信越本線を跨ぎP8・P9橋脚にかかる単純合成桁の可動側(P9)が落橋した。**図-5**に被害全体を示す。落橋に要する支間拡大幅は約50cmであるが、支間測定の結果も約50cmであった。P9橋脚がRC杭、固定側(P8)橋脚が木杭である。P9橋脚の全39本のRC杭が引き抜

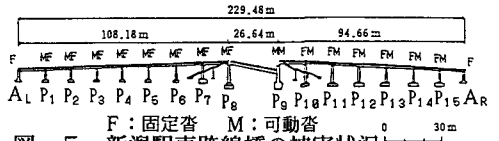


図-5 新潟駅東跨線橋の被害状況

かれ調査された。**図-6**にP9橋脚RC杭の残留変形を示す。杭先端から2~3mの位置で大きな残留曲げ変形がある。39本の杭頭残留変位は13~58cmで平均28cmであった。**図-7**に東跨線橋付近の地盤の永久変位ベクトルを示すが、P8付近の地盤に橋軸方向の永久変位がほとんどないのに対し、P9橋脚付近では支間が拡大する北側への永久変位が生じている。すなわち、被害状況は永久変位と調和

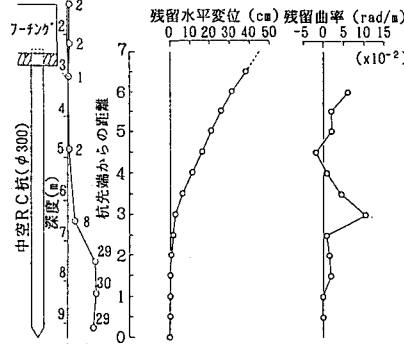


図-6 P9橋脚RC杭の残留変形
新潟駅東跨線橋

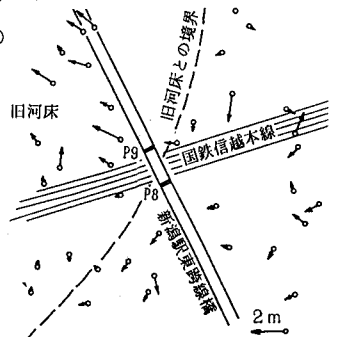


図-7 新潟駅東跨線橋付近の地盤の永久変位

的であり、杭基礎の被害と落橋は地盤の永久変位によるものと考えられる。

(3) NビルおよびDビル：Nビルは約50cmの不同沈下を生じたが、地震後建物を建て起こすことはされず、若干の修復の後1984年の解体まで使用されていた。また、Dビルは、周辺地盤が液状化して杭が破損し、沈下・傾斜した。建物四隅の最大沈下量は1.3mであった。**図-8**、**図-9**に各々のビルの発掘された杭の被害状況を示す。2つのビルの杭がいずれも杭頭および杭先端から2~3mの位置で破損が著しいことがわかる。Nビルの杭の杭頭残留変位は1~1.2mと推定された。**図-10**に両ビル付近の永久変位ベクトルを示す。Nビルにおいては、その付近の地盤の永久変位が約1.2m生じているのに対して、上述の杭頭変位とその量・方向が一致する。したがってこれらの杭の被害は永久変位によるものであると考えられる。

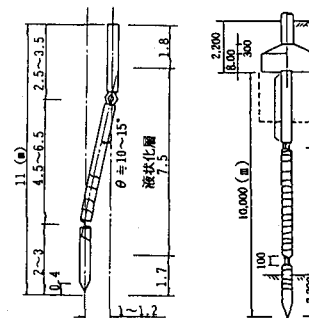


図-8 NビルのRC杭の残留変形

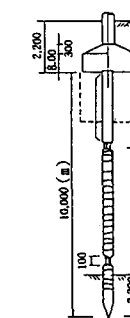


図-9 DビルのRC杭の残留変形

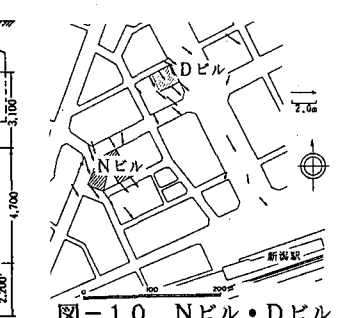


図-10 Nビル・Dビル付近の地盤の永久変位

3. 地盤の永久変位による杭被害の数値解析

上述した構造物の内の3つの杭基礎について、地盤の永久変位を外力として被害の数値解析を行なった。

(1) 解析方法：3つの構造物に対しては、いずれも次のような共通の条件で解析を行なった。解析方法としては、杭は梁に、地盤は水平方向のばねにモデル化し、地

表-2 地盤の永久変位の深度方向分布

分布形状	想定する現象
1 長方形分布	液状化層内で一様な永久変位が(地表まで)生じる
2 三角形分布	液状化層内で一様なせん断変形が生じた結果、地表及び地中に永久変位が生じる：地表まで連続
3 台形分布	液状化層内で一様なせん断変形により永久変位が生じ、地下水位より上位の地盤と一緒に移動する
4 ブロック状分布	液状化層内で永久変位が生じたのではなく、地下水位より上位の地盤のみが液状化層に乗って移動する

盤のばねの一方は杭に結合し、他方には地盤の永久変位を入力するという応答変位法に似た手法を用いた。地盤の永久変位の深度方向分布については、表-2に示すような4つの分布形を考えた。図-11にモデル化の概念と永久変位の分布形状を示す。ただし、昭和大橋については河川内であるため台形・ブロック状は考えない。地盤ばねとしては、道路橋示方書もしくは岸田・中井式により算定したが、算定したばね値に、 $R=1/1$ 、 $1/10$ 、 $1/100$ の低減率を乗じた場合について解析を行なった。杭先端は自由とした。

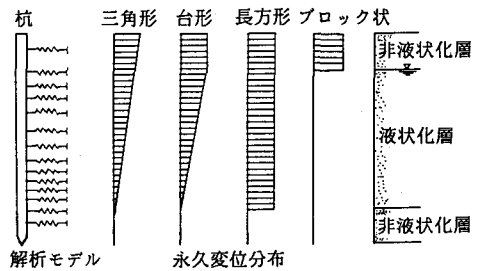
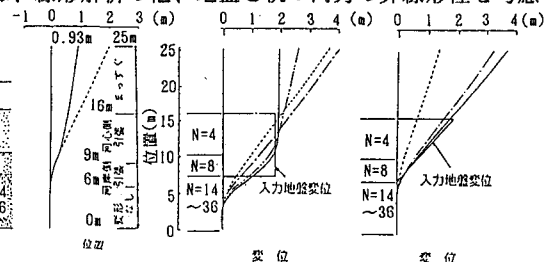


図-11 解析モデルと永久変位分布形状の種類

解析は、線形解析を基本としたが、Nピルについては、線形解析の他、地盤と杭の両方の非線形性を考慮した非線形解析を行なった。

(2) 昭和大橋の解析

表層9m間 ($N \leq 8$) を液状化層と見なし、地表の永久変位を1.8mとした。1列杭のため杭頭自由とした。解析結果を図-12に示す。長方形分布では、上部河心側引張、下部河岸側引張という曲げモーメントのパターンと変形モードが実測残留変形と定性的には合っているケース ($R=1/1$) もあるが、杭下部の曲げ変形に限って言えば、むしろ三角形分布の方がその発生位置がよく一致する。落下した桁のストラット効果により杭頭部の河心側への変位が拘束されることを想定すると上部の戻りの曲げ変形が説明できる可能性がある。



(3) Nピルの解析

GL-1.8~9.3mの7.5m間 (平均 $N=9$) を液状化層とみなし、地表の永久変位を1.2mとした。杭頭はピン支持状態であったため自由とした。

図-13に線形の解析結果を示す。三角形分布では、ばね値の変化に対して感度が鈍く、下部の曲げ破壊は説明できるが上部のは説明できない。台形分布では、上下両方の曲げ破壊が最もよく説明でき、変形モードも実際に近い。長方形分布では、実際の破壊モードを説明できない。ブロック状分布では、 $R=1/100$ の場合に限り上下両方の曲げ破壊を説明しうる。

また、台形分布に対する非線形解析の結果からは、RC杭の上下の曲げモーメントのピーク位置については、杭頭変位が3~5cmの段階でクラックが入り、20cmで降伏状態にはいるのに対し、地

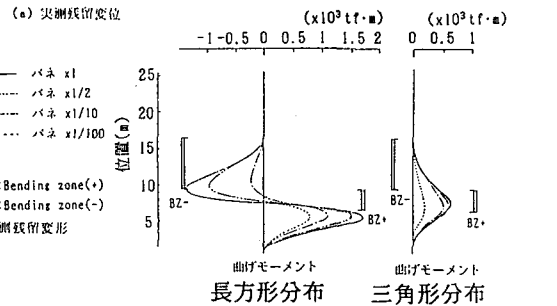


図-12 昭和大橋の解析結果

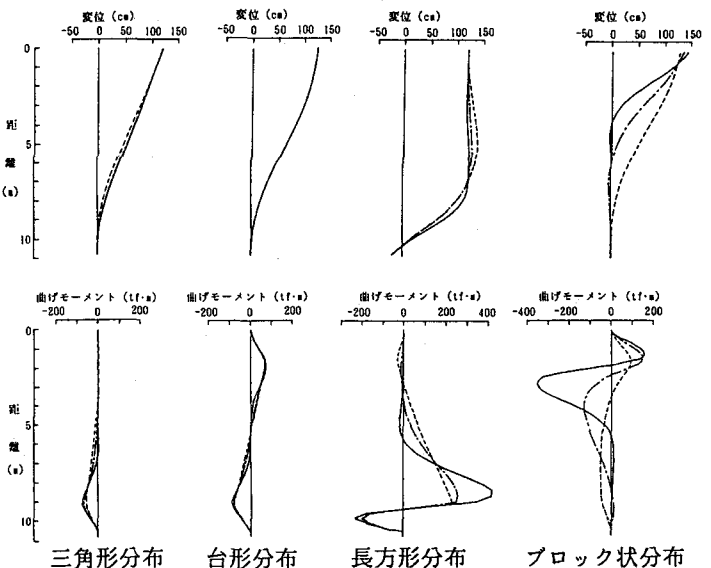


図-13 Nピルの解析結果

盤は、杭が降伏に達する変位でも、ごく地表面付近を除けばほぼ弾性状態であった。杭頭変位が大きくなっても、塑性状態に達するのは、地表面付近と地盤変位分布の急変点付近のごく一部のばねに限られる。すなわち、地盤より杭の方が相対的に弱いため、地盤の非線形性よりもRC杭の非線形性の方がより結果に影響することがわかった。

(4) 新潟駅東跨線橋の解析

表層部7m間(平均N=3)を液状化層とみなし、地下水位をGL-3.5mとした。地表の永久変位を0.7mとした。杭頭はフーチングに剛結とし、地表面までモデル化し頭部を自由とした。図-14に解析結果を示す。ブロック状分布を除けばいずれの変位分布においても、変形・曲げモーメントともばね値の変化には鈍感である。三角形分布、台形分布では、曲げ変形的位置・変形の大きさのいずれも実測残留変形をよく説明できる。長方形分布では、実際の変形モードを説明できない。ブロック状分布では $R=1/100$ の場合に限り残留変形モードを説明しうる。

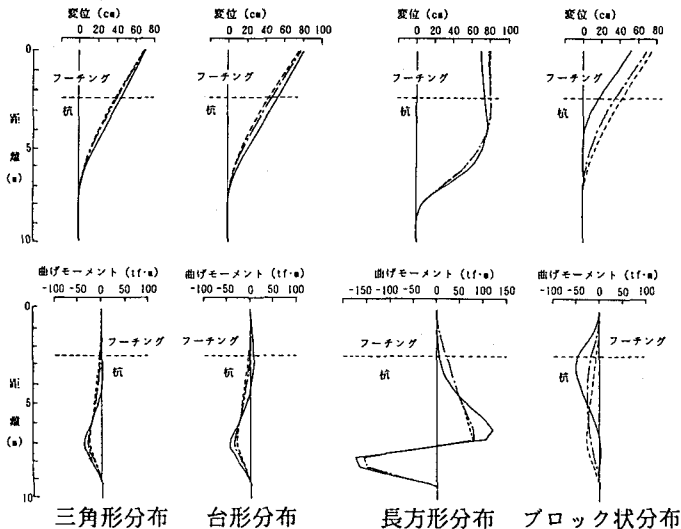


図-14 新潟駅東跨線橋の解析結果

4. 結論

本研究の結果得られた結論は次のとおりである。

- (1) 新潟駅東跨線橋、Nビルについては、地盤の永久変位により杭の被害が説明できる。
- (2) 地盤の永久変位の深度方向分布としては台形分布または三角形分布が良い。
- (3) ブロック状分布でも地盤ばねを大きく低減した場合に杭を説明しうるが、上部に非液状化層の考えられない河川等の場合には設定できない。
- (4) 昭和大橋については、杭の下部の曲げ変形については三角形分布で説明できるが、上部の曲げ変形は説明できない。落下した桁のストラット効果を考慮する必要がある。
- (5) RC杭では、地盤の非線形性よりもRC杭の非線形性の方がより結果に影響する。

今後は、検討対象として残っている八千代橋、Dビル、ホテル新潟の基礎杭について同様な解析を行なうとともに、また、井筒基礎である越後線信濃川鉄橋やケーソン基礎である万代橋についても同様な解析を行ない、基礎形式の違いの影響についても検討を加えてゆきたい。

なお、本研究は「日米共同研究：『地盤変状と地中構造物の地震被害に関する研究会』（委員長：久保慶三郎東京大学名誉教授，事務局：地震予知総合研究振興会）」の一環で行なったものである。東海大学浜田政則教授、建設省土木研究所川島一彦室長には、御指導をいただきました。

参考文献

- 1) 浜田政則、安田進、磯山龍二、恵本克利：液状化による地盤の永久変位の測定と考察，土木学会論文集，第376号/Ⅲ-6，1986.12.
- 2) 建設省土木研究所：新潟地震調査報告書，土木研究所報告 125号，1985.6.
- 3) 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，1966.6.
- 4) 吉田巖：新潟地震における鉄筋コンクリートぐいの被害の一例，第8回地震工学研究発表会講演概要集，1965
- 5) 河村壮一，西沢敏明，田尻貞夫：液状化で破損した杭の調査，基礎工，第12巻，第7号，1984.7.
- 6) 河村壮一，西沢敏明，和田：20年後の発掘で分かった液状化による杭の被害，日経7-キック7，1985.7.29.
- 7) 栗原修三，大藤辰雄，仲山博：ホテル新潟建設工事—新潟特有の砂地盤における山留め工事例一，基礎工，第16巻，第3号，1988.3.
- 8) 地震予知総合研究振興会編：新潟地震における新潟市内の地盤の永久変位ベクトル図，1987