

液状化した埋立シルト地盤における 杭基礎の被害の進展過程

森 伸一郎¹・沼田 淳紀²

¹正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

²正会員 工修 飛島建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県関宿町木間が瀬5472)

1993年北海道南西沖地震の際、函館港の北埠頭の埋立地盤において著しい液状化が発生し、そこに立つ杭基礎構造物が沈下傾斜する被害を受けた。構造物の沈下傾斜は杭の重度の破損によるものであった。地震の際、構造物のある施設では4名が労働中であり、地震直後にヒヤリング調査と地震時行動調査を行うとともに、地震時の行動を再現することによって被害の進展過程の時刻歴を明らかにした。また、近傍の地震観測記録や当該地点の地震応答解析によって得られた地盤の地震応答の時刻歴と被害進展過程の時刻歴を比較することによって地震時地盤応答と被害の進展を対応づけることができた。

Key Words : earthquake damage, pile foundation, damage process, interview, human behavior, time history

1. はじめに

構造物の地震被害は、その主要因によって振動被害と地盤被害に大別されることがある。前者は、周辺地盤に顕著な変状が見られない場合であり、その多くは最大加速度を記録する主要動付近の振動によると解釈されるのが一般的である。一方、土構造物の被害や直接基礎を有する小規模構造物の被害には、その基礎地盤の液状化に代表される地盤被害に起因するものが多い。

翻って、杭基礎構造物の地震被害の場合、周辺地盤に液状化の痕跡が明瞭なときには、主要動による慣性力と液状化による影響の内、どちらが被害の引き金になっているのか明確ではない。最終的な被害形態には、それぞれが寄与していると考えられるが、被害の引き金とその後の進展に対する寄与を明らかにすることが被害メカニズムの解明と合理的な耐震設計法の確立に不可欠である。

被害の進展状況が明らかにされた例として、新潟地震における昭和大桥の落橋被害が挙げられる¹⁾。これにしても、主要動、後続の表面波、液状化に起因する側方流動に主要因を求める意見があり、いまだ推測の域

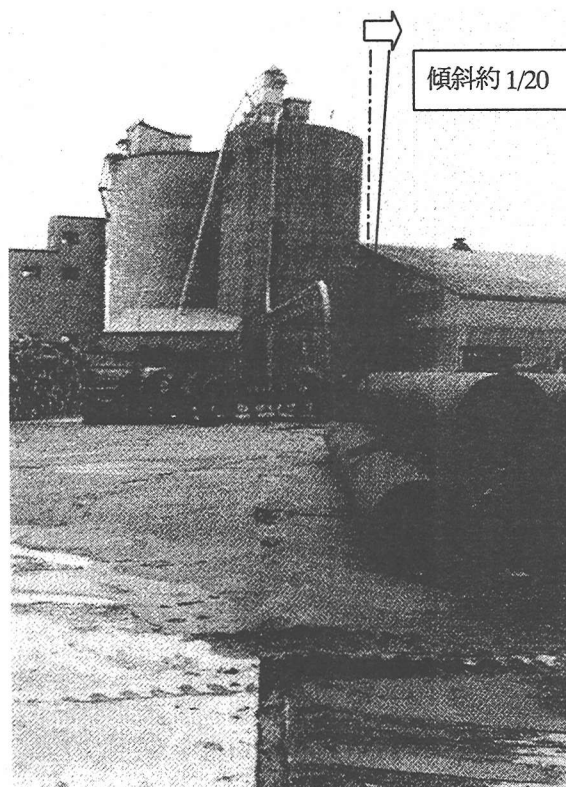


写真-1 被害を受けた貯蔵構造物（一部写真修正）
右の円筒形構造物が右に傾斜している

を出ない。

さて、1993 年 7 月 12 日 22:17 の北海道南西沖地震 (Mjma =7.8)において、震央から約 170km 離れた函館市の港湾関連諸施設は、液状化による被害を多く受けた。なかでも岸壁背後の埋立地に建つ杭基礎の貯蔵構造物が傾斜・不等沈下・水平移動するという重大な被害が生じた²³⁾ (写真-1)。著者らは、この被害とその後の調査結果について報告してきた²⁴⁾。この地震の際、構造物のある施設では 4 名が労働中であり、地震直後にヒヤリング調査と地震時行動調査を行うとともに、地震時の行動を再現することによって被害の進展過程の時刻歴を明らかにした。

2. 被害の概要

被害の内、当該構造物の被害の進展過程を明らかにする上で必要なことのみ、その概要を箇条書きにして述べる。(図-1 参照)

- [1] 同じ敷地に 2 基の円筒状貯蔵構造物があり、1961 年の規準¹⁰⁾で設計された PC 杭 (A 種) で支持された貯蔵構造物が約 3 度傾斜し、30~90cm の沈下、47cm の水平移動するという重大な被害が生じた。1974 年の規準¹¹⁾で設計され PHC 杭 (A 種) で支持された貯蔵構造物に被害は認められなかった。
- [2] 構造物の周辺では、おびただしい量の噴砂が広範囲に見られた。埋立後 28 年を経て、深さ 7m までの埋め立てた砂質シルト層が液状化した⁹⁾。
- [3] 最終的に埋立層は 5%程度の沈下量が生じ、地盤は背後地盤内の高低差に起因して、少ないながらも海側に移動するという側方流動が見られた。
- [4] 傾斜した円筒貯蔵構造物のつばのある円形基礎版の上に、基礎の一部が載っている隣接建物の床に亀裂 (最大 20cm) と段差 (最大 30cm) が生じた。その方向は貯蔵構造物の異動方向に直交する。
- [5] 2 つの貯蔵構造物の頂部には、2 つの鋼性の通路が架けられ、また 1 本の鋼性輸送管がわたっていた。2 つの鋼性通路はともに片側の固定部が破損し固定用アンカーボルトが引き抜かれ、通路端部と貯蔵構造物の間に 1m 以上の離れが生じた。残っている方のアンカー一部のボルトの観察より、2 つの構造物が離れる方だけではなく、縮む方にも挙動したことがわかった。また、鋼性輸送管も中間の溶接部で破断し、破断部では 1m 以上の離れと約 30cm の段差が生じていた。この段差は基礎の相対沈下と整合する。この鋼管 (SS41) の破断強度は約 3000ton である。⁹⁾
- [6] 杭頭部周辺に関しては、全ての杭が破壊されてい

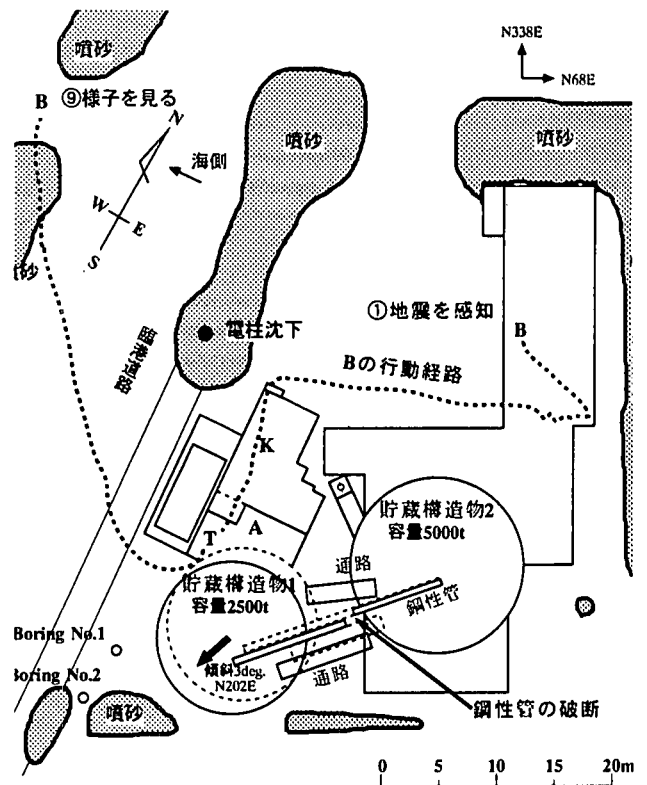


図-1 被害を受けた構造物と地震時の人の挙動

た⁹⁾。杭頭部のせん断または曲げせん断破壊 (タイプ A) と杭頭部より 1~3m 下での曲げ破壊 (タイプ B) という 2 種の典型的な破壊形態に分類できるが、2 タイプの杭の破壊形態は混在しており、杭頭貫入比 P/D がおよそ 0.2 を境に杭頭結合状態が決定され、それより大きいものは剛結、小さいものはピンとして挙動し、タイプ A は杭頭剛結合状態、タイプ B は杭頭ピン状態として挙動した⁷⁾。

- [7] タイプ A の破壊の内、基礎外周部の杭は、貯蔵構造物のロッキングによる杭軸力変動に起因して軸力が減少するときに杭頭に作用する基礎中心方向の水平力により破壊された。破壊面の観察により、貯蔵構造物のロッキングの変位と水平変位は同位相であり、剛結状態基礎中央部の杭は、北東方向に水平力が作用したときに破壊した。
- [8] タイプ B の破壊位置の検討から、破壊は液状化前から始まり、液状化状態で振動しているときにも破壊は続いた。
- [9] 杭中間部の破壊形態として、GL-7m 付近の埋立シルト層下端から旧海底面の軟弱シルト層の部分で、一様に大きく S 字状に折れ曲がっていることがわかった⁹⁾。これは振動によるものか、側方流動によるものかは不明である。

さらに、被害を分析する上で重要な地震動に関する調

査分析により、これまでにわかった主な知見は以下の通りである。

当該地点の揺れ易さとして、北東約 3.5km の JMA 函館に比べて震度で 1 大きく、応答スペクトルで約 2.5 倍であること、また、概ね東方約 1.5km の HDB と同等かもしれないもしくは少し上回る地震動があったことが推定できた⁹⁾。また、HDB 地点での逆応答による入射波を用いた当該地盤での解析によれば、等価線形解析と有効応力解析による加速度応答波に際立った差異はなく、有効応力解析によれば 58 秒で完全液状化に達していた⁹⁾。

構造物の被害のメカニズムを実証するためには、被害の進展過程を明らかにすることは重要である。特に、液状化が始まった時期、基礎が大きく移動した時期、杭の破壊が進み構造物の沈下と傾斜が始まった時期などが特定できれば、被害のメカニズムが明らかになるばかりでなく、被害検討のための数値解析の妥当性も明らかにできる可能性がある。これらの時期を明らかにすることを目的に、地震時行動調査を行った。

3. 地震時行動調査

(1) ヒヤリング調査

一般に夜間に地震が発生した場合の施設の被害挙動については、人が勤務していないことが多く体験談が聴かれないことが多い。しかし、1993 年 7 月 12 日 22 時 17 分頃発生したこの地震の際には当該サイトでは作業中であり、事務所には 4 名が勤務していた。

そこで、地震時の揺れ、貯蔵構造物の被害メカニズム、液状化による噴砂現象に関する地震時の様子を知ることが目的に、ヒヤリング調査をおこなった。ヒヤリングは、地震の 2 日後、2 週間後、1 ヶ月後、1 年後の 4 回に渡って繰り返した。4 名 (B,T,K,A) の内、3 名からヒヤリングができたが、その内 2 名 (B,T) が、当日の行動をよく記憶していた。この 2 名の話の総合して要約すると次のようである。なお、B さんは地震に敏感で恐怖を感じやすい性格であり、T さんは逆の性格であった。

[地震時の行動]

- ① 出荷棟 (S 造) 2 階にいた B さんは、揺れを感じ、大きい地震だと感じた。
- ② B さんは出荷棟 2 階から階段を下り、走って事務所棟に向かった。
- ③ B さんは事務所棟入り口から入り、奥の機械操作室で機械を停止させる処置を執った。
- ④ B さんは、2500ton 貯蔵構造物に最も近い控え室で椅子に座っていた T さんに逃げるよう促した。
- ⑤ T さんは「大丈夫だよ」と言って様子を見ていたが、

約 5 秒後に床が陥没した。

- ⑥ B さんは、T さんに逃げるよう促した後、トラックスケール横を通り道路を渡った。
- ⑦ B さんは道路を渡り様子を見ていた。大きい揺れが続いたので、電柱に捕まっていた。この間にほとんどの電灯が消えた (停電した)。
- ⑧ 暗い中、よく見ると泥水が、腰から肩の高さあたりの高さまで噴き出していた。
- ⑨ しばらくして、T さんが逃げて道路を渡り終えた頃、ドーンという大きな音がした。

図-1 には B さんの行動経路を示した。

(2) ヒヤリング内容の意味付け

前記のヒヤリング調査の内容の意味を記す。

①は、B さんは手すりに掴まって立ち、出荷の様子を見ていたということである。立っている人が揺れを感じるのは、旧震度階で震度 3 に相当する。また、大きい地震だと思ったという証言は、比較的有感地震の多い地域であり、また、B さんが 1983 年日本海中部地震を同じ仕事場で経験していることなどを考えると、このとき、震度 4 相当の揺れが来ているということの意味する。

④は、事務所棟の床が 5cm ほど下がる被害のあった日本海中部地震の経験のある B さんの判断から、このとき既に震度 5 程度の揺れがあったと思われる。

⑤は、T さんは、椅子に座って様子を見ていたが、約 5 秒後に床が陥没 (現地調査では段差であった) し、椅子ごと倒れたことから、記憶は正確である。この陥没は 15~20cm の亀裂を伴っており、2500ton 貯蔵構造物の基礎版張り出し部上の上載土の上に建つ部分が、基礎の大きな変位により、概ね南側に引っ張られたことを意味する。

⑦は、震度 5 程度の大きい揺れが相当時間続いたことを意味する。

⑧は、道路を渡り終えた頃には、勢いのある噴砂現象がすでに始まっていたことを意味する。

⑨の大きな音は、2 基の貯蔵構造物間の鋼性輸送管が破断した音であり、このときに貯蔵構造物は、沈下を伴い傾斜したものと考えられる。

(3) 地震時行動調査

ヒヤリング調査結果は、上記の意味づけがなされることから、地震時の人の行動や現象の確認時刻を特定するために、1 年後に当時の動きを再現してもらい、地震時行動の行動の時間を測定した。ただし、B さんはこの調査当時足を負傷していたため、著者らの調査協力者が再現された行動をとり時間を測定した。3 人で再現を行い、行動時間のばらつきを調べた。

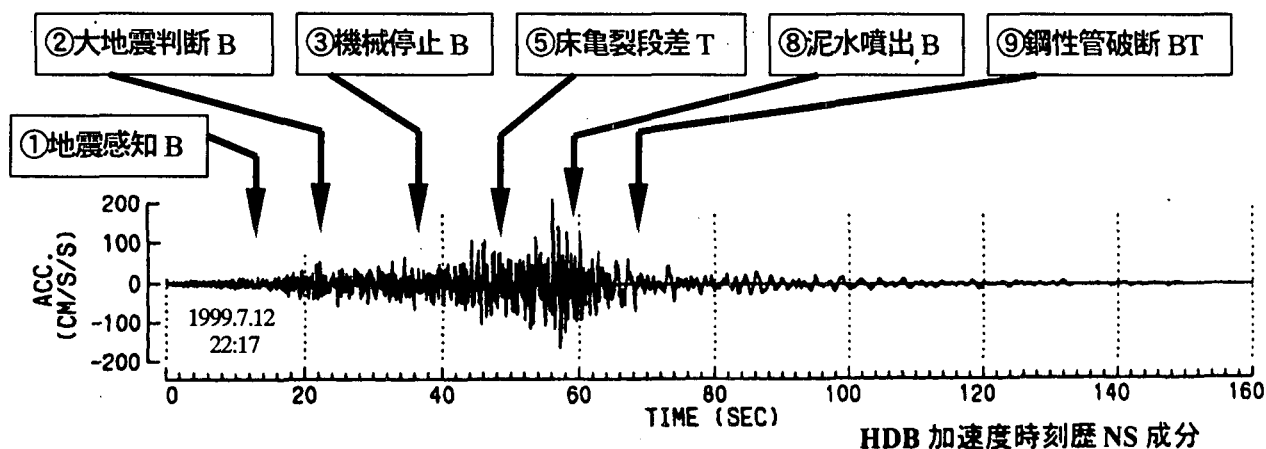


図-2 被害構造物サイトから1.5km離れた地点（HDB）の地震動記録と人の行動と現象確認の時間との関係

地震時行動の再現による各行動の測定時間の結果を示す。

- ②③の行動時間：10～15 秒
- ④の時間：5 秒（B さん再現）
- ⑤の時間：10 秒
- ⑥～⑨の時間：10～15 秒

この調査は昼間に実施したが、地震当時は夜であるということ、地震当時は揺れていること、B さんが 50 代後半であるのに対し再現行動の被験者が 20～40 才であることを考えると、②③と⑥～⑨のそれぞれの時間は多めに考えた方が良いと思われた。

(4) 地震の揺れと被害の時刻特定

震度 4 を感じたのが 30cm/s^2 程度として、②の行動開始を 30cm/s^2 になったときと仮定する。前述のように当該地点の計算加速度と HDB の加速度地震記録の形状に特筆するほどの差異がないことから、それぞれの事象を当該サイトから東方約 1.5km 離れた HDB の本震の記録と対応させた。震央距離にすれば当該地点と HDB 地点に有意な差はない。図-2 に、以上の調査の結果最終的に得られた行動と被害の時刻に関する特定結果を示す。床の亀裂・段差は時刻歴の 50 秒あたりに相当すること、噴砂は 60 秒頃にはすでに確認されたこと、鋼性輸送管の破断は 70 秒あたりに相当することがわかる。

4. まとめ

以上のように、1993 年北海道南西沖地震における埋立地盤に建つ杭基礎貯蔵構造物の被害の進展状況を地震時行動調査によって把握することができた。既にわかっている被害状況と合わせて考察すると以下のようにまとめることができる。

基礎の大きな変位は最大加速度の以前に生じた可能

性が高い。噴砂現象は最大加速度の発現時期には既に確認されており、有効応力解析と整合する。また、貯蔵構造物の傾斜は鋼性管の破断と時期を同じくすると考えられるので、液状化状態での主要動後の揺れで杭の破壊が進展した可能性が考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会新潟震災調査委員会編：昭和 39 年新潟地震災害調査報告書, 1966.6.
- 2) 森 伸一郎, 沼田 淳紀, 三輪 滋, 柴田 登：1993 年北海道南西沖地震における液状化調査, 土質工学会北海道支部技術報告集, No.34, pp.64-73, 1993.2.
- 3) 森 伸一郎, 沼田 淳紀, 三輪 滋：1993 年北海道南西沖地震における液状化の特徴, 第 29 回土質工学研究発表会発表講演集, pp.1005-1008, 1994.6.
- 4) 地盤工学会 1993 年地震災害調査委員会：10 章 産業施設の被害, 地盤工学会, pp.406-419, 1997.11
- 5) 森 伸一郎, 沼田 淳紀：1993 年北海道南西沖地震におけるシルト質浚渫埋立土層の液状化, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.1409-1410, 1994.9.
- 6) 森 伸一郎, 沼田 淳紀, 関 宝琪：液状化した埋立シルト地盤における杭基礎の被害, 第 33 回地盤工学研究発表会講演集, pp.815-816, 1998.7
- 7) 森 伸一郎, 沼田 淳紀：杭基礎の地震被害における杭頭部被害形態の考察, 土木学会四国支部第 4 回技術研究発表会講演概要集, pp.288-289, 1998.5
- 8) 関 宝琪, 森伸一郎, 沼田淳紀：函館港の軟弱地盤とその近傍における地震動の比較, 土木学会第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.185-188, 1997.7
- 9) 関 宝琪, 森 伸一郎, 沼田 淳紀：函館港埋立地盤における 1993 年北海道南西沖地震の際の地震動推定, 第 33 回地盤工学研究発表会講演集, pp.817-818, 1998.7
- 10) 日本建築学会：建築基礎構造設計規準・同解説, 474pp., 1961.11
- 11) 日本建築学会：建築基礎構造設計規準・同解説, 663pp., 1974.11