

埋立地に建つ杭基礎構造物の地震による最終移動量並びに最終移動方向の測定 —兵庫県南部地震の場合—

大岡 弘¹・立川博啓²

¹ 正会員 工博 建設省建築研究所 地震防災研究官(〒305 茨城県つくば市立原1番地)

² 正会員 工修 (株)藤木工務店 技術研究所(〒183 東京都府中市武蔵台1-2-1)

本土側埋立地に建つ5つの構造物、並びに、人工島埋立地に建つ8つの構造物、計13棟の支持杭基礎構造物に的を絞り、杭傾斜計調査を主とする「構造物の地震による最終移動量並びに最終移動方向の測定」を実施した。その結果、構造物の最終移動に関する埋立土層内の杭体の平均的な残留変形角(D_p/H)と、護岸移動の影響を考慮した距離(X/D_p)の間には有効な関係があること、また、「ポートアイランド及びその周辺」と「深江浜及びその周辺」では、後者の地区の方が杭体の平均残留変形角が大きく、内陸に到っても減衰しないこと、さらに、地震後、継続使用可能な構造物の場合、杭体の平均残留変形角は、おおむね2%程度、または、それ以下であることが分かった。

Key Words: building shift, building tilt, soil liquefaction, lateral spreading, reclaimed land, pile foundation, pile inclinometer, permanent deformation, Hyogoken-Nambu earthquake

1. はじめに

兵庫県南部地震でみられた特徴的現象の一つは、重力式護岸の顕著な側方移動¹⁾や液状化した埋立土層の大変形¹⁾によって生じたと思われる、杭基礎構造物の側方移動現象である。ここでは、護岸に極めて近接して建つ本土側埋立地の5つの構造物、並びに、人工島埋立地に建つ護岸から少し離れた内陸部の8つの構造物、計13棟の支持杭基礎構造物に的を絞り、それらの構造物の地震による最終水平移動量、最終水平移動方向、並びに、それらと立地条件の関係について報告する。ただし、第一筆者が主体的に調査に係わったのは、このうちの9棟のみであり、また、ここで言う構造物の最終水平移動量とは、基礎スラブ(フーチング)底面位置、すなわち、杭頭接合部位置における構造物の最終水平移動量であり、杭体の杭頭位置における最終水平移動量であって、上部構造物の傾斜による側方変位を含みぬものであることを、最初にお断りしておきたい。

2. 地震による構造物の最終水平移動ベクトルの測定方法

地震による構造物の最終水平移動量並びに最終水平移動方向の測定は、主に、杭傾斜計調査²⁾によって求めて

いる。ただし、後述する調査物件、PIZとNISの2つだけは、縮尺1/6000並びに1/5000の地震前後の航空写真を用いた測量によって求めた。杭傾斜計は、杭中空部内壁面に内接し、直交2方向の傾斜角を同時に測定できる挿入式のもので、兵庫県南部地震後、桂、社本、谷口らによって開発されたSC式杭傾斜計、並びに、「建築基礎における液状化・側方流動対策検討委員会」(略称: BTL委員会、委員長: 時松孝次東工大教授)が開発したBTL式杭傾斜計の2種類を使用している。

3. 杭傾斜計による最終水平移動ベクトル測定の対象物件

杭傾斜計による構造物の最終水平移動量測定物件は、ポートアイランドおよびその周辺、並びに、深江浜およびその周辺に求めている。というのは、ポートアイランドでは、G.L. -32m、-83mの各深度において、また、深江浜ではG.L. -33mの深度において、それぞれ極めて価値のある強震加速度記録が得られており、今後の解析を実施する上で好都合であると思われるからである。

建設省が関与した杭傾斜計を用いた調査物件の一覧を、上記両地区に分けて、表-1並びに表-2にそれぞれ示す。

●印を付したものが、筆者の一人が主体的に係わった調査物件である。

表-1 建設省が関与したポートアイランド及びその周辺の調査物件

調査物件	建物階数 (階)	調査場所	杭傾斜計 の型式
DAI	7	神戸市中央区	SC式
●KIT	2	ポートアイランド	SC式 BTL式
TAI	平屋	ポートアイランド	SC式
●12B	4	ポートアイランド	SC式 BTL式

表-2 建設省が関与した深江浜及びその周辺の調査物件

調査物件	建物階数 (階)	調査場所	杭傾斜計 の型式
HIG	4	神戸市東灘区	SC式
●KOB	3	神戸市東灘区	SC式
●TOB	2	神戸市東灘区	BTL式
MEI	3	神戸市東灘区	BTL式
●TOW	11	芦屋市臨海部	SC式

4. 航空写真測量による最終水平移動ベクトル測定の対象物件

航空写真測量による構造物の最終水平移動量測定は、ポートアイランドの東西両岸から250m～320mほど離れた2つの構造物を選び実施した。構造物の最終水平移動ベクトルは、構造物周囲の地表面の最終水平移動ベクトルと、移動量、移動方向ともほぼ等しい結果となった。

表-3 航空写真測量による調査物件

調査物件	建物階数 (階)	調査場所	計測精度の 標準偏差
●PIZ	4	ポートアイランド	15cm～
●NIS	2	ポートアイランド	18cm

5. 杭基礎構造物の移動形態の分類

表-4に、調査物件の杭基礎および立地条件の諸元を示す。

埋立地に建つ杭基礎構造物の地震による最終移動量、並びに、最終移動方向を支配する要因としては、以下の3者が考えられる。

- (a)上部構造と地表非液状化層に働く慣性力
- (b)主要動終了直後の液状化地盤の残留変形
- (c)地震後も進展する液状化地盤の側方流動変形

構造物を移動させ得る上記3つの原動力(driving force)と、護岸との位置関係等の立地条件が相まって、構造物の最終移動ベクトルが決定されると考えられる。

今回得られた構造物の移動方向に関する調査結果を簡潔に記すと、以下ようになる。

(A) 構造物の最終移動方向と構造物の傾斜方向の関係

表-4 地盤移動等による原動力を受けた構造物の移動形態の分類

調査物件	杭種	杭径 (mm)	立地条件 (近接護岸数)	埋立土層 厚(m)	構造物の 移動形態
DAI	ベテスル杭	430	護岸極近接 (1)	5	Type A
	PHC杭	450			
KIT	PHC杭・A種	450	(北端) 中央部	17	Type A
TAI	PC杭・A種	400	埠頭 (3)	20	Type B
12B	鋼管杭	500 ～600	埠頭 (3)	21	Type B
PIZ	SC杭+ PHC杭B種	500	(東半) 中央部	18	Type A
NIS	PHC杭	500	(北西端) 中央部	17	Type A
HIG	PHC杭・A種	350	(島)中央部	13	Type C
KOB	PC杭・A種	400	護岸極近接 (2)	8	Type A
TOB	鋼管杭	406.4	(2)	15	Type A
MEI	PC杭・A種	450	(北半)中央部	9	Type C
TOW	PC杭・A種	500	護岸極近接 (3)	8	Type C

■最終移動方向と傾斜方向とがほぼ一致する構造物

⇒ KOB、MEI

■最終移動方向と傾斜方向とがほぼ直交する構造物

⇒ KIT、12B、HIG、TOW

(B) 構造物の最終移動方向と立地条件の関係

■最終移動方向が最近接護岸線にほぼ直交する構造物

⇒ DAI、KIT、PIZ、NIS、
KOB、TOB

■最終移動方向が最近接護岸線にほぼ平行な構造物

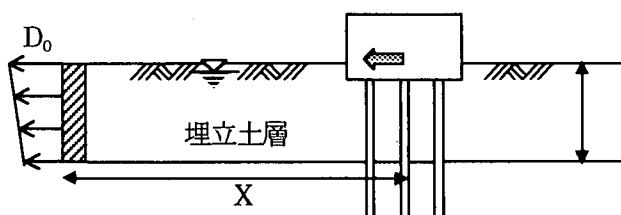
⇒ TAI、12B、HIG、TOW

上記の(B)のうち、最終水平移動方向が最近接護岸線にほぼ直交している構造物の場合は、最近接護岸の存在する側と反対側に、護岸前面の水底位置より高い地表面を有する大質量の地盤が存在するため、構造物直下の流動地盤は、護岸線に直交する方向に流動変形せざるを得ないか、あるいは、背後の大質量の流動地盤によって、護岸の方向に押し出されざるを得なくなる。すなわち、driving force の方向と向きが決まってしまう。これを“Type A”とする。一方、最終水平移動方向が最近接護岸線にほぼ平行であった構造物の場合には、TAI、12Bの2物件のように3方向が護岸に囲まれた埠頭に建っているようなケースで、最近接護岸と平行な護岸が、最近接護岸の反対側に存在するため、両者の存在によるdriving force が互いに相殺され、結果として、それらの護岸に直交するもう一つの護岸方向に構造物が移動している。これを“Type B”とする。

いま一つの形態が“Type C”であるが、このうち、TOWは、上部構造と地表の非液状化層に働く慣性力の影響に支配されて移動した公算が高く、また、HIG並びにMEIは、ポートアイランドよりはるかに規模の小さな人工島の内陸部に位置することから、主要動終了直後の液状化地盤の残留変形に支配された可能性がある。以上の構造物の移動形態の分類を、表-4に添え書きした。

6. 杭基礎構造物の最終水平移動量と立地条件の関係

以下の考察においては、地盤条件や杭種はひとまず不問に付し、立地条件を端的に表現し得る物理量のみを用いることにする。また、使用する各記号は、図-1に示す内容をそれぞれ意味することとする。



- D_B : 杭基礎構造物の地震による最終水平移動方向への最終移動量 (m)
- D_B^* : 杭基礎構造物の地震による極近接護岸線に直交する方向への最終移動量 (m)
- D_0 : 護岸線頂部の水平移動量 (m)
- H : 埋立土層厚 (m)
- X : 杭基礎構造物の最終水平移動方向延長線上における構造物中心部と護岸外壁面間の水平距離 (m)
- X^* : 杭基礎構造物の極近接護岸線に直交する方向における構造物中心部と護岸外壁面間の水平距離 (m)

図-1 各記号の説明図

KOB、DAI、TOWの3つの構造物は、すべて本土側埋立地に位置し、構造物中心部から最近接護岸までの距離は、25m以内の範囲に入る。すなわち、構造物は、護岸に極めて近接して建っている。3物件は、杭種はすべてコンクリート杭、杭径も400～500mmと、相互比較可能な条件がそろっている。

図-2は、縦軸に D_B^*/H をとり、横軸に X^*/D_0^2 をとって、調査結果をプロットしたものである。杭体の変形は、ほぼ全層にわたって液状化が生じたと判断される埋立土層の最下面以浅で生じているケースが多いようなので、図-2の縦軸の物理量は、埋立土層内の杭体の平均的な残留変形角と読み替えることができる。一方、横軸の物理量は、護岸の水平移動量が大いほど、また、護岸に構造物が近いほどその値が小さくなるので、護岸の側方移動に起因する地盤変形の影響度をある程度表現した尺度と考えることができる。その意味で、以下、「護岸

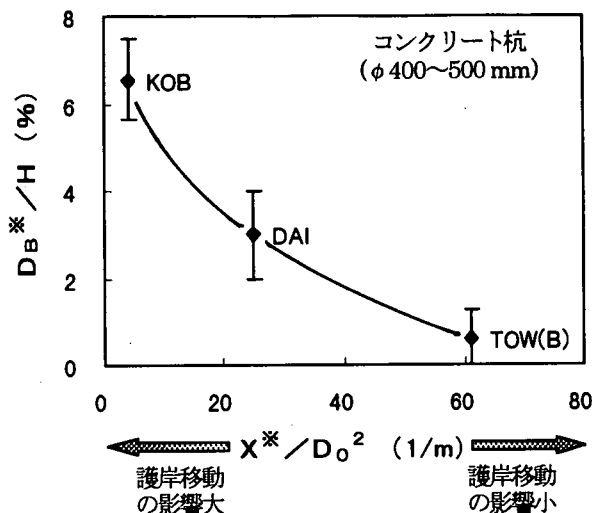


図-2 護岸に極近接した構造物の D_B^*/H と X^*/D_0^2 の関係

移動の影響を考慮した距離」と呼ぶことにする。

図-2を見ると、構造物の階数の他は条件のそろった3つの構造物の調査結果がうまく整理できており、横軸として X^*/D_0^2 なる物理量を用いた有効性が、ある程度示されていると判断される。

前述のTOW以外は、KOB、DAIとも $D_B^*=D_B$ 、 $X^*=X$ なので、この2者とTOWの本来の移動方向に関するデータを含め全物件の調査結果をプロットしたものが、図-3、図-4の両図である。ただし、図-2と異なり、横軸は対数目盛である。

図-3は、ポートアイランド地区と深江浜地区に分けてデータ点を黒塗り、白塗りでそれぞれ区別してある。これを見ると、結果が4つに大別できることが分かる。すなわち、深江浜地区の「構造物の移動形態」Type Aグループ、ポートアイランド地区のType Aグループ、Type Bグループ、そして、深江浜地区のType Cグループとにである。Type名をデータ点の横に添え書きした。

図-3から、(1) $D_B^*/H \sim X^*/D_0^2$ 関係が右下がりの曲線であること、(2) 深江浜地区の全データが、ポートアイランド地区の全データより上位に位置すること、(3) ポートアイランド地区のデータが、Type AグループとType Bグループに明確に区別できること、(4) 深江浜地区のデータでは、Type AグループとType Cグループが連続分布となること、が分かる。

図-4は、地震後、上部構造の傾斜角が $1/100$ radを超え使用不能、または、何らかの理由で解体された構造物と、傾斜角が $1/250$ radより小さく、地震後も継続使用が可能であった構造物に分けて色塗りしてある。データ点の横に添え書きした()内の数字が、上部構造の傾斜角(rad)を表す。この図から、地震後、構造物が継続使用できるか否かの D_B^*/H の限界値は、護岸移動の影響を考慮した距離のいかんにかかわらず、2%程度であることが分かる。

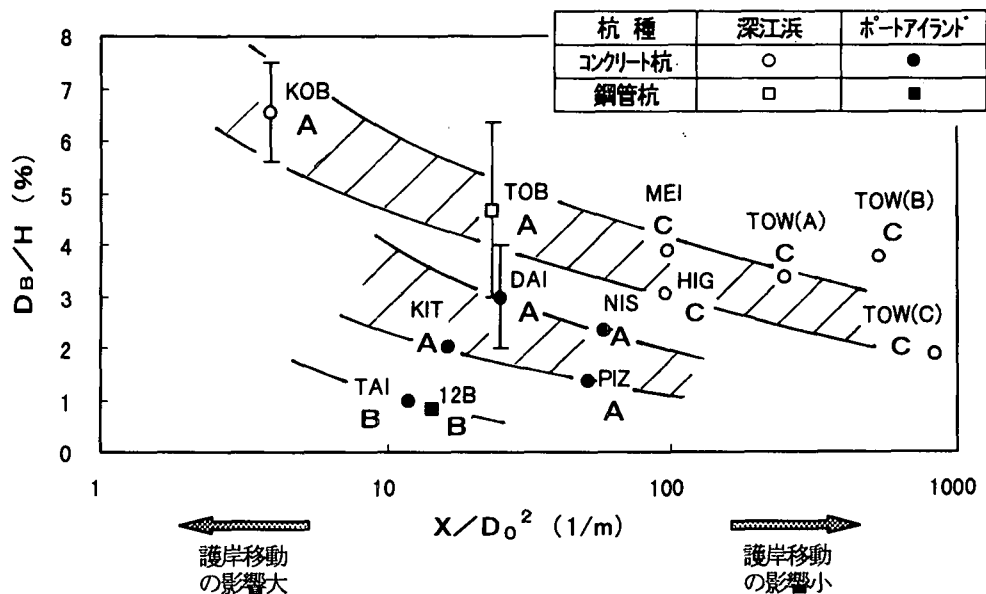


図-3 調査地区と構造物の移動形態が $D_B/H \sim X/D_0^2$ 関係に及ぼす影響

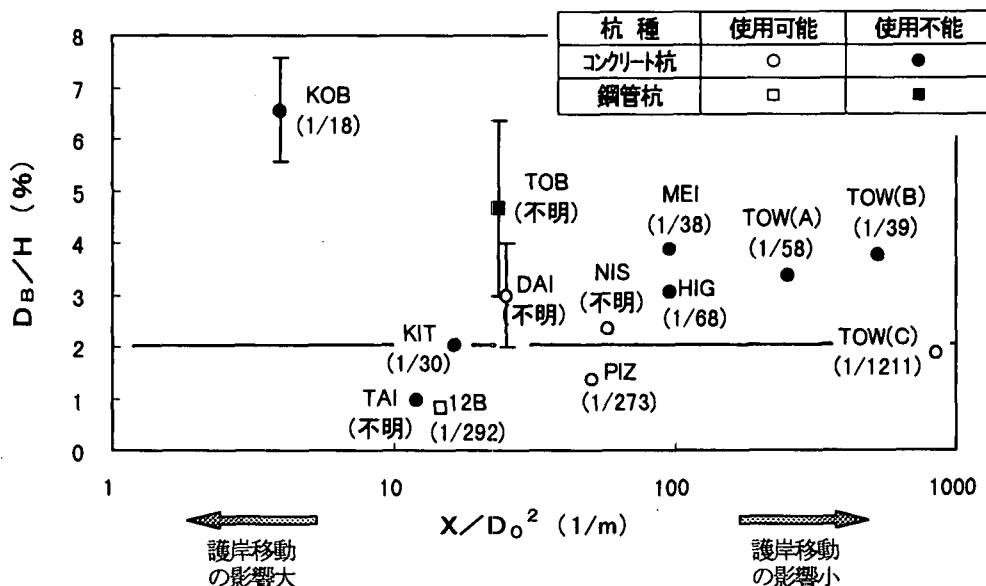


図-4 地震後継続使用できるか否かの限界 D_B/H の値

7. 結論

埋立地に建つ 13 棟の杭基礎構造物の地震による最終水平移動量、並びに、最終水平移動方向を測定した結果、以下のことが分かった。(1)構造物の最終移動に関する埋立土層内の杭体の平均的な残留変形角 (D_B/H) と、護岸移動の影響を考慮した距離 (X/D_0^2) の間には、有効な関係がある。(2)「ポートアイランド及びその周辺」と「深江浜及びその周辺」では、後者の地区の方が杭体の平均残留変形角が大きく、前者の地区と比較して内陸に到っても減衰しない。(3)三方向を海に囲まれた埠頭上の構造物の場合、平行する 2 つの護岸の存在によって生じる原動力 (driving force) 同士が相殺し合い、構造物は残りの護岸の方向に移動する。(4)地震後継続

使用可能な構造物の場合、杭体の平均残留変形角は、おおむね 2 % (1/50 rad) 程度、または、それ以下である。

謝辞：本報文中で扱った全調査物件の関係者各位に、記して深謝申し上げます。

参考文献

- 1) Ishihara, K., Yoshida, K. and Kato, M. : Characteristics of lateral spreading in liquefied deposits during the 1995 Hanshin-Awaji earthquake, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 23-55, 1997.
- 2) Oh-oka, H., Onishi, K., Nanba, S., Mori, T., Ishikawa, K., Koyama, S. and Shimazu, S. : Liquefaction-induced failure of piles in 1995 Kobe earthquake, Proc., 3rd Kansai International Geotechnical Forum (KIG Forum '97), Kobe, JGS, pp. 265-274, 1997.