

港湾における埋立地の簡易な液状化予測手法の報告

江崎 圭祐

四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 調査課 (〒760-0017 香川県高松市番町1-6-1)

東北地方太平洋沖地震津波を踏まえ、全国的に港湾における地震・津波防災対策のあり方について再検討することが喫緊の課題となっている。その中で、復旧・復興に重要な役割を果たすと考えられる港湾ふ頭用地において、液状化の被害程度や液状化する箇所の機能に応じた対応方針の検討を行うことは非常に重要である。

そこで、土質情報が不足している港湾ふ頭用地において、簡易な液状化予測・判定手法として動的貫入試験を用いた液状化の評価を行った。

キーワード 液状化、埋立地、動的貫入試験、物理探査

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震津波は、港湾及び市街地に大きな被害をもたらしたことから、全国的に港湾における地震・津波防災対策のあり方について再検討することが喫緊の課題となっている。こうした中、四国では逼迫する南海トラフで発生する地震による被害の軽減対策が急がれ、港湾施設においては機能の維持・早期復旧の検討が必要とされている。しかし、地震被災後の復旧・復興の拠点となる港湾施設のふ頭用地は埋め立てて造成されているため、広範囲に液状化の発生が想定される。そのため、重要な施設と考えられる港湾ふ頭用地を選定し、液状化の被害程度や液状化する箇所の機能に応じた対応方針の検討を行うことは非常に重要である。しかし、全ての埋立地において液状化判定に必要な土質情報が揃っていないわけではないため、そのような埋立地における対応が求められている。

本論文は、土質情報が不足している埋立地において、簡易な液状化予測・判定手法として短期間・低コストで実施できる動的貫入試験を用いた液状化の評価を行った結果について報告する。

2. 港湾における液状化予測手法

港湾における埋立地の液状化の予測判定は、基本的には図-1に示した手順により行う。対象とする地盤のN

値とその土層を構成する土の粒度を用いて液状化の予測・判定を行い、これにより液状化の有無の判定が困難となった場合には、繰返し三軸試験による予測・判定を行う。

本論文では、粒度による判定から「液状化の可能性あり」となった土層について、等価N値と等価加速度を用いた判定方法を紹介する。

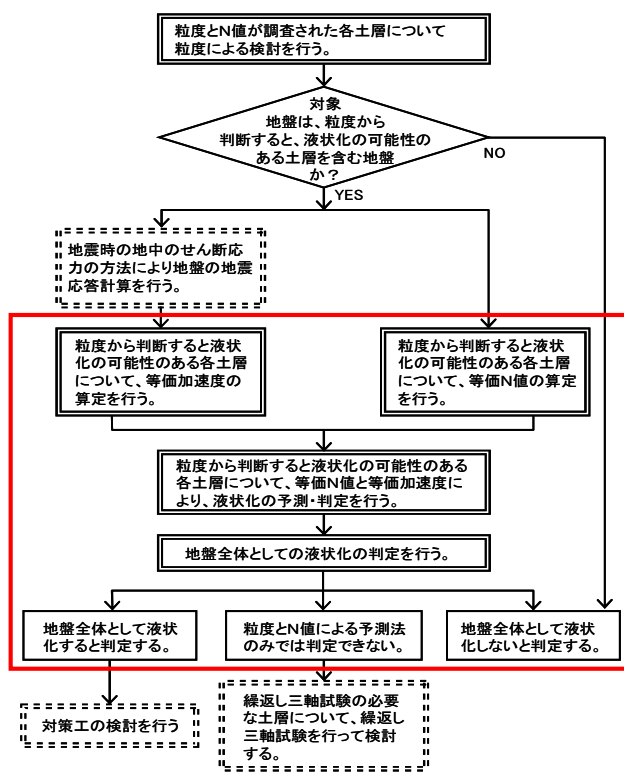


図-1 港湾における液状化の予測・判定の手順

対象土層における等価N値と等価加速度による判定は、**図-2**に示すI～IVの区分分けを行い、I～IVに応じて液状化の予測・判定を行うものである。

(1) 等価N値

等価N値とは、各土層のN値を有効上載圧力が65kN/m²の場合の同一の相対密度等の土層のN値に換算したものであり、式(1a)により算定する。

$$(N)_{65} = \frac{N - 0.019(\sigma'_v - 65)}{0.0041(\sigma'_v - 65) + 1.0} \quad (1a)$$

(N)₆₅ : 等価N値

N : 土層のN値

σ'_v : 土層の有効上載圧力 (kN/m²)

等価N値の算定には、各土層のN値が必要となる。

(2) 等価加速度

等価加速度とは、地盤の地震応答計算により求まる最大せん断応力の時刻歴を用いて、式(1b)により算定する。

$$\alpha_{eq} = 0.7 \cdot \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} \cdot g \cdot \frac{1}{c_a} \quad (1b)$$

α_{eq} : 等価加速度 (Gal)

τ_{max} : 最大せん断応力 (kN/m²)

g : 重力加速度 (980Gal)

c_a : 波形補正係数

σ'_v : 有効上載圧(kN/m²)

地盤の地震応答計算を行うには、N値、Vs(せん断波速度)等の入力パラメータが必要となる。

(3) 等価N値の補正

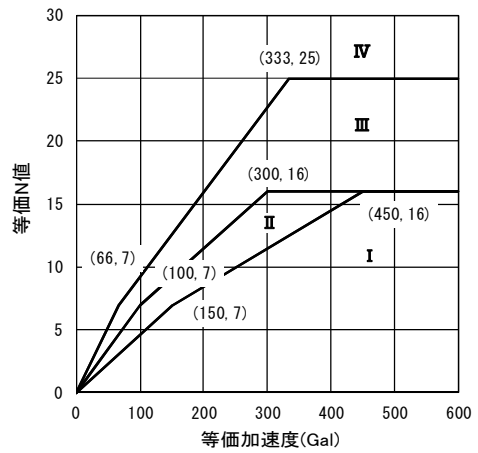
細粒分(粒径が75μm以下の成分)含有率(Fc)が5%以上のものについては、塑性指数(Ip)による等価N値の補正を行う。

- ① Ipが10未満または得られていない場合、あるいはFcが15%未満
- ② Ipが10以上20未満、かつ、Fcが15%以上
- ③ Ipが20以上、かつ、Fcが15%以上

以上より等価N値の補正には、FcとIpが必要となる。

3. 簡易な液状化予測手法の提案

前章で述べた液状化予測・判定手法にはボーリング調査から得られる詳細な土質情報として、N値、Fc、Ipが必要となるが、全ての埋立地において詳細な土質情報が揃っているわけではない。そのような埋立地において新たにボーリング調査を実施しようとした場合、以下の制約により迅速な調査を実施することができなかった。



上記に示す範囲	粒度とN値による液状化の予測	粒度とN値による液状化の判定
I	液状化する	液状化すると判定する
II	液状化する可能性が大きい	液状化すると判定するか、繰返し三軸試験により判定する
III	液状化しない可能性が大きい	液状化しないと判定するか、繰返し三軸試験により判定する 構造物に特に安全を見込む場合には、液状化すると判定するか、繰返し三軸試験により判定する
IV	液状化しない	液状化しないと判定する

図-2 等価N値と等価加速度による判定

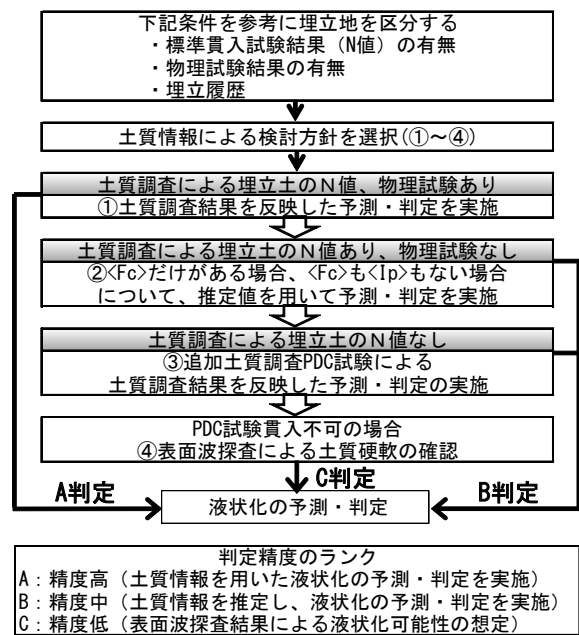


図-3 土質情報による検討方針フロー

- i 用地の立ち入りに関する制約
- ii 調査に要する期間の用地占有に関する制約
- iii 調査費用の制約

このため、埋立地における液状化の判定は、**図-3**に示すように土質情報の有無に応じ検討方針を選択することとし、各検討方針における判定精度をA～Cでランク分けした。ここで、**図-3**の①ボーリング調査によるN値、Fc、Ipがある場合はA判定とし、②N値があり、Fc、Ipがない場合、もしくはN値もない場合は、何らかの推定が

必要なケースとしてB判定とした。追加の土質調査には短期間・低コストで実施できる動的貫入試験を用いることを検討した結果、本検討では原位置試験として従来のボーリング調査に比べ工程が約1/4程度で実施でき、ボーリング調査の液状化判定と整合の良いピエゾドライブコーン試験（以降「PDC試験」と記述）を用いることとした。PDC試験はNETIS（No.TH-100032-A）に登録された技術であり、既往の研究成果より、PDC試験のNd値（打撃回数から求めた貫入抵抗）及びFcの推定値と、実際のボーリング調査のN値及びFcについて相関が確認されている。

PDC試験では、礫や玉石により貫入時に反発し、あるいは貫入できてもロッド変形により試験の実施ができなくなる場合がある。貫入不可となる土層は礫や玉石のため、液状化しないと判断できるものの、液状化しない土層が深部まで連続するか不明である。ここで、埋立地における液状化地盤の評価を行うためには、貫入不可となる土層が深部まで連続しているのか、軟弱な層が出現するのか等の土質状況を推定する必要があった。そこでPDC試験が貫入不可な場合は、C判定として表面波探査を用い、S波速度を対比させて貫入不可の硬い地盤が連続しているのか、地盤中に軟らかい層が位置しているのかを推定することとした。

(1) PDC試験の評価

PDC試験結果の適用の妥当性について、本検討では既往ボーリング調査の近場にPDC試験を行い、PDC試験のNd値及びFcの推定値と、既往ボーリング調査のN値及びFcについて整合の確認を行った。PDC試験は連続データでの数値評価となるため、計測深度ごとのデータから既往ボーリング調査の標準貫入試験の区間深度や試料採取の区間深度の数値を抽出したものを加重平均し、1m区間評価として比較を行った。比較例として、既往ボーリング調査結果、PDC試験の連続データ、PDC試験の1m区間評価の比較結果を図-4に示す。

N値の妥当性については、図-4（左図）に示すようにPDC試験のNd値の1m区間評価（△）と既往ボーリング調査のN値（○）はほぼ同じ結果が得られた。

Fcの妥当性については、図-4（右図）に示すように深度方向へのPDC試験の1m区間評価（△）は、既往ボーリング調査（○）とほぼ同じ結果が得られた。

以上のことから、ボーリング調査データがない箇所については、PDC試験結果によるNd値およびFcの推定値を適用することが可能であると判断した。

(2) 液状化判定用土質定数の設定

PDC試験によるFc推定値は、大きく2パターンの傾向があり、深度方向にほぼ一定の傾向が見られるパターンIとある程度ばらつきのあるパターンIIがある。PDC試験は図-4（●）に示すように1打ごとに連続したデー

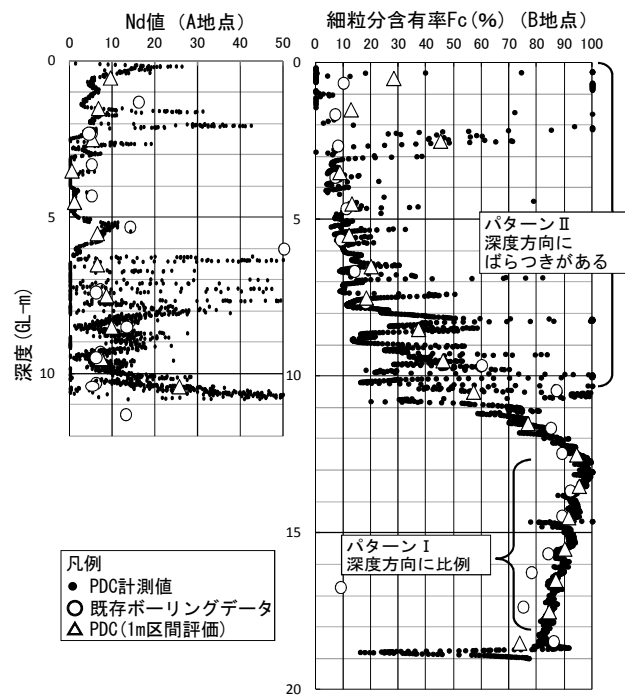


図-4 PDC計測値からのNd値とFcの比較

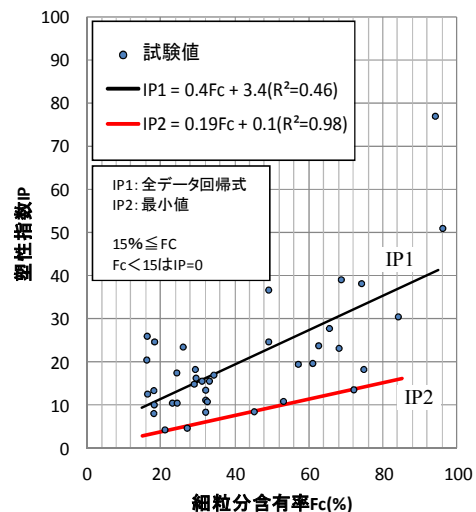


図-5 FcとIpの関係式

タを得られるため、局所的に観測結果がばらつく場合がある。また港湾の液状化判定はN値で行うため、1mピッチの判定を行うことが多い。このことからFcの推定には統計的処理が必要であると考え、本検討ではパターンIIにおいて、区間加重平均値より標準偏差を差し引いた値を採用した。

また、IpについてはPDC試験から直接計測できないため、四国港湾地域の既往データよりFcとの相関から算出した。図-5に四国港湾地域のFcとIpの関係を示す。Ipの推定方法については、四国港湾地域で収集したFcとIpの関係から、安全側（液状化しやすい方）に評価するものとして、最小式（ $Ip = 0.19 \times Fc + 0.1$ ）を採用することとした。

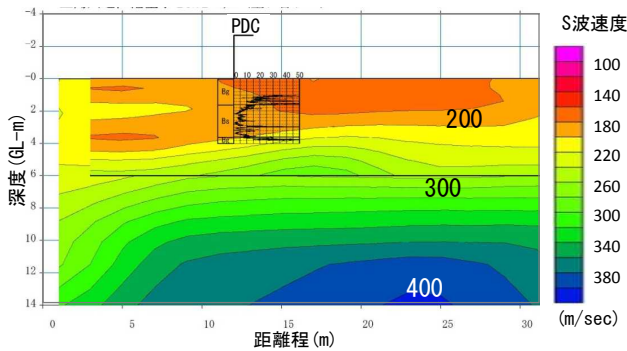


図-6 表面波探査解析結果S波分布 (C地点)

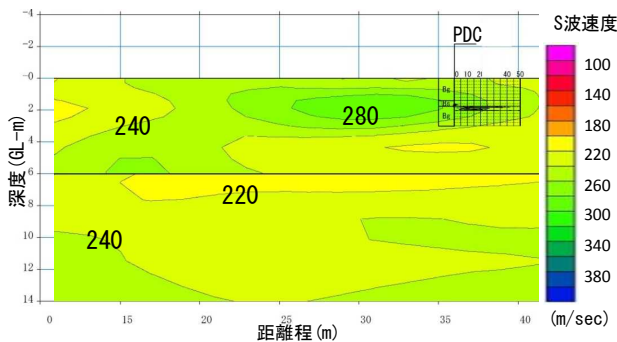
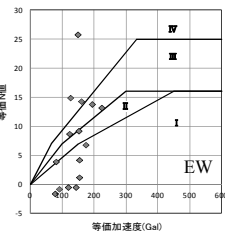


図-7 表面波探査解析結果S波分布 (D地点)

表-1 液状化の予測・判定結果の例

No.	土層名	判定深度 (GL.m)	N値	Fc	Ip	等価 N値	等価 加速度	判定結果	
								EW	FL
1	Bg	0.50	19	0.0	0.0	25.8	149	IV	2.00
2	Bg	1.56	7	0.0	0.0	8.7	123	III	1.12
3	Bg	2.48	8	0.0	0.0	9.2	152	II	0.97
4	Bs	3.50	4	0.2	0.0	4.2	154	I	0.38
5	Bs	4.50	1	2.7	0.0	1.2	154	I	0.11
6	Bs	5.50	8	2.0	0.0	6.8	174	I	0.55
7	Bcs	6.50	0	10.6	0.0	-0.5	143	I	-0.04
8	Bcs	7.50	0	5.9	0.0	-0.5	119	I	-0.06
9	Bcs	8.50	0	7.6	0.0	-0.8	91	I	-0.12
10	Bcs	9.50	0	16.3	3.2	-1.6	78	I	-0.29
11	Bcs	10.50	5	8.7	0.0	3.9	81	II	0.68
12	Bg	11.50	21	4.9	0.0	14.9	126	IV	2.00
13	Bg	12.50	21	4.9	0.0	14.3	160	IV	1.63
14	Bg	13.50	21	4.9	0.0	13.8	194	III	1.29
15	Bg	14.50	21	4.9	0.0	13.2	224	III	1.06



(3) PDC試験貫入不可深の評価

PDC 試験貫入不可となった深度部分での土層の硬軟の推定に表面波探査を用いることの有効性を確認した。

表面波探査により得られるS波速度は、一般的に硬い層で速く、軟らかい層で遅くなる。図-6、図-7にPDC試験結果と表面波探査解析結果の重ね合わせ図を示す。C地点では、PDC試験の結果より深度3.8mまで砂質土及び砂礫であることが推定されており、貫入不可の深度3.8mより深部ほどS波速度が大きい。これによりPDC試験の貫入不可より深部は、深度3.8mで確認した砂礫以上の締めまり具合を有する土質が深度14mまで水平に分布していることが推定できた。よって、PDC試験の貫入不可より深部は液状化しにくいという判断ができる。

一方、D地点ではPDC試験が貫入不可となった深度より深部にS波速度の遅い層が存在していることがわかった。この場合、表面波探査結果のみではなく、周辺ボーリング及びPDC試験結果の情報も活用し、液状化発生

の可能性について想定する必要がある。

これらの事例から、PDC 試験から得られる情報の補足として、表面波探査を用いることにより PDC 試験貫入不可となった深度部分での土層の硬軟の推定が可能であることが確認できた。

4. 簡易な液状化予測・判定手法による計算例

表-1にPDC試験箇所の区間ごとの結果をまとめた。各層において、本手法より求めたN値、Fc、Ipを用いて式(1a)と式(1b)より等価N値と等価加速度を算定した。各層にて算定した等価N値と等価加速度を図-2の予測判定図にプロットし、I～IVの予測判定を行った。本検討においては、各層の判定IもしくはIIの合計数を求め、以下のようにPDC試験を行った地点の液状化を判定した。

- ・判定IもしくはIIが3点以上：液状化しやすい
- ・判定IもしくはIIが3点未満：液状化しにくい

表-1の地点においては、判定IもしくはIIが9点あるため、この地点は液状化しやすいという判断となる。

5. まとめ

本検討で得られた主要な知見を以下に示す。

- ① PDC試験を行うことにより、液状化判定用の土質情報が不足する箇所においても、速やかに調査実施でき、埋立地における液状化地盤の評価を迅速に実施できた。
- ② PDC試験で深部まで貫入できなかった埋立地についても、表面波探査を用いることで、PDC貫入不可の深部における地盤の硬軟を推定できた。

港湾における液状化予測・判定手法には、ボーリング調査から得られる詳細な土質情報として、N値、Fc、Ipが必要となる。しかし、全ての埋立値において、詳細な土質情報が揃っているわけではない。また、場合によっては新たにボーリング調査を実施できない状況も考えられる。そのような状況において、本論文で報告したPDC試験と表面波探査を複合した調査手法は、簡易ではあるが有効な判定手法であると考えられる。

本手法が地震・津波に対する防災・減災対策の検討における基礎資料として活用されることを期待したい。

参考文献

- 1) 林ら (2013) : 動的貫入試験と表面波探査を用いた埋立地における液状化地盤の評価、第48回地盤工学研究発表会、2013.7(投稿中)。