

国際線エプロンにおける液状化対策工の改良効果確認について

国際線エプロン JV 天野 喜勝

キーワード：液状化対策、締固め砂杭、チェックボーリング

1. まえがき

国際線エプロンの事業においては、面積約 35ha という広大なエプロン範囲において、所要の耐震性能（表-1）が求められている。そこで実施設計期間（2006 年度）に、追加のボーリング調査を実施し、地盤改良の工法及び仕様を決定した。詳細については、第 3 回技術報告会（2007. 07. 13）において報告済みである。

上記で決定した仕様に対し、静的締固め砂杭工（SAVEコンポーザー）×5 台、振動締固め砂杭工（サンドコンパクションパイル）×10 台、変位低減型深層混合処理工（CDM-LODIC）×5 台を使用し、2007 年 4 月～2008 年 3 月までの約 1 年間昼夜施工を行い、ほぼエプロン全域の地盤改良を完了した。

本報文では、上記液状化対策工のうち締固め砂杭工の改良効果の確認方法、及び結果について報告する。なお、エプロン全体で平均長 L=10m の砂杭を約 13 万本、合計約 130 万 m の砂杭（φ70 cm）を打設している。図-1 に締固め砂杭打設状況を示す。



図-1 締固め砂杭打設状況

2. 対象地盤の土層構成

当該事業用地の土層構成は、地表から約 10m 程度に砂層の Bs, As1 層が分布し、その下部に粘性土の Ac2 層が層厚約 20m 程度で堆積している。Ac2 層については、粘性土としては比較的砂分の混入が多い上部（Ac2 上層）と、砂分の混入が少なくなる下部（Ac2 下層）の 2 層に分割できる。それ以深については、薄層の Asc 層が分布し、Asc 層以下は洪積層と判断した。

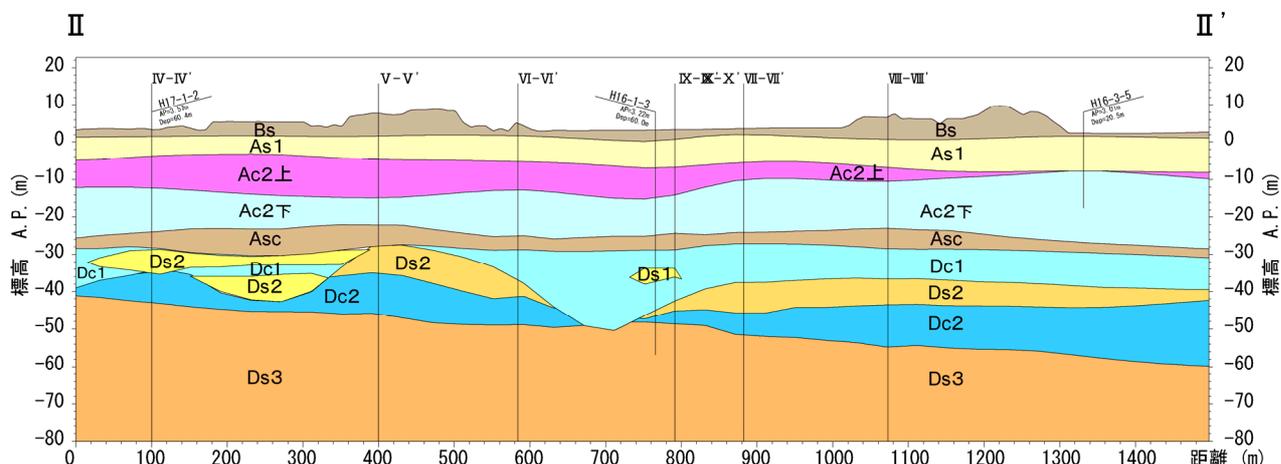


図-2 土層断面図

3. 液状化対策工の概要

3-1 液状化対策の基本思想

液状化対策は、液状化の可能性のあるBs層及びAs1層を対象に締固め砂杭工法を実施し、Ac2上層の上部に10m程度の非液状化層を設けることにより、地表面のエプロン施設に及ぼす影響を抑制する。

地震後の地盤ひずみと過剰間隙水圧の分布状況は、地盤の有効応力解析の結果をもって確認することとし、地震動が収束した後、過剰間隙水圧が消散していく過程での体積収縮（沈下）については、石原・吉嶺によって示された液状化後の体積ひずみの算出方法に従い、液状化後の沈下量を算出することとした。詳細については、第3回技術報告会（2007.07.13）における報告を参照されたい。

3-2 要求耐震性能と液状化の照査

本事業において、要求水準書¹⁾にて求められているエプロンの重要度別に空港土木施設の耐震設計指針（案）²⁾に従い、耐震性能（被害程度I～III）及び照査規準を整理すると表-1のように示される。

表-1 重要度ごとの耐震性能と照査規準¹⁾

対象施設	重要度	地震動のレベル	耐震性能	照査規準（許容被害状態）
南側エプロン	A	レベル1地震動	被害程度I	・軽微なひび割れの発生 ^{※1} ・エプロン表面の許容変形量を満足する ・エプロン基礎地盤が液状化しない ^{※2}
		レベル2地震動	被害程度II	・早期復旧可能な程度の残留変形量以下 ・エプロン表面に沈下や段差が若干発生し許容変形量を一部逸脱する
北側エプロン	B	レベル1地震動	被害程度II	・部分的な液状化 ^{※3} が発生する
		レベル2地震動	被害程度III	・エプロン表面に沈下や段差が発生し、許容変形量を逸脱する ・液状化が発生する

※1 軽微なひび割れの発生は、発生する平均ひずみレベルから推定する。

※2 液状化が発生しても地盤変状が小さく、施設（構造物）に与える影響が小さければ、規準を満たすものとする。

※3 深度的にみて対象となる施設（構造物）に与える影響が小さい液状化現象をいう。

上記の照査規準では具体的な数値が示されていないため、本事業では被害程度ごとの照査規準を以下のように考えて地盤改良の仕様を決定した。

【被害程度 I】

全てのボーリング地点においてBs層及びAs1層が液状化しないことを確認する。

【被害程度 II】

全てのボーリング地点においてBs層及びAs1層が液状化しないことを目指すが、平面的にみて部分的な液状化は許容する。

【被害程度 III】

全てのボーリング地点においてBs層及びAs1層が液状化することを許容する。

ここで、上記の”ボーリング地点で液状化する”とは、埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版）に示された等価N値と等価加速度による液状化判定（図-3）を深度方向1m間隔で実施し、2点が連続して液状化する（範囲I, II, III）と判定された場合、もしくは連続しなくても3点以上が液状化する（範囲I, II, III）と判定された場合と定義した。

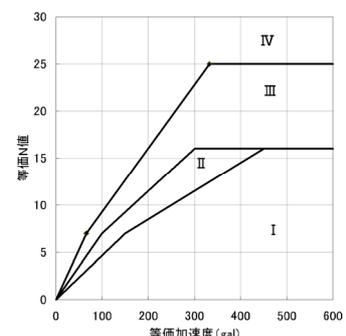


図-3 等価N値と等価加速度による判定

3-3 実施設計における改良ピッチ

前記の照査規準を用いて実施設計時に決定した締固め砂杭工法の改良ピッチ平面図を図-4 に示す。実際の施工は、図-4 に示される改良ピッチを満足する様に詳細な杭配置を設定した上で実施している。

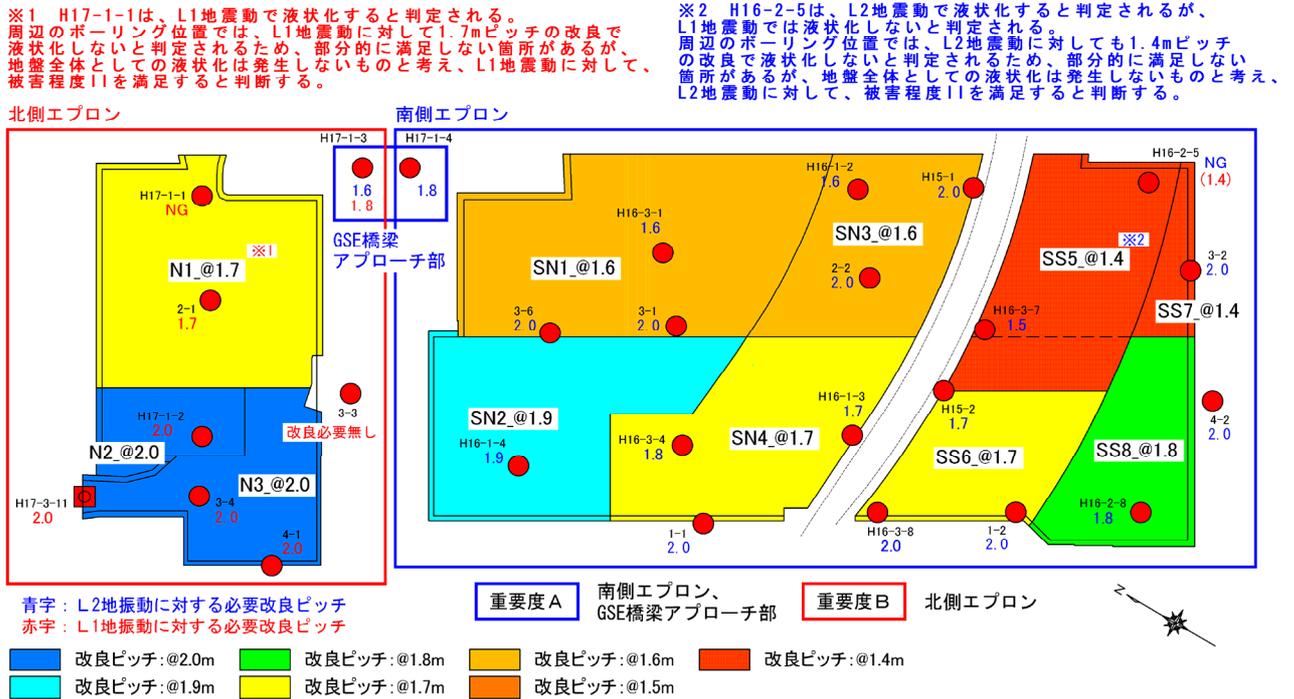


図-4 実施設計における改良ピッチ平面図

4. 改良効果の確認方法

4-1 チェックボーリング実施位置と改良効果確認フロー

地盤改良終了後の地盤が所定の耐震性能を満足していることを確認するために、チェックボーリングを実施し改良地盤の杭間N値を確認した。

なお、実施設計時に改良仕様の決定に用いた既存ボーリングは約 150m ピッチで実施されていたが、チェックボーリングは、その間を補うように概ね 70m~80m ピッチで実施した。ただし、改良率が大きいブロック及び実施設計時にNG判定となった箇所については重点実施施工箇所と考え、チェックボーリングピッチを概ね 50m~70m とした。

図-5 にチェックボーリング配置平面図を示す。このうち、青丸は実施設計時までにはボーリング調査が行われており、改良仕様の決定に用いたボーリングの近傍において改良効果の確認を実施した箇所を示す。また、赤丸は改良後地盤の耐震性能確認のために前記既存ボーリング箇所を補う様に配置した新規ボーリング箇所を示す。南側エプロン及び北側エプロン合わせて既存ボーリング箇所 22 箇所、及び新規ボーリング箇所 52 箇所の合計 74 箇所のチェックボーリングをエプロン内で実施した。

図-6 に改良効果の確認フローを示す。改良後地盤の耐震性能確認は、原則として実施設計時と同様、それぞれのボーリング位置での液状化判定を実施した後に被害程度の確認を行い、必要に応じて最終的には舗装の変形性能照査を行うフローとした。ここで、既存ボーリング近傍での実施箇所については、チェックボーリング実施後即座に改良効果の確認ができる様実施設計時の検討結果より目標 N 値を算出して、チェックボーリングで得られた杭間 N 値と比較するフローとした。

既存ボーリング (H18追加ボーリングを含む) は、約150mピッチで実施されており、その間を補うように、概ね70m~80mピッチで、チェックボーリングを実施。
 ただし、改良率が大きいブロック、及び詳細設計時にNG判定となった箇所については、重点実施箇所と考え、チェックボーリングピッチを概ね50m~70mとした。

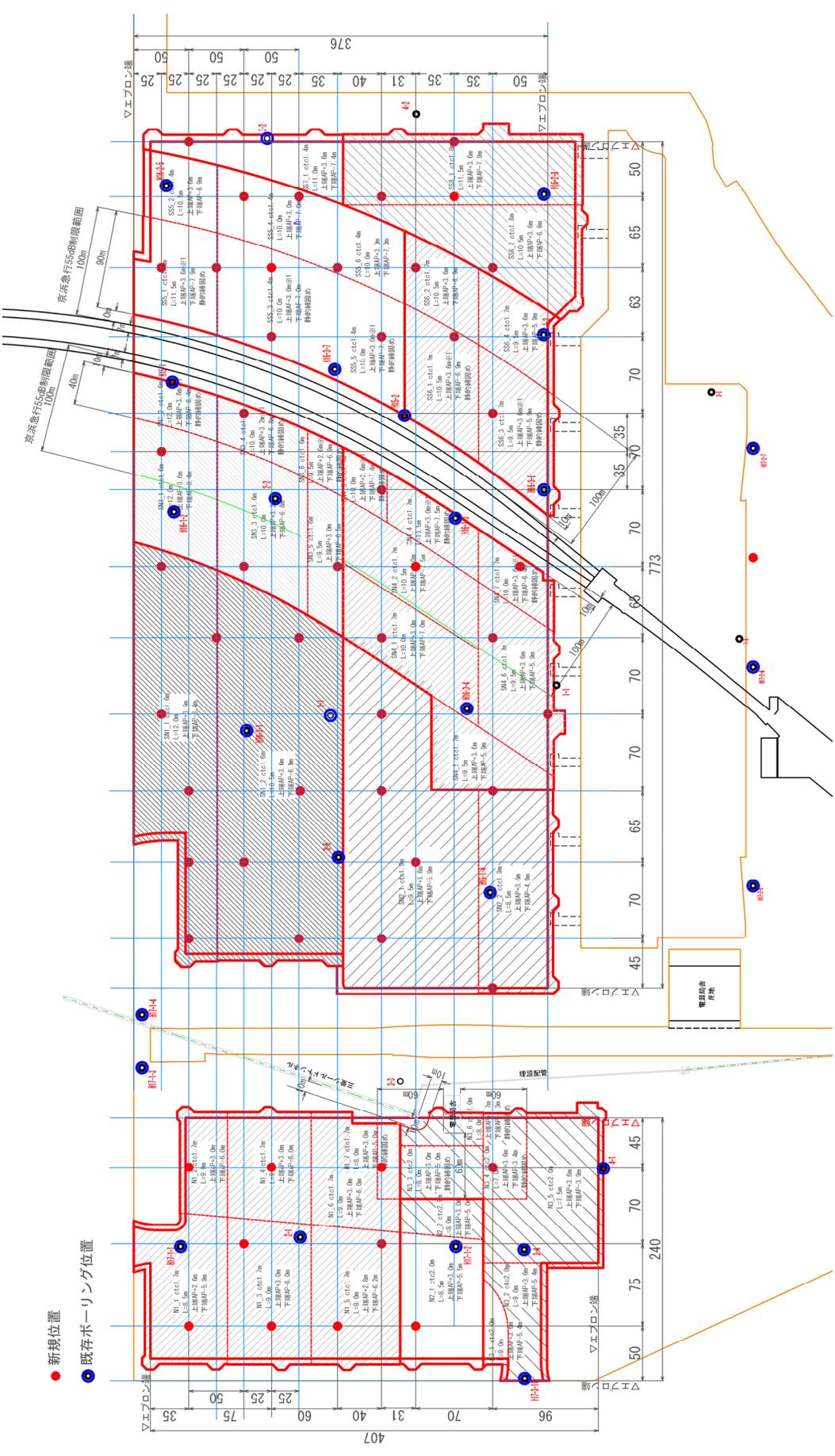


図-5 チェックボーリング配置平面図

地盤全体としての改良効果の確認

改良効果の確認

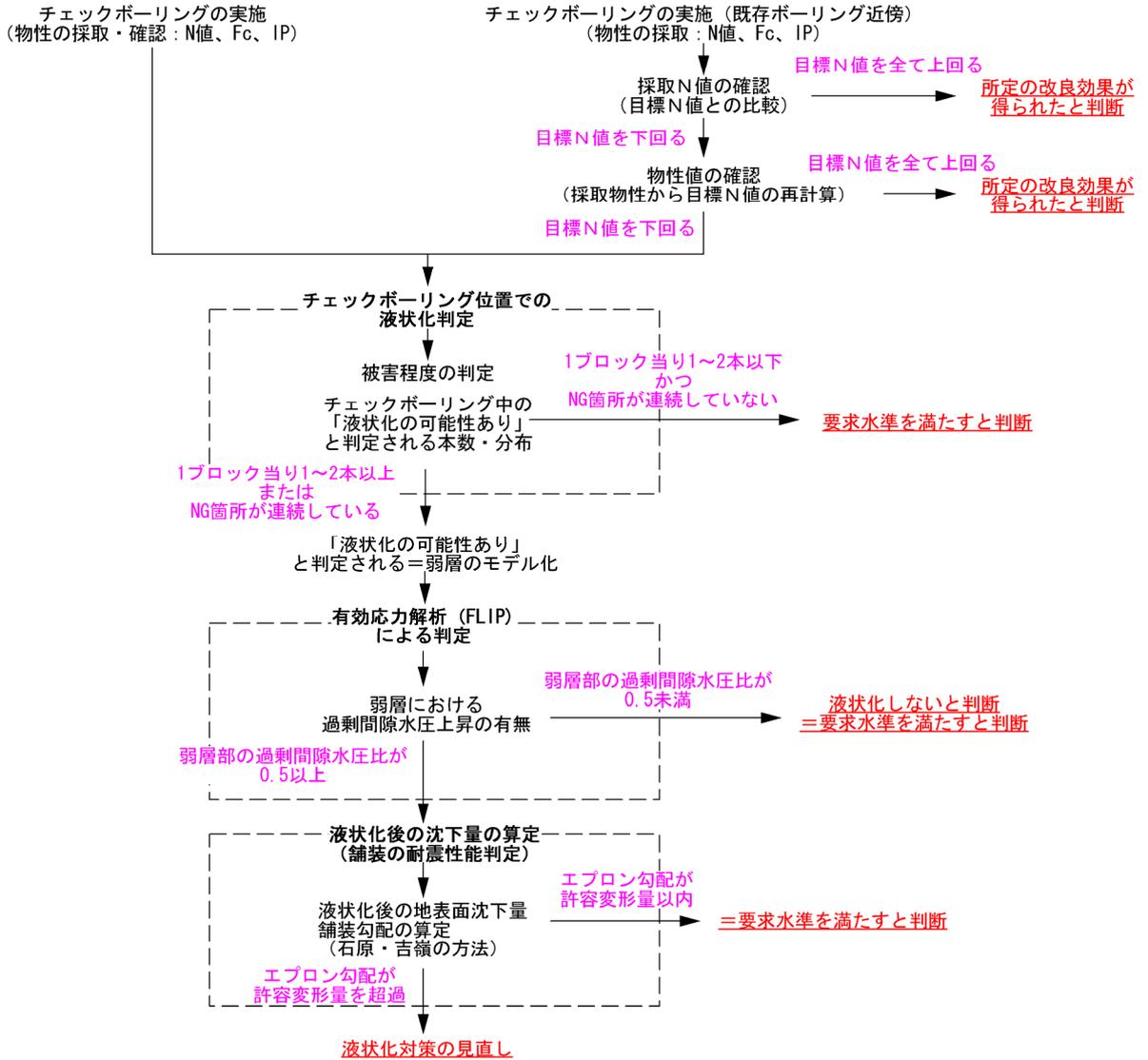


図-6 改良効果の確認フロー

4-2 液状化判定条件

既存ボーリング箇所での目標N値算定時には、実施設計時に当該箇所の改良仕様を決定した地震波（等価加速度）に対して埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版）に示された等価N値と等価加速度による液状化判定手法より目標N値を逆算した。

新規ボーリング箇所については、実施設計時と同様に八戸波及び大船渡波に対して新たに地盤応答解析を実施し、前記の等価N値と等価加速度による液状化判定を実施した。このとき、Ac2層以深の土層モデルは、実施設計時に作成した本事業エリア全体の3D地盤モデルより該当箇所の土層断面を抽出して作成した。

ここで、地震動のレベルとしては被害程度IIの判定に用いる地震動（南側エプロン：L2地震動、北側エプロン：L1地震動）を使用した。なお、南側エプロンに対してL2地震動で被害程度Iを満足することが確認できれば必然的にL1地震動に対しても被害程度Iを満足するため、L1地震動に対する液状化判定は省略可能である。

4-3 Bs、As1 層内に介在するシルトについて

Bs、As1 層の中にはシルトが薄層状に所々介在しており、純粋な砂質土だけで層が構成されているわけではない。そのようなシルトが介在している箇所については、締固め砂杭工法の効果を完全には期待できない。しかし、シルトは純粋な砂質土とは異なり細粒分が非常に多い土質であるため本来液状化に対する懸念も少ない土質である。

したがって、被害程度の照査を適正に行うためには当該シルトの適正評価を考慮する必要がある。そこで、チェックボーリングの局面においては下記の運用方法にて照査を実施した。

- 1) 等価 N 値の算定においては、埋立地の液状化対策ハンドブックに準じるが、当該シルト (Fc が 35% 以上) については、東京国際空港の既往設計の実績等を勘案して、図-7 に示す Fc の補正式を適用する。
- 2) 当該シルト (Fc が 35% 以上) の内、塑性指数が 15 を超えるもの、あるいは粘土分含有率が 20% を超えるものについては液状化判定対象外とする。

当該シルトは、細粒分含有率の分布状況から見て、むしろ Ac2 上層に近い土層であり、振動三軸試験や有効応力解析結果から考えると問題となる土層ではない。それを液状化判定に適切に取り入れていく手段として、Fc の効果のある程度評価可能でかつ実用の実績もある図-7 に示す補正式を用いることとした。

また 2) に示した内容は、上述した補正式においても Fc の効果は 45% で頭打ちであり、更に大きな Fc を示す土質については別途考慮する必要があるため、このような方法とした。その理由としては、細粒分含有率が 60% 以上となってくれば必然と塑性指数や粘土分含有率も上昇してくる。そこで、液状化対象外の判定として他の基準でも用いられている塑性指数が 15 を超えるものや、粘土分含有率が 20% を超えているものなどの判定基準を用いることとした。

上述した運用方法を取れば、当該シルトも Fc が 35%~60% 位までは低塑性 ($I_p \leq 15$) であるため、いきなり判定外とならず Fc の効果を考慮した上述の補正式にて判定されることになる。また、Fc が 60% 以上のものは、塑性指数が 15 を超えるものや粘土分含有率も 20% を超えるものが多くなるため、上述の補正式で網羅されていない範囲を既往の知見により評価されることになる。

$$\begin{aligned} Fc=35\% \sim 45\% \text{で、} & \quad \beta = 0.5 - 0.2 \div 30 \times (Fc - 15) \\ Fc=45\% \text{で、} & \quad \beta = 0.3 \end{aligned}$$

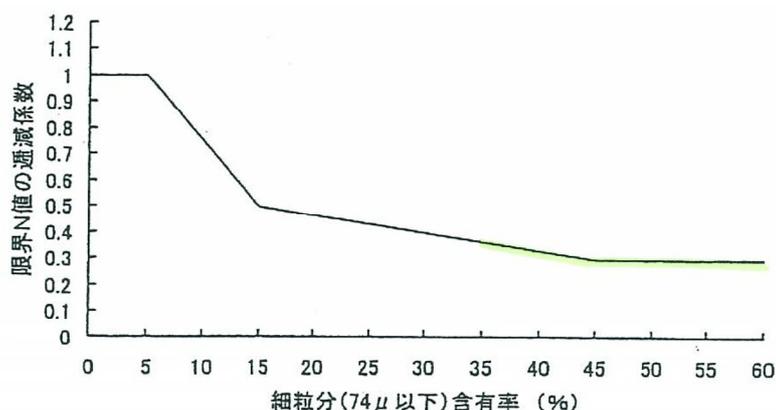


図-7 細粒分含有率 Fc による補正 (Fc ≥ 35% に適用)

5. 被害程度の判定結果及び考察

5-1 チェックボーリング位置での液状化判定結果、及び被害程度の判定結果

図-8 にチェックボーリング位置での液状化判定結果平面図を示す。すべてのチェックボーリング位置において液状化しない結果となったため、南側エプロンはL2地震動に対して被害程度Ⅰ、北側エプロンはL1地震動に対して被害程度Ⅰを満足することが確認できた。

したがって、必然的に南側エプロンはL1地震動に対して被害程度Ⅰ、L2地震動に対して被害程度Ⅱ、北側エプロンはL1地震動に対して被害程度Ⅱ、L2地震動に対して被害程度Ⅲを満足しており、改良後の地盤は所定の耐震性能を満足していることが確認できた。

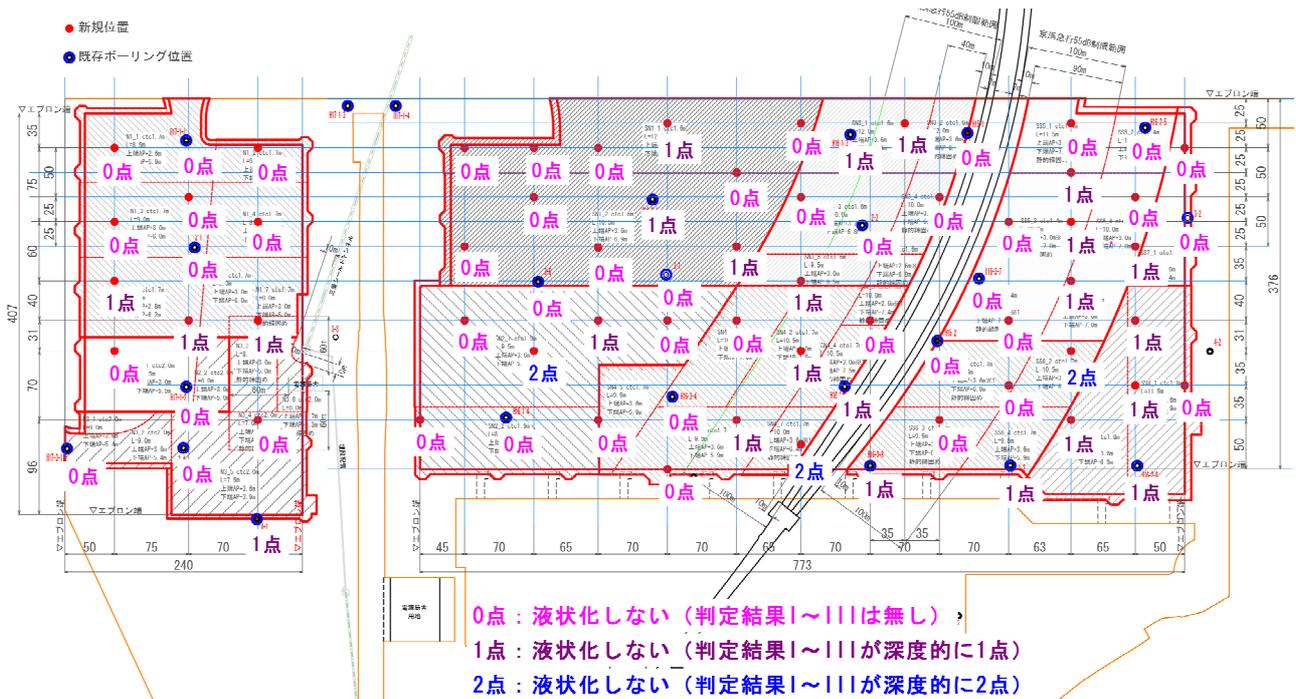


図-8 チェックボーリング位置での液状化判定結果平面図

5-2 改良前後のN値の比較

既存ボーリング箇所に関して改良前後のN値の比較を図-9に、また、改良後N値について実施設計値とチェックボーリングで得られた値の比較を図-10に示す。(判定対象のみプロット)

ただし、実施設計時に算定した改良後N値とは、各ブロックにて決定した改良ピッチではなく、各ボーリング地点での必要改良ピッチに対する値である。

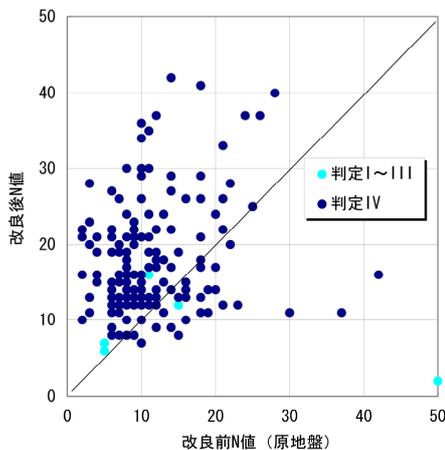


図-9 改良前後のN値の比較

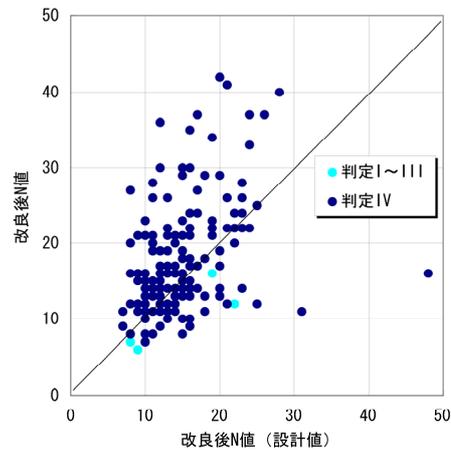


図-10 改良後N値（実施設計値との比較）

図-9に示すように、改良によりN値が大きく上昇している。(平均N値がN=11からN=18に上昇)

また、図-10に示すように実施設計時に算定した改良後N値とチェックボーリングで得られたN値を比較しても同等以上の値となっており、十分な締固め効果が得られたことが確認できた。

5-3 改良後N値とFcの関係

全点を対象として、改良後N値の深度分布を図-11に、細粒分含有率(Fc)の深度分布を図-12に、改良後N値とFcの関係を図-13に示す。図-12より、判定対象外となるシルトは、主としてBs層内に点在していることがわかる。

また、図-11、図-13より当該シルトについては締固め砂杭の効果は低い、地震時の液状化が懸念される砂質土については、一部(判定結果：I~IIIのプロット)を除いて十分大きなN値が得られている。とくに、最も液状化が懸念される細粒分含有率が小さい箇所についてはより大きなN値となっており、液状化に対して十分抵抗し得ると考えられる。

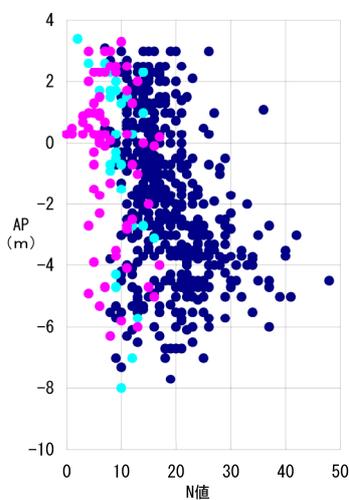


図-11 改良後N値の深度分布

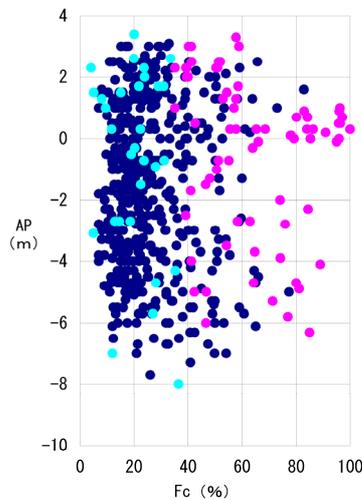


図-12 Fcの深度分布

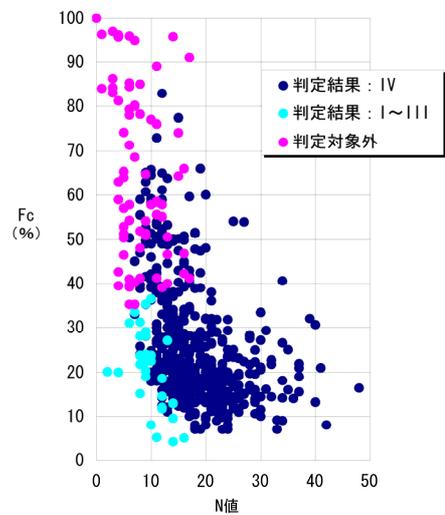


図-13 改良後N値とFcの関係

6. あとがき

面積 35ha にも及び広大なエプロン範囲に対して、昨年度約 1 年間に要して地盤改良を実施した。本液状化対策仕様は、第 3 回技術報告会(2007.07.13)で報告したとおり変形性能照査型の設計をもって決定している。

本報文では、上記の設計手法に則した締固め砂杭工の改良効果の確認方法を示し、チェックボーリング(図-14)の結果よりエプロンが所要の耐震性能を満足していることを報告した。

今後、エプロンの様な広大なエリアに対する地盤改良効果の確認手法として今回の報告が参考になれば幸いである。

(参考文献)

- 1) 東京国際空港国際線地区エプロン等整備等事業 業務要求水準書 国土交通省関東地方整備局 pp42, 2005.11
- 2) 空港土木施設の耐震設計指針(案) 運輸省航空局 pp34, 2000.3



図-14 チェックボーリング実施状況