

国際線エプロンにおける液状化対策設計
 ~ 過剰間隙水圧消散に伴う沈下を考慮したエプロンの液状化対策仕様の決定 ~

国際線エプロン JV 廻田 貴志

キーワード：液状化、変形性能照査、FLIP、沈下

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が求められている。また、事業用地内の地下には、京浜急行シールドトンネルや三愛石油シールドトンネルが、事業用地境界付近の環状 8 号線に沿っては、東京モノレールの橋脚等の重要施設が設けられている。このような重要施設が存在する広大な敷地に対して、確実かつ費用対効果が最大となるよう耐震性能をいかに確保していくのが事業の成否を左右する鍵となる。

本報文では、エプロンの液状化対策の考え方（変形性能照査型の設計）について報告する。

2. 地盤の概要

2-1 事業範囲と土質調査位置

図-1 に本事業範囲と、その中で実施されたボーリング調査位置を示す。また、事業用地のほぼ中央位置（図-1 の - ' 断面）で切った土層断面を図-2 に示す。

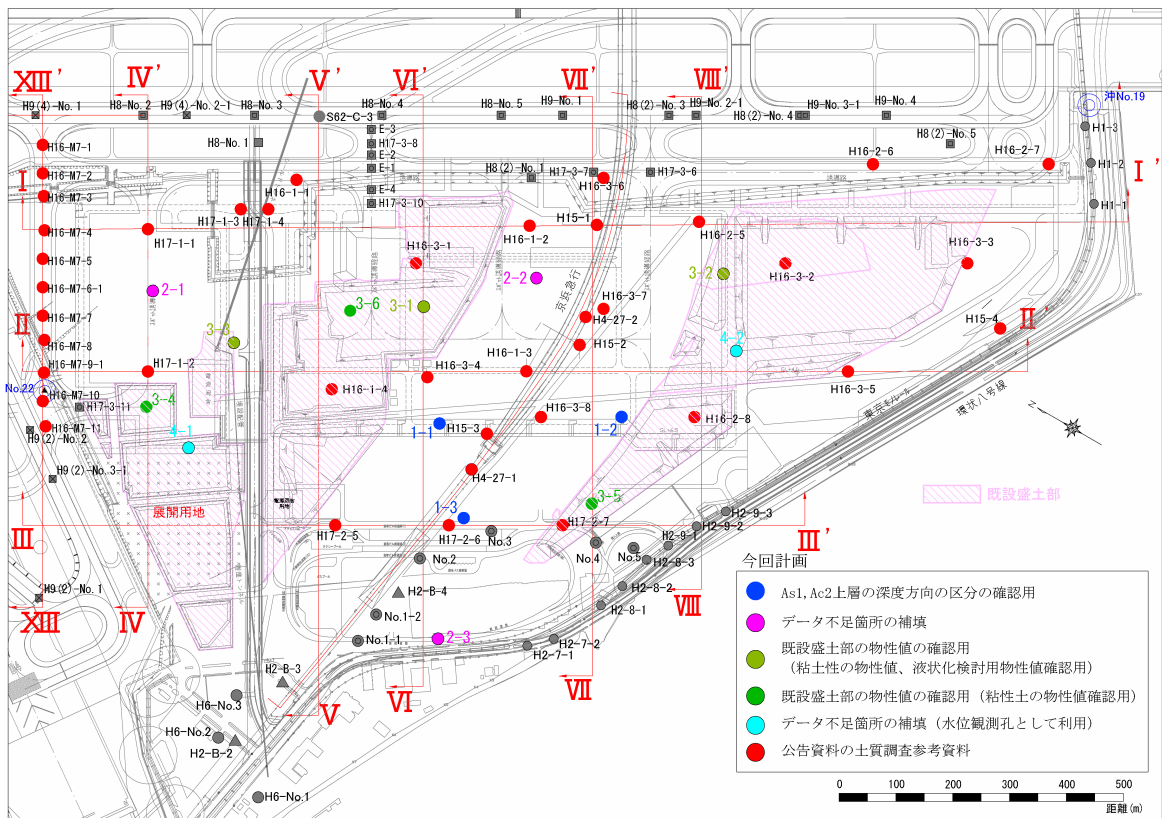


図-1 土質調査位置図

2-2 土層構成

図-2 に示す当該事業用地の土層構成は、表層から約 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 上部層)と砂分の混入が少なくなる下部(Ac2 下部層)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された。

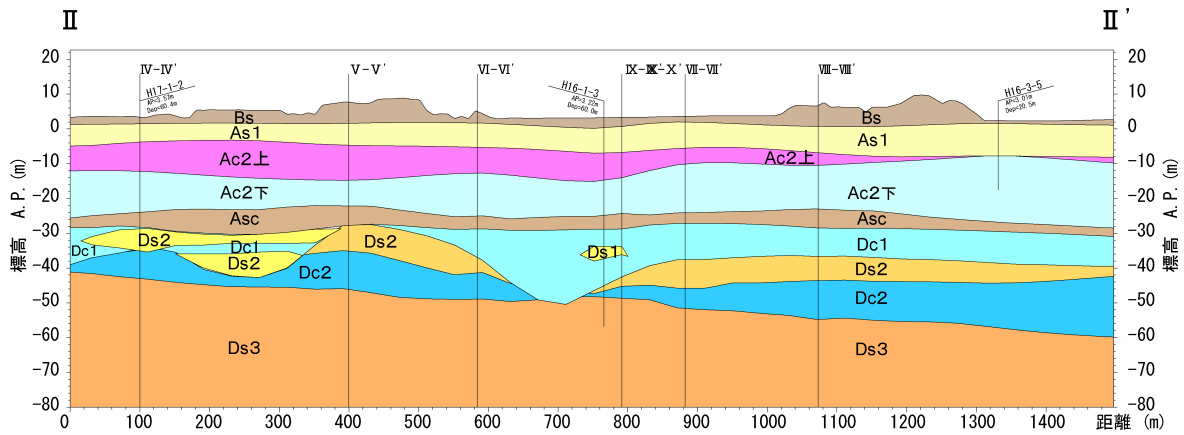


図 2 土層断面図 (- ' 断面)

2-3 液状化対象層の細粒分含有率 (Fc) と塑性指数 (Ip)

ここで、液状化が懸念される層としては、Bs、As1層とAc2上部層である。図-3に、各層毎に細粒分含有率と塑性指数の試験結果を示す。これを見て分かるように、Bs、As1層は純粋な砂よりはやや細粒分を多く含むものの、Fcは30%以下のものが大半である。一方、Ac2上部層はFcが30%～100%の範囲に分布しており、非常に細粒分が多くなっている。一般的には、細粒分が多い土層は液状化に対する抵抗も大きいことが知られているが、当該層は細粒分が多いものの低塑性 (IP 15) な土質が含まれている。

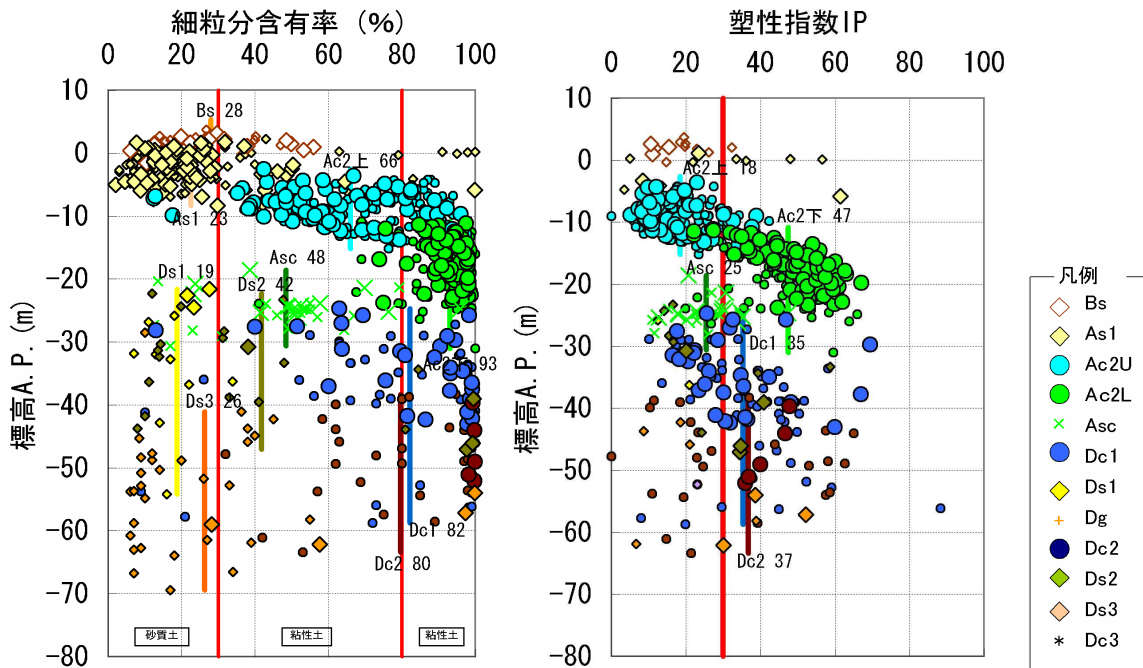


図 3 細粒分含有率と塑性指数

3. 液状化対策設計の基本思想

3-1 耐震要求性能と液状化対策の基本思想

本事業における要求水準にて、求められている耐震性能を表-1に示す。

表-1 各施設の耐震性能要求水準

	耐震性能要求水準
南側エプロン	空港土木施設の耐震設計指針(案)に示す 重要度Aのエプロン
北側エプロン	空港土木施設の耐震設計指針(案)に示す 重要度Bのエプロン

また、空港土木施設の耐震設計指針（案）に示される重要度別の耐震性能、照査規準を以下に示す。

表一解 4.14 エプロンの耐震性能

重要度区分	地震動のレベル	耐震性能
重要度Aのエプロン	レベル1地震動	被害程度Ⅰ
	レベル2地震動	被害程度Ⅱ
重要度Bのエプロン	レベル1地震動	被害程度Ⅱ
	レベル2地震動	被害程度Ⅲ

表一解 4.15 エプロンの照査規準

被害程度	照査規準（許容被害状態）
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}
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 ・部分的な液状化 ^{※3} が発生する
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
被害程度Ⅳ	・液状化発生等に伴い沈下・段差が生じることで許容変形量を逸脱し、空港機能を維持できない被害レベルであるが、二次的災害は引き起こさない

※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。

出典【「空港土木施設の耐震設計指針（案）」 表解 4.14,15】

「空港土木施設の耐震設計指針（案）」における耐震性能の照査規準(被害程度Ⅰ)の「液状化しない」によると、「*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。」という注釈がある。そこで、液状化対策の基本思想として以下のように考えた。
 (液状化対策の基本思想)

- ・ 地盤改良は図 4 に示すように、液状化の可能性のあるBs層およびAs1層を対象に実施する。
- ・ Ac2 上部層の上位に地盤改良による10m程度の非液状化層(Bs層およびAs1層)を設けることによって、エプロンへの影響を抑制する。
- ・ Ac2 上部層が液状化することによる施設への影響(過剰間隙水圧消散に伴う地盤の変形)は、その変形量を定量的に評価し、舗装の変形性能照査を行う。

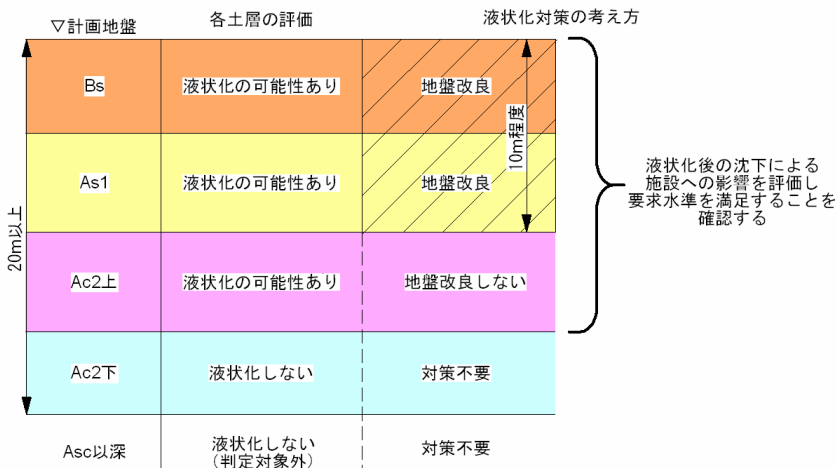


図 4 各土層の評価と液状化対策の基本思想

3-2 被害程度照査規準の具現化

表 2 各施設の重要度に対する耐震性能

	南側エプロン	北側エプロン
レベル1地震動	被害程度	被害程度
レベル2地震動	被害程度	被害程度

エプロンの耐震性能について、地震動の大きさと被害程度について整理して示すと表 2 のようになる。ここで、レベル 1 地震動は最大基盤加速度で 350gal、レベル 2 地震動は最大基盤加速度で 390gal と与えられている。

空港土木施設の耐震設計指針（案）に示されている被害程度は、具体的な数値指標が示されていない。そこで本事業では被害程度の照査規準を次のように考え、地盤改良の仕様を決定する。

【被害程度】

「埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版)」に示された粒度とN値の液状化判定方法によって1m間隔で判定を行い、2点が連続して液状化する(範囲、)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、)と判定された場合は、被害程度 の規準を満足しないと解釈する。

【被害程度】

被害程度 とは、広域の平面エリアにおいて、全てのボーリング地点で被害程度 を満足することを旨すが、部分的には満足しない箇所があることも許容する。

【被害程度】

被害程度 とは、液状化が発生し、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状態である。但し、被害程度 については、液状化を許容していることから、改良仕様決定の指標とはならない。従って、北側エプロン(重要度B)については、レベル1地震動に対して被害程度 を満足するように改良仕様を決定する。ただし、二次元有効応力解析及び過剰間隙水圧消散に伴う沈下の影響検討を行い、エプロン表面の変形量の確認を行う。

3.3 液状化対策検討フロー

上述してきた内容に従い検討を実施するが、そのフローを図5に示す。

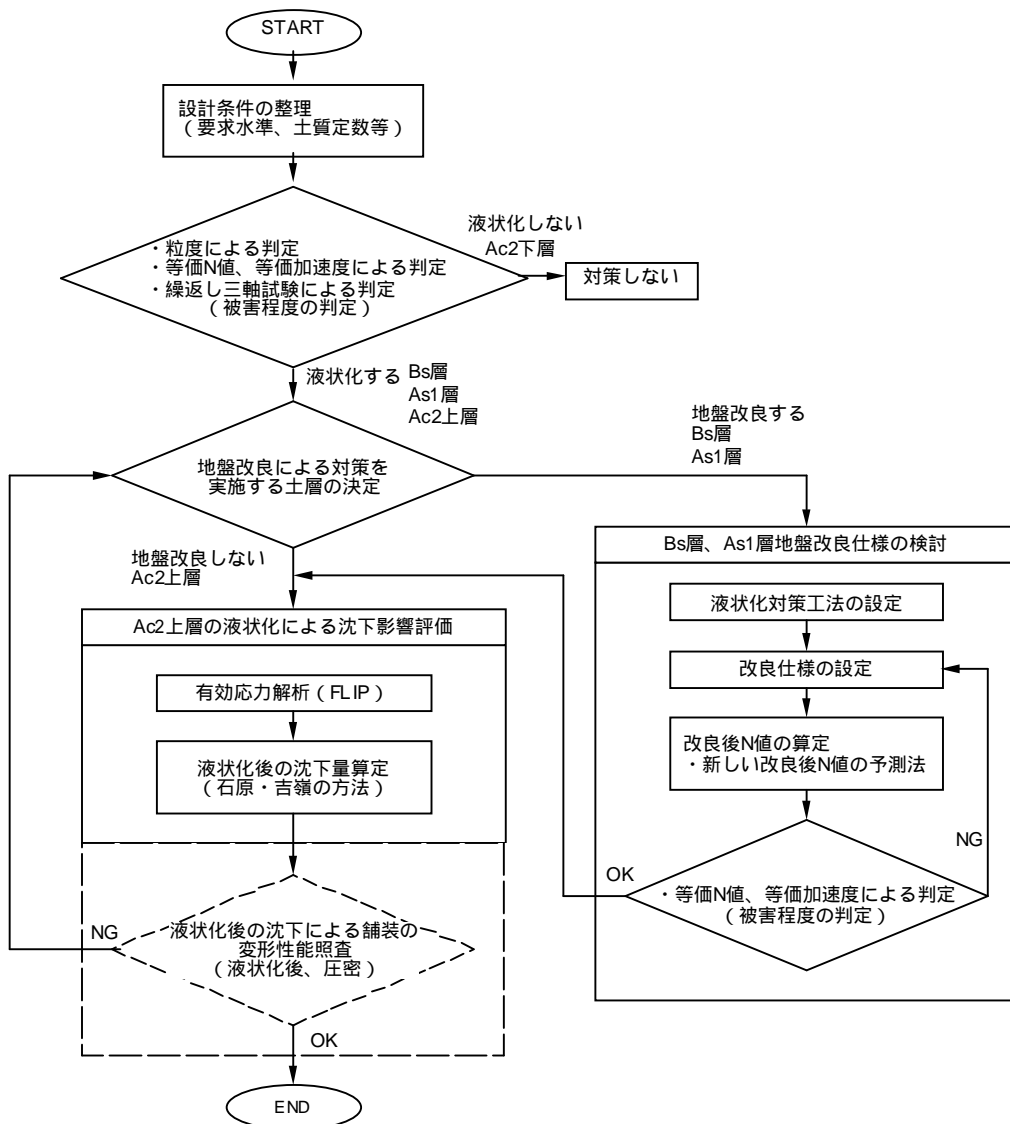


図5 液状化対策検討フロー

4. 検討結果と改良仕様の決定

4-1 液状化対策工法の選定

液状化対策工法については、羽田空港での実績、環境への影響、当該地盤への適用性、経済性等を比較検討した結果、一般部については締固め砂杭工法(振動締固め)、既設構造物近傍については締固め砂杭工法(静的締固め)および深層混合処理工法(変位低減型)を採用した。

各種施設に対する振動や変位制限について、現地試験施工等を実施し対策工法を図-6に示すように使い分けることとした。

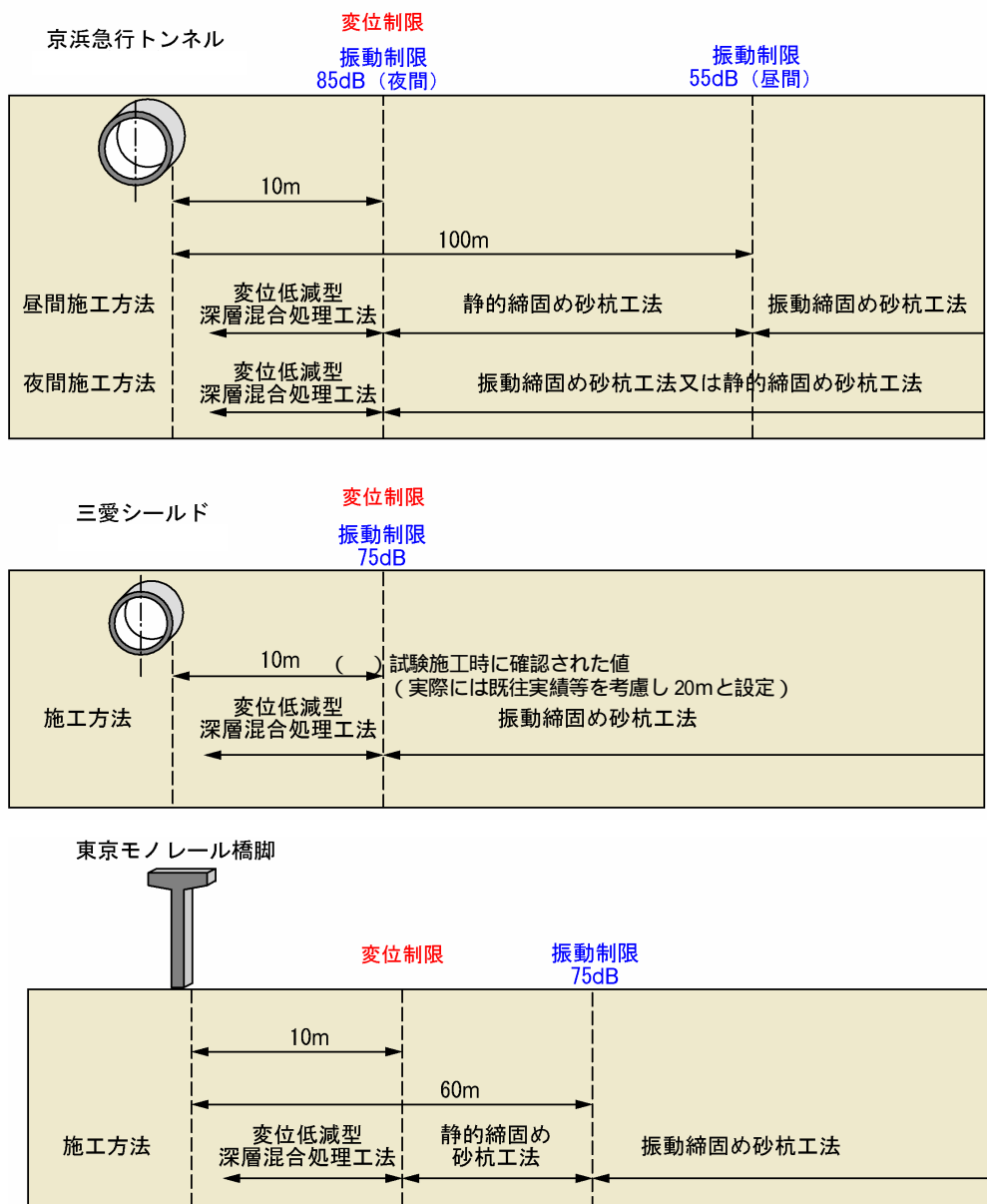


図-6 既存施設の振動・変位制限を考慮した改良仕様

4-2 締固め砂杭工法の仕様と被害程度判定結果

各ボーリングに対し、1m毎に等価 N 値、等価加速度による判定を実施し、被害程度の判定を行った。被害程度の判定結果が、各施設に要求される重要度に対する耐震性能を満足するよう、締固め砂杭工法の改良ピッチ(改良率)を決定した。

被害程度の判定結果と砂杭改良ピッチを図-7に示す。

※1 H17-1-1は、L1地振動で被害程度Ⅰを満足しない。
 周辺のボーリング位置では、L1地振動に対して1.7mピッチで被害程度Ⅰを満足するため、部分的に満足しない箇所があるが、地盤全体としての液状化は発生しないものと考え、L1地振動に対して、被害程度Ⅱを満足すると判断する。

※1 H16-2-5は、L2地振動で被害程度Ⅰを満足しないが、L1地振動では被害程度Ⅰを満足する。
 周辺ボーリング位置では、L2地振動に対しても1.4mピッチで被害程度Ⅰを満足するため、部分的に満足しない箇所があるが、地盤全体としての液状化は発生しないものと考え、L2地振動に対して、被害程度Ⅱを満足すると判断する。

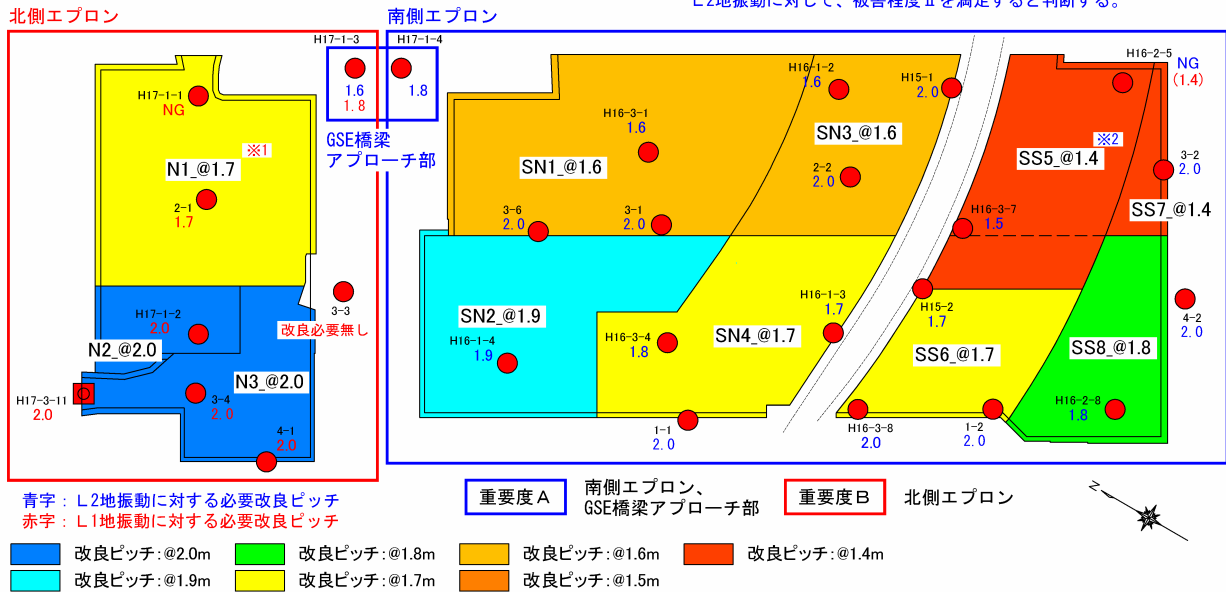


図 7 液状化判定（被害程度の判定）結果平面図

5. Ac2 上部層の過剰間隙水圧消散に伴う沈下検討

5-1 Ac2 上部層に対する考え方と変形照査について

Ac2 上部層は液状化判定によると、液状化の可能性はある。しかし、図 3 に示したように細粒分含有率が 30% ~ 100% と大きい土質である。このような土質に対して、締固め砂杭工法の改良効果は期待できないため、確実に改良効果を期待できる工法となると、化学的に固結させる深層混合処理工法などに限定されてしまう。しかしながら、対象範囲は広大であり、Ac2 上部層を固化改良するとなれば、膨大な費用が必要となる。

そこで、基本思想でも述べたが、Ac2 上部層より上に位置する Bs, As1 層を確実に改良し、10m 程度の非液状化層を造ることで、深い位置に存在する Ac2 上部層の影響が地表面において最小となる対策を採ることとした。この対策の変形照査については、以下のように考えた。

Ac2 上部層は、細粒分を非常に多く含んでいることから、液状化に対しては純粋な砂に比べてねばりがある。従って、ひずみと過剰間隙水圧は上昇するものの、上部に堅固な地盤を造成しておけば、振動時に進行していく Ac2 上部層のひずみの影響が地表面まで及ぶことはないと考えられるため、これについては地盤の有効応力解析の結果をもって確認する。しかしながら、地震動がおさまってから後、過剰間隙水圧が消散していく過程での体積収縮（沈下）は十分考えられるため、こちらについては有効応力解析の結果から定量評価し、舗装の変形性能を照査することとした。

5-2 過剰間隙水圧消散に伴う沈下の検討方法

有効応力解析については、港湾関係で実績がある FLIP¹⁾を用いることとした。FLIP は土粒子と水の二相混合体を一相として取り扱い、過剰間隙水圧上昇による応力 ひずみ関係の軟化現象を解析から直接求めるのではなく、別途定義して解析している。従って、FLIP は水の流れを解析していないので、過剰間隙水圧の消散に伴う圧密沈下を直接求めることはできない。そこで、図 5 のフローにも示したが、沈下については石原・吉嶺²⁾によって示された液状化後の過剰間隙水圧消散による体積ひずみの算出手法に従い求めることとした。

5-3 有効応力解析

5-3-1 入力地震動

入力地震波は等価 N 値、等価加速度による液状化判定において等価加速度が最も大きくなる八戸波(レベル2地震動)を用いる。ただし、補正波形を用いその最大補正基盤加速度を 486gal とする。図 8 に入力地震波を示す。

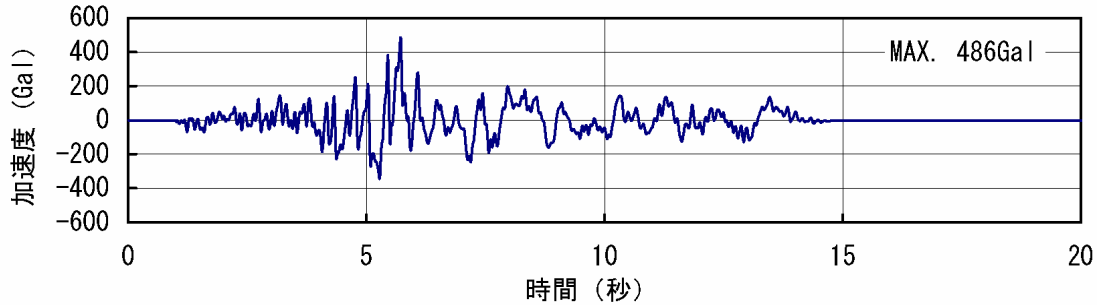


図 8 入力地震波 (八戸波 : L2 : 補正最大基盤加速度 486gal)

5-3-2 検討断面の設定

検討断面設定の基本方針は下記のとおりであり、この基本方針の基に図 9 に示す断面 1 および断面 2 を設定した。

- ・液状化層(Ac2 上部層)の不陸が大きく、局所的にせん断ひずみや過剰間隙水圧の集中が予想される断面
- ・液状化層(Ac2 上部層)においてせん断波速度が異なる一般部($V_s = 140\text{m/s}$)と既設盛土部($V_s = 150\text{m/s}$)を含み、局所的にせん断ひずみや過剰間隙水圧の集中が予想される断面

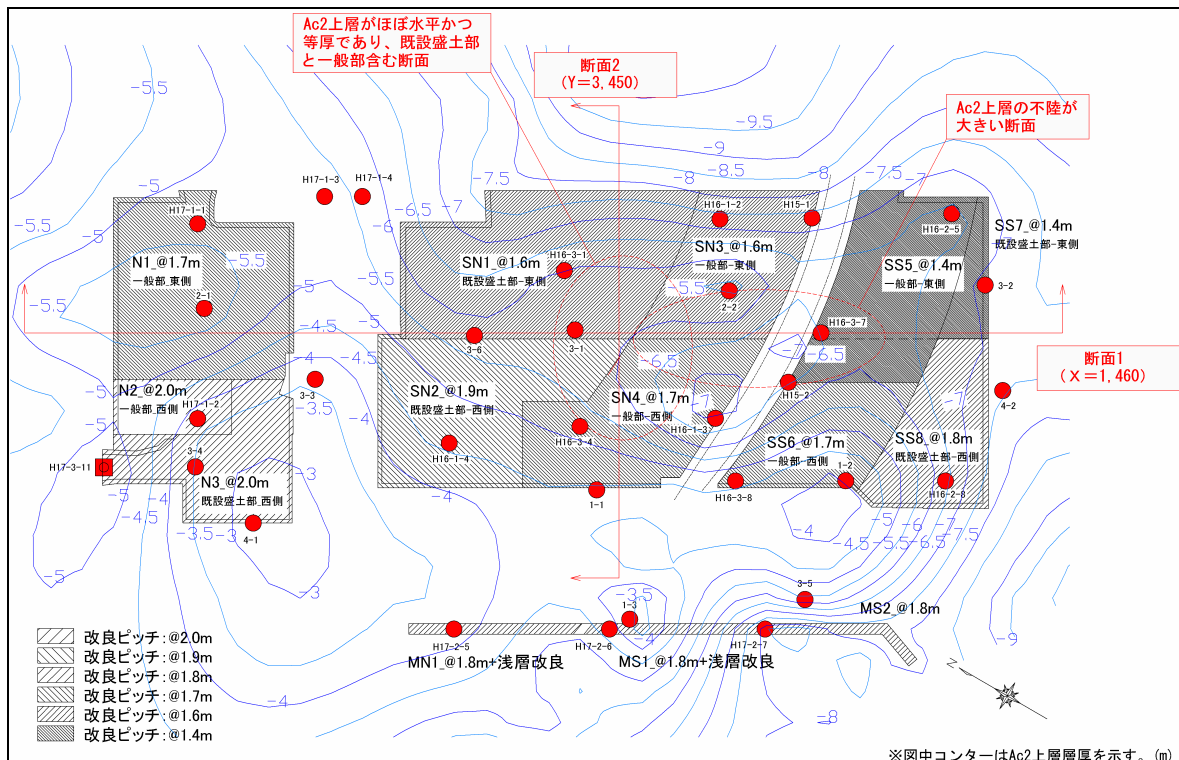


図 9 検討断面位置図

5-3-3 液状化抵抗曲線の設定

有効応力解析に際して設定する液状化パラメータのうち、Ac2 上部層については振動三軸試験結果から得られた液状化抵抗曲線に対して、要素シミュレーションによりフィッティングさせ設定した。Bs, As1 層の砂層に対しては、FLIP において提案されているパラメータの簡易設定法を用いた。

5-3-4 有効応力解析結果

有効応力解析結果を図-10、図-11に示す。図-10は最大せん断ひずみ分布を示しており、Ac2上部層にせん断ひずみが卓越して発生していることが分かる。しかし、Bs、As1層については、せん断ひずみは殆ど発生しておらず、Ac2上部層の影響が地表面まで及んでいないことが分かる。

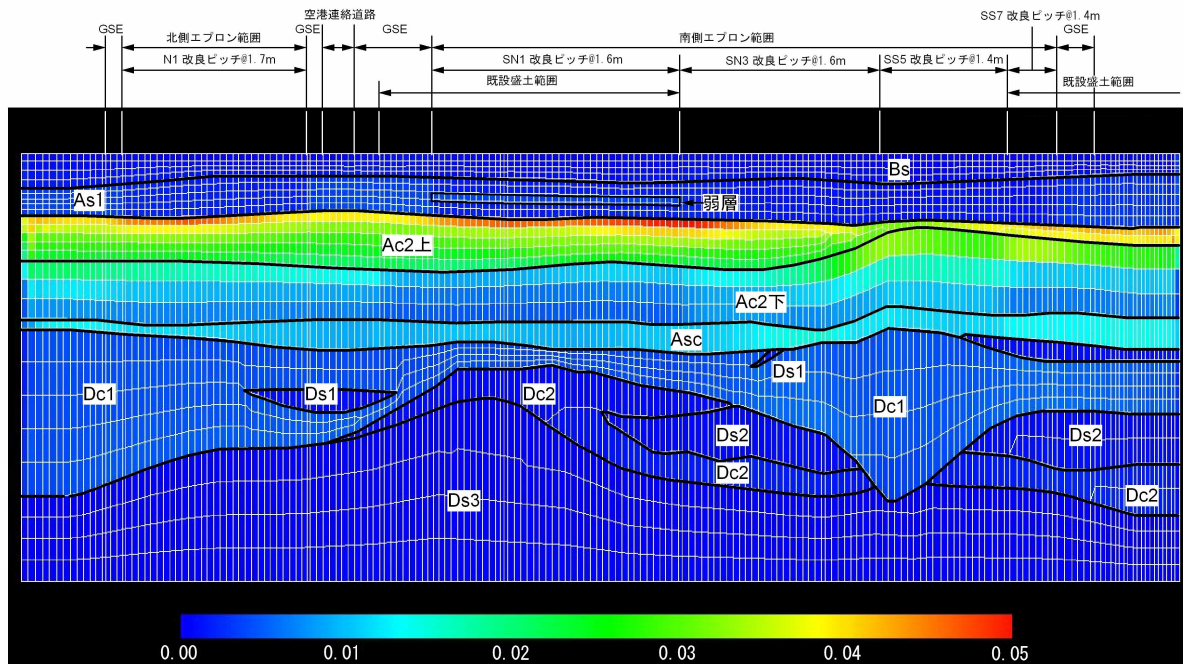


図-10 F L I P解析結果 { 最大せん断ひずみ(γ_{xy})分布図(断面1) }

図-11は過剰間隙水圧比の分布を示しており、過剰間隙水圧はAc2上部層にて卓越して発生しているものの、0.8程度でおさまっている。また、As1層の中において過剰間隙水圧の上昇が見られる範囲があるが、これはエプロン直下以外であり地盤改良を施していない範囲にあたる。興味深いのは、未改良であっても過剰間隙水圧比の上昇が1.0まで到達していない点であるが、これは隣接するエプロン直下の地盤改良によりせん断変形が抑制された効果であると考えられる。

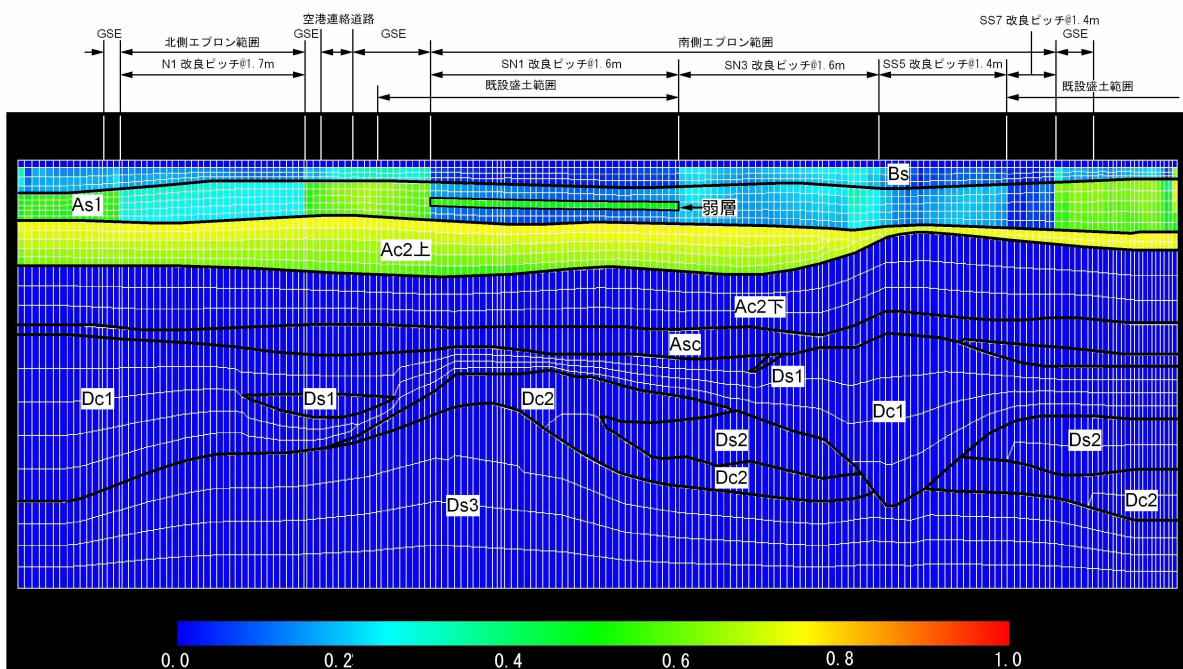


図-11 F L I P解析結果 { 過剰間隙水圧比(u/v)最大値分布図(断面1) }

5.4 沈下量の算出

本検討では、FLIP の解析結果により得られた最大せん断ひずみから要素ごとの体積ひずみを求める。その事前準備として、液状化強度試験後に実施した再圧密試験結果より、最大せん断ひずみと体積ひずみの関係を整理した。Bs、As1 層、Ac2 上部層ごとにグラフを整理したが、ここでは図 -12 に Ac2 上部層のグラフを示す。

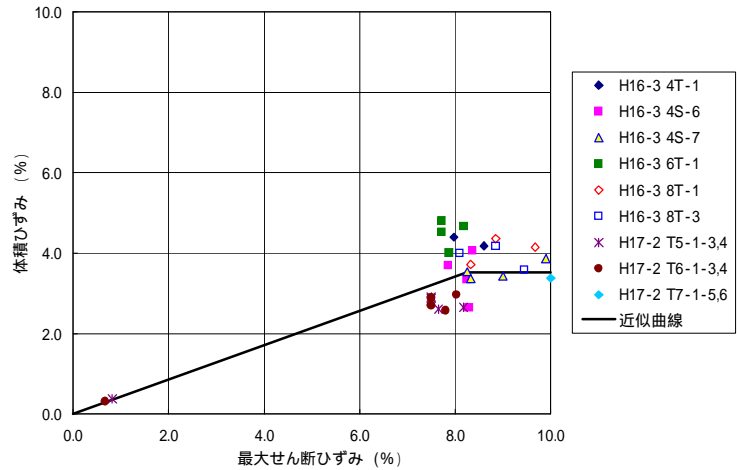


図 -12 体積ひずみ～最大せん断ひずみ関係(Ac2 上部層)

次に、各要素ごとに得られた体積ひずみを用いて、二次元 FEM モデルにより沈下解析を行い地表面沈下量を算定した。

二次元 FEM 沈下解析の方法は、二次元液状化流動解析プログラム ALID³⁾における方法を参考とした。

プログラム ALID では、砂地盤の沈下解析ステップで、石原・吉嶺の過剰間隙水圧消散後のせん断ひずみ～体積ひずみ関係から発生体積ひずみを求め、これと流動解析ステップにおける発生過剰間隙水圧量から等価体積弾性係数を求め、ポアソン比を 1/3 と設定して、ひずみポテンシャルとして体積ひずみ相当の沈下量が発生するよう応力を作用させている。

本検討では、基本的には ALID における方法を適用するが、汎用 FEM 解析プログラム ABAQUS⁴⁾を用い、FLIP の解析結果から、液状化対象層の体積ひずみ、等価剛性及び解放応力を予め設定して解析を行った。解析結果として、鉛直変位量コンター図を図 -13 に、地表面沈下量分布図を図 -14 に示す。

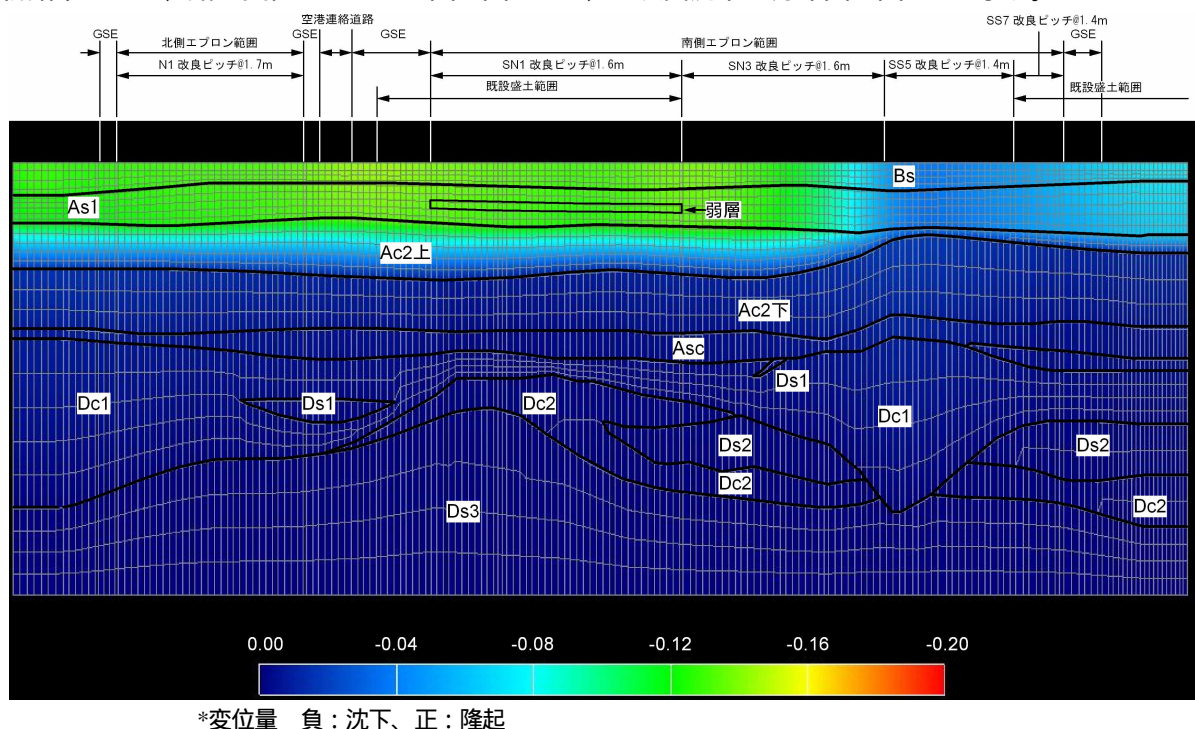


図 -13 鉛直変位量分布図(m)(断面 1)

図 -13 に示すように、Ac2 上部層下端を境界として Ac2 上部層以浅の変位が卓越しており、Ac2 下部層以深においては有意な沈下は見られない。また、図 -14 に示すとおり、地表面沈下量は Ac2 上部層天端での沈下量とほぼ一致する。地表面沈下量と Ac2 上部層天端における沈下量の差は、As1 層および Bs 層の沈下量であり、これら表層の沈下量は、全体の沈下量に比べわずかである。このことから、過剰間隙水圧消散

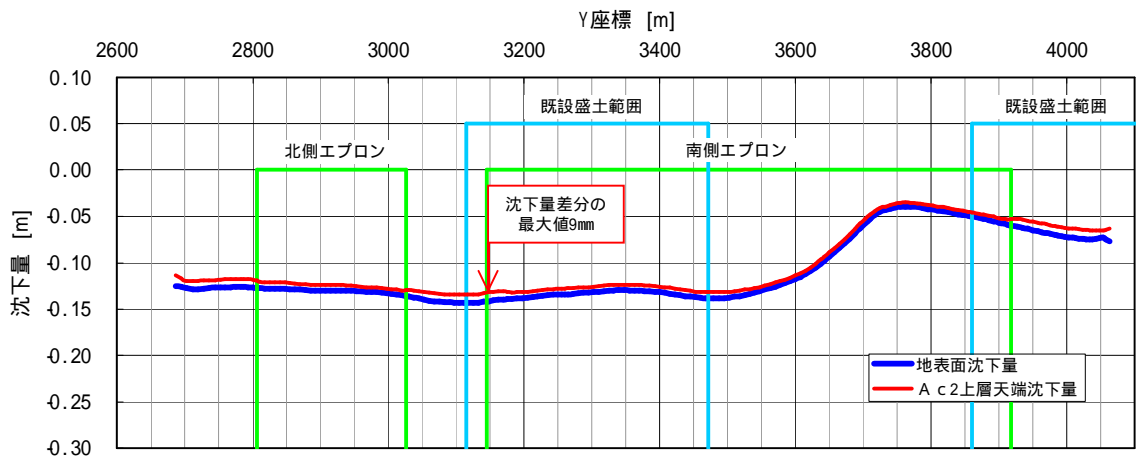


図-14 地表面沈下量分布図(断面1)

に伴う残留沈下はAc2 上部層の沈下が支配的であることが分かる。

舗装設計を行う中で、上述した地震後の残留沈下量を考慮する必要がある。そのために、舗装設計で用いている不同沈下シミュレーションの平面メッシュに合わせて地震後の残留沈下量を平面二次元で算出する必要があった。そこで、残留沈下量はAc2 上部層が支配的であるため、(地表面沈下量) = (Ac2 上部層厚) × (体積ひずみ)で求めることとし、体積ひずみはFLIPの結果から得られる平均値を用い、層厚は三次元土質モデルから設定した。地震後の残留沈下量について、平面二次元で算出した結果を図-15に示す。

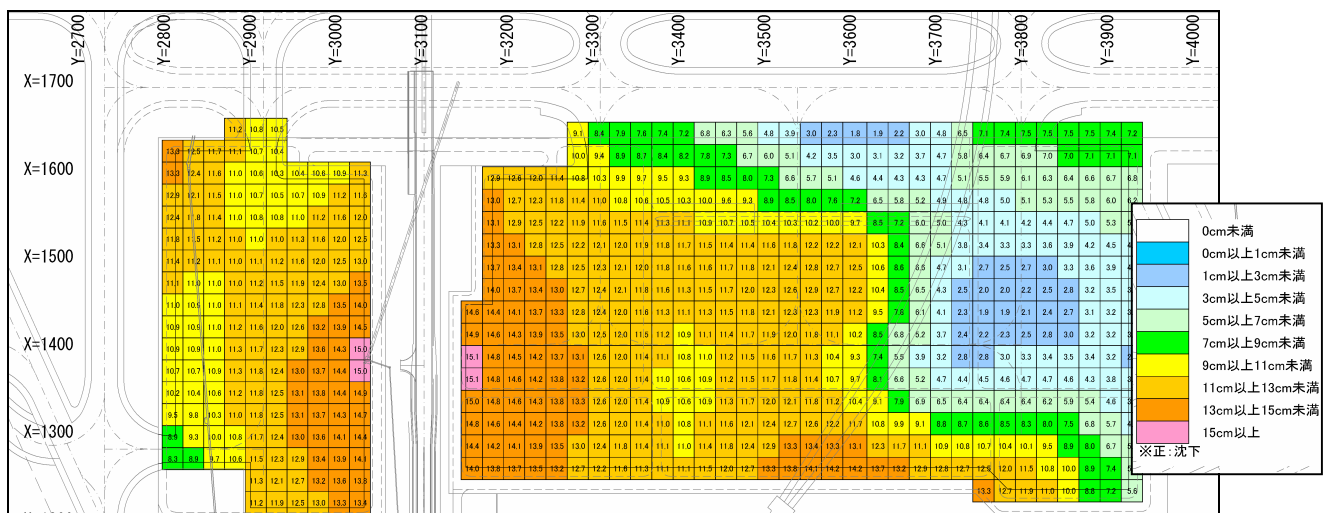


図-15 地震後の残留沈下量コンター図

図-15に示す沈下量を入力値として、別途エプロン舗装に対する変形照査を実施した。その結果、所定の性能を満足しており、液状化対策の仕様の妥当性が確認された。

6. あとがき

面積35haにも及ぶ広大なエプロン範囲に対する地盤改良仕様の決定に対し、液状化をある程度許容し、所要の変形性能を満たすよう改良仕様を決定した。いわゆる変形性能照査型の設計をもって、液状化対策仕様を決定したということである。変形性能照査型の設計は今後益々増加していくことが予想されるが、それには詳細な解析技術と相応の設計技量が求められることになる。本設計事例が、参考になれば幸いである。

(参考文献)

- 1) 井合進・松永康男・亀岡知弘：Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, 港湾技術研究所報告, 第29巻, 第4号, pp.27-56, 1990.
- 2) Ishihara, K. and Yoshimine, M.: Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.1, pp.173-188, 1992.
- 3) ALID研究会：2次元液状化流動解プログラムALID/Win 第二版、平成17年6月。
- 4) ABAQUS Analysis User's Manual ver.6.5, 2006.7.7