

静的締固め工法における現場管理の 簡易評価手法の検討

竹田 晃

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

国直轄海岸事業における撫養港海岸の液状化対策は、極めて流動性の低いモルタル又は砂に流動化剤を添加した補給砂を地盤中に静的に圧入して締固める工法である。しかし、地盤改良後の強度確認に時間と費用を要することは、延長が長い海岸にとって進捗等に影響を与える。一方、圧入による静止土圧係数 K_0 の増加は、既往の研究等から地盤強度を上げる効果として知られているが、設計に考慮することが難しいとされている。本稿は、現地地盤調査から K_0 効果と密度増大効果を分離する考え方を説明し、 K_0 効果の定量的な評価の試みから標準的な現場強度管理として活用しているN値により簡易に素早く安価に現場強度確認へと活用する方法の検討について報告する。

キーワード 締固め工法, 液状化対策, 性能照査

1. はじめに

徳島県の撫養港桑島地区は、逼迫する東南海・南海地震等の地震に伴う津波に備え、国直轄海岸事業による津波浸水対策事業を進めている。当海岸の液状化対策は、極めて流動性の低いモルタル又は砂に流動化剤を添加した補給砂を地盤中に静的に圧入して締固める工法（以下、締固め工法）である。しかし、地盤改良後の強度確認に時間と費用を要することは、延長が長い海岸にとって進捗等に影響を与える。一方、圧入による杭間の拘束圧の増加（静止土圧係数 K_0 の増加）は、既往の研究等から地盤強度を上げる効果が十分にあることは知られているが、設計に考慮することが難しいとされている。

本稿は、現地地盤調査から K_0 効果と密度増大効果を分離する考え方を述べ、 K_0 効果の定量的な評価を試みて、標準的な現場強度管理として活用しているN値により簡易に素早く安価に現場強度確認へと活用する方法の検討について報告するものである。

2. 静的締固め工法における効果と課題

(1) 静的締固め工法の適用

当海岸では、軟弱地盤の液状化に伴う変位対策として、極めて流動性の低いモルタル（CPG工法）又は砂に流動化剤を添加した補給砂（SAVE工法）を静的に圧入して締



写真-1 撫養港海岸の平面写真

固める工法を多く適用している。参考までに、種々ある地盤改良工法の中で、当海岸では局所的な場所に適用が限定されている工法と理由は、以下の通りである。

- ① 薬液注入工法は、細粒分含有率の多い当海岸（細粒分含有率 $F_c > 40$ ）では適用が難しいこと。
- ② 高圧噴射攪拌工法は、締固め工法と比較して高価であり、堤防直下に対する斜め施工が難しいこと。

(2) 静的締固め工法における拘束圧の効果

締固め工法は、固結体が周辺地盤を圧縮し、密度増大と拘束圧の増加（静止土圧係数 K_0 の増加）の効果を期待している。そのうち、圧入による杭間の拘束圧の増加は、既往の研究等¹⁾²⁾から地盤強度を上げる効果が十分にあることが知られている。例えば、図-1 に示すように各工法の施工事例から概略的に把握するとすれば、当

海岸と同じ改良率 20%に対して、 K_0 値は 1.3~2.0 の上昇が期待できることになる。

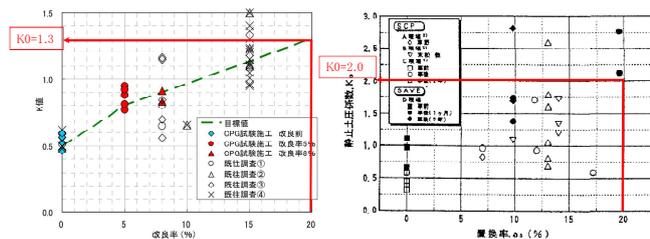


図-1 締め固め工法における拘束圧の効果
(左：CPG 工法の例，右：SAVE 工法の例)

(3) 静的締め固め工法の課題

前述の通り、既往の研究等から K_0 値の増加は、地盤強度を上げる効果として十分にあることは確認されているが、効果を設計で考慮することが難しいといった課題がある。しかし、課題である密度増大とのダブルカウントを避けた形で K_0 値を考慮した評価方法が可能であれば、施工後の N 値が設計で定める杭間 N 値を満足出来ていなかったとしても K_0 値の効果を検討することで、施工後の地盤強度の評価が素早く出来ることになる。

3. 簡易評価手法の手順と考え方

標準的な現場強度管理として活用している N 値を指標とした評価手法の検討に着目し、手順と考え方を以下に示す。

手順①：現地試験と室内試験の実施

改良前（未改良）と改良後（杭間）の地盤において、 N 値の計測と繰り返し非排水三軸試験（以下、三軸試験）を実施する。

手順②：換算 N 値の推定

計測した N 値から換算 N 値（拘束圧の影響を間接的に考慮）を推定する。また、三軸試験結果からフィッティングする換算 N 値をシミュレートして推定することで、換算 N 値による整理を行う。

手順③：密度増大効果と K_0 効果の分離の考え方

ここで、三軸試験を行うための試料採取は、地盤改良後の杭間地盤から試料を採取した時点で、拘束圧から解放される（ K_0 値はリセットされる）とすれば、改良後（杭間）の計測 N 値と三軸試験結果の差は K_0 効果への寄与と考える。一方で、改良前（未改良）と改良後（杭間）の三軸試験結果の差は、密度増大への寄与と考える。

手順④：ダブルカウント回避の考え方

解析に用いる二次元有効応力解析 FLIP に取り込む際に、設計目標 N 値（杭間 N 値）から K_0 効果上昇分の N 値を差し引くことで、FLIP パラメータ（液状化パラメータ等）を決定する。また、FLIP による初期自重解析後には、 K_0 効果上昇分の変位を強制変位として与えることで、密度増大とのダブルカウントを避けた形で K_0 効果を考慮できると考える。

手順⑤： K_0 値の定量的評価

K_0 値をパラメトリックに変化させ、性能規定照査（変形量の照査）を実施し、 K_0 効果が N 値に換算するとどの程度に相当する整理する。

このような整理が出来れば、施工後に実測した杭間 N 値が少し小さい場合でも、 K_0 効果による改良効果が説明できると考える。

4. 地盤調査による K_0 効果と密度増大効果の分離

(1) 地盤調査の概要

検証する解析モデルを図-2 に示す。液状化対象層 A_s 層に着目し、地盤改良前（以下、未改良地盤）と改良後の等価 N 値、換算 N 値、細粒分含有率（以下、 F_c ）及び液状化強度曲線を比較した。地盤調査結果の比較を表-1、液状化強度曲線の比較を図-3 に示す。改良後には、換算 N 値で 8 程度の上昇を示し、液状化強度曲線で見ると改良後には液状化強度の上昇を示している。

表-1 地盤調査結果

土層	等価 N 値の平均		換算 N 値の平均		細粒分含有率の平均 (%)
	改良地盤	未改良地盤	改良地盤	未改良地盤	
A_s	11.0	3.1	13.6	4.9	44.8

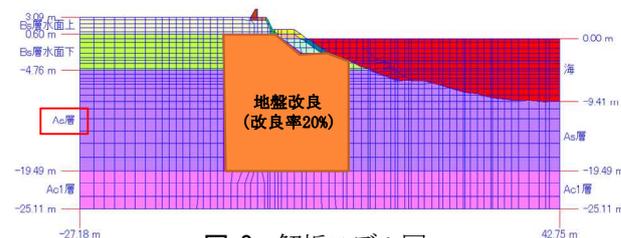


図-2 解析モデル図

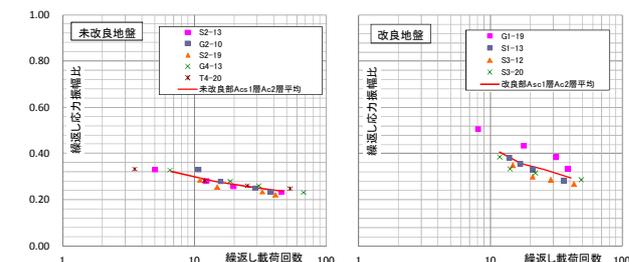


図-3 液状化試験結果

(2) 三軸試験結果から換算N値（等価N値）の推定

三軸試験を実施するために、不覚乱試料を採取した時点で K_0 値はリセットされると考えれば、改良前後の三軸試験結果の差は、密度増大による液状化抵抗増加への寄与を示している。一方、改良前後のN値の上昇は、密度増大効果と K_0 効果の両方が含まれていると考えられる。そこで、換算N値と F_c から推定した液状化強度曲線と三軸試験結果の比較を図-4に示す。未改良地盤では、N値と F_c から推定した液状化強度曲線と三軸試験結果が整合している。一方、改良地盤では、N値と F_c から推定した液状化強度曲線は三軸試験結果よりも大きい。これは、N値から推定した液状化強度曲線は、現地の K_0 効果上昇分だけ三軸試験結果よりも大きくなったと推定される。ここで、三軸試験結果と整合するN値を求めるため、三軸試験結果とフィッティングするような液状化強度曲線をシミュレートした(図-5)。結果、未改良地盤の三軸試験結果に対応する換算N値は6、改良地盤の三軸試験結果に対応する換算N値は11となった。換算N値及び等価N値の関係を表-2に整理する。

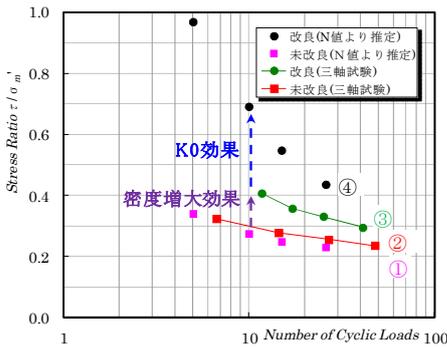


図-4 換算N値と F_c の推定液状化強度曲線

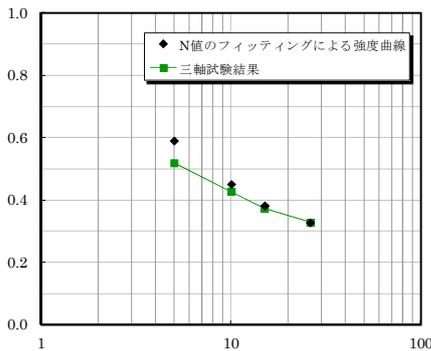


図-5 改良地盤の液状化試験のフィッティング

表-2 換算N値及び等価N値による整理結果

	換算N値	等価N値
① 未改良地盤(現場N値)	4.9	3.1
② 未改良地盤の三軸試験のフィッティング	6.0	4.9
③ 改良地盤の三軸試験のフィッティング	11.0	9.0
④ 改良地盤(現場N値)	13.6	11.0

(3) κ 法による換算N値（等価N値）の推定

港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成19年)(以下、港湾基準)によれば、締固め工法の設計として κ 法が(a)から(c)式で示され、圧入後の杭間N値が推定できる。未改良地盤の等価N値、 F_c 及び改良率(撫養海岸では20%)から、 K_0 効果を考慮しない条件の κ 法で杭間N値を算定すると等価N値9.7、換算N値11.9となった。これは、三軸試験結果から推定した等価N値9.0、換算N値11と整合する。よって、改良地盤と未改良地盤の三軸試験結果の差は、密度増大効果であることを確認できた。

$$N_1 = C_M \left(\frac{\kappa F_v + \gamma_i^*}{c + \kappa F_v + \gamma_i^*} \right)^2 A \quad (a)$$

$$\gamma_i^* = \frac{c \sqrt{N_0 / (AC_M)}}{1 - \sqrt{N_0 / (AC_M)}} \quad (b)$$

$$A = \frac{69 + \sigma_v'}{167} \quad (c)$$

N_1 : 圧入後のN値
 C_M : 係数、ここで、 $C_M = (1/0.16)^2$ としてよい。
 κ : 係数、ここで、 $\kappa = 5 \cdot 10^{-0.01F_c}$ としてよい。
 F_v : 圧入率
 c : 係数、ここで、 $c = 0.02F_c + 0.4$
 F_c : 係数: 細粒含有率(%)
 * : 式(2)で算定される係数
 N_0 : 現地盤N値
 A : 式(3)で計算される係数
 σ_v' : N値を計測したときの有効上載圧力(kN/m²)

表-3 κ 法と改良地盤の三軸試験の比較

	換算N値	等価N値
改良地盤の三軸試験のフィッティング	11.0	9.0
港湾基準(κ 法)	11.9	9.7

(4) K_0 効果と密度増大効果の分離

表-2 から改良地盤の三軸試験のフィッティングN値11と未改良地盤の三軸試験のフィッティングN値6との差分N値5、あるいは改良地盤の三軸試験のフィッティングN値11と未改良地盤の換算N値4.9との差分6.1は、密度増大効果による液状化強度増加分であると考えられる。一方、改良地盤の換算N値13.6と改良地盤の三軸試験のフィッティングN値11との差分2.6は、 K_0 効果上昇分であると考えられる。この考え方に基づいて等価N値でも同様の整理が可能である。

4. 簡易評価手法の検討

(1) K_0 効果のパラメトリックスタディによる解析

κ 法による杭間地盤の設計目標N値(等価N値9.7)から2, 3, 4, 5を引いた等価N値7.7~4.7と砂杭(等価N値25)の複合地盤として物性値を算定し、FLIPによる地震応答解析を行った。なお、当海岸では、地盤改良後(改良率20%)の孔内水平載荷試験より K_0 が0.7程度であることを確認している。既往の事例(図-1)を参考にして K_0 を1.3まで大きくした場合でも実施した。解析上 K_0 を設定する適切なモデル化が必要となるが、本報では

高橋ら²⁾によってモデル化された「横方向に強制変位を与える方法」に基づき設定した。表-4に解析ケースと地震応答解析結果を示す。残留鉛直変位は小さいことから、残留水平変位について着目して比較した。杭間の等価N値と胸壁直下地盤残留水平変位の関係、杭間の等価N値と過剰間隙水圧比(地盤改良範囲の平均)の関係を図-6に示す。青プロットは、当海岸の設計(κ法)による杭間の設計目標N値(等価N値9.7)と砂杭の複合地盤で設定した物性値での値である。設計目標N値よりも4小さい等価N値としても、K₀効果から目標等価N値と同等又は小さい残留変位になることが分かる。

表-4 解析ケースと応答解析結果

解析ケース	FLIP解析の物性値の設定方法	K0	N65	残留水平変位	残留鉛直変位	Δu平均
ケース1	目標N値の改良地盤と砂杭の複合地盤	0.5	9.7	1.50 m	-0.01 m	0.50
ケース2	(目標N値-2)の改良地盤と砂杭の複合地盤	0.7	7.7	1.25 m	-0.11 m	0.34
		0.9	7.7	1.24 m	-0.04 m	0.30
		1.1	7.7	1.22 m	-0.03 m	0.27
ケース3	(目標N値-3)の改良地盤と砂杭の複合地盤	1.3	7.7	1.19 m	-0.02 m	0.25
		0.7	6.7	1.34 m	-0.10 m	0.42
		0.9	6.7	1.28 m	-0.05 m	0.40
ケース4	(目標N値-4)の改良地盤と砂杭の複合地盤	1.1	6.7	1.25 m	-0.03 m	0.39
		1.3	6.7	1.23 m	-0.02 m	0.36
		0.7	5.7	1.46 m	-0.04 m	0.50
ケース5	(目標N値-5)の改良地盤と砂杭の複合地盤	0.9	5.7	1.37 m	-0.05 m	0.50
		1.1	5.7	1.32 m	-0.03 m	0.48
		1.3	5.7	1.30 m	-0.02 m	0.47
ケース6	(目標N値-6)の改良地盤と砂杭の複合地盤	1.3	4.7	1.50 m	-0.04 m	0.56
ケース6	(目標N値-6)の改良地盤と砂杭の複合地盤	1.3	3.7	1.94 m	-0.07 m	0.63

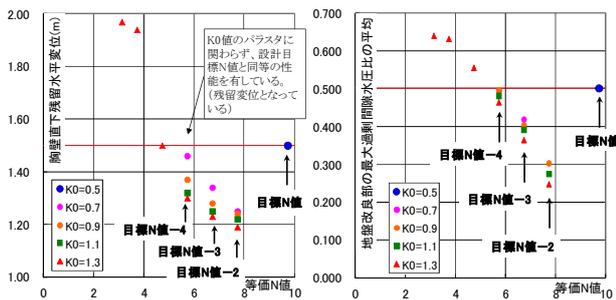


図-6 左：等価N値と残留水平変位の関係
右：等価N値と過剰間隙水圧比の関係

(2) 現場強度管理の評価手法の検討

地盤調査結果からK₀効果を等価N値で換算すると2.0の上昇であった。一方、パラメトリックスタディからは、杭間地盤と砂杭との複合地盤とし、更にK₀を解析上適切にモデル化することで、等価N値換算で4程度の上昇であった。このことから、K₀上昇の効果はN値の増加として地盤調査結果に現れる以上に地盤の液状化強度を増加させる可能性があることも分かる。よって、設計時に設定した杭間等価N値をN_{設計}とし、改良後の現場強度管理として杭間N値から整理される等価N値をN_{現場}とすると、(d)式の関係にあれば性能規定を満足できると考える。ここで、改良後の杭間N値は、地盤調査の特性からK₀効果を含んだ値であるため、設計時の杭間等価N値と比較する場合にはK₀効果分の2程度を引く必要がある。

$$N_{\text{現場}} - 2 > N_{\text{設計}} - 4 \dots (d)$$

(3) 評価手法の適用限界について

採取された砂の乱れが極めて小さいと考えられる凍結サンプリングと通常のチューブサンプリングにより得られた試料の液状化強度比と換算N値の関係については、吉見³⁾によって比較されている。これによれば、通常のサンプリングは、乱れの影響が無視できないことが多く、コストが見合うと考えられれば、凍結サンプリングなどの良質な試料が採取できる方法を採用することが望ましいとされる。しかし、本検討目的である簡易に素速く安価に評価することを考えると、多くの現場が採用している通常のサンプリングで評価することを考えたい。ただし、評価した精度を担保するためには、ある一定の適用限界を設けておく必要もあると考える。そこで、適用限界については、凍結サンプリングと差が大きくなる手前の換算N値15以下が望ましいと考える。なお、本稿の評価は、換算N値で15以下となっている(表-2)。

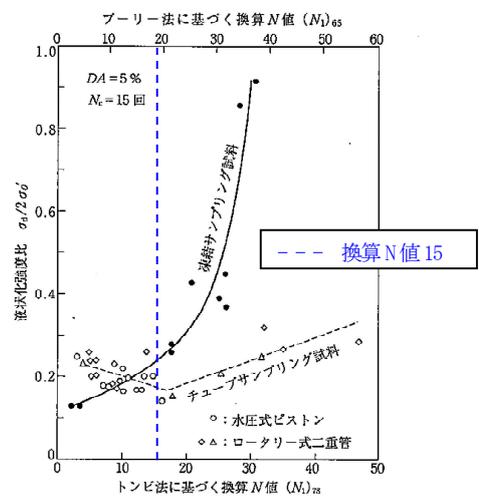


図-7 凍結サンプリングとチューブサンプリングの液状化強度比の比較 (吉見に加筆)

5. まとめ

締固め工法を適用する場合、未改良地盤と改良地盤においてN値計測と液状化強度試験を実施し、本稿で示す手順に基づいて換算N値による関係式を事前に整理しておけば、施工後の現場強度確認を簡易に素早く安価に判断することができる。ただし、本稿で示す数値は、撫養港海岸での地盤調査及び解析結果であることと、適用限界には注意が必要である。

参考文献

- 1) FLIP 研究会14年間の検討成果のまとめWG：FLIP 研究会14年間の検討成果のまとめ, 2011.
- 2) 高橋ら：海上空港における液状化対策としての静的圧入締固め工法の数値解析手法, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.68, No.2, I_444-I_449, 2012.
- 3) 地盤材料試験の方法と解説, p.745