

締固め工法における現場強確認の簡易評価手法の検討

国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 正会員 ○竹田 晃 富本 正 谷定 大輔
(株)ニュージェック 正会員 平井 俊之

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について提案するものである。

2. 地盤調査結果の概要

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-1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。

3. K_0 効果と密度増大効果の分離

1) 三軸試験結果からの換算 N 値（等価 N 値）の推定

液状化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、改良前後の液状化試験結果の違いは、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 値と細粒分含有率 F_c から推定した液状化強度曲線と三軸試験結果との比較を図-2に示す。未改良地盤では、 N 値と細粒分含有率から推定した液状化強度曲線と三軸試験結果とが整合している。一方、改良地盤では、 N 値と細粒分含有率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。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。

2) κ 法による等価 N 値の推定

港湾基準によれば、締固め工法の設計として κ 法が示され、圧入後の杭間 N 値が推定できる。未改良地盤の

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

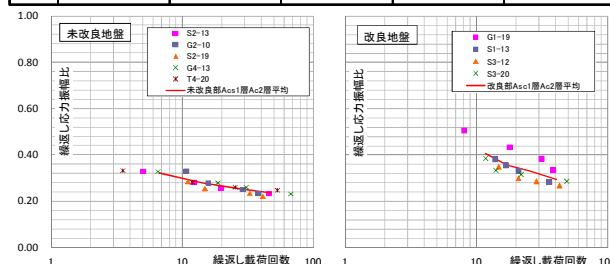


図-1 液状化試験結果

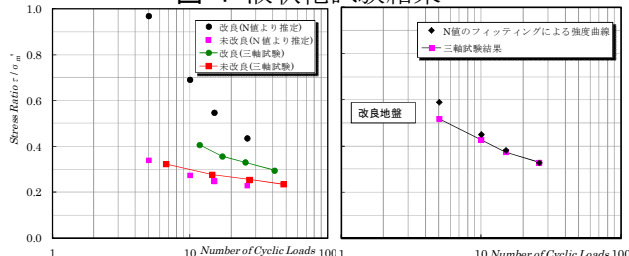


図-2 左:換算 N 値と F_c の推定液状化強度曲線
右:改良地盤の三軸試験のフィッティング

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
未改良地盤	4.9	3.1
未改良地盤の三軸試験のフィッティング	6.0	4.9
改良地盤の三軸試験のフィッティング	11.0	9.0
改良地盤	13.6	11.0

キーワード 締固め工法、液状化対策、性能照査

連絡先 〒760-0017 高松市番町一丁目6番1号(住友生命高松ビル2階)

国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 TEL087-811-5662

等価 N 値, 細粒分含有率及び改良率(当海岸では 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と確認できた.

3) K_0 と密度増大効果の分離

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える.

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える. 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 程度を確認している. 既往の事例より FLIP

研究会資料¹⁾では約 2.0, 羽田空港の報告²⁾では約 1.3 である. 比較のため K_0 を 0.7, 1.3, 2.0 で実施した. 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-2 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-3 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, K_0 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.

2) 現場強度管理の評価手法の検討

地盤調査結果から K_0 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 K_0 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, K_0 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. よって, 設計時に設定した杭間等価 N 値を N_{65d} とし, 改良後の現場強度管理として杭間チェックボーリングから得られる等価 N 値を N_{65e} とすると, (a) 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, 改良後のチェックボーリングは, 地盤調査の特性から K_0 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 K_0 効果分の 2 程度を引く必要がある.

$$N_{65e} - 2 > N_{65d} - 4 \quad \dots (a)$$

4. おわりに

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, 本稿で示すような換算 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, 当海岸での地盤調査及び解析結果であるため注意が必要である.

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.

表-2 解析ケースと解析結果

検討ケース	FLIP解析の物性値の設定方法	K_0	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
		0.7	7.7	1.25 m	-0.11 m	0.34
ケース2	目標N値-2の改良地盤と砂杭の複合地盤	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
ケース4	目標N値-4の改良地盤と砂杭の複合地盤	0.9	6.7	1.28 m	-0.05 m	0.40
		1.1	6.7	1.25 m	-0.03 m	0.39
ケース5	目標N値-5の改良地盤と砂杭の複合地盤	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6	目標N値-6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
ケース8	目標N値-5の改良地盤と砂杭の複合地盤	1.3	4.7	1.50 m	-0.04 m	0.47
		1.3	3.7	1.94 m	-0.07 m	0.63

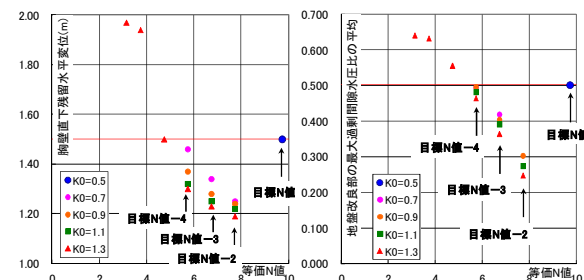


図-3 等価 N 値と残留変位, 等価 N 値と水圧比

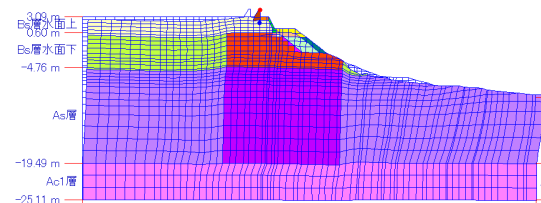


図-4 目標 N 値の解析結果(残留変形図)