

Application of vacuum-induced consolidation method to soft ground improvement

梅崎健夫 *2
塩野敏昭 *3
市川尋士 *4
中熊和義 *5

T.Umezaki (Civil Engineering Dept., Faculty of Engg., Shinshu Univ., Japan)

T.Shiono (Matsumoto Office, Nagano Branch, OYO Corporation, Japan)

H.Ichikawa (Ooji Office, Tokyo Consultants Co., Ltd., Japan)

K.Nakakuma (Saitama Head Office, Maruyama Industry Co., Ltd., Japan)

キーワード：地盤改良，真空圧密，有機質土，動態観測，強度増加

Keywords : soil improvement, vacuum consolidation, organic soil, field observation, strength increase

Abstract

From the recent projects using the vacuum-induced consolidation method, two case studies are introduced. One is about the stabilization of the soft ground under an embankment and the other is about a new application which substitutes for the dredging. From the results of field observation and cone penetration tests, the method is useful for the soft ground improvement.

1. はじめに

地盤改良工法の一つである真空圧密工法は、スウェーデン王立土質研究所のW.Kjellman¹⁾が盛土載荷に代わるプレローディング工法として1949年にその効果を発表して以来、広く実用化された工法である。日本では、1964年に神戸市の埋立地で試験施工が実施され²⁾、1970年代から1980年代にかけて数多くの実施工が行われた。しかし、真空を利用することから最大載荷応力が98kPaであり、多くの場合、実際の載荷応力は盛土高さ3~4mに相当する50~60kPaであったこと、その後、固結工法などの新たな地盤改良工法が開発されたことから、近年では本工法の施工例は少なくなっている。一方、中国では、1982年に天津港の埋立に用いられて以来、天津港では最近までの15年間に31の施工例で総面積は1,600,000m²、その他の広範囲の沿岸地域においても20の施工例で総面積は600,000m²に及んでおり、その間に本工法に関する独自の開発が進められている³⁾。また、1996年11月には米国科学財団(NSF)、ロサンゼルス港および地盤改良に関する国際土質基礎工学会技術委員会(TC-17, ISSMFE)の共催により「真空圧密の普及に関する国際ワークショップ」⁴⁾が開催され、スウェーデン、米国、中国および日本の研究者により本工法の発展に向けての課題やその解決方法について討議されている。

本文は、著者らが携わった最近の施工事例の中から、1997年に千葉県市原市の大百池(おおいけ)の環境整備事業の一環として実施された真空圧密工法による盛土基礎地盤の安定対策(施工面積2,520m²)と新しく考案した浚渫に代わる泥土処理対策(施工面積5,700m²)の事例について報告したものである。

2. 原位置の状況

千葉県市原市にある大百池(おおいけ)は、Fig.1に示すように、旧堤体により上池と下池に分

*1 China-Japan Joint Symposium
on
Recent Development of Theory & Practice in
Geotechnology

(1997)で発表

*3 (応用地質株式会社長野支店松本営業所)

*4 (東京コンサルタンツ株式会社王子分室)

*5 (丸山工業株式会社)

*2 (信州大学工学部社会開発工学科)

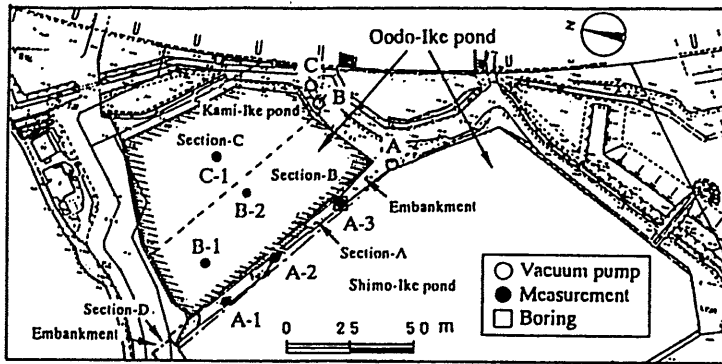


Fig.1 Areas of improvement and points of measurement

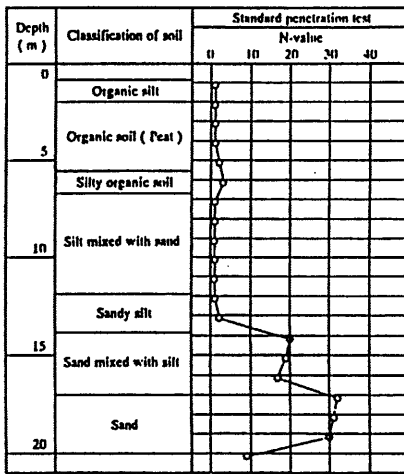


Fig.2 Soil boring log and N-value

Table 1 Results of laboratory test

Depth (m)	1.80	2.85	8.40
Classification of soil	Organic silt	Organic soil	Silt mixed with sand
Density of soil particles, ρ_s (g/cm ³)	2.480	1.873	2.676
Wet density, ρ_d (g/cm ³)	1.169	1.072	1.533
Natural water content, w_n (%)	204.7	323.8	90.3
Void ratio, e	6.27	6.46	2.18
Sand and gravel fraction (%)	27	30	28
Silt fraction (%)	41	45	47
Clay fraction (%)	32	25	25
Liquid limit, w_L (%)	221.9	283.9	86.6
Plasticity Index, I_p	131.5	129.1	42.8
Unconfined compressive strength, q_u (kPa)	11.27	22.44	56.45
Compression index, C_c	1.53	1.31	0.82
Consolidation yield stress, p_c (kPa)	12.74	23.52	56.84
Coefficient of consolidation, c_v (cm ² /day)	300	200	330
Coefficient of permeability, k (cm/s)	1.5×10^{-4}	8.0×10^{-7}	4.0×10^{-7}

かかれている。このうち、上池 (Section-B, C) と旧堤体 (Section-A, D) において真空圧密工法を用いた地盤改良が実施された。上池は、0~0.3mの水深であり、葦が繁茂している場所もある。旧堤体は、幅約2.0m、高さ約5.0mでありそのうち約0.3mは水没しており、高さ約7mの樹木が数本存在する。

旧堤体 (Fig. 1 のA-3地点) で行われた調査ボーリングの結果をFig. 2に示す。盛土下の地層は、有機質シルトが1.0m、有機質土 (泥炭) が3.5m、シルト質有機質土が1.0m、砂混じりシルトが5.0m、砂質シルトが2.0mであり、N値は、それぞれ、N=1, 1~2, 3, 1, および1~2であり、層厚12.5mの軟弱地盤が存在する。軟弱地盤における主な土質試験結果をTable 1に示す。有機質シルトおよび有機質土 (泥炭) は高含水比で一軸圧縮強度がかなり小さいことから無処理での盛土の造成は困難であり、圧密特性から判断して、その場合には圧密沈下が長期間継続することが予想される。また、砂混じりシルトも一軸圧縮強度が小さく圧縮性も大きいことから地盤改良が必要である。

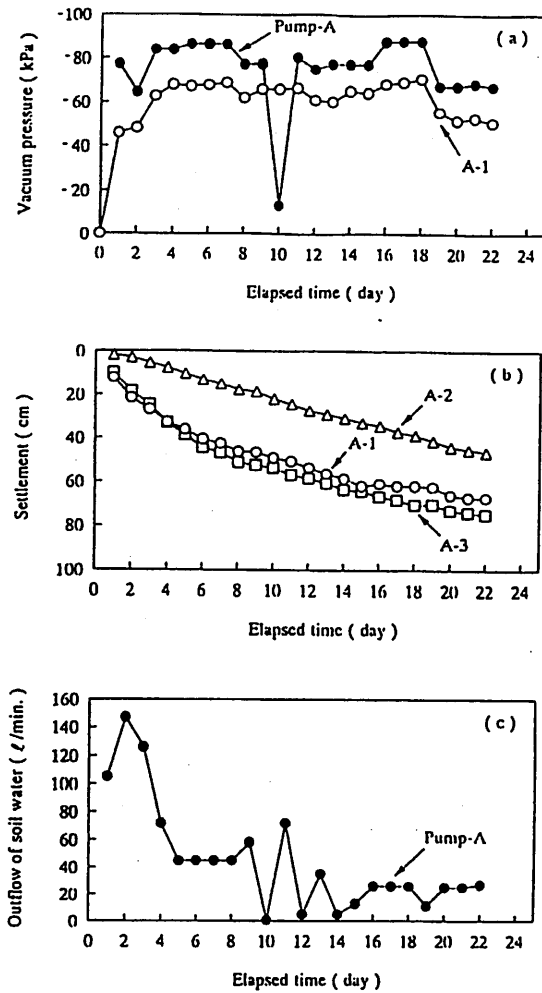


Fig.3 Changes of vacuum pressure, settlement and outflow of soil water with time (Soft ground under embankment)

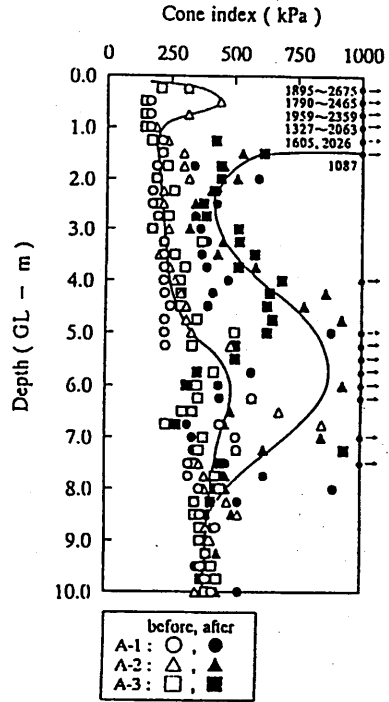


Fig.4 Distribution of cone index before and after countermeasures with depth (Soft ground under embankment)

上池は、歩行が困難な場所が大部分で表層付近の泥土の支持力はほとんど皆無であり、調査ボーリング、土質試験ともに実施していない。

3. 盛土基礎地盤の安定対策

(1) 施工の概要

旧堤体を幅8.0m、高さ1.5mに拡幅する造成工事に際して、盛土基礎地盤の安定対策として真空圧密工法を実施した。まず、建設機械のトラフィカビリティを確保するために、長繊維不織布(厚さ3mm、引張り強度60.0kg/5cm)を施工領域の全面に敷設し、透水性のあまり良くない現地発生土を0.5mの層厚を維持するように撤き出した。その後、全面透水ゾーンで柔軟性の良いプラスチックドレーン(厚さ4mm、幅10cm)を専用打設機械により間隔0.75mの正方形配置で深さ8.0mまで打設した。さらに、柔

軟性の良い有孔排水管を施工領域の中心に敷設した後、サンドマットの代わりに同じ材質のプラスチックドレーン（厚さ4mm、幅30cm）を水平排水材として0.75m間隔で敷設して鉛直排水材と有孔排水管を接続した。最後に、ピンホール防止の特殊加工を施した気密性シートを敷設し、気密性シートの端面は地中に埋設して処理した。

Fig. 1のPump-Aの地点に真空ポンプを設置し、真空ポンプにおける真空圧力および土中水の排出流量とFig. 1のA-1～3の地点における現地発生土内の地中圧力および地表面沈下量を測定した。

さらに、同地点において施工前と真空ポンプの停止後にオランダ式二重管コーン貫入試験を実施して地盤内の強度増加について検討した。

(2) 動態観測の結果

Fig. 3に真空圧力、地表面沈下量および土中水の排出流量の経時変化を示す。真空ポンプは駆動後すぐに-80kPa程度の真空圧力を示している。一方、真空ポンプから約85m離れたA-1の地点においては、真空圧力の増加に約3日間を要しているが、気密シート下の現地発生土内において-64kPa程度の真空圧力がほぼ一定に保持されている。なお、10日目においてポンプの真空圧力が低下しているのは気密シートの破損修理のためであり、19日目以降は沈下量が設計値に達したためポンプの出力を減少させた。

真空ポンプからそれぞれ約25mと約85m離れたA-3地点とA-1地点における沈下量はそれぞれ約75cmと約67cmである。両地点の中間のA-2地点の沈下量が異なっているが、設計に支障を来すような大きな施工のばらつきはなかった。

真空ポンプの駆動前から排水があり、測定した土中水の排出流量と沈下量とは直接関係づけられないが、沈下量の増加とともに単位時間当たりの排出流量は減少する。真空ポンプの駆動状況の把握のためにも施工管理の一項目として測定すべきである。

(3) 地盤内の強度増加

Fig. 4に施工前後のコーン指数の深さ方向の分布を示す。測定値はばらついているものの、ドレーンを打設した深さ8mまでの強度増加が認められる。また、地表面から深さ1.5mまでの強度増加が著しく大きい。この部分は旧堤体の盛土層と撤き出した現地発生土であると思われる。

4. 浚渫に代わる泥土処理対策

(1) 施工の概要

上池の水深を1.0mに拡張する工事に際して、真空圧密工法を応用して池の底に堆積した泥土地盤の圧密沈下を促進し泥土地盤を圧密固化することにより、通常行われる浚渫に代わる泥土処理工法を新たに考案し実施した。浚渫においては泥土の掘削と搬出が行われそれに伴い水質の汚濁が生じる。また、搬出した泥土の固化処理が必要であり、その廃棄場所も問題となる。一方、本工法では、上池の水位をポンプアップして一時的に泥土層表面まで低下させた後、まず、人力作業を確保するために、長繊維不織布（厚さ3mm、引張り強度60.0kg/5cm）を施工領域の全面に敷設し、プラスチックドレーン（厚さ4mm、幅10cm）を簡易打設機を用いて人力により間隔1.0mの正方形配置で深さ1.2mまで打設した。その後、Section-Aの作業と同様に、有孔排水管と、水平排水材としてのプラスチックドレーン（厚さ4mm、幅30cm、間隔1.0m）および気密性シートを敷設した。なお、施工領域は、Fig. 1に示すように、Section-BとCの2つに分割し、それぞれ独立の真空ポンプを用いた。動態観測と施工前後のオランダ式二重管コーン貫入試験も同様に実施した。

(2) 動態観測の結果

Fig. 5に真空圧力、地表面沈下量および土中水の排出流量の経時変化を示す。真空ポンプにおける真空圧力の増加に約5日間を要しているが、その後は、Pump-Bで-80kPa程度、Pump-Cで-65kPa程度の真空圧力が保持されている。一方、Section-Bにおいて、真空ポンプからそれぞれ約80mおよび約45m離れたB-1およびB-2の地点では真空圧力の増加に約10日間を要しており、気密シート下の泥土地盤内

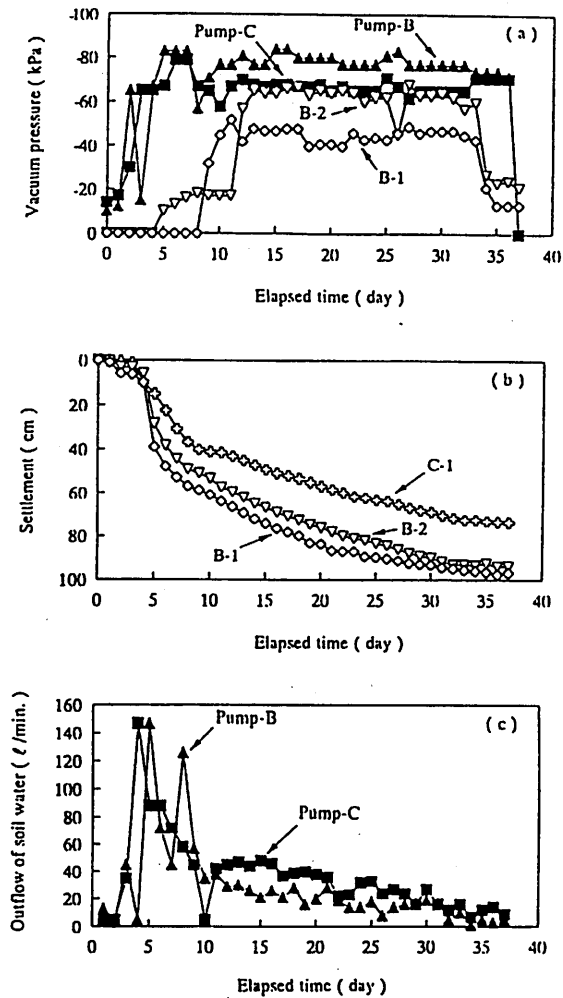


Fig.5 Changes of vacuum pressure, settlement and outflow of soil water with time (Kami-Ike pond)

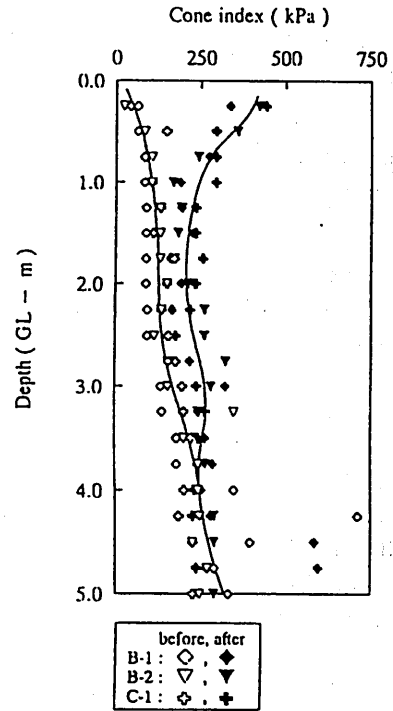


Fig.6 Distribution of cone index before and after countermeasures with depth (Kami-Ike pond)

においてそれぞれ-47kPaおよび-64kPa程度の真空圧力がほぼ一定に保持されている。

真空ポンプからそれぞれ約45mと約80m離れたB-2地点とB-1地点における沈下量はそれぞれ約97cmと約94cmであり、約50m離れたC-1地点の沈下量は約73cmである。1.2mのドレーン打設深さに対してその6~8割以上の沈下が生じたことになる。また、ポンプ停止後の地盤のリバウンドがほとんど生じていない。

沈下量の増加とともに単位時間当たりの排出流量は減少し、Pump-BとPump-Cの排出流量はほぼ同様の値を示している。

(3) 地盤内の強度増加

Fig. 6に施工前後のコーン指数の深さ方向の分布を示す、地表面付近の強度増加がとくに大きい。1.2mのドレーン打設深さに対して深さ3.5mまでの強度増加が認められる。

Table 2 Summary of recent projects by vacuum-induced consolidation method

Year	Site of project	Object of soil improvement	Type of soil	Improvement area (m ²)
1992	Ami, Ibaraki pref.	Stability of soft ground under embankment	Peat	4,878
1993	Ami, Ibaraki pref.	Stability of soft ground under embankment	Peat	910
1994	Ami, Ibaraki pref.	Lateral displacement of cut-off slope of bank	Peat	6,500
1995	Kasumigaura, Ibaraki pref. Tsuchiura, Ibaraki pref. Edosaki, Ibaraki pref.	Bearing capacity of dredged ground	Ooze	93,380
		Decrease in water content of dredged soil	Ooze	100
		Residual settlement of soft ground under embankment *)	Peat	2,840
1996	Hakuba, Nagano pref. Ami, Ibaraki pref.	Lateral displacement of cut-off slope of bank	Peat	9,830
		Stability of soft ground under embankment	Peat	1,470
		Lateral displacement of abutment on soft ground	Peat	700
		Bearing capacity of soft ground	Peat	7,200
1997	Ichihara, Chiba pref. Mito, Ibaraki pref. Tohgetsu, Hokkaido (under construction)	Stability of soft ground under embankment	Peat, Silt	2,520
		Settlement of ooze deposit for dredging **)	Ooze	5,700
		Settlement of ooze deposit for dredging **)	Ooze	4,770
		Stability of soft ground under embankment *)	Peat, Clay	1,000
Total				141,798

*) New method for rapid construction of embankment

**) New method for dredging

5. まとめ

施工事例により軟弱地盤改良工法としての真空圧密工法の有効性を示した。著者らは、真空を利用する本工法はその原理から地盤改良工法としてさらに広く応用できるものと考えている。Table 2は、著者らが携わった真空圧密工法の施工事例の一覧である。地盤改良の目的には、軟弱地盤や埋立地盤の支持力の増加、盛土基礎地盤の安定性の向上や残留沈下の防止のほか、掘削に伴う河川堤防や橋台の側方流動の防止、浚渫土の脱水固化、さらには、新しく考案した浚渫に代わる泥土処理工法や真空排水による急速盛土工法も含まれている。これまでに対象とした主な土質は、泥炭を主とする有機質土地盤、浚渫土および湿地や池の底に堆積した泥土であり、1992年から1997年現在までの総施工面積は141,798m²である。現在、真空圧密の基礎的理論^{6), 6)}、本工法の設計法および施工技術の確立、そして、新たな適用方法の開発について、C & C研究会 (Workshop on Consolidation & Counter-measures) の中で研究を進めている。

【謝辞】 千葉県市原市の大百池の施工事例は、住宅都市整備公団 首都圏都市開発本部 千葉・市原開発事務所で計画された環境整備事業の一環であり、関係各位に深い感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) W.Kjellman : Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure, *Proc. of Conf. of Soil Stabilization in MIT*, pp.1-6, 1949.
- 2) 五洋建設株式会社技術研究所編：ペーバードレーン工法と大気圧密工法 第6章 大気圧密工法、理工図書、pp.197-215, 1968.
- 3) L.Yixiong : Application and experience of vacuum preloading method, Tianjin Port Engineering Institute, 1996.
- 4) *Proc. of International Workshop on Technology Transfer for Vacuum-Induced consolidation: Engineering and Practice*, 1996.
- 5) 梅崎健夫, 千野克浩, 川上 浩：真空による粘土の圧密挙動, 第32回地盤工学研究発表会, pp.367-368, 1997.
- 6) 千野克浩, 梅崎健夫, 川上 浩：真空圧密を受けた粘土の非排水せん断強度, 第32回地盤工学研究発表会, pp.579-580, 1997.