セメント系固化材を用いた柱状固化体の支持特性[†]片岡 宏治* 後藤 年芳* 荻野 拓哉*
清水 和也* 中野 錦一**

Bearing Capacity of Soil-Cement Column in Several Soft Grounds

by

Kohji KATAOKA*, Toshiyoshi GOTO*, Takuya OGINO*

Kazunari SHIMIZU* and Kin-ichi NAKANO**

Vertical loading tests of soil-cement columns were carried out in three soft grounds by banking in order to obtain the allowable bearing capacities and distribution of axial force of the columns. The axial strains, head and bottom settlements of the columns were measured during the tests.

The soil-cement columns were placed in situ and their diameters were in the range of 45 ~ 47 cm and the lengths were 3 ~ 6 m.

The test results show that the allowable bearing capacities of the columns are 4.7 ~ 10 tons and the bearing capacities of the columns placed in the soft strata without reaching to the supporting stratum arises mostly from skin friction, while those placed on the supporting stratum from both of skin friction and end bearing resistance. The settlement of the columns in long term loading tests were very small in all grounds.

Key words : Bearing capacity, Soil-cement, Column, Soft ground, Friction, Settlement, Strain

1 はじめに

セメント系固化材は、土質安定材料として各種の地盤改良工事に適用され幅広く利用されるようになってきている。特に固化材を用いて地盤中に柱状の固化体を造成する深層改良工法は、工事の目的、規模によって各種の工法が開発、実用化され、支持力増強、沈下量の低減、地盤の変形防止等の目的に使用されている。

これらの中で最近、小規模住宅の軟弱地盤対策に比較的小口径の柱状固化体が、摩擦杭としての機能を保有していることに着目して用いられている例が多くなっている。^{1)~5)}こうした固化体の支持力についての報告では、載荷試験結果等は示されているが支持力に周面摩擦力がどの程度寄与しているかを明らかにしたデータはほとんど示されていない。^{1), 4), 5)}

本報告は、小型のトラッククレーンに油圧オーガーを取り付けた削孔機により、排土しながら固化材を粉体のまま添加混合し、オーガーを逆転して締固める工法で造成した、小口径柱状固化体に関して行った研究報告である。研究は、まず施工性と固化体の性能を検討した。さらに柱状固化体の載荷試験を実施し、荷重と固化体のひずみ測定などの結果からその支持特性について

の考察を行なった。

その結果、周面摩擦力の支持力への寄与が非常に大きいことが明らかになった。

2 実験結果

2・1 試験地盤

試験を実施した地盤は、いずれも丘陵地に造成された盛土地盤であり、スウェーデン式サウンディング試験結果と標準貫入試験結果を Fig. 1, 地盤の代表的な

Fig. 1. Results of swedish weight sounding and standard penetration testing.

[†] 原稿受理 昭和63年2月5日 Received Feb. 5, 1988

* 大阪セメント(株)中央研究所 大阪市大正区南恩加島, Osaka Cement Co., Ltd., Minamiokajima, Taisho-ku, Osaka

** 正会員 大阪セメント(株)中央研究所 大阪市大正区南恩加島, Osaka Cement Co., Ltd., Minamiokajima, Taisho-ku, Osaka

Table I. Physical properties of soil samples in test ground.

Test ground	Depth (m)	Natural water content (%)	Wet density (g/cm ³)	Grain size distribution (%)		
				>2mm	2mm-74 μ m	<74 μ m
No. 1	0-1.5	19.6	2.04	7.4	42.6	49.9
	1.5-3	13.9	2.11	15.1	53.6	31.3
	3-5	22.9	1.97	6.7	42.8	50.5
No. 2	1-2	29.7	1.84	8.7	29.3	61.8
	2-5	25.3	1.83	3.0	31.7	65.3
No. 3	2-3	23.3	1.98	24.5	36.8	38.7

1) Beginning of drilling. 2) Drilling and adding cement to soil. 3) End of drilling. 4) Fill up the hole. 5) Mixing. 6) End of mixing. 7) Insert the drill in the hole. 8) Compaction. 9) End of compaction. 10) Top leveling.

Fig. 2. Execution flow.

土質の試験結果を Table I に示す。図中には固化体の施工深さも示した。

2・2 固化体造成の施工条件と固化体の強度

固化体の造成手順は Fig. 2 に示すとおりであり、排土時の固化材の添加、孔内での混合、オーガーを逆転することによる締固めが基本的な要素となっている。固化材の添加量は固化体体積 1m³ 当たり 200 kg とし、造成に用いたオーガー径は 40 cm である。

施工条件が固化体の強度におよぼす影響を調べるために No. 1 の地盤で施工性に関する試験を実施した。

試験条件は、Table II に示すとおりで、Fig. 2 の 4) ~ 6) の混合操作の回数と固化体強度との関係を中心に調べた。

Table II. Execution test condition and item.

Item	Condition
Screw	$\phi=400\text{mm}$ $\ell=6\text{m}$
Excution depth	3m
Addition of cement	200kg/m ³
Number of mixing	1: *1) ~ 4), 7) ~ 10) 2: 1) ~ 10) 3: 1) ~ 6), 4) ~ 10) 4: 1) ~ 6), 4) ~ 6), 4) ~ 10)

*Work number of Fig. 1

(1) 混合回数と土塊の大きさ

混合土を約 20 kg 採取し、25 mm 標準ふるいの残分量百分率を求めた。

(2) 固化体の形状

施工後 5 ~ 6 日経過したのち柱状固化体をバックホウにより掘り出し、巻尺で形状寸法を測定した。

(3) 固化体の強度

掘り出した固化体を長さ 80 cm 程度に切断して成形し、両端をキャッピングして 100 トン圧縮試験機により圧縮強度を求めた。

(4) 施工時の騒音・振動

施工試験時の騒音と振動を、騒音計および振動レベル計により測定した。

2・3 載荷試験

(1) 載荷試験方法

載荷試験を実施する固化体は、No. 1, No. 2 地盤では、摩擦杭としての効果の程度を明らかにするために施工深さ（杭長）を変えて施工し、No. 3 地盤では N_{sw} が 500 程度（N 値 15）の砂層まで施工した。

固化体の軸ひずみと底部の沈下量を測定するために抵抗線ひずみゲージを周長方向の対称位置に貼付した塩ビパイプ内に鉄筋を挿入し底部のみを速硬セメントペーストで固定した (Fig. 3 参照)。載荷試験に先立ち、固化体の中心部をボーリングし、孔内に挿入した塩ビパイプとボーリング孔との間げきに固化材スラリーを注入して固定した。

固化体頭部は、水平に成形し、超速硬セメントモルタルでキャッピングしたのち、薄く砂を敷いて載荷板を設置した。鉄筋の沈下を測定する器具等を設置後、

Fig. 3. Loading test apparatus.

載荷板と鉄筋の沈下量測定用のダイヤルゲージ式変位計, 油圧ジャッキ, ロードセル等を Fig. 3 に示すように設置した。反力は反力杭あるいはバックホウの自重とした。載荷は, 緩速多サイクル方式とし, 1 荷重段階での保持時間はそれぞれ 30 分とした。

なお, 載荷試験は施工後約 1 ヶ月を目安として実施した。

(2) 長期間の持続載荷試験方法

No. 1 および No. 2 地盤において, 長期間の持続荷重による沈下量の経時変化を追跡した。長期載荷を行なう固化体には, 施工時に 200×200 mm 長さ約 1.2 m の H 形鋼を頭部に約 50 cm 圧入しておき, 約 1 カ月経過後 No. 1 地盤では 5 t, No. 2 地盤では 3 t のコンクリートブロックを H 形鋼頭部に固定するように打設して持続荷重とした。沈下量はコンクリートブロックに設置したスケールと付近に設置した不動点とを比較し, レベルを用いて測定した。

Fig. 4. Relationship between number of mixing and percentage retained on 25mm sieve.

3 試験結果と考察

3・1 施工条件と固化体の強度

(1) 混合回数と土塊の大きさ

Fig. 4 に混合回数と混合処理土の 25 mm ふり残分量の関係を示す。混合操作を繰り返すことにより土塊は小さく解されて混合程度が良くなる傾向にあり, 2 回以上ではほぼ 25 mm 以下にはぐれた。

(2) 固化体の形状

施工後 1 週間経過した後に掘り出した固化体の形状を測定した結果, 直径は 450 ~ 470 mm であった。これは, オーガ径 400 mm にくらべオーガの振れや締固め操作によりこの程度大きく仕上がるものと考えられる。

(3) 固化体の強度

掘り出した固化体を長さ 80 cm 程度に切断して整形し, 両端をキャッピングして圧縮試験を実施した。供試体数は 1 条件当り 1 ~ 3 本であり, Fig. 5 に混合回数と改良体の破壊強度の平均値の関係を示す。図中の黒丸は埋め戻し作業時にオーガを孔内に挿入し逆転する方法によったもので混合程度が良いと考えられ破壊強度も高くなっている。また, 改良体強度は, 盛土地盤であるために近接した位置でも土質が変化していることや締固め程度の差異などでばらつきが大きく, 25 mm 残分量のように混合回数との関係が明確でない。混合回数が 1 回の場合は, 目視によっても混合程度が悪いことが確認できるが 2 回程度以上になると供試体の状態も良くなり 15 トン以上の破壊強度が得られている。

Fig. 5. Relationship between number of mixing and strength of column.

(4) 施工時の騒音・振動

施工試験時に騒音と振動を騒音計および振動レベル計により測定した。10 m 離れた位置での騒音レベル

Table III. Loading test results.

Test ground	Length of column (m)	Yield load (tf)	Ultimate load (tf)	Allowable bearing capacity (tf)	Ultimate settlement (mm)		Residual settlement (mm)	
					Head	Bottom	Head	Bottom
No. 1	2.8	16.0	30.0	8.0	25.3	13.6	18.4	10.0
	4.7	20.0	30.0	10.0	7.9	2.4	4.4	1.5
No. 2	2.7	10.9	15.0	5.0	12.3	3.6	9.9	2.2
	4.7	10.1	14.0	4.7	18.4	0.9	13.7	0.4
	5.7	10.6	14.0	4.7	41.6	0	37.8	0
No. 3	4.0	—	15.0	>5.0	1.1	0.4	0.2	0.2

の最大値は75dB とほとんどがエンジン音によるものであり、4 m 離れた位置での振動レベルの最大値は45dB とほとんど人体に感じない程度であった。

3・2 載荷試験結果と固化体の挙動

荷重—沈下量曲線を Fig. 6～8 に、試験結果の一覧表を Table III に示す。

No. 2 地盤の 5.7 m, 4.7 m および No. 3 地盤の固化体は底部の沈下がほとんどなく、その他の固化体は底部

Fig. 6. Load-settlement curve. (No. 1 ground).

Fig. 7. Load-settlement curve. (No. 2 ground).

Fig. 8. Load-settlement curve. (No. 3 ground).

部の沈下も認められた。Table III 中の降伏荷重は、 $\log P \sim \log S$ 曲線、 $S \sim \log t$ 曲線、 $\Delta S / \log t \sim P$ 曲線により検討して求めた。折点荷重が明確であった $\log P \sim \log S$ 曲線を Fig. 9～Fig. 11 に示した。いずれの固化体も長期許容支持力で 4.7 tf/本以上を示した。

Table IV にそれぞれの改良体のコアあるいは掘り出した供試体の一軸圧縮強度と変形係数を示した。No. 2 の地盤は細粒分、特にコロイド分を多く含んでおり含水比が比較的低いにもかかわらず強度は低く

Fig. 9. Log P-log S curve. (No. 1 ground).

Fig. 10. Log P-log S curve. (No. 2 ground).

Fig. 11. Log P-log S curve. (No. 3 ground).

なっている。

荷重試験時の固化体のひずみ分布を Fig. 12 ~ 15 に示す。図中には Table IV に示したそれぞれの変形係数と、頭部の直径から求めた軸力の目盛りも併記した。

No. 1 地盤では、4.7 m の固化体の 3 t 荷重時には計算軸力もほぼ 3 t となり、固化体の上部 3 m の摩擦で支持されている傾向が認められた。また、周面摩擦力

Fig. 12. Strain distribution of column. (No. 1 ground, 4.7 m).

は GL-0.5 ~ -1.5 m 間の軸力の低下から算出すると 4.5 tf/m² となり、スウェーデン式サウンディング試験結果からの推定式による一軸圧縮強度 9 tf/m² の 1/2 と一致した。しかし、6 t 以上の荷重では計測されたひずみが小さく計算軸力と載荷荷重が一致しない。荷重保持中にひずみが低下する現象が認められたことから、塩ビパイプの固定が不十分となり以後の変形に追従しなかったものと考えられる。2.8 m の固化体も同様であった。

No. 2 地盤では、塩ビパイプの固定が十分であったため、計算軸力と載荷荷重はほぼ一致した結果が得られた。支持の状態は、底部のひずみが小さいことから、いずれの固化体もほとんど周面摩擦により支持されていたと考えられる。14 ~ 15 tf の荷重時で固化体の破壊が起こっていることが Fig. 7, 10, 13 から推察される。周面摩擦力は、GL-1.0 ~ -2.0 m 間の軸力の低下から算出すると、3.4 tf/m² となり、スウェーデン式サウンディング試験結果から計算される一軸圧縮強度 6 tf/m² の 1/2 とほぼ一致する。

No. 3 地盤では、表層部の摩擦の寄与が大きい。ま

Table IV. Mechanical property of columns.

Ground	Compressive strength (kgf/cm ²)	Modulus of deformation E ₅₀ (kgf/cm ²)	Specimen
No. 1	8.5 ~ 19.3 ave. 13.4	6100 ~ 8000 ave. 6900	column
No. 2	5.7 ~ 11.4 ave. 8.35	1720 ~ 4200 ave. 3000	core
No. 3	21.8 ~ 59.2 ave. 34.6	3200 ~ 12400 ave. 8000	core

Fig. 13. Strain distribution of column.
(No. 2 ground, 2.7 m).

Fig. 14. Strain distribution of column.
(No. 2 ground, 4.7 m)

た、固化体底部が砂層に達しているため載荷荷重が大きくなるに従い先端支持力の寄与も増大し、最大荷重時で約 29% の負担になっている。GL-1.0 ~ -2.0 m 間のひずみの変化が小さいのは固化体先端が砂層に達しているために沈下量も小さく周面摩擦力の寄与が小さいためであると考えられる。

Fig. 15. Strain distribution of column.
(No. 3 ground, 4.3 m).

3・3 長期間の持続載荷による沈下量

No. 1 および No. 2 地盤における、長期間の持続荷重による沈下量は Table V に示すとおりである。測定期間は、試験現場の制約で 1 ヶ月と 3 ヶ月であったが、持続載荷による沈下量はレベルの測定精度では判別できない程度に小さい。したがってほとんど進行していないものと考えられる。

3・4 長期許容支持力の算定

柱状固化体を用いた地盤改良工における長期許容支持力の算定には、場所打コンクリート杭の支持力算定式の準用が考えられる。載荷試験において固化体の破壊がなく、降伏荷重から長期許容支持力を判定した No. 1 地盤について、載荷試験と支持力算定式による長期許容支持力を Table VI に示した。

Table VI. Long term allowable bearing capacity of columns.

Columns	Long term allowable bearing capacity (tf)	
	Measurement-value	calculation-value
2.7m	8	4.5
4.7m	10	8.2

Table V. Settlement of column in durable loading tests.

Ground	Length of columns (m)	Load (tf)	Term of test (days)	Long term allowable bearing capacity (tf)	Settlement of short term loading (mm)	Settlement of durable loading (mm)
No. 1	3	5	38	8.0	0.6	<1.0
	5	5	38	10.0	0.5	<1.0
No. 2	3	3	94	5.0	0.9	<1.0
	5	3	94	4.7	0.6	<1.0

長期許容支持力算定式

$$Ra = \frac{1}{3} \left[15\bar{N}A_p + \left(\frac{1}{5}N_sL_s + \frac{q_u}{2}L_c \right) \phi \right] - W$$

ここに,

$\bar{N}$: 先端 N 値

A_p : 固化体の断面積 (m^2)

N_s : 砂層の平均 N 値

L_s : 砂層の厚さ (m)

q_u : 粘土層の平均一軸圧縮強度 (tf/m^2)

L_c : 粘土層の厚さ (m)

ϕ : 固化体の周長 (m)

W : 固化体の自重 (tf)

載荷試験による長期許容支持力は, 計算値に対して, 固化体長 2.7 m で 1.78 倍, 固化体長 4.7 m で 1.22 倍の値となった. 算定式による長期許容支持力と実測値との相関については, 平均値 $\pm \sigma$ の範囲にほぼ分布していることが示されており, 今回の結果は, 荷重は小さいけれどもほぼ同様な分布範囲に入っており, しかも実測値が計算値より大きく現われていて, 計算値で判断すれば安全側になる. したがってこの算定式が十分利用できるものと考えられる.

4 ま と め

盛土されて 1~2 年程度経過した地盤において, 簡易なトラックオーガを用いて施工したセメント系固化材による柱状固化体造成工法の施工性の試験を実施し, 固化体強度を確認して標準的な施工法を確立した.

3 箇所の地盤でのセメント系固化材による柱状固化体の載荷試験を実施し, 同時に測定した固化体底部の沈下量および固化体のひずみについて検討した結果, 柱状固化体の支持力には, 周面摩擦力が大きく寄与していることが明らかになった. N 値が 3~5 程度の

地盤において, 比較的強固な地盤に到達させずに固化体を造成した場合でも, 数トン程度の載荷時にはほとんどが周面摩擦力により支持され, 沈下量も小さいこと, さらに 3~5 tf /本の長期間の持続載荷に対しても沈下はほとんど認められないことを確認した. N 値 15 の砂層まで到達させた場合には, 沈下量は極めて小さく, 先端支持力も寄与していることが確認できた.

このように, 柱状固化体は, 小規模住宅の基礎地盤補強工として十分に機能するものと考えられる.

今後は, 実際に使用した建物の追跡調査等で長期的な挙動についても明らかにしていく必要がある.

最後に, 試験場所を提供していただいた住宅都市整備公団関西支社, 兵庫県住宅供給公社の担当各位に感謝の意を表します.

(昭和62年9月18日 土質安定材料シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 甚野慶右, 基礎工, **2**, 86 (1985).
- 2) 甚野慶右, 野田伸也, “第17回土質工学研究発表会”, p. 725 (1982).
- 3) 平井誠一, 富田 隆, 基礎工, **7**, 73 (1987).
- 4) 小林一郎, 基礎工, **7**, 78 (1987).
- 5) 榎並 昭, 日比野信一, 高橋守男, 秋谷健二, 山田雅一, 第22回土質工学研究発表会, p. 1859 (1987).
- 6) 稲田倍雄, 土と基礎, **1**, 13 (1960).
- 7) 日本建築学会, “建築基礎構造設計基準・同解説”, p. 235 (1974).
- 8) 日本建築学会, “建築基礎構造設計基準・同解説”, p. 238 (1974).