地盤改良を応用した角形鋼管柱脚の力学的性状に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON BEHAVIOR OF STEEL SQUARE TUBULAR COLUMN BASE WITH SOIL CEMENT

張 冠 華 ——*1 中 島 徹 ——*2

キーワード:

柱脚, 地盤改良, 水平加力, 履歴曲線, 耐力

Keywords:

Column base, Soil cement, Lateral loading, History curve, Capacity

Guanhua ZHANG ——*1 Toru NAKAJIMA ——*2

A new type of steel column base system with improved soil cement has been developed. In this study, lateral loading test was carried out on two case of specimens in order to investigate the behavior of the new steel column base. The crack pattern, strain distribution and history curves were discussed.

1. はじめに

近年、経済の低迷もあり、建築工法に対する省力化・経済性の追求が高まっている。また、世界的な地球環境意識の高まりに従い、環境負荷低減を図った工法が精力的に開発されている。

その一つに、基礎構造について、セメント系固化材を用いた地盤改良が近年かなり適用されるようになった。その材料特性に関する研究も盛んになされているが、あくまでも地盤の補強手段として用いられているのが現状である。適切な固化材量を配合すれば、一定の強度を得ることができ、また、その耐久性も確認されている¹⁾⁷⁾¹⁰⁾。

以上の観点から、施工性の簡略化、工期の短縮、経済性および環境負荷の低減を図り、ブロック状の地盤改良を応用して低層鉄骨造建物を対象とした柱脚を考案した。図1は在来工法と新考案工法の概略を示したものである。新考案工法は根切り深さの低減やコンクリート工事の低減、工期の短縮が期待できる。

本柱脚工法において、柱の鉛直力はコンクリートフーチングを通して改良体に伝わり、地盤に伝達していく形である。水平力を受けた時に、柱の改良体に延長した部分により、柱脚に発生する曲げモーメント及びせん断力に抵抗し、埋め込み柱脚のメカニズムと近似していると考えられる。これまでの地盤の補強に重点をおいた研究からは、鉛直力時の安全性が予測できると考えられるが、改良体を構造体の一部として取り込んだ研究は殆どなく、水平力を受けた場合の安全性が不明な点が多い。本研究では、その地震時の抵抗性状を明らかにするため、角形鋼管を地盤改良体に埋め込んだ場合の水平加力実験を行った。基本性状を得るためにプレーン改良体を用いたシリーズⅠと、破壊しやすい上口を溶接金網で補強したシリーズⅡの2シリーズとした。

図1 柱脚比較

2. 実験概要

2.1 試験体

表1に試験体諸元を示すと共に、図2に試験体形状を示す。試験体は2シリーズ全10体であり、改良体は1000×1000×900とした。鋼管サイズは□100×100×4.5である。改良体への埋め込み深さは500を基本とし、TR100-5は700である。シリーズⅡの各試験体の改良体上口をφ5-150×150の溶接金網で補強した。TR100-3、TR100-4は改良体の上に200厚のコンクリートを打ち込んであり、コンクリートと改良体の間には200ピッチでD10の異形鉄筋コネクタを配置し一体化を図った。コンクリートをフーチングと見立て200ピッチのD6ベース筋を配筋した。各試験体の改良体強度はφ50×h100のシリンダー3本を用いて評価し、その平均値を表1に示した。用いた柱鋼管の材料特性を表2に示す。

*1 ㈱エルフ 開発部長・博士(工学)
(〒761-0102 香川県高松市新田町甲2087-1)

*2 ㈱エルフ 代表取締役

*1 Elf Inc., Dr. Eng.

*2 President-Director, Elf Inc.

本実験が対象とする工法は、流動化処理土手法を取り入れた地盤改良工法で、機械攪拌式に属する。試験体の作製は、鋼製型枠を用いた。改良土（ソイルセメント）は、土・セメント・水を鋼製槽に入れて均質になるようにコンボで攪拌混合し、スラリー状にした。練り上げた改良土を型枠に打設して柱鋼管を挿入した。打設時に十分充填できるように突き棒で隅部を締めた。強度評価用シリンドラーは、モールドを用いてコンクリートシリンドラー作製のような要領で作った。なお、改良土は流動性を有しており、よい自己充填性を有する。土は、比較的攪拌混合しやすい砂質土を用い、固化材を高炉セメントとした。セメントの量は改良土 1m^3 あたり 200kg とした。

図2 試験体形状

表1 試験体一覧表

	試験体	埋め込み深さ (mm)	コンクリート厚さ (mm)	改良体の溶接金網補強	加力点高さ (mm)	目標強度 (N/mm^2)	改良体強度 (N/mm^2)
シリーズ I	T100-1	500	—	なし	1000	3.0	3.36
	T100-2	500	—	なし	1000	3.0	2.84
	T100-3	500	—	なし	1000	2.0	1.8
	T100-4	500	—	なし	1000	2.0	2.56
シリーズ II	TR100-1	500	—	あり	1000	2.0	2.12
	TR100-2	500	—	あり	1000	2.0	1.79
	TR100-3	500	200	あり	800	2.0	2.65
	TR100-4	500	200	あり	800	3.0	4.05
	TR100-5	700	—	あり	800	2.0	2.35
	TR100-6	500	—	あり	800	2.0	2.33

* 加力点高さはコンクリートがある場合、コンクリート面から起算

2.2 載荷及び測定方法

載荷は水平加力で、正負繰り返し載荷とした。加力概略を図3に示す。載荷は変位制御とし、変形角 $1/400(0.0025\text{rad})$ 、 $1/200(0.005\text{rad})$ 、 $1/100(0.01\text{rad})$ 、 $1/50(0.02\text{rad})$ 、 $1/25(0.04\text{rad})$ 、 $1/15(0.067\text{rad})$ 、 $1/10(0.1\text{rad})$ で載荷を行った。最後に正加力で $\delta=120\text{mm}$ まで加力し終局とした。なお、耐力に急激な低減があった場合、終局とした。加力点高さが 800mm のTR100-3～6については、 $1/8(0.125\text{rad})$ のサイクルも行った。

計測に関しては、荷重はジャッキに取り付けたロードセルによって計測した。変形については、加力点の柱頭レベルに変位計を設置したほか、鋼管の埋め込み部および改良体の補強鉄筋（溶接金網）に歪ゲージを貼付した。歪ゲージの貼付位置を図4に示す。補強鉄筋では同じ位置に上下2枚の歪ゲージを貼付した。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊性状

最終破壊状況を図5に示す。破壊図は改良体底面を除いて展開図の形となっており、中央は試験体上面である。上下は加力方向と直交する面であり、下に位置するのがジャッキ側となる。コンクリート

表2 鋼材の機械的性質

実験シリーズ	形状 (呼び寸法)	板厚 (mm)	材質	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 ($10^3\text{N}/\text{mm}^2$)	伸び %
T100	□-100x100x4.5	4.4	STKR400	379.4	431.9	1.81	23.3
TR100	□-100x100x4.5	4.5	STKR400	339.7	409.0	1.82	24.3

図3 加力概略図

図4 歪ゲージ貼付位置

付きの試験体の表面は破壊が殆ど認められなかったので、省略する。すべての試験体について $1/25(0.04\text{rad})$ サイクル以降で改良体にひび割れが発生し、改良体強度が高いほど、ひび割れの発生時変形が大きい傾向となっている。TR100-1,2では鋼管の加力方向近傍に圧壊が確認されたほか、ひび割れが認められた。改良体強度が低いほど、表面の圧壊領域が広く、ひび割れの程度も進んでいる傾向を示している。TR100-5,6についてはいずれも、小さい圧壊領域に留まり、ほぼ同じ強度であることから、埋め込み深さが深いほど圧壊が軽くなることがわかる。ひび割れは鋼管の近傍ではほぼ 45° 方向に発生している。シリーズIの試験体では加力方向に押し出すようなせん断的な破壊が発生しており、急激な耐力の低減が起きている。一方、シリーズIIでは、TR100-2を除いて破壊に達するようなひび割れが確認されなかった。TR100-2が同傾向のひび割れが確認されたものの、大きな耐力低減がなかった。この違いは鉄筋及びコンクリートによる補強の影響と考えられる。

3.2 鋼管の軸歪

正加力時における鋼管埋め込み部の歪分布を図6に示す。縦軸は深さで横軸は歪を取っている。各変形レベル時の歪を図中にプロットしている。コンクリート付き試験体については、深さはコンクリート表面を0とした。すべての試験体において埋め込み上部に最大歪

図5 最終破壊状況

が発生している。各試験体の鋼管は $1/50(0.02\text{rad}) \sim 1/25(0.04\text{rad})$ で降伏歪に達している。鋼管先端付近の歪は、埋め込み深さが浅いものは深いものよりやや大きくなっている。コンクリート付き試験体はコンクリート無し試験体より、深部の歪が小さい傾向を示しており、表面近傍の低減が幾分急になる傾向を示している。分布傾向は総じて文献3)で得られたコンクリートの場合と同じ傾向である。

3.3 曲げモーメント分布

柱鋼管の曲げモーメント分布を図7に示す。正加力の各加力サイクルの変形レベルにおける値をプロットした。曲げモーメントの算定は、鋼管両側（加力方向の直交面）に貼付している2枚の歪ゲージによって得られた歪を用い、平面仮定が成立すると仮定して行った。

図6 鋼管の軸歪分布

最大曲げモーメントが挿入部表面近傍に生じていることが分かる。改良体のみの試験体を着目すると、先端部の曲げモーメントは、埋め込みが深いTR100-5においてほぼゼロに近いのに対し、その他の試験体は若干大きな値を示しており、鋼管先端において曲げを受けていることが考えられる。コンクリート付き試験体では深部のモーメントがコンクリートなしのものより、小さい値を示しており、改良体強度が若干高いこともあるが、上口のコンクリートの影響が主な原因と考えられる。

3.4 補強筋の歪

改良体上口補強筋の鋼管横の鉄筋歪と水平荷重の関係を図8に示す。歪は鋼管近傍に位置するゲージによるものである。いずれも「く」

図 7 鋼管の深さ方向曲げモーメント分布

の字の形となっている。改良体強度の低いものほど歪が大きい傾向を示しており、表面の圧壊の傾向に一致している。埋め込みが深いTR100-5については、浅いものより歪が小さくなっており、改良体表面部に作用する応力が低減していることによると考えられる。また、コンクリート付きの試験体においては、鉄筋歪が低い値を示しており、コンクリートが有効に働いていることがわかる。

3.5 荷重—変形関係

各試験体について、荷重—変位関係を図9に示す。変形は加力点の水平変位である。シリーズⅠについて、T100-2,3は変形1/25(0.04rad)の手前あたりに、T100-4は1/15(0.067rad)の手前あたりに耐力の低下

図 8 鉄筋の歪—水平荷重

が見られ、終局に至った。T100-1について1/15サイクルなしに1/25サイクルの後に直接1/10まで加力したが、急激な耐力低下がなく、ひび割れの発生により最終サイクルの負加力時に耐力低下が見られた。これらの耐力低減は前記の破壊性状の節で述べたパンチング破壊に起因すると考えられる。実験では端部に二点で反力をとっているが、実際の柱脚では前面に土の抵抗が働くこととなり、パンチング破壊に対し、ある程度改善されると考えられる。履歴特性についてみると、ひび割れ発生後ではやや逆S字を呈している部分もあるが、ほぼ紡錘形を有しており、安定していることがわかる。

一方、シリーズⅡについては、いずれの試験体も、シリーズⅠと比べると、より大変形まで安定したループを描いており、耐力の大きな低減が殆どない。いずれの試験体についても1/100(0.01rad)まではほぼ弾性的な挙動を示している。まず強度の違い以外で同一条件のTR100-1,2をみると、1/25(0.04rad)サイクルで剛性の大きな低減が現れ、鋼管の塑性変形が支配的になっていることがわかる。これは鋼管の軸歪からも確認できる。TR100-1では1/50(0.02rad)サイクル以降ではやや逆S字的な形状を成しており、これは改良体の表面付近で塑性化や、また、それにより鉄骨と改良体の間に隙間が生じたことによると考えられる。TR100-2ではTR100-1より特に大変形時に顕著な逆S字カーブを示しており、スリッ的な特性になっている。この違いは改良体強度の違いに起因していると考えられる。TR100-2は、TR100-1と較べると、ひび割れの発生度合いや表面圧壊領域が大きく、鉄骨と改良体の間に比較的広い隙間が出来ている。TR100-3,4はコンクリート付きの試験体である。2体とも典型的な鋼材の紡錘形の履歴ループを描いており、安定している。最大耐力後、徐々に低減しているが、埋め込み表面近傍に発生した鋼管の局部座屈による影響と考えられる。表面部のコンクリートは改良体上部の

圧壊等による耐力低減防止に寄与していることがわかる。TR100-5,6については、加力点はコンクリート付きの場合と同じであり、TR100-6の鋼管の埋め込み深さはTR100-1,2と同じ500mmにしている。また、TR100-5の鋼管の埋め込み深さは700mmとしている。2体とも安定したループとなっているが、TR100-6は大変形時にやや逆S字の傾向を示している。これは埋め込み深さの浅いTR100-6において改良体表面部の塑性化がより進んでいることによると考えられる。全埋め込み深さが同じであるTR100-5とコンクリート付きのTR100-3,4と較べると、TR100-5は剛性がやや劣化しているが、ほぼ遜色のない安定した履歴ループが得られている。

図9 変位—水平荷重関係

3.6 水平耐力

表3に水平耐力の実験値と計算値の比較を示す。水平耐力は鋼管の降伏による他、改良体の支圧強度及びパンチン破壊により決まると考えられる。改良体による耐力は、ここでは、支圧強度の場合について述べる。埋込部の歪及び曲げモーメントの深さ方向の分布はコンクリートに埋め込んだ場合とよく似ていることから同じようなメカニズムであると考えられる。そこで、コンクリートに埋め込んだ場合と同じように、図10に示す支圧応力分布を仮定できる。支圧強度は建築学会 プレストレスコンクリート設計施工基準・同解説に示している支圧強度式による。式1に示すとおりである。本実験では改良体の横幅は柱鋼管の10倍であり、 $F_b=2F_c$ となる。水平耐力の算定は埋め込み柱脚の方法³⁾⁶⁾によった。これにより得られた値は計算値2欄に示してある。圧壊が発生したと考えられるTR100-2の計算値は実験値をやや下回る。計算にあたりコンクリート付の試験体については、コンクリート部分は改良体と同じ終局応力とした。計算値1は鋼管の全塑性モーメントから算定した値である。塑性ヒンジは埋め込み表面からD/2 (D:鋼管のせい) 入ったところに発生すると仮定し、力のつりあいから加力点位置における水平力を算定した。水平耐力は上記の2計算値の小さい方になる。表からは、計算値は概ね安全側の耐力を与えることがわかる。なお、パンチン破壊モードの耐力に関する研究が少なく、今後の課題となる。

$$F_b = \sqrt{A_1/A} \cdot F_c \text{ かつ } \leq 2F_c \quad \text{式1}$$

ここでは、 F_b : 改良体支圧強度

F_c : 改良体強度

A_1 : 改良体の支承面積

A : 支圧面積

図10 支圧応力分布

表3 水平耐力一覧

試験体	実験値	単位: kN	
		計算値1	計算値2
T100-1	29.5	20.8	33.3
T100-2	22.4	20.8	28.1
T100-3	22.5	20.8	17.8
T100-4	25.9	20.8	25.3
TR100-1	21.5	20.0	21.0
TR100-2	20.3	20.0	17.7
TR100-3	28.5	25.1	55.2
TR100-4	28.7	25.1	84.4
TR100-5	26.1	25.1	49.0
TR100-6	26.6	25.1	27.4

4. まとめ

本実験は、無補強の地盤改良体及び上口を補強した地盤改良体を用いた埋め込み角形鋼管柱脚について2シリーズの水平加力実験を行った。その結果、下記のことがわかった。

- 1) 鋼管を改良体に埋め込んで柱脚とすることが可能であり、埋め込み深さは鋼管せいの5倍程度をとれば、柱鋼管を先行降伏させることができる。
- 2) 柱鋼管の埋め込み部における軸歪および曲げモーメント分布がコンクリートに埋め込んだ場合と同じ傾向を示す。
- 3) 履歴曲線は紡錘形を有しており、安定している。
- 4) 改良体の上口を補強すれば、せん断破壊が軽減され、大変形までより安定した履歴特性が得られる。
- 5) 埋め込み深さが深いほど、表面部の圧壊が軽減され、吸収エネルギーが大きい安定した履歴特性となる。
- 6) フーチングのコンクリートを改良体と一体化することにより、改良体の圧壊を防ぐことができ、より安定した履歴特性が得られる。
- 7) 改良体支圧応力分布が等分布と仮定した水平耐力、埋め込み部にD/2入ったところにヒンジが形成すると仮定した水平耐力によって簡略的に評価した柱脚の水平耐力の計算値は実験値を安全側に評価できる。

参考文献

- 1) 社団法人 セメント協会：セメント系固化工材を用いた改良体の長期安定性に関する研究、2002.3
- 2) 中島重壽、五十嵐定義：曲げモーメントとせん断力を受ける角形鋼管柱の埋込み形式中柱柱脚部における力学性状、その1 実験計画と荷重-変形関係、日本建築学会構造系論文報告集、第366号、1986.8、pp.106～118
- 3) 中島重壽、五十嵐定義：曲げモーメントとせん断力を受ける角形鋼管柱の埋込み形式中柱柱脚部における力学性状、その2 初期剛性と終局耐力および応力伝達機構、日本建築学会構造系論文報告集、第374号、1987.4、pp.63～76
- 4) 森田耕次、加藤勉、田中淳夫、藤田典正：埋込み形式柱脚の最大耐力に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第347号、1985.1、pp.65～74
- 5) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針、2001
- 6) 日本建築学会：鋼管構造設計施工指針・同解説、1990
- 7) 日本建築センター：建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針、2002.9
- 8) 張冠華、中島徹：地盤改良を応用した柱脚に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演概要集、C-1、2003.9、pp.751～752
- 9) 張冠華、中島徹：地盤改良を応用した角形鋼管の柱脚に関する実験的研究、その1 プレーン改良体の場合、日本建築学会大会学術講演概要集、C-1、2004.8、pp.749～750
- 10) 二本幹夫、他：建築基礎地盤としてのセメント系改良地盤に関する研究、全体概要・その1～44、日本建築学会大会学術講演概要集、1994～1997

[2004年10月20日原稿受理 2005年2月23日採用決定]