

ジャッキダウン工法の適用拡大



吉田 一*



山田 正人**



林 篤*

これまでに線路上空に人工地盤を構築する場合の施工方法として、従来工法よりも約15%程度コストダウンが図れるジャッキダウン工法を考案し、柱梁接合部として円形の柱を限定としたソケット式接合部の耐力算定式を提案した。しかしながら、線路上空人工地盤では、ホーム端からの距離の確保、室内面積の確保の観点から角形鋼管柱を使用するケースもある。

そこで、柱を角形とした試験体による載荷試験により、ソケット式接合部の耐荷機構を解明し角形柱の場合の耐力算定式を提案した。併せてソケット鋼管内に低強度充填材を用いた場合の耐荷機構、繰返し荷重の影響についても確認し、ジャッキダウン工法の適用範囲の拡大を図った。

●キーワード：ソケット式接合、ジャッキダウン、角形鋼管柱、耐荷機構、終局耐力

1. はじめに

駅部線路上空に人工地盤を構築する場合、図1 (a) のように仮上家の設置、ケーブル類の移設回数の多さがコストアップにつながっていた。そこで、仮上家の省略、上家に添架されるケーブル類の移設回数を削減することによりコストダウンと工期短縮を図ることができるジャッキダウン工法を開発した (図1 (b))。

具体的には、図2に示すように外ダイアフラム形式の柱梁接合部をユニット化したソケットにより既存上家に支障しない位置に人工地盤を構築し、既存上家の撤去後、所定の位置まで人工地盤をジャッキダウンし、その後、柱とソケットの間の空隙にモルタルやコンクリートを充

填し柱と接合するものである。

これまでソケット式接合部は円形鋼管柱での適用を想定し、円形の柱に限定した終局耐力算定式を制定してきたが、線路上空人工地盤では、ホーム端からの距離の確保、室内面積の確保の観点から角形鋼管柱を使用するケースもある。そこで、角形鋼管柱を用いたソケット式接合部の耐荷機構を解明することを目的とし、人工地盤の柱・梁接合部をモデル化した模型供試体を用いて載荷試験を実施し、ソケット式接合部の終局耐力算定手法について検討した。

また、接合部の耐荷機構を更に解明するため、円形鋼管を柱とし、充填材に低強度コンクリートを用いた載荷試験、充填材に剥離防止を施した繰返し荷重の載荷試験についても実施した。以下にその概要を示す。

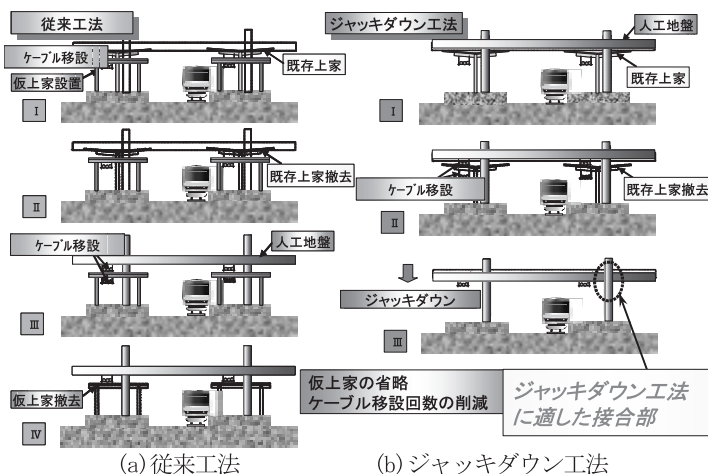


図1 従来工法とジャッキダウン工法のイメージ

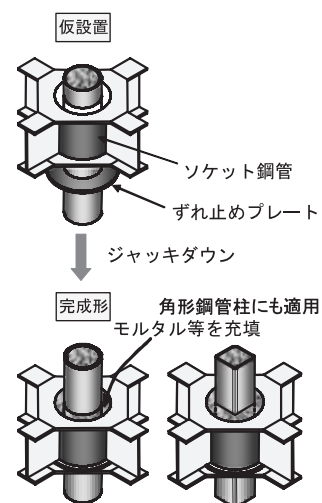


図2 接合部のイメージ

2. 角形鋼管柱を用いたソケット式柱梁接合部に関する実験

2.1 実験概要

2.1.1 試験体形状および諸元

試験体の形状および諸元を図3、表1にそれぞれ示す。なお、図3、表1には後述するS—4、S—5試験体および既往のP—6試験体についても示している。試験体は、柱・梁接合部をモデル化したT形試験体で、コンクリート充填角形鋼管柱よりも径の大きなソケット鋼管にコンクリート充填角形鋼管柱を差し込み、間隙をモルタルで充填して一体化する構造とした。ソケット鋼管外側に外ダイアフラムを設け、H形梁を接合させている。試験体はS—1を標準試験体とし、S—2およびS—3は鋼管径を変えた試験体である。さらにS—3試験体については、コンクリート充填角形鋼管柱を45度回転させた試験体とした。

角形鋼管柱の形状は、充填モルタルによる支圧面積が一定となるよう円形鋼管柱の円周の1/4と角形鋼管の一边を統一した。各試験体には、鋼管の表面と充填モルタルとの付着性能を向上させるため、ソケット鋼管内側および柱鋼管外側に、 $\phi 6\text{mm}$ の丸鋼を50mmピッチで円周上および柱側面にフレア溶接している。

なお、今回の試験では、鋼管柱を降伏させずに接合部を破壊させるように、鋼管柱およびソケット鋼管の板厚をそれぞれ定めた。鋼材は、ソケット鋼管のみSS400（一部の試験体はSM490）とし、それ以外の部分についてはSM490を使用している。鋼管柱への充填コンクリートは設計基準強度 27N/mm^2 、柱とソケット鋼管との空隙充填材には設計基準強度 45N/mm^2 程度のプレミックスモルタル（S—4試験体は設計基準強度 18N/mm^2 のコンクリート）

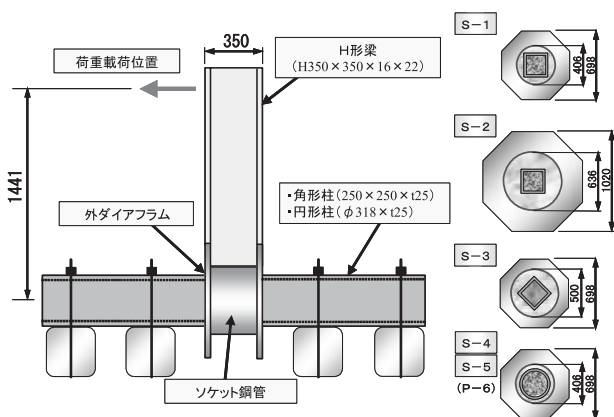


図3 試験体形状

表1 試験体諸元

試験体名	鋼管柱 d (mm)	梁 (mm)	ソケット 鋼管径D (mm)	ソケット 長さL (mm)	ソケット 板厚t (mm)	パラメータ
S-1	250×250×t25	H350×350×16×22	406	350	6	角形鋼管（標準ケース）
S-2	250×250×t25	H350×350×16×22	636	350	6	角形鋼管（ソケット鋼管径）
S-3	250×250×t25	H350×350×16×22	500	350	6	角形鋼管（ソケット鋼管径） 角形鋼管柱45度回転
S-4	$\phi 318 \times t25$	H350×350×16×22	406	350	6	円形鋼管（標準ケース） 低強度コンクリート充填
S-5	$\phi 318 \times t25$	H350×350×16×22	406	350	6	円形鋼管（交番載荷） モルタル剥離対策
P-6 (既往)	$\phi 318 \times t25$	H350×350×16×22	406	350	6	円形鋼管（標準ケース）

表2 材料強度

試験体名	降伏点 (N/mm^2)					圧縮強度 (N/mm^2)	
	ソケット 鋼管	柱鋼管	外ダイア フラム	梁 フランジ	梁 ウェブ	柱コン クリート	充填 モルタル
S-1	292	369	322	328	371	30.3	73.6
S-2	292	369	322	328	371	31.6	73.2
S-3	394	357	357	357	376	52.6	58.6
S-4	394	357	357	357	376	52.0	15.2
S-5	292	345	357	329	350	39.1	48.4
P-6 (既往)	311	321	366	326	330	41.8	51.1

を使用した。表2に実験に用いた鋼材の降伏点とコンクリートおよびモルタル材料の実験当日の強度を示す。

2.1.2 載荷方法

載荷方法は、図3に示す位置での片押しの単調載荷とした。載荷は、試験体が破壊するかジャッキのストローク限界となる200mm程度まで行った。

測定については、載荷力、各部位での変位、ソケット鋼管、柱鋼管、外ダイアフラムでのひずみを測定した。

2.2 実験結果および考察

2.2.1 破壊過程および性状

標準となるS—1試験体の破壊状況について記述する。まず、充填モルタルの側面に角形鋼管角部からひび割れが発生し、載荷とともにひび割れが進展し、充填モルタルとソケット鋼管および鋼管柱との空隙が確認された。その後、ソケット鋼管の一部が、周方向に対して45度方向ひずみが増加して降伏ひずみに達した。更に載荷荷重の増加に伴って充填モルタルのひび割れが進展し剥落し始め、充填モルタルと鋼管柱およびソケット鋼管との空隙が広がっていった。また、外ダイアフラムの黒皮が剥れ落ち、ソケット鋼管のせん断変形が進展していった。そして、外ダイアフラムの面外変形が進展していき、載荷点変位が250mmとなった段階で実験を終了した。

S—2、S—3試験体についても降伏ひずみに達する位置、方向あるいは各部の損傷程度に差はあるものの、概ねS—1試験体と同様な破壊状況であった。図4にS—1試験体の破壊状況および図5にS—3試験体の破壊状況を示す。



図4 S—1試験体



図5 S—3試験体

2.2.2 ソケット鋼管主ひずみ分布

図6にソケット鋼管表面の主ひずみ分布を示す。図6 (a) は、S—1試験体の降伏荷重時における主ひずみ分布、図6 (b) は、同じくS—1試験体の終局耐力時における主ひずみ分布である。

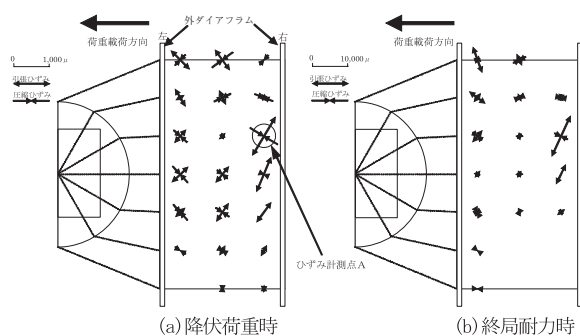


図6 ソケット鋼管主ひずみ分布 (S—1試験体)

まず、図6 (a) のS—1試験体の降伏荷重時についてであるが、図より右外ダイアフラム側 (ひずみ計測点A付近) のソケット鋼管のせん断応力 (または、斜め引張力) が卓越していることがわかる。さらに、載荷荷重の増加に伴いこの傾向が顕著になっていくことから、このソケット鋼管を介して外ダイアフラムに応力が流れていることが、図より推定される。従って、S—1試験体については、ソケット鋼管の表面と充填モルタルとの付着力が高かったことにより、梁からの断面力に対する接合部の抵抗部材としてソケット鋼管が有効に機能していたと推定される。

なお、ソケット鋼管径の大きなS—2試験体の主ひずみ分布においても、S—1試験体と概ね同様な主ひずみ分布となっていた。また、柱鋼管を45度回転させたS—3試験体においても、終局耐力時に角部付近の斜め引張力が卓越しているが、分布形状はS—1およびS—2試験体と同様であり、梁からの断面力に対する接合部の抵抗部材としてソケット鋼管が有効に機能していたと推定される。

2.2.3 荷重・変位関係

図7にS—1、S—2およびS—3試験体と過去に行った円形

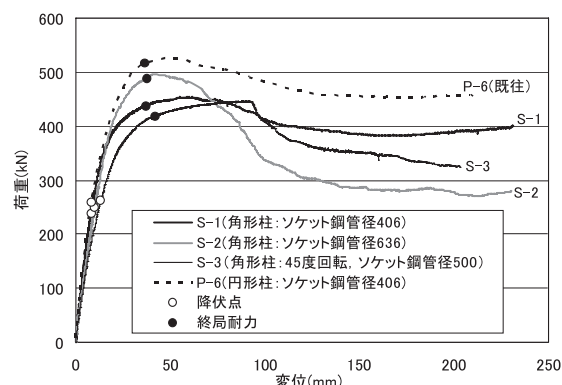


図7 荷重・変位関係

鋼管を柱とした標準タイプP—6試験体 (柱鋼管径 $\Phi 318 \times t25\text{mm}$) の荷重・変位関係を示す。図中における●印は終局耐力を表わしており、荷重・変位関係の接線勾配が初期勾配の5%にまで低下した時点の荷重を便宜的に実験により得られた終局耐力と定義した。

図7に示した角形柱の試験体を比較すると、S—2試験体の終局耐力はS—1試験体より大きい値となった。これはS—2試験体が、S—1試験体と比較して外ダイアフラムの外寸法が異なっており、外ダイアフラムの終局耐力に及ぼす影響が大きかったためと考えられる。そのため終局荷重以降は外ダイアフラムの耐力が低下し、他の試験体と比較すると荷重の低下が大きかったものと推定される。

また、角形鋼管柱を45度回転させたS—3試験体の終局耐力はほぼS—1試験体と一致しており、柱角部の影響による終局耐力の低下はみられなかった。次に、図7より標準体のS—1とP—6試験体を比較すると変位増加傾向は同等であるが、終局荷重に差がみられる。これは円形柱に比べ充填モルタルの体積と形状に差があるため、充填モルタルのせん断耐力が低下していることが考えられる。

2.3 T形ソケット接合部の終局耐力の算定

2.3.1 接合部の耐荷機構

過去の円形鋼管を柱とした実験において検討した接合部の主な耐荷機構としては、図8に示す耐荷モデルから柱鋼管とソケット鋼管の間に生じる支圧力の偶力と柱鋼管と環状のモルタルの間に生じる摩擦力の偶力により、接合部に作用する曲げモーメントおよびせん断力に抵抗していることが解明できており、モーメントの釣り合い式を解くことで式(1)に示す終局耐力算定式を提案している。また、形状差によるソケット鋼管と外ダイアフラムの強

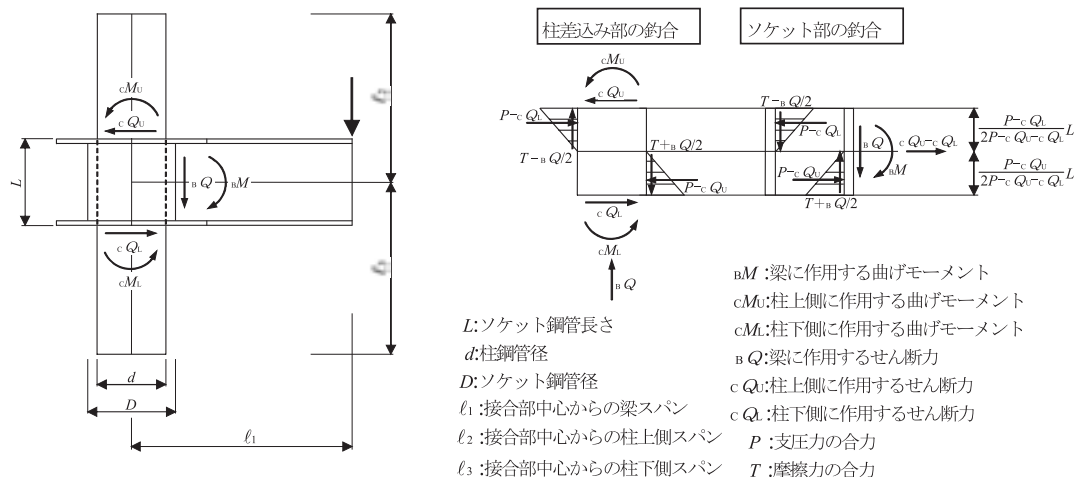


図8 接合部の耐荷モデル

度分担割合の違いなどを考慮し式(2)のように支圧力の合力Pの補正を行っている。

その補正係数 γ は柱鋼管径d、ソケット鋼管径D、ソケット鋼管長さL、ソケット鋼管厚tとの相関性を導き出し、式(3)のように定式化している。なお、Vs、Vc、Vpは、ソケット鋼管、モルタル部、外ダイアフラムがそれぞれ負担するせん断耐力を示している。また、Xの式を構成するtsは、外ダイアフラムの板厚を示している。

(終局耐力算定式)

$$M_u = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad \dots (1)$$

ここで

$$\begin{aligned} A &= 16 \ell_1^2 \left[(\ell_2 + \ell_3 - L) \{ 2 \ell_2 \ell_3 - 2 \ell_2 L - 2 \ell_3 L - L^2 \} + 3d(2\ell_3 - L) \tan \phi \right] + L(2\ell_2 - L)(2\ell_3 - L) \\ B &= (2\ell_1 - D) \{ 4\ell_2 \ell_3 - \ell_2 L - \ell_3 L \} [8P\ell_1(12\ell_2 \ell_3 + \ell_2 L + \ell_3 L - 4L^2) + 6\sqrt{2}d\ell_1 \{ cdL(2\ell_3 - L) + 2\sqrt{2}P \tan \phi(3\ell_3 + \ell_2 - 2L) \}] \\ C &= (2\ell_1 - D)^2 \cdot (4\ell_2 \ell_3 - \ell_2 L - \ell_3 L)^2 \cdot (8LP^2 + 3\sqrt{2}d^2 cLP + 12dP^2 \tan \phi) \end{aligned}$$

(支圧力の合力)

$$P = (V_s + V_c + V_p) \cdot \gamma \quad \dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= 0.501X + 0.485 \\ X &= (2.97t/D + 1.55ts/D)(d/D)(L/D)10 \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

2.3.2 角形鋼管柱における終局耐力の算定

角形鋼管柱を使用した今回の実験においては、円形鋼管柱よりも終局耐力が低下することがわかった(図7)。そこで、角形鋼管柱の内接円を円形鋼管柱に置換え、角形鋼管柱の内接円の直径をdとして上式から終局耐力を推定することを試みた。また、内接円で置換えることにより見かけ上、ソケット鋼管径が大きくなることから式(3)のXに掛かるソケット鋼管径Dに係数を乗じて式(4)のように支圧力を補正することを試みた。

$$X = (0.8(2.97t/D + 1.55ts/D))(0.8d/D)(0.8L/D)10 \quad \dots (4)$$

以上のように補正して求めた接合部の終局耐力の計算値と実験値を比較したものを表3および図9に示す。図表より計算値は実験値を比較的精度良く評価できていることがわかる。なお、表3、図9には、過去の円形鋼管柱および後述するS-4試験体の実験値と計算値についても記載している。

以上の結果から、柱に角形鋼管を用いたソケット式接合部の応力伝達機構が解明でき、ジャッキダウン工法における適用の拡大を図ることができた。

表3 終局耐力の計算値と実験値

試験体名	実験値 Puexp (kN)	計算値 Pucal① (kN)	Puexp /Pucal①	パラメータ
P-1	522	517	1.01	標準ケース
P-2	426	423	1.01	ソケット鋼管径
P-3	837	822	1.02	ソケット鋼管長さ
P-4	686	638	1.08	ソケット鋼管板厚
P-5	586	605	0.97	ソケット鋼管径
P-6	517	552	0.94	位置固定プレート無し
P-8	529	503	1.05	ソケット鋼管径
S-1	438	429	1.02	角形鋼管(標準ケース)
S-2	489	435	1.12	角形鋼管(ソケット鋼管径)
S-3	417	386	1.08	角形鋼管45度回転(ソケット径)
S-4	408	425	0.96	低強度コンクリート
P-11	514	528	0.97	外ダイアフラム無し
P-12	563	544	1.03	外ダイアフラム板厚
P-13	488	520	0.94	外ダイアフラム高さ

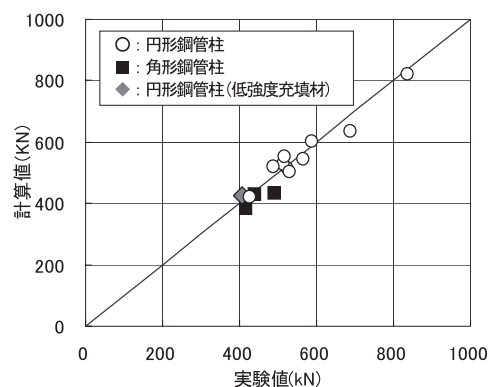


図9 終局耐力の計算値と実験値の比較

3. ソケット鋼管内に低強度充填材を用いた実験

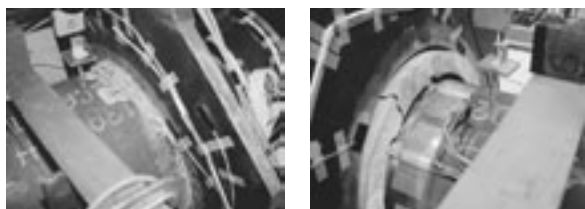
3.1 実験概要

次に、ソケット鋼管内の充填材に低強度コンクリート（強度 15.2N/mm^2 ）を充填した試験体（S—4試験体）により単調載荷試験を実施した。試験体形状については、図3および表1に示すとおり、円形鋼管柱を用いた標準試験体を採用した。また、材料強度は表2に示すとおりである。

3.2 実験結果および考察

3.2.1 破壊過程および性状

S—4試験体における載荷試験においてもこれまでの試験体と同様な破壊過程および性状を示したが、終局耐力付近においては圧縮側の充填コンクリートが完全に圧碎した。図10に低強度コンクリートの破壊状況を示す。

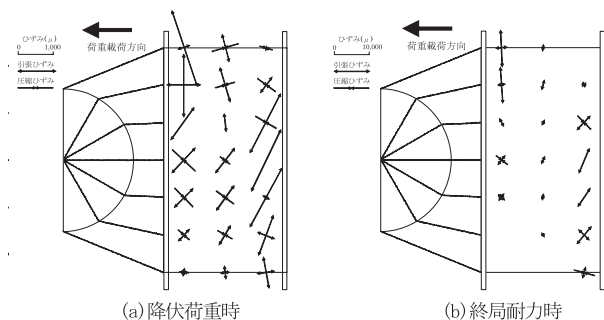


(a) 圧縮側終局耐力時 (b) 引張側終局耐力時

図10 試験体破壊状況（低強度充填材）

3.2.2 ソケット鋼管主ひずみ分布

図11に降伏荷重時と終局耐力時におけるソケット鋼管表面の主ひずみ分布を示す。図11よりこれまでの試験体と同様な傾向を示すことが確認できている。なお、左外ダイアフラム側で周方向のひずみが卓越している箇所があるが、全体の傾向から局部的なものであるといえる。



(a) 降伏荷重時 (b) 終局耐力時

図11 ソケット鋼管主ひずみ分布（S—4試験体）

3.2.3 荷重・変位関係

図12にS—4試験体と既往のP—6試験体の荷重・変位関係を示す。図12より、充填材強度が異なる試験体を比較

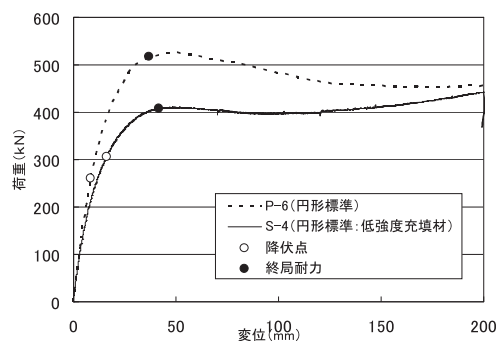


図12 荷重・変位関係

した結果、終局耐力が2割程度低下していることがわかる。これは、充填コンクリートの損傷により、充填コンクリートそのものが受け持つせん断耐力の低下などの影響と考えられる。また、降伏荷重以降の剛性の低下も顕著であることがわかる。

3.3 低強度充填材による終局耐力の算定

円形鋼管柱を用いた終局耐力の計算値と実験値を比較したものを表3および図9に示す。図表より、計算値は実験値を比較的良く評価できていることがわかる。以上から充填材強度 $\sigma_{ck}=15\text{N/mm}^2$ 程度のコンクリートにおいても終局耐力算定式において評価できることがわかった。

4. 繰返し荷重を受ける試験体の強度確認実験

4.1 実験概要

過去に行った円形鋼管柱による繰返し荷重載荷試験（交番載荷試験）の結果から、単調載荷に比べ交番載荷は終局耐力が2割程度低下することがわかっている。これは繰返し荷重の影響により充填モルタルが粉砕化されたために、充填モルタルそのものが受け持つせん断耐力の低下や外ダイアフラムの抵抗部材としての機能が単調載荷に比べると有効に発揮できなかったためと考えられる。そのため、設計上は終局耐力算定式より算定した値を1.2で除したものを終局耐力としていた。

しかし、モルタルが粉砕化しても拘束を受ける場合は繰返しによる強度低下がないと推定できることから、充填モルタルをシリコン材で拘束した形で過去と同様に交番載荷試験を行うこととした（図13）。試験体の諸元は表1に示すとおり円形の標準試験体とした。



図13 試験体形状

4.2 破壊過程および荷重・変位関係

S-5試験体の荷重・変位関係を図14に示す。特徴としては、エネルギー吸収の少ない逆S字の履歴を示した。荷重は4回繰返し载荷した時点で最大となったが、この時点でシリコンのはがれは全く現れていなかった。

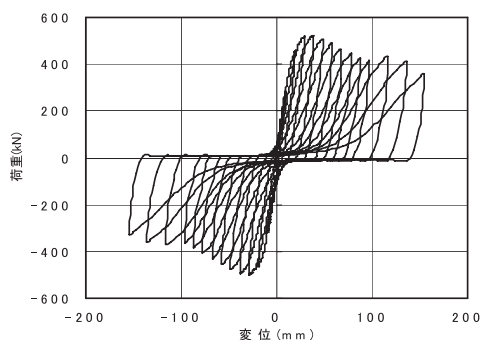
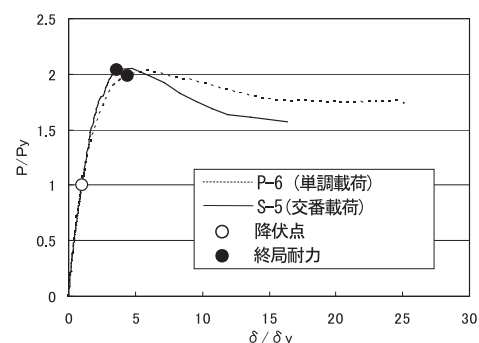


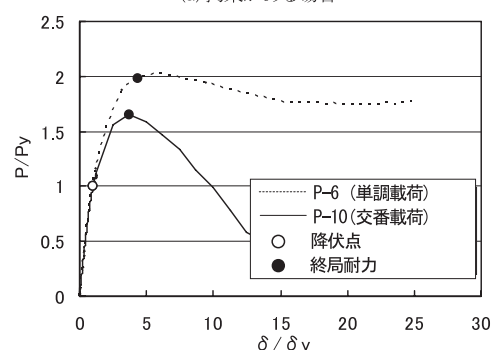
図14 荷重・変位関係

4.3 単調载荷との比較

図15(a)に本試験体の交番载荷の包絡線と単調载荷したP-6試験体の荷重・変位関係の比較を示す。縦軸、横軸とも降伏荷重、降伏変位で無次元化している。図15(a)より、単調载荷及び交番载荷の終局耐力がほぼ等しいことがわかる。また、図15(b)に充填モルタルの拘束がない過去の実験における同図を示す。図15の(a)と(b)を比較すると、充填モルタルが拘束される場合は終局耐力の低下がなく、終局耐力以降の荷重の低下が小さいことが顕著にわかる。よって、通常の建物のようにスラブなどで充填材が拘束される場合は終局耐力算定式より算定した値を低減しなくてもよいこととした。



(a) 拘束がある場合



(b) 拘束がない場合

図15 単調载荷と交番载荷の比較

および終局耐力算定式の条件の緩和について確認することができ、ジャッキダウン工法の適用拡大を図ることができた。また、これらについては、2006年3月に構造評定を取得するとともに同年7月には「ソケット式接合部設計マニュアル」として制定した。今後はプロジェクトへの適用に向けて技術支援していくこととしている。

参考文献

- 1) 山田正人, 林 篤, 野澤伸一郎: コンクリート充填鋼管ソケット式柱梁T形接合部の耐力評価, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.293-308, 2004.4.
- 2) 小林寿子, 古谷時春, 木下雅敬: ソケット式柱梁十字接合部の耐力試験について, 第24回関東支部技術研究発表会講演概要集, V-13, pp.582-583, 1997.3.
- 3) 野澤伸一郎, 木下雅敬, 築嶋大輔, 石橋忠良: コンクリート充填鋼管ソケット接合部の耐力評価, 土木学会論文集, No.606/V-41, pp.31-42, 1998.11.
- 4) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼とコンクリートの複合構造物), 丸善, 1998.7.
- 5) 野澤伸一郎, 木下雅敬, 築嶋大輔, 石橋忠良: ずれ止めを用いたコンクリート充填鋼管ソケット接合部の耐力評価, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.71-89, 1999.11.

5. おわりに

今回行った载荷試験の結果からソケット式接合への角形鋼管柱の適用、ソケット内充填材強度が及ぼす影響お