

論文 鋼管で補強されたコンクリートの支圧特性に関する基礎的研究

山田 和夫*1・関 俊力*2・巻幡 悠佑*3

要旨：本研究では、鋼管およびプレーンモルタルの支圧特性に及ぼす鋼管巻き幅、支圧深さおよび細長比(H/D)の影響について一連の検討を行った。その結果、プレーンモルタルの支圧強度は、六車・岡本式による推定強度と良く一致するが、鋼管モルタルに対する推定強度は、鋼管巻き幅が大きくなるほど過小評価となること、部分的に補強された鋼管モルタルの最大圧縮耐力は、支圧深さが深くなるに従って若干低下するが、側面が全て鋼管で補強されると逆に増大すること、全面加力を行ったプレーンモルタルの最大圧縮耐力はH/D比の影響が認められるが、支圧加力を行った場合は明確ではないことを明らかにした。

キーワード：鋼管モルタル、圧縮耐力、支圧強度、荷重-変位関係、コンファインド効果、H/D比

1. はじめに

筆者らは、これまでに鋼管形式による杭頭半剛接工法の確立を目的とした基礎研究として、鋼管によって補強された杭頭断面減少接合部の1軸圧縮特性について一連の実験的検討¹⁾を行った。その結果、鋼管で補強された杭頭断面減少接合部は、杭本体への支圧作用によって割裂きを引き起こし、破壊が杭頭近傍に集中すること、この破壊集中の程度は、鋼管で補強された断面減少接合部の杭本体への埋込み深さによっても相違し、破壊集中を低減させるには、更に杭頭近傍の杭本体を鋼管などによって部分的に補強する対策を講ずる必要があることがわかった。そのため、本論文では、鋼管形式による杭頭半剛接接合部の1軸圧縮特性の解明を目的とした基礎的研究として、鋼管によって部分的に補強された杭頭部を想定した鋼管コンクリートの1軸支圧特性について一連の検討を行った。なお、本実験では、前報²⁾と同様に、鋼管コンクリートの1軸圧縮特性に及ぼす幾何学的非均質性(D/d：試験体寸法と粗骨材寸法との比)の影響³⁾を取り除くために、粗骨材を含まないモルタルを使用した。

2. 実験方法

2.1 試験体

本実験では、図-1および表-1に示すように、公称肉厚(T)が1.6mmで外径(D)がφ150mmのストレート継ぎ目溶接鋼管によって部分的に補強された鋼管モルタル試験体を使用し、実験要因としては、鋼管巻き幅(W=0, 50, 100, 150および200 mmの5種類)、支圧径(B=75および145(鋼管部を直接加力しないように設定したもので、本論文では、この径の加力を全面加力と略記する)mmの2種類)、支圧深さ(C=0, 50および100 mmの3種類)、並びに試験体高さ(H=50, 100, 150および200 mmの4種類、ただし、H=50, 100および150mmの試験体は

プレーンモルタルのみ)を取り上げた。なお、支圧深さ50および100 mmの試験体は、直径がφ75 mmで長さ所定寸法の鋼棒を型枠内に設置して打設を行った。

2.2 試験体の製作および養生方法

試験体の製作に際しては、目標フロー値を200±10に設定し、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂(最大寸法：2.5mm、表乾密度：2.60g/cm³)を使用して試し練りにより調合を決定した。本実験で用いたモルタルの標準調合表を表-2に示す。鋼管モルタルの打設はφ150×300mm型枠の約250mmの高さまで2層に分けて行い、棒状バイブレータを使用して締め固めを十分に行った。試験体は、材齢1週で脱型した後、材齢2週目にカット・

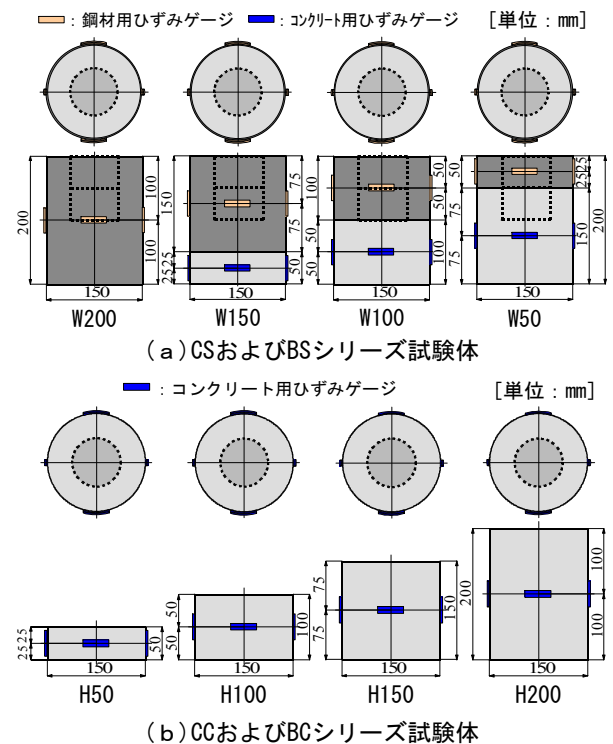


図-1 試験体の形状・寸法、ひずみゲージ貼付位置

*1 愛知工業大学 工学部都市環境学科建築学専攻教授 工博 (正会員)
 *2 愛知工業大学大学院 工学研究科生産・建設工学専攻 修士(工学) (正会員)
 *3 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻

表-1 実験の概要

試験体記号	W/C (%)	試験体寸法		支圧部詳細		鋼管部詳細	
		直径D (mm)	高さH (mm)	直径B (mm)	深さC (mm)	肉厚T (mm)	幅W (mm)
CS-D00-W00	65	φ150	200	φ145	0	—	—
CS-D00-W50	65	φ150	200	φ145	0	1.6	50
CS-D00-W100	65	φ150	200	φ145	0	1.6	100
CS-D00-W150	65	φ150	200	φ145	0	1.6	150
CS-D00-W200	65	φ150	200	φ145	0	1.6	200
BS-D00-W00	65	φ150	200	φ75	0	—	—
BS-D00-W50	65	φ150	200	φ75	0	1.6	50
BS-D00-W100	65	φ150	200	φ75	0	1.6	100
BS-D00-W150	65	φ150	200	φ75	0	1.6	150
BS-D00-W200	65	φ150	200	φ75	0	1.6	200
BS-D50-W00	65	φ150	200	φ75	50	—	—
BS-D50-W50	65	φ150	200	φ75	50	1.6	50
BS-D50-W100	65	φ150	200	φ75	50	1.6	100
BS-D50-W150	65	φ150	200	φ75	50	1.6	150
BS-D50-W200	65	φ150	200	φ75	50	1.6	200
BS-D100-W00	65	φ150	200	φ75	100	—	—
BS-D100-W50	65	φ150	200	φ75	100	1.6	50
BS-D100-W100	65	φ150	200	φ75	100	1.6	100
BS-D100-W150	65	φ150	200	φ75	100	1.6	150
BS-D100-W200	65	φ150	200	φ75	100	1.6	200
CC-D00-H50	65	φ150	50	φ145	0	—	—
CC-D00-H100	65	φ150	100	φ145	0	—	—
CC-D00-H150	65	φ150	150	φ145	0	—	—
CC-D00-H200	65	φ150	200	φ145	0	—	—
BC-D00-H50	65	φ150	50	φ75	0	—	—
BC-D00-H100	65	φ150	100	φ75	0	—	—
BC-D00-H150	65	φ150	150	φ75	0	—	—
BC-D00-H200	65	φ150	200	φ75	0	—	—

表-2 標準調合表

W/C (%)	S/C	単位量 (kg/m ³)			目標フロー値
		セメント	水	細骨材	
65	3.00	472	307	1,415	200±10

表-3 材料試験結果

試験材齢	密度 (g/cm ³)	強度試験結果		ヤング係数 (GPa)	ポアソン比
		引張 (MPa)	圧縮 (MPa)		
28日	2.23	2.72	33.3	—	—
39日	2.18	2.42	35.2	21.3	0.19
46日	2.18	2.77	34.5	21.2	0.20

[注] 材齢39および49日は、それぞれ鋼管モルタル試験体の実験直前および直後の結果。

(b) 鋼管

肉厚 (mm)	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	ヤング係数 (GPa)	伸び率 (%)	解放ひずみ度
1.58	229	342	198	38.0	140μ

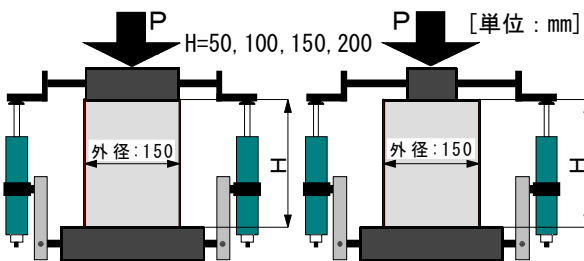


図-2 試験体の加力および測定要領

研磨を行ったが、脱型およびカット・研磨の作業時以外は、実験実施まで実験室内でシート養生を行った。実験時の材齢は41～43日であった。なお、使用モルタルの力学的性質を調べるためにモルタル打設時にφ10×20cmの円柱供試体を同時に製作し、材齢28日（標準水中養生）、

表-4 実験結果一覧

試験体記号	Pc (kN)	δc (mm)	cεl (μ)	cεs (μ)	sεl (μ)	sεs (μ)
CS-D00-W00	686.8	0.99	-2944	918	—	—
CS-D00-W50	642.6	0.92	-2961	1099	-50	87
CS-D00-W100	662.3	0.99	-3394	1043	-188	384
CS-D00-W150	766.6	2.55	-1431	1150	-3159	2649
CS-D00W-200	853.5	1.99	—	—	-2912	3252
BS-D00-W00	300.1	0.58	-797	139	—	—
BS-D00-W50	392.8	1.00	-1311	1157	-245	1894
BS-D00-W100	480.7	2.00	-2569	1813	-252	5540
BS-D00-W150	502.0	3.64	-2391	530	-874	3830
BS-D00-W200	520.5	3.03	—	—	-1080	3432
BS-D50-W00	270.8	0.49	-408	256	—	—
BS-D50-W50	353.5	0.98	-824	113	-136	424
BS-D50-W100	442.2	1.30	-1327	3243	-282	798
BS-D50-W150	524.8	2.21	-2852	416	-206	3251
BS-D50-W200	576.5	3.41	—	—	-1294	7273
BS-D100-W00	318.3	0.49	-315	94	—	—
BS-D100-W50	368.9	1.26	-448	4024	-139	280
BS-D100-W100	373.3	1.03	-769	232	-42	13
BS-D100-W150	471.7	2.82	-1224	4890	-400	612
BS-D100-W200	598.6	4.69	—	—	-846	2416
CC-D00-H50	912.1	1.86	-690	2952	—	—
CC-D00-H100	766.1	0.75	-3048	1675	—	—
CC-D00-H150	726.8	0.85	-3333	1734	—	—
CC-D00-H200	686.7	0.99	-2944	918	—	—
BC-D00-H50	318.6	0.53	-82	3675	—	—
BC-D00-H100	324.2	0.56	-374	186	—	—
BC-D00-H150	315.0	0.56	-657	148	—	—
BC-D00-H200	300.1	0.58	-797	139	—	—

[注] Pc：最大圧縮耐力実験結果、δc：最大圧縮耐力時の軸変位、cεl・cεs：最大圧縮耐力時のコンクリート表面の縦・横ひずみ度、sεl・sεs：最大圧縮耐力時の鋼管表面の縦・横ひずみ度。

並びに実験直前および直後（封緘養生）の時点で圧縮および引張強度試験を行った。本実験で用いたモルタルおよび鋼管に関する材料試験結果を表-3に示す。なお、表-3(b)中の解放ひずみ度は、幅50mmの鋼管に1対のひずみゲージ（ゲージ長5mm）を円周方向に貼付した後に鋼管を材軸方向に切断して測定した鋼管の解放ひずみ度で、140×10⁻⁶（元応力度=27.7MPa）であった。

2.3 加力および測定方法

加力要領を図-2に示す。本実験では、鋼管モルタルの1軸圧縮加力に際して容量2,000kNの耐圧試験機を使用し、毎分約2.0mmの荷重スピードで単調漸増1軸荷重を行って荷重-軸変位関係、モルタルおよび鋼管中央側面部（前掲の図-1参照）の荷重-縦・横ひずみ度関係を測定した。なお、荷重中の鋼管モルタルの軸変位（荷重板間変位（図-2参照））の計測には、ストローク50mmの高感度ひずみゲージ式変位計を使用し、試験体側面のひずみ度の測定には、ゲージ長5mm（鋼管用）および30mm（モルタル用）のひずみゲージを使用した。

3. 実験結果とその考察

3.1 最大圧縮耐力

表-4および写真-1に、それぞれ本実験によって得られた各種試験体の最大圧縮耐力（Pc）、最大圧縮耐

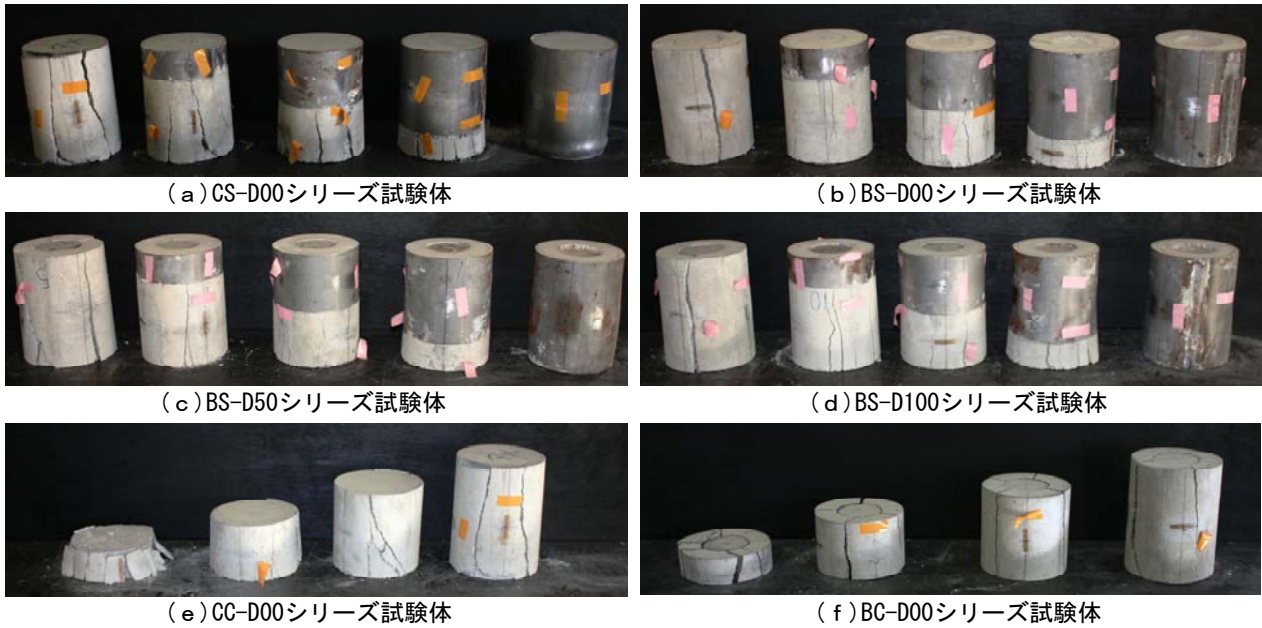
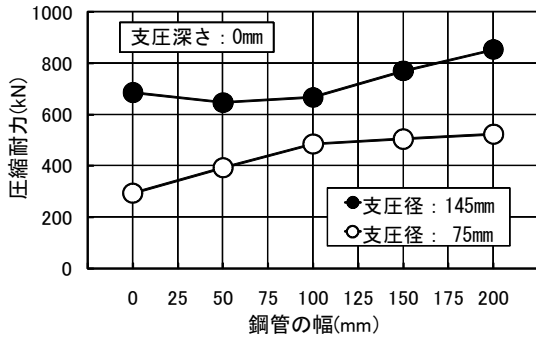
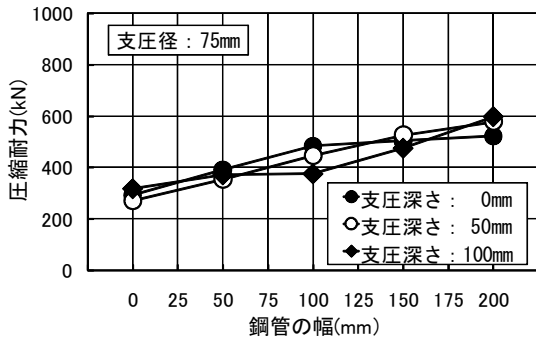


写真-1 試験体の最終破壊状況

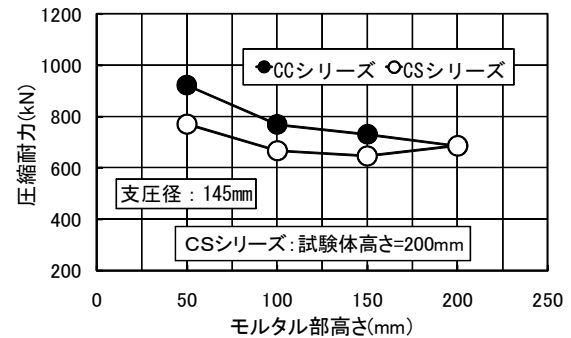


(a) CSシリーズ

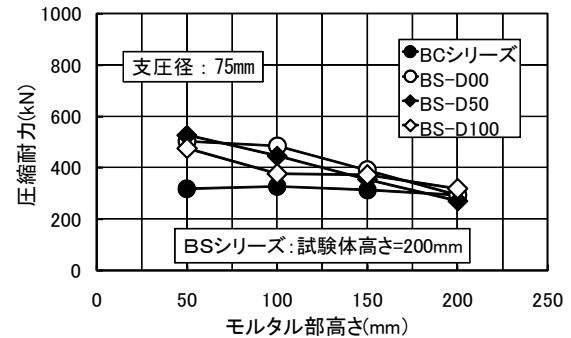


(b) BSシリーズ

図-3 最大圧縮耐力と鋼管巻き幅との関係



(a) CSシリーズ



(b) BSシリーズ

図-4 最大圧縮耐力とモルタル部高さとの関係

力時の荷板間軸変位 (δ_c), モルタルおよび鋼管側面中央部の縦ひずみ度 ($c \varepsilon_{l, s \varepsilon l}$)・横ひずみ度 ($c \varepsilon_s, s \varepsilon_s$) の一覧および試験体の最終破壊状況を示す。

図-3は、最大圧縮耐力に及ぼす鋼管巻き幅の影響を示したものである。図によれば、最大圧縮耐力は、支圧深さおよび支圧径に関わらず鋼管巻き幅が大きくなるとともにほぼ直線的に増大しているのがわかる。これは、鋼管によって部分的に補強された試験体の最大耐力が鋼管によって補強されていないモルタル部分の破壊により決定されるためである。図-4(a)および(b)は、それ

ぞれCSシリーズ(全面加力)試験体およびBSシリーズ(支圧加力)試験体によって得られた最大圧縮耐力と鋼管によって補強されていないモルタル部高さとの関係をプレーンモルタルのCCシリーズ(全面加力)およびBCシリーズ(支圧加力)の結果と比較したものである。これらの図によれば、全面加力を行った場合には、同一モルタル部高さの最大圧縮耐力は、鋼管によって部分的に補強された試験体よりもプレーンモルタルよりもの方が大きくなっているが、支圧加力を行った場合は、逆に鋼管によって部分的に補強された試験体の方が大きくなっ

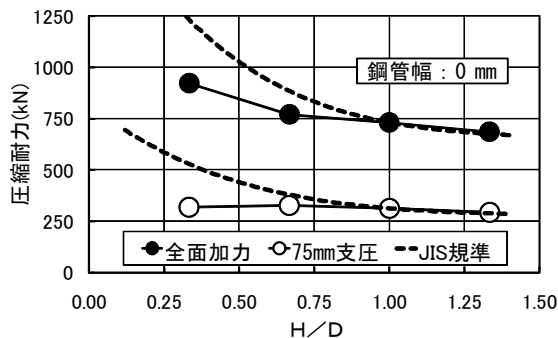


図-5 最大圧縮耐力と細長比(H/D)との関係

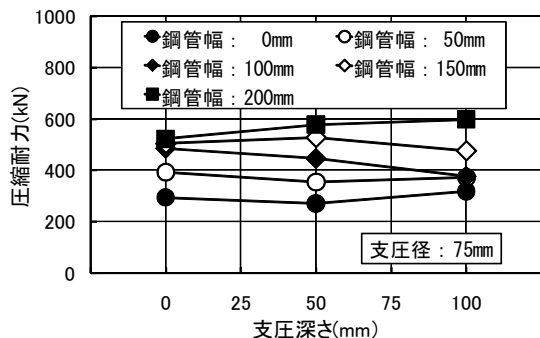
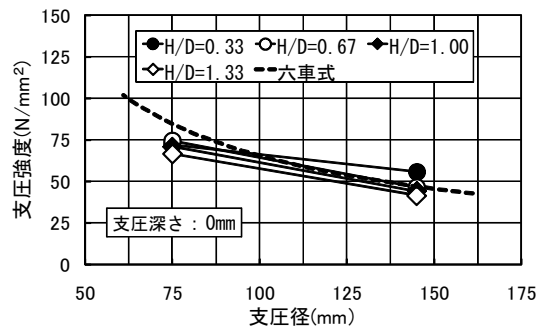
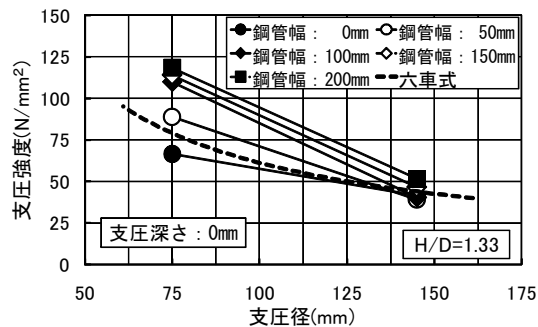


図-6 最大圧縮耐力と支圧深さとの関係



(a) CCおよびBCシリーズ



(b) CSおよびBSシリーズ

図-7 支圧強度と支圧径との関係

ている。これは、鋼管によるモルタル端部の横拘束効果と載荷板と試験体間の端面摩擦による横拘束効果との大小関係が支圧面積に応じて変化するためと考えられる。

図-5は、本実験によって得られたプレーンモルタルの最大圧縮耐力に及ぼす細長比(H/D)の影響を加力方法別に示したものである。なお、図中には、JIS A1107:2002「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に示されているH/D比が2.0に満たない試験体に適用するコンクリート強度の補正係数とH/D比との関係を4次式で近似して算定した結果(H/D比<1.0以下のJIS規定範囲外の区間については外挿近似した)も併示してある。図によれば、加力方法に関わらずプレーンモルタルの最大圧縮耐力に及ぼすH/D比の影響は、H/D比が1.0以上の範囲において近似曲線とほぼ一致した傾向を示しているが、H/D比が1.0未満の範囲になると、最大圧縮耐力は近似曲線に比べてかなり小さくなっているのがわかる。特に、支圧加力を行った場合(図中の○)は、最大圧縮耐力に及ぼすH/Dの影響が殆ど認められない。これは、支圧加力を行った場合のプレーンモルタルの破壊が、H/D比に関わらず写真-1(f)に示すような支圧部の割裂きによる瞬間的な割裂引張りひび割れに支配されるため、載荷板と試験体端面との端面摩擦の影響によりせん断滑り破壊を示す全面加力の場合(写真-1(e)参照)に比べて、H/D比が小さくなるに従って支配的となる端面摩擦の影響が小さいためと考えられる。

図-6は、BSシリーズで得られた最大圧縮耐力と支圧深さとの関係を鋼管巻き幅別に示したものである。図

によれば、鋼管巻き幅が0mmのプレーンモルタルの場合(図中の●)の最大圧縮耐力は、支圧深さの影響を殆ど受けていないが、鋼管で部分的に補強された鋼管巻き幅が50, 100および150mmの試験体(それぞれ図中の○, ◆および◇)では、支圧加力面が試験体内部に設定されると、鋼管によるモルタル端部の横拘束効果が試験体表面支圧の場合に比べて小さくなるためか、最大圧縮耐力は、支圧深さが深くなると低下する傾向を示している。ただし、試験体全面を鋼管で補強した鋼管巻き幅が200mmの場合の最大圧縮耐力は、逆に支圧深さが深くなるに従って増大している。これは、試験体全面が鋼管で補強された試験体の場合では、最大圧縮耐力が鋼管のコア部モルタルに対するコンファインド効果に支配されること、かつ支圧深さが深くなるに従って支圧加力される領域の実質的H/D比が小さくなるためと考えられる。

図-7(a)および(b)は、それぞれプレーンモルタルおよび鋼管モルタルによって得られた支圧強度と支圧径との関係を示したものである。ただし、支圧強度は最大圧縮耐力(P_{max})を支圧面積(下記の A_1)で除すことによって算定した。なお、図中には、次に示す六車・岡本による支圧強度推定式⁴⁾による計算値も併示してある。

$$F_B = F \cdot 2.28 \sqrt{A/A_1} \quad (1)$$

ここに、 F_B : 支圧強度(N/mm²), F : 全面圧縮強度(N/mm²), A : 支承面積(mm²), A_1 : 支圧面積(mm²)。

これらの図によれば、CCおよびBCシリーズのプレーンモルタルの支圧強度(図(a)参照)は、支圧径(また

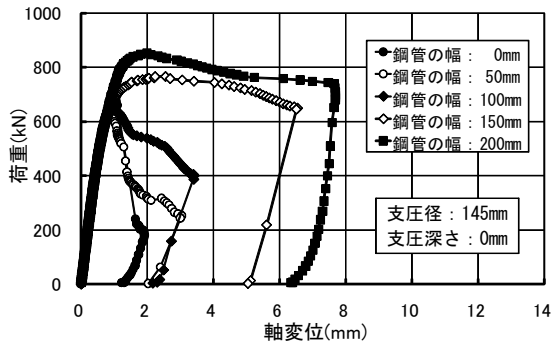
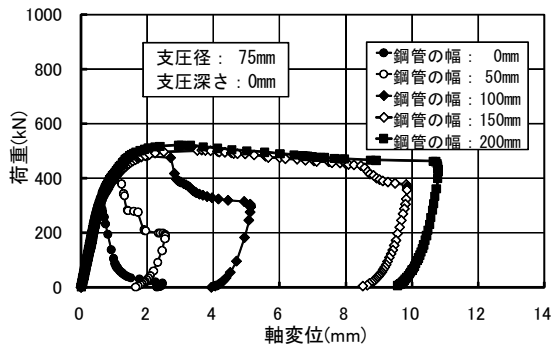
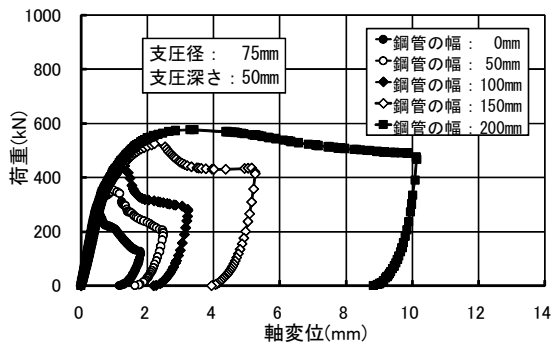


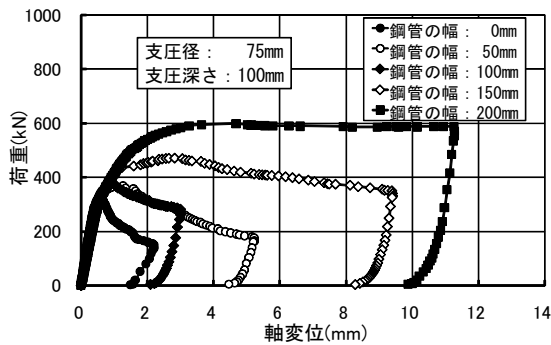
図-8 荷重-軸変位関係に及ぼす鋼管巻き幅の影響 (CSシリーズ)



(a) 支圧深さ=0mmの場合



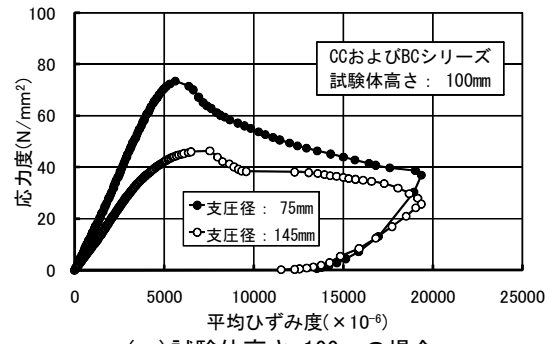
(b) 支圧深さ=50mmの場合



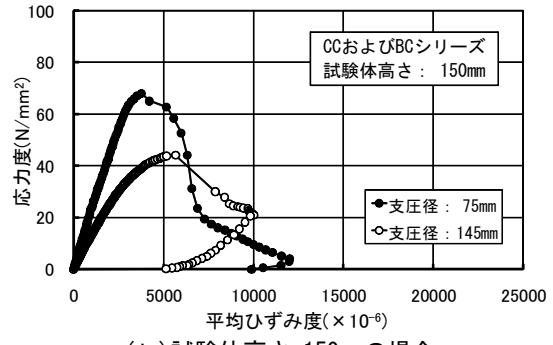
(c) 支圧深さ=100mmの場合

図-9 荷重-軸変位関係に及ぼす鋼管巻き幅の影響 (BSシリーズ)

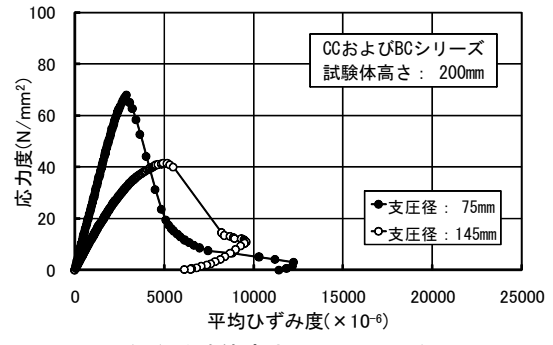
は支圧面積)が小さくなるとともに増大する傾向を示し、六車・岡本の支圧強度式による推定値とも比較的良く一致した傾向を示している。一方、鋼管によって部分的に強されたCSおよびBSシリーズの試験体(図(b)参照)では、鋼管による補強を行っていないプレーンモルタル(図中の●)の支圧強度の実験値は、六車・岡本による



(a) 試験体高さ=100mmの場合



(b) 試験体高さ=150mmの場合



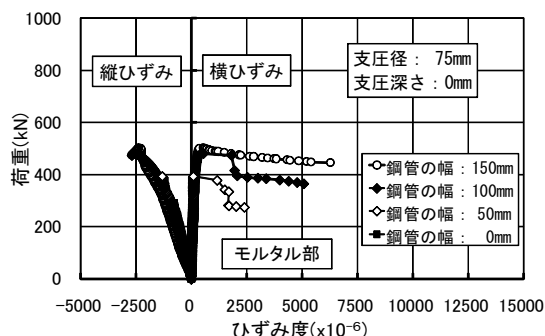
(c) 試験体高さ=200mmの場合

図-10 応力度-平均ひずみ度関係に及ぼす支圧径の影響 (CCおよびBCシリーズ)

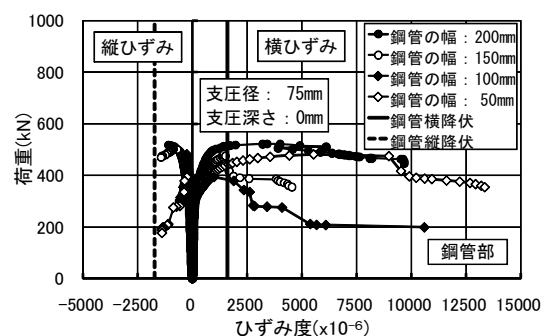
支圧強度推定値と比較的良く一致しているが、鋼管巻き幅が大きくなるに従って、支圧径を75mmに設定した場合の支圧強度の実験値は、支圧強度推定値よりも大きくなる傾向を示しており、鋼管のコア部モルタルに対するコンファインド効果に起因する強度増大が全面加力時よりも支圧加力時に対してより顕著であることがわかる。

3.2 変形特性

図-8および図-9は、それぞれ全面加力および支圧加力を行った試験体の荷重-軸変位関係に及ぼす鋼管巻き幅の影響を示したものである。これらの図によれば、鋼管モルタルの最大圧縮耐力、最大耐力時の軸変位および圧縮靱性は、加力方法に関わらず一般的に鋼管巻き幅が大きくなるに従って増大する傾向を示しているのがわかる。特に、支圧加力を行った場合(BSシリーズ)には、全面加力を行った場合(CSシリーズ)に比べて最大圧縮耐力が小さく、鋼管のモルタルに対するコンファインド効果が大変形領域においてより顕著に作用するた



(a) モルタル部の荷重-ひずみ度関係



(b) 鋼管部の荷重-ひずみ度関係

図-11 荷重-縦・横ひずみ度関係 (BS-D00シリーズ)

め、荷重-軸変位関係に対する鋼管巻き幅に起因する靱性改善効果が全面加力の場合よりも著しくなっている。

図-10(a)~(c)は、CCシリーズおよびBCシリーズの試験体によって得られたプレーンモルタルの応力度-平均ひずみ度関係に及ぼす支圧径の影響を試験体高さ別に示したものである。なお、応力度は、荷重を支圧面積で除すことによって算定し、平均ひずみ度は、測定された軸変位を試験体高さで除すことによって算定した。これらの図によれば、同一応力度および支圧強度時の平均ひずみ度は、支圧径が小さいほど小さくなっており、応力下降域の変形特性は一般的に脆性的な挙動を示している。また、試験体高さが小さくなるに従って、支圧強度時の平均ひずみ度が大きくなっており、全体的な応力度-平均ひずみ度関係も延性的な傾向を示している。

図-11(a)および(b)は、それぞれ支圧径が75mmで支圧深さが0mmの試験体で得られたモルタルおよび鋼管中央側面部の荷重-縦・横ひずみ度関係を鋼管巻き幅別に示したものである。まず、モルタルの荷重-縦・横ひずみ度関係を示した図-11(a)によれば、荷重上昇域における縦ひずみ度は、荷重を支圧面積で除して得られる応力度とヤング係数(前掲の表-3(a)参照)とから算定される値に近い関係を保ちながら荷重の上昇とともに増大しているが、横ひずみ度は最大圧縮耐力近傍までひずみ度の増大が殆ど認められず、最大圧縮耐力に到達した直後に急増する傾向を示している。これに対して、鋼管の荷重-縦・横ひずみ度関係(図-11(b)参照)では、鋼管が軸力を殆ど負担していないため、縦ひずみ度

の増大は最大圧縮耐力近傍まで殆ど認められないが、鋼管の横ひずみ度は、支圧部モルタルのポアソン効果に伴って荷重初期の段階から荷重の上昇とともに増大し、その後鋼管の降伏によってひずみ度が急増した直後に試験体が崩壊に至っているの読み取れる。

4. 結論

本研究によって得られた結果を要約すると、およそ以下のようにまとめられる。

- 1) プレーンモルタルの支圧強度は、六車・岡本式による推定強度と比較的良く一致するが、鋼管によって部分的に補強された鋼管モルタルに対する推定強度は、鋼管巻き幅が大きくなるほど過小評価となる。
- 2) 鋼管によって部分的に補強された試験体の最大圧縮耐力は、支圧深さが深くなるほど低下するが、側面が全て鋼管で補強されると逆に増大する。ただし、プレーンモルタルは支圧深さの影響が明確でない。
- 3) 全面加力を行ったプレーンモルタルの最大圧縮耐力はH/D比の影響が明確に認められるが、支圧加力を行った場合には、H/D比の影響が明確ではない。
- 4) 鋼管によって部分的に補強された試験体の変形特性は、一般的に鋼管巻き幅および支圧深さが大きく、支圧径および試験体高が小さいほど延性的となる。

謝辞

本実験とデータ整理に際して多大なご助力を得た愛知工業大学4年生の岡部祥也君、齊藤亨輔君、塩澤優姫さん、永田詩乃さん森田慎治君に対して謝意を表します。また、本実験は、愛知工業大学耐震実験センターを利用して実施し、本研究費の一部として、愛知工業大学耐震実験センターの研究費を使用したことを付記する。

参考文献

- 1) 山田和夫, 関俊力, 山本俊彦, 伴幸雄: 鋼管形式による杭頭半剛接合部の1軸圧縮特性に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No.62, pp.240-247, 2009.2
- 2) 山田和夫, 関俊力, 巻幡悠佑: 鋼管で補強されたコンクリートの1次圧縮特性に及ぼす調合の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.393-398, 2008.7
- 3) 谷川恭雄, 山田和夫: コンクリートの圧縮強度の寸法効果について, 日本建築学会論文報告集, 第262号, pp.13-21, 1977.12
- 4) 六車熙, 岡本伸: 局部荷重を受けるコンクリートの支圧強度に関する研究, プレストレストコンクリート, 第5巻, 第5号, pp.22-29, 1963.10