

論文 モルタル充填鋼管柱の圧縮変形特性

伊藤 秀敏*¹ ・米倉 亜州夫*² ・岡本 卓史*³ ・濱 旭*⁴

要旨：本研究は、モルタルおよびセメントペーストを充填した鋼管短柱に軸方向力を充填材のみに加えた場合の圧縮変形挙動を実験的に検討することを目的として行った。その結果、軸方向では約30%、これと直交する方向では約20%の変位量があったにも拘わらず、ほとんどひび割れることなく、変形した鋼管と同様の形状を維持していたことから、加圧することによって、高靱性部材としての適応性があるものと考えられる。

キーワード：モルタル充填鋼管、軸方向変位、細孔径分布、結合水量

1. まえがき

鋼管にコンクリートを充填した部材は、靱性が著しく向上することから、耐震構造物に適用されてきている。この種の部材は、主に軸方向圧縮力を受ける柱や曲げおよびせん断力を同時に受ける部材に適用されており、高靱性部材としての応用分野が拡大しつつある。

本研究では、モルタルあるいはセメントペーストを、厚さの異なる2種の鋼管に充填した短柱の変形に関する基礎的なデータを得ることを目的として、主に、充填材に軸方向圧縮力を加えた場合のひずみ量、変位量さらに、載荷後における充填材の変形状況を確認し、検討を加えたものである。

その結果、軸方向およびこれと直交する方向で、それぞれ約35、20%の変位にもかかわらず充填材が崩壊することなく保持していた。また、細孔径分布および結合水量は、無載荷の場合と若干異なることが判明した。

2. 試験の概要

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm³，比表面積：3340 cm²/g）を、細骨材は砕砂（密度：2.65 g/cm³，FM：2.85）

を用いた。

2.2 モルタルの配合および供試体

(1) モルタルの配合

表-1にモルタルの配合の概要を示す。

表-1 充填材の配合

項 目	W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)
モルタル	50	308	616	1233
ペースト	30	486	1619	—

(2) モルタル充填鋼管供試体

供試体の形状および寸法は図-1に示すように、市販の鋼管（SS41，直径：101.6mm，鋼管厚：3.2, 4.2mmの2種）を30cmに切断し、モルタル部のみを載荷するための両端部2個の載荷治具（10cm）を介して20cmだけ充填した。鋼管のひずみ変化を測定するため、外面中央部に一對の2軸ひずみゲージを貼り付けた。一部の供試体には、載荷中の温度変化を測定するため、熱電対を供試体の中央中心部に配置した。また、同条件で鋼管とモルタルを同時に載荷するため鋼管の長さ20cmとし、鋼管とモルタルに載荷板があたるようにした。試体は約20℃の室内で湿潤養生し、試験材齢は30日である。

*1 広島工業大学助教授 工学部建設工学科 工修（正会員）

*2 広島工業大学教授 工学部建設工学科 工博（正会員）

*3 広島工業大学 工学部建設工学科学生

*4 広島工業大学 工学部建設工学科学生

表-2 供試体の試験条件

項 目	モルタル		ペースト
	W/C=50%		W/C=30%
載荷方法	モルタルのみ	同時	ペーストのみ
鋼管厚 (mm)	3.2 4.2	3.2 4.2	3.2

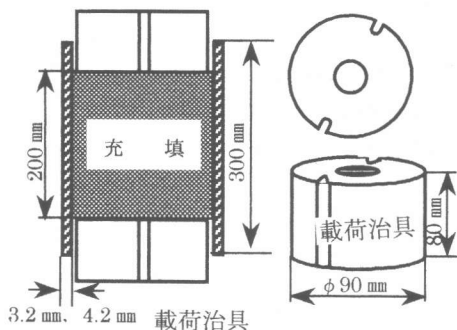


図-1 モルタル充填鋼管供試体

2.3 載荷試験方法

供試体は表-2 に示す条件で、治具を介して充填モルタルのみおよび鋼管と充填モルタルを同時に載荷するものを作製した。載荷は、2000kN の耐圧試験機で行い、軸方向（以後、軸方向とする）およびこれと直交する方向（中央部、以後、半径方向とする）の長さ変化をそれぞれ測長 10cm および 5cm の変位計により測定した。載荷後、鋼管を切断し、充填モルタルの変形状況および表-3 に示す分析を行った。

表-3 分析試験項目

項 目	適 用
細孔分布	水銀圧入式ポロシメーター
含水量	マッフル炉 1000℃

3. 試験結果および考察

3.1 充填モルタルのみを載荷した場合の変形特性

(1) 無載荷供試体の物性値

充填モルタルおよび充填セメントペーストの圧縮強度、弾性係数およびポアソン比の平均値を表-4 に示す。

表-4 無載荷供試体の強度

項 目	モルタル (N/mm ²)	セメントペースト (N/mm ²)
圧縮強度	51	50
弾性係数	2.5×10^4	2.4×10^4
ポアソン比	0.22	0.24

(2) モルタル充填鋼管の鋼管厚の相違によるひずみ分布

図-2 は鋼管厚が 3.2 および 4.2mm の荷重-ひずみ曲線をモルタル充填の有無について示したものである。鋼材の圧縮降伏応力度は、この図に示しているモルタル無充填鋼管（以後、鋼管のみとする）の荷重-ひずみ曲線から算出した。この場合の降伏応力度は鋼管厚 3.2 および 4.2mm で、それぞれ 303,

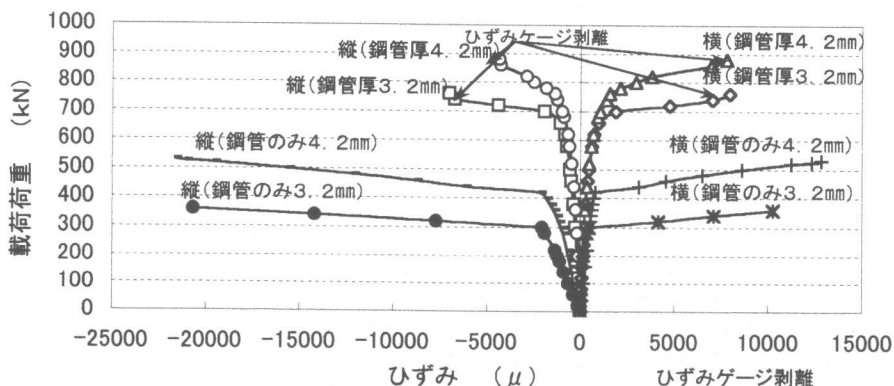


図-2 鋼管のひずみ分布

327N/mm²となった。このときのひずみは1600 μ 程度であったので、これをモルタル充填鋼管の降伏ひずみとした。モルタル充填鋼管の降伏荷重は、鋼管厚が3.2,4.2mmでそれぞれ700kN,790kNに達する。よって、鋼材降伏時におけるモルタル充填鋼管の耐力は、それぞれの鋼管のみに比べて耐力が2倍強に達することを示唆している。また、鋼管降伏前におけるモルタルの強度は、鋼管が弾性的であるものと仮定して、次式より算出した。

$$f_{sy} = E_s \varepsilon_y$$

$$P_m = P - E_s \varepsilon_s A_s$$

$$f_m = P_m / A_m$$

f_{sy} : 鋼材の降伏応力, E_s : 鋼材の弾性係数, ε_y : 鋼材の降伏ひずみ,

P_m : モルタルに作用する荷重 P : 全荷重

A_s : 鋼材の断面積 f_m : モルタルの応力

A_m : モルタルの断面積

なお、セメントペーストの場合も同様に求めた。その結果を表-5に示す。

表-5 鋼管降伏時の充填材の強度

項目	モルタル (N/mm ²)	セメントペースト (N/mm ²)
圧縮強度	116 (4.2 mm) 98.0 (3.2 mm)	84.4 (3.2 mm) ——

この表より、鋼管降伏時のモルタル強度は、鋼管厚によって異なるが、表-4に示す無拘束供試体強度の2倍程度に達することが判明した。

(3) モルタル充填鋼管柱の変位量

図-3は鋼管とモルタルの付着ありの変位量を示したものである。

この図より、終局時の軸方向の変位量は鋼管厚の相違に拘わらず約70mm,半径方向で約20mmに達した。この長さ変化率は、載荷前のモルタル部の長さ(200mm)に対して、軸方向で約35%,半径方向で約20%変形したことになる。

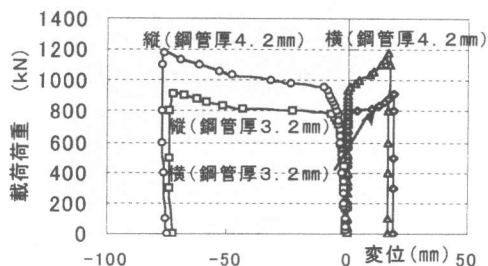


図-3 モルタル充填鋼管の変位

載荷後のモルタル充填鋼管の変形状況は写真1に示すように中央部が突起した花瓶のようになっていることが分かる。



写真1

この鋼管をガス切断して充填モルタルを取り出すと写真2のごとく、モルタルは崩壊することなく花瓶状の形を保持していた。さらに、内部ひび割れの確認または細孔径分布、結合水量を測定するため、軸方向と半径方向にコンクリートカッターで切断した。切断後を写真3に示す。

ひびわれの発生については、目視と100倍の光学顕微鏡で確認したが、配置してある熱電対の周辺にわずかにヘアクラックがある以外には、ほとんど確認できなかった。

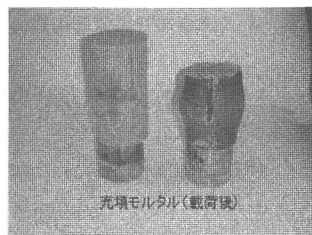


写真2

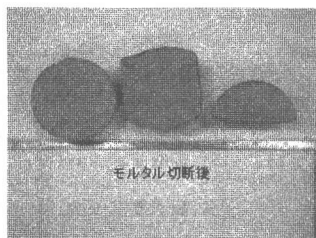


写真3

辛²⁾らは、モルタル充填鋼管で構成した合成トラス要素の荷重試験を行った後、鋼管を切断して、内部モルタルの変形状況を調べたところ、内部モルタルは鋼管が座屈しているにも拘わらずほとんどひび割れることなく変形していることを報告している。この理由としては、高圧下における水和ゲル間隔が小さくなることやゲルの癒着さらには水和の促進等が考えられるので、3.4 節で細孔径分布および結合水量について述べる。

3.2 充填モルタル鋼管を同時に荷重した場合の変形特性

図-4 は充填モルタルと鋼管とを同時（以下同時荷重とする）に、および充填モルタルのみを荷重した供試体のひずみ変化を示したものである。

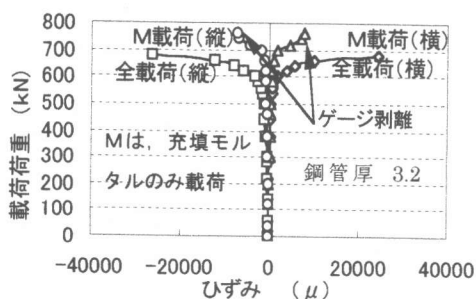


図-4 モルタル充填鋼管の変位

この図より、同時荷重の場合は、充填モルタルのみ荷重した供試体に比べて、各荷重段階におけるひずみの進展が大きく、鋼材の降伏荷重は小さくなっている。同時荷重の場合は、荷重板から約2cm すなわち、鋼管端面から2cmの深さの部位で、提灯座屈と思われる

変形が生じていた。これは、モルタル無充填鋼管においても同様の傾向が見出されていることから、供試体端部では、主として鋼管が圧縮力を負担するために、鋼管の変形が先行することに基づくものと考えられる。この場合の変位を示すと、図-5 のごとくであった。

この図より、同時荷重の軸方向変位量は、充填モルタルのみを荷重した場合の約 10%

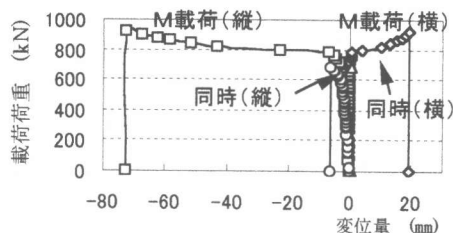


図-5 充填モルタルの変位

程度であった。したがって、モルタル充填鋼管柱の変形の制御と充填モルタルのコンファインド効果を考慮すると、充填モルタルのみに外力が加わるようにした方が有利であると考えられる。同時荷重の供試体についても、荷重後鋼管を切断して、内部モルタルの変形状況を観察した。この状況を写真4に示す。

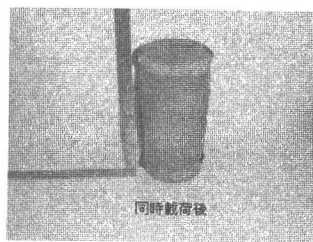


写真4

この写真より、変形量はモルタルのみ荷重したものに比較すると小さいが、前述と同様にひびわれが生じることなく、充填モルタルは鋼管の変形と同様の形状を保持していた。

3.3 セメントペースト充填鋼管の変形特性

この試験は、主に荷重中におけるセメント水和反応の促進あるいは細孔径分布を測定する試料を得ることを目的として行ったもので

ある。図-6 に填セメントペースト（以後充填ペーストとする）のみを載荷した場合の変位量を示したものである。

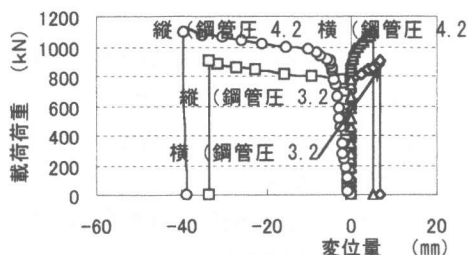


図-6 充填セメント量の変位

充填ペーストの場合は、載荷時（材齢 30 日）には、乾燥収縮あるいは自己収縮により、鋼管と充填ペーストとが剥離していたので、充填ペーストと鋼管との付着がないものと考えられる。軸方向変位量は、33mm 程度であり、モルタル充填の場合の大略 50% であった。載荷後、鋼管を切断して充填ペーストを充填モルタルの場合と同様に切断し、この断面の状況を写真 5 に示す。この写真より、充填モルタルの場合と同様にペーストの崩壊は認められないが、供試体表面から半径方向にひび割れが発生していた。これは、上述のように、ペーストの収縮により、鋼管とペーストとの間に隙間が生じたことによるものと考えられる。

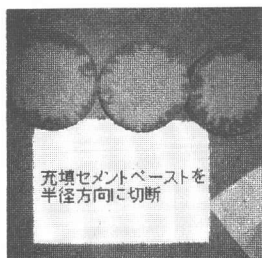


写真 5

3.4 細孔径分布

図-7, 8 は、セメントペーストを充填した場合の中央中心部における試料より測定した細孔径分布を、載荷および無載荷供試体につ

いて示したものである。

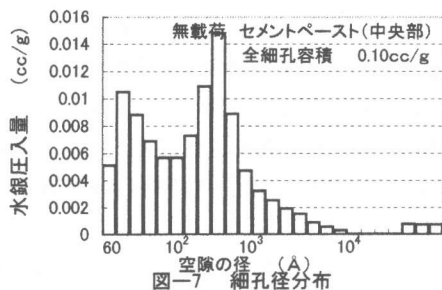


図-7 細孔径分布

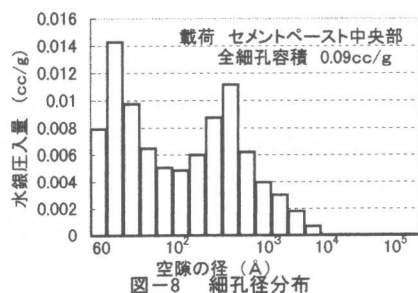


図-8 細孔径分布

これらの図より、空隙はいずれも、6～10nm および 10nm～10 μ m の領域で、それぞれピーク値を示すように分布している。載荷供試体の細孔径分布は、無載荷の場合に比べて、6～10nm の領域の空隙（孔隙）は増加しているが、10nm～10 μ m の空隙は減少した。また、載荷によって、全細孔量は 0.01cc/g ほど減少していた。

すなわち、充填鋼管の終局時には、充填ペーストの応力が約 100N/mm² に達するため 10nm～10 μ m の空隙の一部が 6～10nm の領域にシフトしたものと考えられる。また、載荷後では 1 μ m 以上の空隙が認められないのも、特徴の一つと思われる。米倉ら³⁾ は三軸拘束を受けるモルタル供試体を用いて、応力強度比 2.0 のクリープ試験を行い、試験終了後、細孔径分布を測定した結果、無載荷の場合に比べて、細孔径分布が変化し、空隙が減少することを報告している。このクリープ試験期間は 40 日であったのに対し、本試験では、30 分程度の載荷時間で起ったことになる。傾向はモルタル充填鋼管の場合も同様であった。

3.5 結合水量

試料は、無荷重および荷重供試体の中央部の軸方向に直交する断面から採取し、ただちに、アセトン溶液中で保存した。結合水量は、105℃で 24 時間乾燥させた後、マッフル炉(1000℃)内で 24 時間、強熱減量させた値を基に算定した。

この試験は、荷重中の高圧下における水和反応の進行状況を把握することを目的として行ったものである。

セメントペーストによる試験結果を図-9に示す。中心部とは、供試体中央部よりやや端面よりの図心位置のことで、外部とは横断面の周辺部のことである。

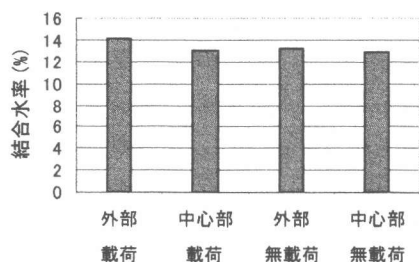


図-9 結合水量 セメントペースト

この図より、荷重供試体の結合水量は無荷重の場合に比べて、若干大きい値を示していることから、荷重による高圧下において、水和が促進されたものと考えられる。また、採取部位による相違はほとんど見受けられなかった。一方、供試体中央中心部に配置した熱電対より測定した温度変化は、鋼管が降伏した後、すなわち、モルタルあるいはペースト部に大変形が生じる時点から、約 2℃の温度上昇が認められた。この温度上昇は、変形に伴うゲル粒子間の摩擦あるいは水和の促進によるものと考えられる。

4. 結論

以上の試験の結果次のようなことが判明した。

- 1) 充填モルタルの終局時における軸方向および半径方向の変位量は、それぞれ約 35, 20%であり、軸方向の変位量は無拘束状態の場合の 100 倍近くにも達した。
- 2) 荷重試験後の充填モルタルは、約 35%変形したにも拘わらず、ほとんどひびわれが発生することなく、形状を保持していた。
- 3) 充填モルタル鋼管柱の圧縮強度は、鋼管のみの場合の約 2 倍となった。
- 4) 荷重後の細孔径分布は、10~100nm の空隙が減少し、6~10nm の空隙が増加した。
- 5) 荷重後の結合水量は、無荷重の場合に比べて若干増加した。

参考文献

- 1) NCB研究会編、：新しい合成構造と橋、山海堂、pp. 85-225, 1996. 2
- 2) 辛軍青、米倉亜州夫、佐藤立美、伊藤秀敏：三次元拘束コンクリート部材を用いた合成トラス要素の力学的特性、コンクリート工学年次論文集、Vol. 22, No. 3, pp. 1003-1008, 2000. 6
- 3) 米倉亜州夫、田澤栄一、森本英樹：三軸拘束を受けるモルタルのクリープ、セメント・コンクリート論文集、No. 49, pp. 576-581, 1995. 12