

論文 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

辛 軍青^{*1}・米倉 亜州夫^{*2}・佐藤 立美^{*3}・伊藤 秀敏^{*4}

要旨：本研究では、コンクリート充填鋼管部材をトラス構造の三角形要素に応用し、コンクリートにコンファインド効果を十分発揮できるようにした合成トラス要素を取り上げる。圧縮弦材の場合は、内部コンクリートのみに軸圧縮力が作用するように格点構造を考案した。引張弦材の場合は、PC 鋼棒又は膨張コンクリートにより、あらかじめプレストレスを導入しておいた。その結果、三次元的に拘束したコンクリート充填鋼管部材のトラス要素の耐力及び変形能力を大幅に増大させることができる結果を明らかにした。

キーワード：コンクリート充填鋼管、トラス構造、三次元拘束、コンファインド効果、変形能力

1. はじめに

阪神・淡路大震災及びトルコ、台湾地震では、構造物が瞬時に破壊したものが多く、そのため、耐力と変形能力が大きく、地震に強い構造の開発及び補強方法の研究が要求されている。

コンクリート充填鋼管部材に軸方向の圧縮応力を内部コンクリートのみに作用させた場合、内部コンクリートの半径方向への広がりや鋼管で拘束される。その結果、内部コンクリートは、三次元方向の圧縮応力を受けるため、軸方向圧縮強度及び変形能力が著しく増大し、地震に強い構造とすることができる。このようなコンクリートは、コンファインドコンクリートと呼ばれ、国内外では多くの研究がなされている。

しかし、この種の部材がトラス構造に応用された例は非常に少ない。これは、従来のトラス構造の格点部のジョイントはガセットプレート等による接合がほとんどで、鋼管は直接圧縮応力を受けるので、局部座屈しやすくなり、内部コンクリートのコンファインド効果はあまり生じなくなると思われる。本研究では、コンクリート充填鋼管部材をトラス構造の基本単位とし

ての三角形要素に応用し、圧縮弦材には、内部コンクリートのみに軸圧縮力が作用するように格点構造を考案し、引張弦材には、载荷の前にあらかじめコンファインド効果を生じさせておくために、軸方向のプレストレスを導入した。このようにして作った部材を使用して組み立てた三角形トラス構造供試体の部材の耐力及び変形能力を実験的に調べた。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

丸形鋼管 電鍍炭素鋼管を用い、外径 101.6 mm、厚さ 3.2 mm であり、材質及び機械的性質が STK400-B 相当とした。材料特性を表 1 に示す。

PC 鋼棒 PC 鋼棒は C 種 1 号の直径 21 mm のものを使用した。PC 鋼棒の材料特性を表 2 に示す。

コンクリート 鋼管断面が小さいので、コンクリートの代わりに、モルタルを使用した。モルタルは早強ポルトランドセメントを使用し、

*1 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻 (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 広島工業大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*4 広島工業大学助教授 工学部建設工学科 工修 (正会員)

表 1 丸形鋼管の材料特性

外径 ϕ (mm)	厚み t (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
101.6	3.2	373	432	210	0.30

表 2 PC 鋼棒の材料特性

直径 (mm)	断面積 (mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	0.2%永久伸び に対する荷重 (kN)	降伏強度 (N/mm ²)	引張荷重 (kN)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
21	346.4	201	405	1169	442	1275	10

配合は W/C=30%, 45%, 60% の 3 配合とした。
膨張モルタルは、膨張材として静的破碎材を用い、セメント量に対する置換率は 30% とした。

格点構造 STKM13B 相当の外径 406.4mm, 厚さ 40.5mm, 幅 260mm の鋼管を切断し、鉄板と溶接して作製した。

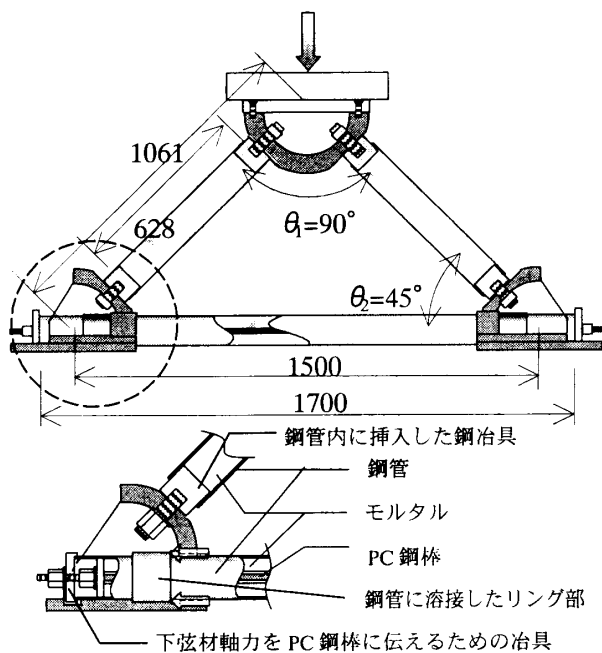


図 1 供試体概略図(単位:mm)

2. 2 供試体作製

図 1 のように、三角形合成トラス構造供試体はモルタル充填鋼管三部材（圧縮弦材 2，引張弦材 1）と格点構造三個を組み立てて作製した。圧縮弦材の場合，モルタルのみに軸圧縮応力が作用するように鋼管の両端部に鋼製冶具を挿入し，冶具に PC 鋼棒（直径 32mm，全ネジ）を

付けて，ナットで格点部と連結した。下弦材は引張弦材となり，荷重によるコンファインド効果を期待できないので，これら部材には，トラス構造を組み立てる前に，PC 鋼棒にて大きなプレストレスを内部モルタルに導入し，コンファインド効果を載荷の前に生じさせておいた。プレストレスの導入はモルタル打設 7 日後に行なった。供試体下弦材鋼管端部表面に $\phi 120$ mm, 幅 100mm のリングを溶接して取り付け，載荷の時に，斜材からの軸圧縮力で格点部構造を押し広げようとする力を下弦材の端部に溶接した

表 3 供試体一覧表

供試体	モルタルと鋼管との付着	モルタル W/C	下弦材 Prestress 導入
EB-Po-45	あり	45%	あり
UB-Po-45	なし	45%	
UB-Po-60		60%	
UB-Po-30		30%	
UB-Po0-30		30%	なし
UB-0-30		30%	PC 鋼棒なし
UB-Ch-45		45% (膨張材置換率 30%)	ケミカルプレストレス (PC 鋼棒あり)
中空鋼管型	モルタル充填なし		

供試体の略記方法

UB	Po	45
付着状況	Prestress 導入方法	
UB: 付着なし	Po: Post Tension	W/C
EB: 付着あり	Ch: Chemical Prestress	

リングで受けて、引張力に抵抗させた。また、膨張モルタルによるケミカルプレストレスを用いた供試体についても検討した。なお、モルタルを充填しない鋼管だけの供試体も比較のために作製した。

鋼管とモルタルの付着の有無とは鋼管内壁にアスファルトを塗布してからモルタルを打設し、付着を低減させる場合とそうしないで付着有りの場合を示している。本実験に用いた供試体は表3に示す。

2. 3 荷重方法

荷重試験は 200 t アムスラー油圧式荷重試験機を用い、トラス要素上部格点に単調増加荷重で荷重した。ひずみ測定は、各弦材の中央部にあるモルタル内埋め込み型ゲージ、鋼管及び PC 鋼棒表面貼り付け型ゲージにより行い、供試体上部格点の垂直方向及び圧縮弦材の軸方向変位を変位計で測定した。また、荷重後、鋼管内部のモルタルを取り出し、ひび割れ状況を調べた。

3. 実験結果及び考察

各供試体の最大荷重荷重を図2に示す。

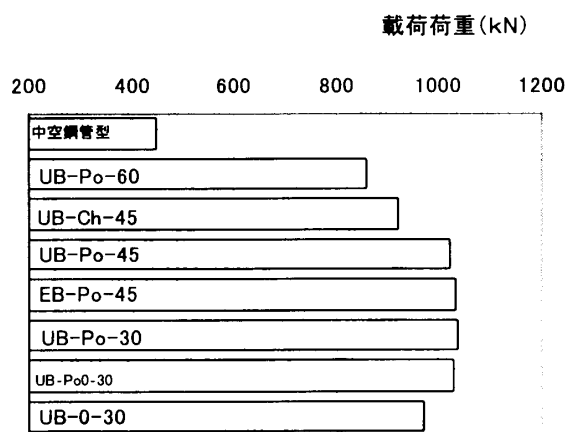


図2 各供試体の最大荷重荷重 (kN)

3. 1 モルタル充填の影響

図3に鋼管にモルタルを充填した供試体 UB-Po-45 型と充填しない中空鋼管型の上部格点の垂直方向変位－荷重荷重関係を示す。モルタルを充填した供試体は、様々な既往の研

究の報告と同様であり、中空鋼管型と比べて最大荷重荷重が 2.3 倍、変形能力が 3 倍以上に向上したことが示されている。これは、モルタルは三次元方向の圧縮応力を受けるため、軸方向圧縮強度が著しく増大するコンファインド効果があるためである。なお、もう一つの原因は、充填しているモルタルは鋼管の内側への座屈を抑制している。ただし、UB-Po-45 の初期剛性が中空鋼管型と比べて若干低下した結果となった。これは、モルタルを充填した供試体の斜材の場合、鋼管でなく、モルタルが直接圧縮力を受けるため、モルタルの弾性係数 E_c が鋼管の弾性係数 E_s より極めて小さく ($E_s/E_c=7\sim10$)、同じ荷重を受ける場合、UB-Po-45 の圧縮斜材の変形量が大きいためである。

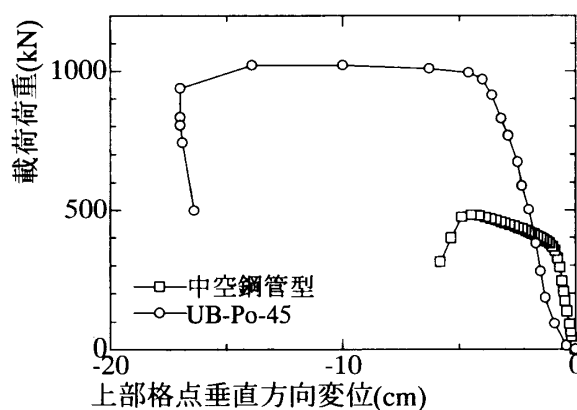


図3 上部格点の垂直方向変位－荷重関係

3. 2 鋼管とモルタルの付着の影響

図4に鋼管とモルタルの付着状況が違う EB-Po-45 と UB-Po-45 の荷重－斜材の軸方向変位関係を示す。図4に示すように、鋼管とモルタルの間の付着を低減させた UB 型が付着ありの EB 型に比べ、初期剛性は若干低下する結果となった。これは、UB 型が付着を低減させたため、部材の鋼管の軸方向圧縮分担荷重が付着ありの EB 型より小さくなったためである。しかし、EB 型は最大荷重になった後に、中空鋼管型とほぼ同じ変位になるところで、保有耐力を失い、トラス構造は斜材が座屈して脆性的に破壊した。一方、UB 型は最大荷重に到達後

にも、耐力を保持していて、塑性変形が大幅に進展し、軸方向変位はEB型の約2.5倍になることが確認でき、コンファインド効果をより発揮していると言える。最終的な破壊は後述するように、最大荷重到達後、格点部の二次モーメントにより、大変形を生じた後に除荷した。

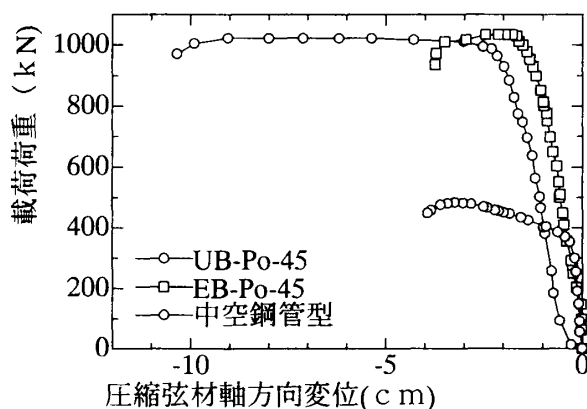


図4 圧縮弦材の軸方向変位－荷重関係

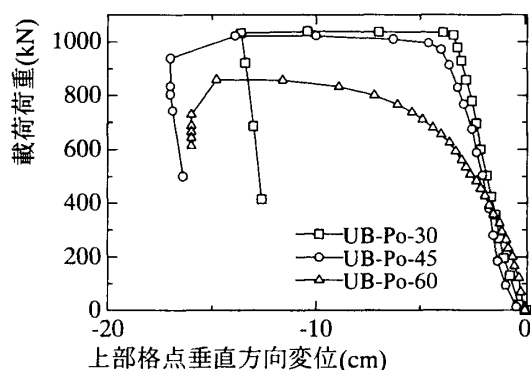


図5 上部格点の垂直方向変位－荷重関係

3.3 モルタルの一軸圧縮強度の影響

本研究はモルタルの水セメント比(すなわち一軸圧縮強度)を30%, 45%, 60%に変えて供試体を作製した。図5にモルタルの水セメント比が違う各供試体の上部格点の垂直方向変位－載荷荷重関係を示す。高強度モルタルを使用した供試体 UB-Po-30 が中強度の供試体 UB-Po-45 と比べ、初期剛性と最大載荷荷重がほぼ一致しており、高強度モルタル自体は圧縮変形能力がやや低いため、供試体の変形能力が低下した。

一方、低強度モルタルを使用した供試体

UB-Po-60 が中強度の供試体 UB-Po-45 と比べ、変形量はほぼ同様となったが、最大載荷荷重が低くなり、最大載荷荷重到達までの段階の変形が大きく、最大載荷荷重到達後にすぐ、斜材が二次モーメントによって波形の大変形を生じた。

以上のことにより、中強度モルタルを使用した供試体は初期剛性、耐力及び変形能力などの力学的挙動がいずれも優れ、モルタル充填鋼管部材はトラス構造に応用する時に最適であるという結果になった。

3.4 下弦材へのプレストレス導入の影響

トラス構造の斜材の場合、活荷重の位置により、圧縮力と引張力の両方が働く正負交番荷重の場合がほとんどであり、また下弦材は常に引張力が作用するため、そのようなトラス構造への適用を考え、圧縮力に強いとされてきた充填鋼管を引張力の働く弦材への適用性を検討する必要がある。本研究ではトラス構造要素の引張応力を受ける下弦材の形式を3種類に変化し、各供試体の力学的挙動を調べた。

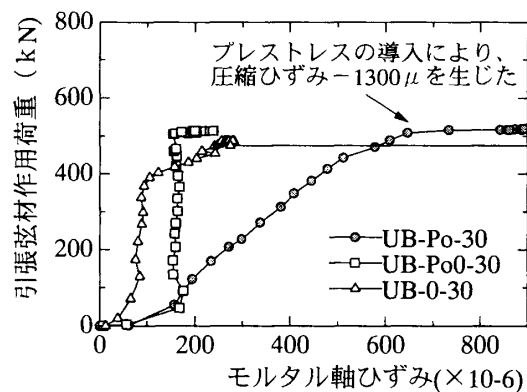


図6 下弦材作用荷重－モルタルひずみ関係

図6に下弦材の形式が違う供試体の下弦材の作用荷重－モルタルひずみ関係を示す。下弦材にPC鋼棒が配置していない供試体 UB-0-30、またはPC鋼棒は配置しているが、プレストレスを導入しない供試体 UB-Po0-30 のひずみ曲線を調べると、荷重増加の初期段階で両者のひず

み増加が急に小さくなり、その後、最大載荷荷重まであまり変らなかった。これは、モルタルが引張応力を受けると、すぐクラックが発生し、埋め込み型ひずみゲージ附近のモルタルに応力がほとんど生じなくなったためである。一方、PC 鋼棒による下弦材モルタルに 28N/mm^2 のプレストレスを導入した UB-Po-30 の場合、充填したモルタルに -1300μ の圧縮ひずみを生じさせておいたため、最大載荷荷重に至るまで、モルタルは圧縮応力のままであるため、クラックが発生していないと考えられる。このため、供試体 UB-Po-30 のモルタルは鋼管軸引張力による半径方向の収縮に対してより抵抗できるため、鋼管の初期剛性も向上した。これは、図 7 の下弦材鋼管軸方向応力-ひずみ関係から明らかである。また、下弦材の剛性が大きいほど、上部格点部の角度が拡がらず、供試体の二次応力の発生を抑制でき、最大載荷荷重が増大した。

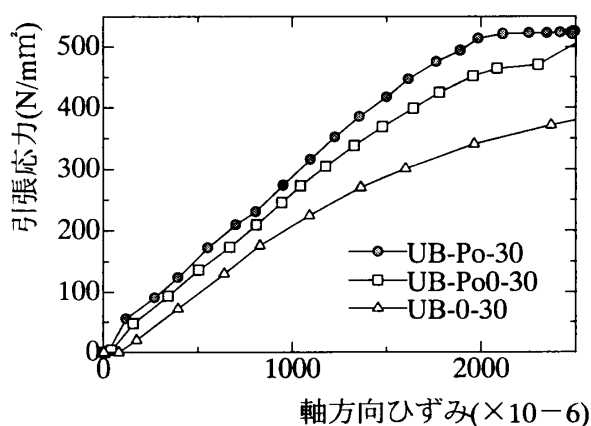


図 7 下弦材鋼管 軸方向応力-ひずみ関係

3. 4 ケミカルプレストレスの影響

本研究では、普通モルタルの代わりに、膨張モルタルを鋼管に充填し、ケミカルプレストレスを生じさせた場合のトラス要素の力学的特性を検討した。鋼管表面に貼付けたひずみゲージより測定したひずみからケミカルプレストレス導入量を計算し、軸方向と半径方向がそれぞれ $22.8, 38.7\text{N/mm}^2$ である。図 8 に膨張モルタルを使用して水混合材比 45% (実際の水セメント比

は 64%) の供試体 UB-Ch-45 と、普通モルタルを使用して水セメント比 45%、60% の供試体 UB-Po-45 及び UB-Po-60 の上部格点の垂直方向変位-荷重関係を示す。普通モルタルを使用した供試体と比べ、膨張モルタルを使用した供試体 UB-Ch-45 は変形能力がほぼ一致しており、初期剛性が大幅に向上した。これは、圧縮斜材に充填した膨張モルタルの膨張効果により、内部モルタルは三次元的に拘束され、圧縮応力により緻密化され、モルタルと鋼管の摩擦が増大し、載荷の最初段階では圧縮弦材のモルタルと鋼管とが共に圧縮応力を負担したためである。また、適量の膨張材置換率を選択すると、膨張モルタルの供試体の最大載荷荷重を向上できると考えられ、今後の研究で、一層検討する必要がある。

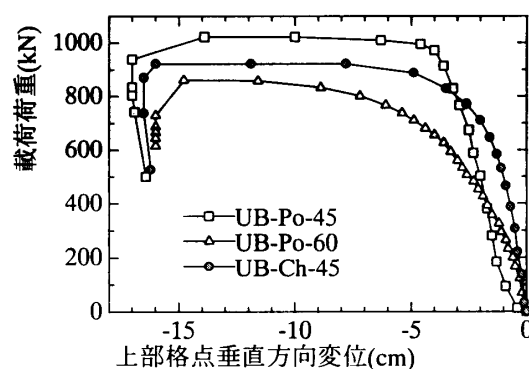


図 8 上部格点の垂直方向変位-荷重関係

3. 5 破壊性状

いずれの供試体の場合も圧縮弦材の内部モルタルの大きい塑性変形とトラスの二次応力の発生によって鋼管の局部座屈が生じて、供試体は最終破壊した。圧縮弦材鋼管の中央部上下部に貼り付けたひずみゲージのひずみ測定値から、圧縮弦材の曲げモーメントを計算し、曲げモーメントと圧縮弦材に作用する荷重の関係(図 9)を調べると、最大荷重 700kN あたりから、曲げモーメントが激しく増加したことが分かる。

試験後の供試体を写真 1 に示す。載荷試験後、圧縮弦材の鋼管を切断して内部モルタルの破壊性状を調べた。いずれの圧縮弦材の内部モルタル

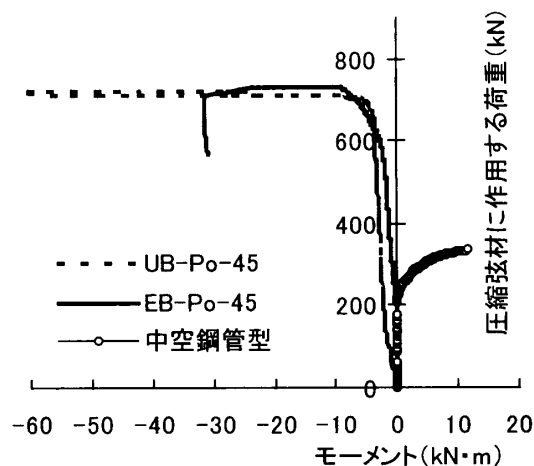


図9 圧縮弦材の荷重－モーメント関係

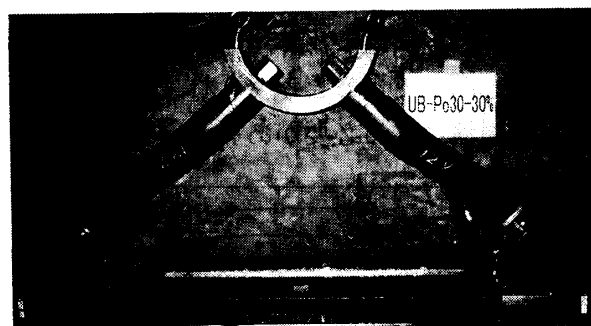


写真1 三角形トラス構造の破壊性状

ルも鋼管の塑性変形と同様の形の大きな塑性変形を生じており、ひび割れにより、バラバラになっている状態ではなかった。これは注目にする新事実である。

付着ありのEB型(写真2)供試体は中央部のせん断破壊のすべり面以外にほとんど健全な形状を保存し、大きいひび割れが見られなかった。一方、付着なしのUB型(写真3)の供試体が、モルタルの全体にいくらか目で確認できる程度のせん断ひび割れが見られた。これは、UB型供試体はモルタルと鋼管の付着が低減されているため、モルタル全体で圧縮応力を受けていて内力が全体に渡って一様であること、一方、EB型はモルタルと鋼管の界面の摩擦により、鋼管の軸圧縮力の分担がUB型の場合より大きく、鋼管の座屈が生じやすく、座屈部のモルタルが破壊していたためと思われる。

4. まとめ

コンクリート充填鋼管部材を用いた三角形ト

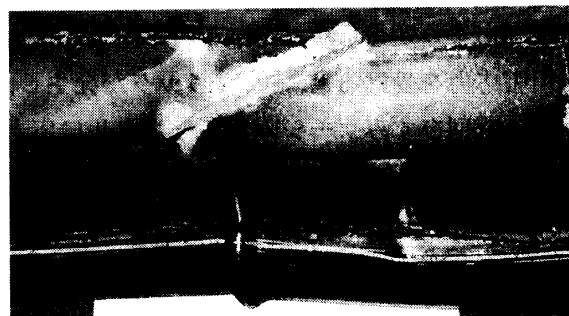


写真2 EB型の破壊性状



写真3 UB型の破壊性状

ラス要素及び各弦材の力学的挙動を検討した結果を以下に示す。

1. トラス構造供試体はモルタルの充填により、充填しない場合と比べて破壊耐力と変形能力が向上する特性を示した。特に鋼管とモルタルの付着を低減したUB型供試体は、コンファインド効果をより発揮したため、最大載荷荷重は2.3倍に増大し、変形能力が3倍以上になった。

2. 充填したモルタルの一軸圧縮強度を変えると、トラス構造の力学的特性も変化した。中強度モルタルを使用した供試体は、最大載荷荷重と変形能力と両方とも大きく、充填鋼管トラス構造に適している。

3. トラス構造供試体の引張下弦材にPC鋼棒を配置し、さらにプレストレスを導入したことにより、モルタルのひび割れが発生しにくく、鋼管の周方向への縮みに抵抗でき、下弦材の引張変形を低減できたため、供試体全体の二次モーメントの発生を抑制できた。

4. 膨張モルタルを使用し、ケミカルプレストレスを導入した供試体は、載荷の初期剛性が優れており、最終的な変形能力も普通モルタルの場合と同様に優れている。