

各種高じん性モルタルの開発

Development of Various Ductile Fiber Reinforced Mortar

谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI

樋口 正典 MASANORI HIGUCHI

斯波 明宏 AKIHIRO SHIBA

佐々木 亘 WATARU SASAKI

本報は、筆者らが開発してきた、じん性やひび割れ分散性等に優れる高じん性モルタルの特性について紹介するものである。本報では、まず、高いじん性を持つコンクリートおよびモルタルの種類と曲げ供試体の下面に発生するひび割れの関係を示した。次いで、高い圧縮強度が要求された場合と、低い弾性が要求された場合の2種類の高じん性モルタルの特性を示した。それらのモルタルは、軽量細骨材を使用して軽量化を図ることや、より微細なひび割れに分散させることなどが可能であり、要求性能に応じてさまざまな性能を付与した高じん性モルタルの製造が可能であることを確認した。

キーワード：高じん性モルタル、高強度、軽量、曲げタフネス、微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料

This paper describes the characteristics of various ductile fiber reinforced mortar which the authors have developed. First of all, the difference of the crack which occurred in various cementitious materials having high toughness was shown. In this report, the characteristic of the mortar with high strength or low elasticity is shown as performances other than the high toughness. Light-weight mortars can be produced using light-weight aggregate, and minute crack occurs in the mortars by appropriate design of mix proportion.

Key Words: Fiber Reinforced Mortar, High Strength, Light-weight, Flexural Toughness, High Performance Fiber Reinforced Cement Composite (HPERCC)

1. はじめに

より高い水準のじん性やひび割れ分散性等を得ようとして、短繊維混入率を大きくし、さらには微細な短繊維に変更すると、コンクリートのワーカビリティや強度等の低下を招くため、コンクリート中の骨材量を減じる必要がある。太径のビニロン繊維を混入した高じん性コンクリートに関しては、それらの品質に影響を及ぼさないための、短繊維混入率に応じた単位粗骨材絶対容積を報告している¹⁾。筆者らの確認した範囲¹⁾を超え、短繊維混入率をさらに大きくしていけば、単位粗骨材絶対容積をますます小さくする必要があり、結果的にはモルタルの領域に達する。

高じん性モルタルの一つとして、設計基準強度 180N/mm^2 の高い強度を持ち、鋼繊維を多量に混入することで高いひび割れ発生強度と引張強度を付与した超高強度繊維補強コンクリート(UFC)²⁾がある。これは、

「コンクリート」と称しているが、実際には、粗骨材を有しない「モルタル」である。また、使用される細骨材の最大寸法についても、通常のコンクリートに使用される細骨材の値(5mm)よりも小さくしている。最近では、微細で高密度のひび割れを発生する材料が開発され始めている。これについては、土木学会で「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(略称: HPERCC)」と称し、設計・施工指針(案)が作成されている³⁾。海外における同種の材料として代表的なものが ECC (Engineered Cementitious Composite) である。これは、ミシガン大学の Victor C.Li によりマイクロメカニクスと破壊力学を設計原理とした材料である。これらの材料(モルタル)においては、UFC よりもさらに細かな細骨材が使用されており、その量も少ない。このように、高じん性のセメント材料の技術開発は、モルタルを中心とした領域で新たな進展が見られる。

筆者らは、これまでにさまざまなタイプの高じん性

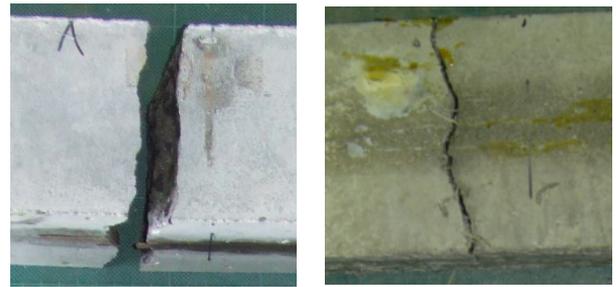
コンクリート・モルタルの開発^{たとえ、1),4)}を行ってきた。本報では、セメント硬化体をモルタルとした場合を対象とし、高い圧縮強度が要求された場合と低い弾性が要求された場合の2種類の高じん性モルタルを取り上げ、さらに軽量化あるいはひび割れ分散性を付与した高性能な高じん性モルタルの開発の一例を紹介する。

2. 高じん性モルタルに発生するひび割れの特徴

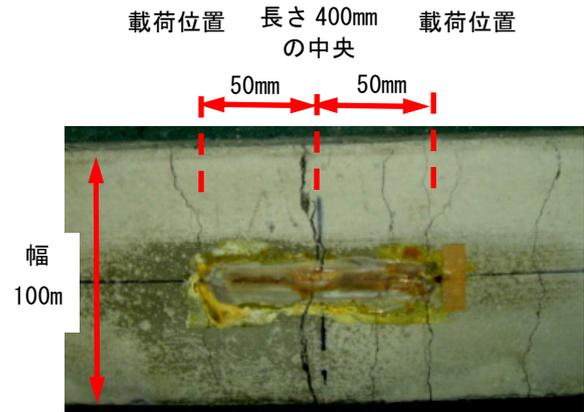
写真-1は、各種コンクリート・モルタルで製作した供試体を使用し、曲げ強度（タフネス）試験（JSCE-G552）を行った後、その供試体の下面に発生したひび割れ状態を示している。供試体は、一般的な100×100×400mmの角柱状のものであり、3等分点荷重によって試験を実施している。写真-1(d)の供試体に発生したひび割れは微細であるため、供試体の中央部を拡大している。ただし、ひび割れが相当に微細であるため、写真では確認できないひび割れが多数存在している。

短繊維を含まない通常のコンクリートの場合には、曲げ強度試験を行うと、供試体の中央付近にひび割れが発生し、最大荷重に達した時点で破壊に至り、2分割される。ビニロン繊維や鋼繊維を使用した高じん性コンクリート（短繊維補強コンクリート）の場合には、荷重-たわみ曲線に違いはあるものの⁴⁾、通常のコンクリートと同様に中央付近のひび割れが進展し、たわみの増加とともにそのひび割れ幅が大きくなっていく。ただし、短繊維混入率がある程度大きい場合には、曲げじん性係数の計算に用いるたわみ2.0mmまでに供試体が2分割されることはない。

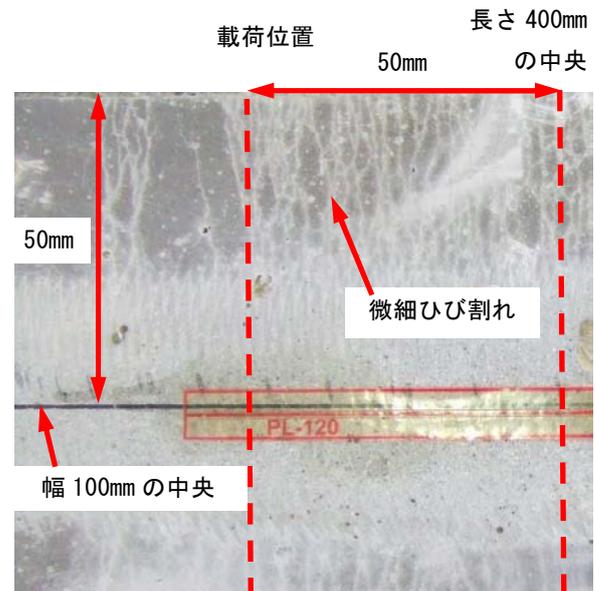
写真-1(c)に示す高じん性モルタルは、コンクリート補強用の太径ビニロン繊維を多量に使用したものである。この場合、ひび割れ本数は高じん性コンクリートよりも多くなりひび割れの分散性が高まるが、ひび割れ間隔は数cm程度となり、微細ひび割れと呼ぶ領域には至らない。設計においてひび割れ分散性をどこまで求めるかによるが、ひび割れ分散性を高めるためには、細径のビニロン繊維等を多量に使用する必要がある。その他、さまざまな材料・配合の工夫を行うことにより、写真-1(d)に示すように、約50mmの範囲（供試体の長さ方向400mmの中央から荷重位置までの範囲）に相当数のひび割れが発生し、かつ1本当たりのひび割れ幅も小さい、HPRCCに分類される複数微細ひび割れ型の高じん性モルタルを得ることができる。このように、微細なひび割れに分散させることにより、塩化物イオン等の劣化因子の侵入を抑制し、部材の長期供用を可能にできる。



(a) 普通コンクリート (b) 高じん性コンクリート



(c) ひび割れ分散性を高めた高じん性モルタル

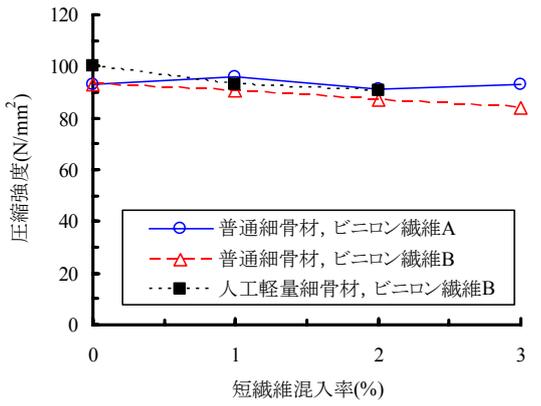


(d) 微細ひび割れ型の高じん性モルタル

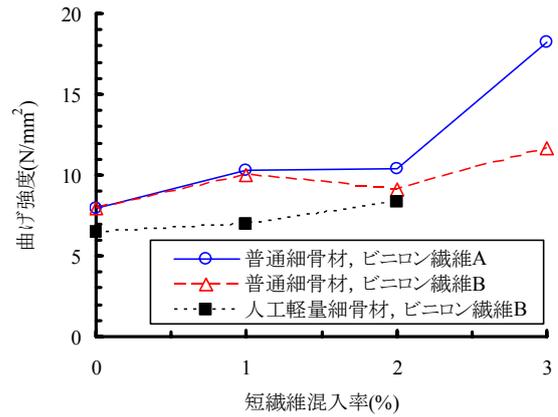
写真-1 曲げ供試体下面に発生したひび割れの違い

3. 高強度が要求される高じん性モルタルの開発

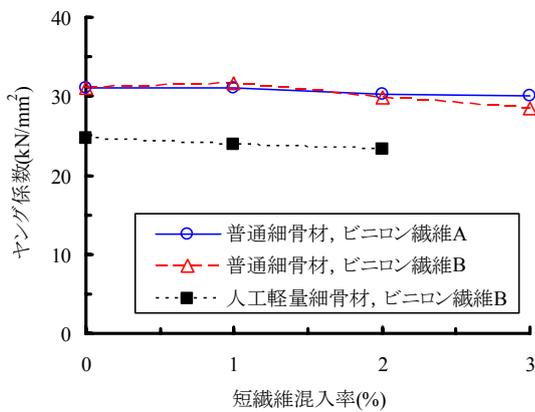
PC（プレストレストコンクリート）部材等への適用を想定した場合には、高じん性モルタルに対しても、ある程度高い圧縮強度が求められる。図-1は、一般的な



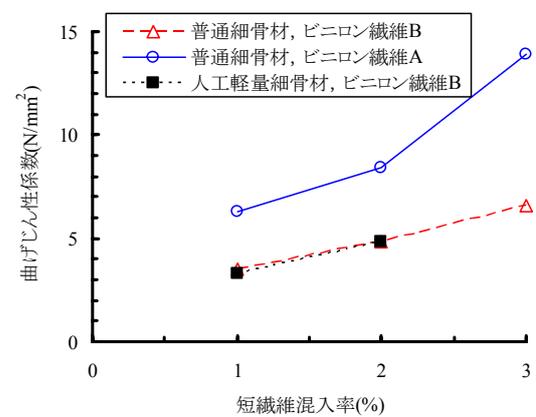
(a) 圧縮強度



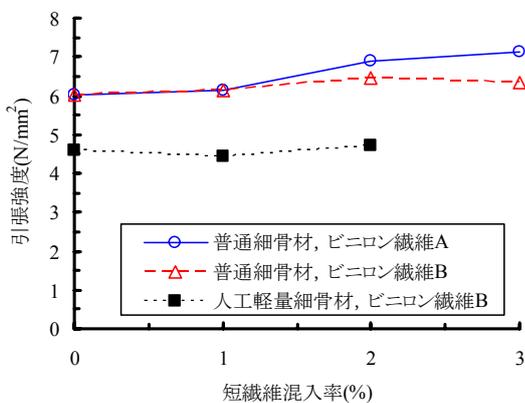
(d) 曲げ強度



(b) ヤング係数



(e) 曲げじん性係数



(c) 引張強度

図-1(1) 高強度高じん性モルタルの力学的特性

材料の組合せにより、通常生コン工場等の設備を用いて製造できる、比較的高い強度域を対象とした高じん性モルタルの力学的特性を示している。ここで紹介する高じん性モルタルは、水セメント比 (W/C) を 34.8%、水粉体比 (W/P) を 30.9%としたものである。粉体には早強ポルトランドセメントと石灰石微粉末 (比表面積

図-1(2) 高強度高じん性モルタルの力学的特性

4,000cm²/g 級) を使用した。細骨材は、一般的な普通細骨材 (川砂と砕砂の混合砂) と人工軽量細骨材を使用し、それぞれの細骨材を使用したモルタルの力学的特性を示した。モルタルの流動性は、本実験では打込みが可能な範囲であることとし、特に目標値を定めていない。流動性の調整には高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系) を使用した。短繊維は、コンクリート補強用として一般的なビニロン繊維 A (径 0.66mm, 長さ 30mm) と、これよりも若干短く、細いビニロン繊維 B (径 0.20mm, 長さ 18mm) を使用し、ビニロン繊維の違いがモルタルの物性に及ぼす影響を確認した。モルタルの品質は、いずれもコンクリートと同一の試験方法で実施したものであり、圧縮強度、ヤング係数および (割裂) 引張強度は JIS、曲げ強度および曲げじん性係数は JSCE-G552 に準じて試験を行って求めたものである。

図-1 に示すとおり、圧縮強度は、短繊維混入率を高めることにより若干の低下が認められるが、その低下量は小さく、短繊維混入率を 3.0%まで増やしても

90N/mm²前後が得られている。また、軽量モルタルに関しても、試験で確認した短繊維混入率が2.0%の範囲ではあるが、圧縮強度への影響がほとんどなく、普通骨材と同等の圧縮強度が得られている。

ヤング係数は、細骨材の種類によって異なるのは当然であるが、細骨材の種類が同一であれば、ビニロン繊維の種類と短繊維混入率の影響は認められない。モルタルは、圧縮強度が同一のコンクリートに比べてヤング係数が小さくなるので、4. で述べるように低弾性が要求される場合には有効な手段であるが、コンクリートと同等のヤング係数が必要な場合^{たとえば、5)、6)}にはある程度高い強度域のモルタルを製造する必要がある。ここで紹介した普通細骨材を使用した高じん性モルタルのヤング係数は、設計基準強度40N/mm²のコンクリートの構造計算で用いる値に相当する。

引張強度は、ビニロン繊維 A の場合には、短繊維混入率が1.0%~3.0%の範囲で大きくなっているが、ビニロン繊維 B を使用した場合には細骨材の種類にかかわらず、短繊維混入率の影響は見られない。

曲げ強度は、短繊維の混入により大きくなる傾向があるが、短繊維混入率を増加させても必ずしも大きくならない場合も見られる。ただし、ビニロン繊維 A を3.0%使用すると、ビニロン繊維を使用しない場合に比べ、曲げ強度が2.3倍になる。

曲げじん性係数は、いずれの細骨材を使用した場合にも短繊維混入率の増加に伴い、大きくなる傾向が認められる。ビニロン繊維 A を使用した場合、短繊維混入率の増加により曲げじん性係数が大幅に増大する。ビニロン繊維 B を使用した場合の曲げじん性係数は、短繊維混入率が1.0%と2.0%では、細骨材の種類による違いが見られない。

図-2 は、ビニロン繊維 A と普通細骨材を使用した場合の高じん性モルタルの曲げ強度試験における荷重-たわみ曲線を示している。短繊維混入率 (Vf) が0%の場合にはひび割れの発生とともに破壊に至り、図中ではほとんど確認できない。短繊維混入率が1.0%であっても、最大荷重 (ひび割れ発生荷重) 以降の急激な破壊を生じず、高いじん性を有することがわかる。短繊維混入率が1.0%と2.0%の荷重-たわみ曲線は比較的似ており、ひび割れ発生荷重に達した後、一旦は荷重が低下するが、その後、たわみの増加とともに荷重が再び増加する。短繊維混入率を3.0%まで増加させると、ひび割れ発生荷重からの荷重の低下はわずかであり、その直後からたわみの増加とともに荷重が増加し始める。たわみが2.0mm程度のところまで荷重が増加し、その後緩やかに低下する。曲げじん性係数はたわみが0~2.0mmまで

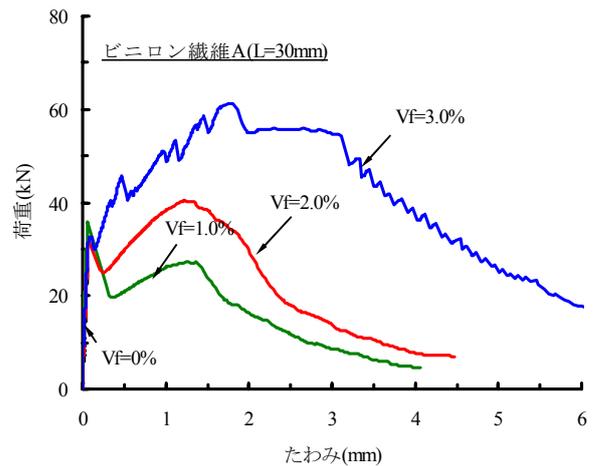


図-2 高い圧縮強度が要求される高じん性モルタルの曲げ強度試験における荷重-たわみ曲線の一例

の範囲で、荷重-たわみ曲線に囲まれる領域の面積から求めたものであるが、図-2 に示すとおり、たわみが6.0mmに達しても、荷重が20kN弱となる状態であり、曲げじん性係数は、この高いじん性を過小評価している。

軽量モルタルの見掛けの密度は1.95g/cm³程度であり、モルタル自体はコンクリートと比べて大幅な軽量化を図れるものではない。しかし、高強度、高じん性の特性を活かした部材の形状寸法を検討すれば、それらの相乗効果により、部材の軽量化を図ることも可能になるものと思われる。

4. 低弾性が要求される高じん性モルタルの開発

コンクリート構造物の構造設計においては、コンクリート標準示方書や道路橋示方書に示された設計基準強度に対応するヤング係数の標準値を用いている。昨今は、骨材の品質の低下によりコンクリートのヤング係数が小さい場合や、人工軽量骨材コンクリートのようにヤング係数が普通コンクリートと大幅に違う場合には実測値を確認し、設計に反映することもあるが、一般にはヤング係数については設計上の自由度はない。しかし、構造物の条件によっては、特定の部位に作用力が高く、使用するコンクリートあるいはセメント系材料のヤング係数を小さくしたい場合もある。床版下面増厚工法では、ヤング係数が相当に小さい吹付けポリマーセメントモルタルが使用されている。本章では、そのような設計の自由度を高めるため、ヤング係数が小さい高じん性モルタルの開発を試みた。

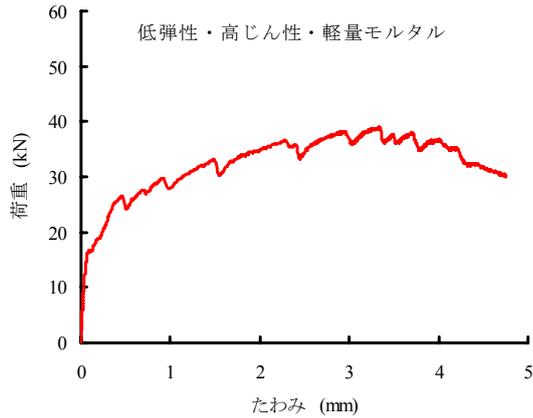


図-3 人工軽量細骨材を使用した低弾性高じん性モルタルの曲げ強度試験における荷重-たわみ曲線

(1) 軽量細骨材を使用した低弾性高じん性モルタル

モルタルのヤング係数が、同一強度のコンクリートに比べて小さくなることは前述のとおりである。また、軽量骨材を使用したコンクリートのヤング係数は、同一強度の普通骨材を使用したコンクリートに比べて小さく^{1),7)}、前述の高強度を対象とした高じん性モルタルの試験結果でも実証されている。そこで、人工軽量細骨材を使用して、高じん性モルタルのヤング係数をどの程度低減できるか確認を行った。

施工の対象は、設計基準強度が 30N/mm^2 前後の RC 構造物を想定した。設計基準強度 30N/mm^2 のコンクリートの構造計算に用いるヤング係数の標準値が 28kN/mm^2 以下であるため、ヤング係数としては、材齢 28 日の試験値として 20kN/mm^2 以下で、なるべく小さくなる方法を検討した。

前章と同様に、粉体は早強ポルトランドセメントを基本とし、石灰石微粉末を組み合わせた。このようなモルタルはコンクリートに比べて収縮が大きくなる傾向があるため、膨張材と収縮低減剤を使用した。流動性と粘性の調整には高性能 AE 減水剤と増粘剤を使用した。これらはいずれも市販の材料である。人工軽量細骨材に関しても市販品を使用した。フレッシュモルタルにおけるファイバーボールの発生を抑制し、硬化モルタルのひび割れ分散性を高めるため、人工軽量細骨材は特別に粒度調整等の処理を行った。使用した短繊維は、ビニロン繊維 B である。フレッシュモルタルおよび硬化モルタルの品質を総合的に評価し、水結合材比は 52%、水粉体比は 46%、短繊維混入率は 3.0%とした。なお、実施した硬化モルタルの品質を確認する試験方法は、前章と同一である。

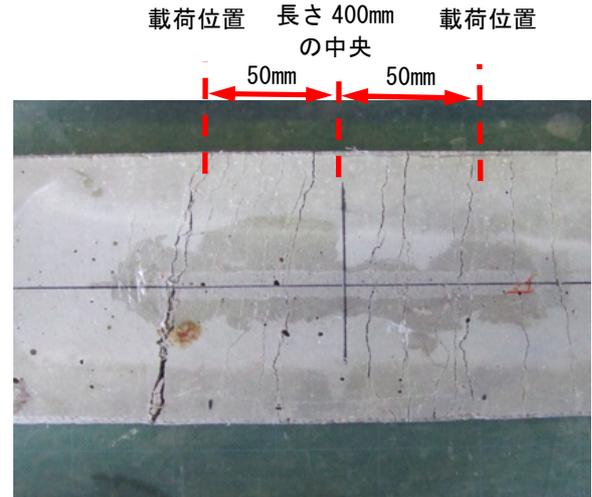


写真-2 軽量細骨材を使用した低弾性高じん性モルタルの曲げ強度試験後の供試体下面に発生するひび割れの違い

実験の結果、得られたモルタルは、想定した設計基準強度よりも若干高めめの 40N/mm^2 程度の圧縮強度を確保しながら、ヤング係数を 14kN/mm^2 前後まで下げることが可能であることが確認された。また、曲げ強度は約 10N/mm^2 と高く、曲げ強度試験における荷重-たわみ曲線は、図-3 に示すとおり、たわみが 5mm 近くにも達しても破壊に至らず、 30kN 程度の高い荷重を保持している。図中に示した曲線の多くの凹凸は、ひび割れの発生を意味する。写真-2 は、曲げ強度試験後の供試体下面に発生したひび割れ状態である。写真-1(d)に示すような複数微細ひび割れには達していないが、ひび割れ分散性も高いモルタルである。また、硬化モルタルの見掛けの密度は 1.76g/cm^3 であり、部材の軽量化も図れる。

(2) 普通骨材を使用した複数微細ひび割れ型の低弾性高じん性モルタル

前述の人工軽量細骨材を使用した高じん性モルタルの場合、人工軽量細骨材の粒度調整を行ったが、ビニロン繊維を微細なものに変更しても、ひび割れ分散性は大幅には向上しなかった。そこで、微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPERCC) の思想に沿った高じん性モルタルの製造を試みた。

使用した材料は、(1)と同様に、市販の早強ポルトランドセメント、石灰石微粉末、膨張材、収縮低減剤、高性能 AE 減水剤、増粘剤等である。ここでは、細骨材には、市販されていて容易に入手できる、微小粒のものとして珪砂 6号を選定した。ビニロン繊維はモルタル用の微細で短いもの (径 $40\mu\text{m}$ 、長さ 12mm) を使用した。

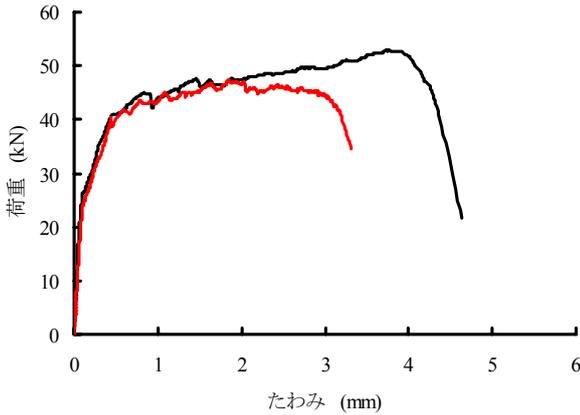


図-4 普通細骨材を使用した低弾性高じん性モルタルの曲げ強度試験における荷重-たわみ曲線

水結合材比は45%前後、水粉体比は40%前後、短繊維混入率2.0%前後に定めると、比較的良好な性状の高じん性モルタルが得られることが確認された。

図-4は、この高じん性モルタルを使用し、曲げ強度試験を行った場合の荷重-たわみ曲線を表している。図中の曲線の凹凸が微細ひび割れの発生を示すものであり、相当数のひび割れを発生していることがわかる。図中の2本の曲線は、若干異なる配合の試験例である。曲げじん性としては黒線の供試体のほうが優れているが、微細ひび割れの発生を示す凹凸が見えにくいので、比較的わかりやすい赤色の線で示した結果も併記した。この高じんモルタルを用いた曲げ供試体のひび割れ発生状況は、写真-1(d)のとおりである。

モルタルの圧縮強度は45N/mm²程度、ヤング係数は17.5kN/mm²であった。前述の人工軽量細骨材を使用した場合よりもヤング係数は大きい、目標とした20kN/mm²以下を十分に満足する。また、曲げ強度は14kN/mm²であり、人工軽量細骨材を使用したものよりもさらに高い値である。なお、見掛けの密度は1.95g/cm³であった。

現在、技術開発を進めるなかで、ヤング係数を15kN/mm²程度まで抑えた複数微細ひび割れ型高じん性モルタルも実現可能であることが確認されている。

5. まとめ

本報では、高じん性コンクリートよりも高いじん性や優れたひび割れ分散性が得られる高じん性モルタルの特性について紹介を行った。これまでの技術開発のなかで、高じん性のみならず、高強度、低弾性、軽量といった他の性能を併せ持つ高じん性モルタルの製造が可能で

あることが確認された。

さまざまなタイプの高じん性コンクリート・モルタルの製造が可能であるため、今後は、具体的な構造物を対象に要求性能を明確にし、現場への展開を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 谷口秀明, 三上浩, 浅井洋, 樋口正典, 藤田学: 高じん性コンクリートの開発-ビニロン繊維補強コンクリートの基礎物性-, 三井住友建設技術研究所報告, 第6号, pp.73-82, 2008.11
- 2) 石井精一, 西村一博, 児山裕樹, 一宮利通: 超高強度繊維補強コンクリートの道路橋への適用事例, 第15回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.13-16, 2006.10
- 3) 土木学会: 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案), 2007.3
- 4) 谷口秀明, 樋口正典, 佐々木亘, 三上浩: 高じん性コンクリートの開発-高じん性コンクリートのさらなる高性能化に向けて-, 三井住友建設技術開発センター報告, 第7号, 2009(投稿中)
- 5) 中村定明, 濱田譲, 谷口秀明, 中村雅之: PC橋の改造技術に関する研究-その3: PC部材のはつりの適切性に関する研究-, プレストレストコンクリート, Vol.50, No.1, pp.54-60, 2008.1
- 6) 谷口秀明, 渡辺博志, 竹中秀樹, 三加崇: PC橋の改造技術に関する研究-その4: 大規模な断面修復の材料および施工に関する検討-, プレストレストコンクリート, Vol.50, No.2, pp.92-100, 2008.3
- 7) 谷口秀明, 三上浩, 浅井洋, 樋口正典, 藤田学: 人工軽量骨材コンクリートの品質向上に関する研究-基礎物性および自己充てん性-, 三井住友建設技術研究所報告, 第6号, pp.83-90, 2008.11