

論文 充てんモルタルの破壊力学特性に関する研究

石黒 覚^{*1}・小合俊平^{*2}

要旨：管水路の補修・改修工法で使用される充てんモルタルの破壊特性を調べるため、楔挿入割裂試験法によるモード I 破壊試験を実施した。計測した荷重 - 開口変位の結果から、破壊エネルギーと引張軟化曲線の 2 つの破壊力学パラメータを解析し、使用材料および配合などの相違が充てんモルタルの破壊力学特性に及ぼす影響について検討した。管水路の補修・改修後の力学性能を解析するための基礎データを得るとともに破壊力学パラメータに及ぼす細骨材の影響を明らかにした。また、楔挿入割裂試験法を採用した付着試験は、充てんモルタルと既設コンクリートの付着特性を評価する試験法として適用できることを示した。

キーワード：管更生工法, モルタル, 破壊エネルギー, 引張軟化曲線, 楔挿入割裂試験

1. はじめに

近年、農業用の管水路においても老朽化が進行し、その機能保持のために補修・改修の必要性が増大している。管水路の補修・改修に対しては既に多くの工法が開発されており¹⁾、このうち非開削による管水路の補修・改修工法は一般に管更生工法と呼ばれ、種々の利点から近年その施工実績が増加している。管更生工法の一つである製管工法は、既設管内において補強筋を有する硬質塩化ビニル材などをらせん状に巻きながら嵌合させて製管を行い、この管と既設管との間にモルタルを充てんし、一体化した管を構築する工法である。更生後の管は、内水圧や上載荷重などに対して、既設管、充てんモルタルおよび補強筋が一体となって抵抗する。このため、充てんモルタルの力学特性は、補修・改修後の構造物の力学性能を予測および解析する上からも極めて重要である。

本研究では、充てんモルタルとして使用された 4 種類のポリマーセメントモルタルを対象とし、楔挿入割裂試験法を適用してそれらの破壊試験を実施した。そして、破壊エネルギーおよび引張軟化曲線の 2 つの破壊力学パラメータを解析し、材料および配合などの相違がモルタルの破壊特性に及ぼす影響について調べた。

2. 試験および解析方法

2.1 モルタルの種類および作製方法

表 1 に示す 4 種類のモルタルを対象とした。これらのモルタルは、止水、耐食ライニングおよび強度復元など管の更生目的によってその配合や用途が決められている。ここで、MA は細骨材として珪砂、MB は軽量細骨材（フライアッシュバルーンおよびパーライト）、MC は発泡ポリスチレン粉砕品、MD は乾燥砂を使用した。なお、MA、MB、MC および MD で用いた細骨材のかさ比重は、それぞれ、1.35、0.2~0.6、0.015 および 1.4~1.6 である。また、モルタルの結合材として、MA、MB、MD では普通ポルトランドセメント、MC ではフライアッシュセメント、ポリマーとしてアクリル系樹脂エマルジョンを使用した。各種モルタルの水セメント比 (W/C)、ポリマーセメント比 (P/C)、単位セメント量 (C) および細骨材量 (S) を同表に示す。

モルタルはプレミックス粉体（セメント、細骨材、収縮低減剤の混合粉体）、水、エマルジョンをハンドミキサーで練混ぜ、1 回に 20 を製造した。モルタルは打込み後 24 時間で脱型し、3 日間水中養生を行った後、試験材齢までビニル袋に入れて 20°C の室内で保存した。なお、強度および破壊試験用の供試体数は 3 個とした。

*1 三重大学 生物資源学部共生環境学科 助教授 農博 (正会員)

*2 三重大学大学院 生物資源学研究科生物生産工学専攻 大学院生

2.2 モルタルの特性

フレッシュおよび硬化モルタルの特性を表-1に示す。ここでは、ポリマーセメントモルタルの試験方法 (JIS A 1171) を参照して各種の試験を実施した。なお、曲げ強さ f_b および圧縮強さ f_c は、それぞれ、 $4 \times 4 \times 16 \text{cm}$ の供試体およびその折片から求めた。また、引張強さ f_t は直径 5cm 、高さ 7.5cm の円柱割裂試験から求めた。

2.3 モルタルの破壊試験

破壊試験法として Tschegg らの考案した楔挿入割裂試験法²⁾を適用し、荷重 - 開口変位の挙動を計測した。試験装置ならびに供試体への載荷状態は、それぞれ図-1(a)および(b)に示す。

試験時には、楔、切欠きおよび支点が同一鉛直面内となるように供試体を設置し、電動式一軸載荷試験機により 0.67mm/min の速度で楔を鉛直方向に挿入させた。このとき、試験機からの荷重 F_m は、容量 9.8kN のロードセルにより計測した。なお、楔から荷重伝達版を介して供試体へ載荷される水平方向荷重 F_h は、楔の角度 α と荷重 F_m から $F_h = F_m / (2 \tan(\alpha/2))$ の関係式より求めた。

また、載荷点と同じ高さの位置に開口変位測定治具を固定し、容量 5mm のクリップ型変位計を取付けて開口変位を測定した。開口変位は供試体の前面と後面の2ヶ所で測定し、それらの平均値を採用した。試験機からの荷重および開口変位の各データは、自動デジタルひずみ測定器を用いて1秒間隔で計測および記録した。

破壊試験に用いた供試体の形状寸法を図-2に示す。供試体には荷重伝達版の挿入部分として幅 40mm 、深さ 20mm の細長いくぼみ部を設けている。また、試験直前にコンクリートカッターを用いて供試体のくぼみ中央に幅 2mm 、深さ 20mm の切欠きを入れ、リガメント長さを 60mm とした。

2.4 破壊エネルギーの算定

破壊エネルギーは、荷重 (F_h) - 開口変位 (CMOD) の計測結果から、次式により算定した。

$$G_f = W_1 / A_{lig} \quad (1)$$

ここで、 G_f は破壊エネルギー (N/mm)、 A_{lig} はリガメントの面積 (mm^2) および W_1 は荷重 - 開口変位曲線下の面積 ($\text{N} \cdot \text{mm}$) を表す。

2.5 引張軟化曲線の推定

引張軟化曲線は多直線近似解析法を適用して推定し³⁾、荷重 - 開口変位の計測結果から逆

表-1 モルタルの種類および特性

種類	MA	MB	MC	MD
W/C (%)	41	60	49	33
P/C (%)	6.3	8.3	5.4	13.0
C (kg/m^3)	673	582	710	702
S (kg/m^3)	1010	191	12.1	1053
収縮低減剤 (kg/m^3)	20.5	32.1	15.4	22.0
単位容積質量 (g/cm^3)	2.15	1.60	1.16	2.19
フロー値	280	300	280	290
空気量 (%)	5.7	5.8	-	5.8
f_c (MPa)	7日	43.6	24.5	4.0
	28日	51.2	28.6	7.7
f_b (MPa)	7日	9.65	5.80	1.41
	28日	10.8	6.65	2.96
f_t (MPa)	7日	4.47	2.11	-
	28日	4.58	2.31	1.07

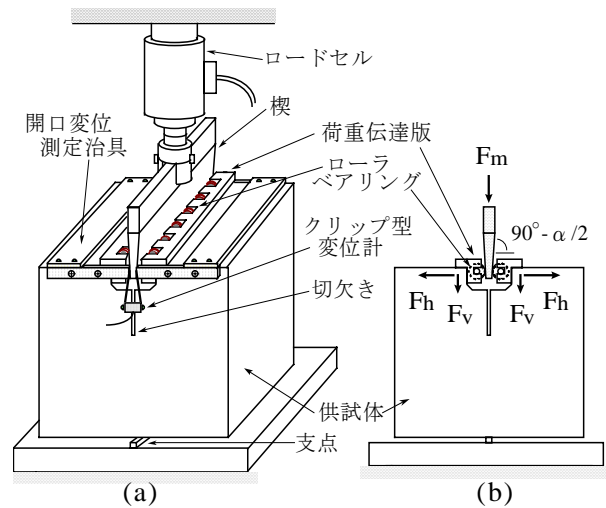


図-1 楔挿入割裂試験の概要

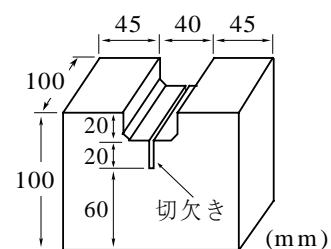


図-2 破壊試験に用いた供試体

解析により求めた。図-3は引張軟化曲線の解析フローを示す。ここでは、まず、モルタルの弾性係数および引張強度（軟化開始点応力）を推定し、つぎに、引張軟化曲線の解析を行った。

2.6 モルタルの付着試験

充てんモルタルと既設コンクリートの付着特性を評価するため、図-4(a)に示すような打継ぎ供試体を作製した。ここでは100×100×400mmの型枠の両端に既設コンクリート（材齢91日）を設置し、その間にモルタルを打込んだ。既設コンクリートはW/C=50%として作製し、その打継ぎ面の性状は、型枠面および型枠面をチップング処理した2ケースとした。供試体は打込後24時間で脱型し、3日間水中養生を行った後、試験材齢（モルタル打込み後28日）までビニル袋に入れて20°Cの室内で保存した。なお、

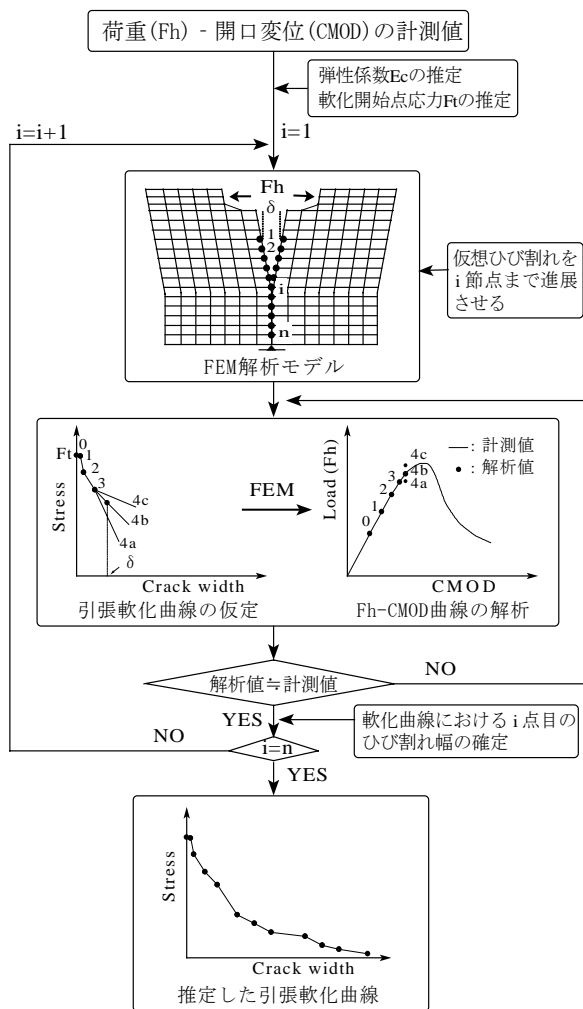


図-3 引張軟化曲線の解析フロー

試験したモルタルはMAおよびMBの2種類であり、これらのモルタルおよびコンクリートの圧縮強度および弾性係数を表-2に示す。また、付着試験供試体の種類を表-3に示す。

作製した打継ぎ供試体は試験前にコンクリートカッターで2等分し、さらに、同図(b)に示すように打継ぎ面に沿って切欠きを入れ、その後瞬間接着剤を用いて厚さ20mmのみかげ石を貼り付けた。付着試験の供試体数は4個とし、この供試体を用いて楔挿入割裂試験を行い、打継ぎ面の付着特性を評価した。

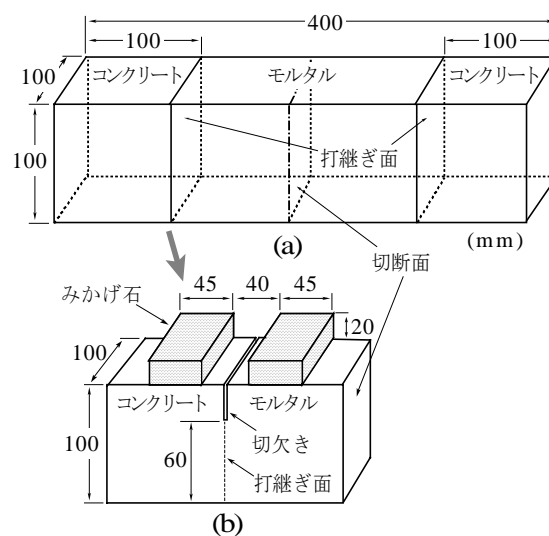


図-4 付着試験に用いた供試体

表-2 付着試験に用いたコンクリートおよびモルタルの圧縮強度および弾性係数

種類		圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)
コンクリート* (材齢119日)	CA	37.6	27900
モルタル** (材齢28日)	MA	36.3	22100
	MB	20.9	8760

*: φ10×20cm, **: φ5×10cmの円柱供試体による。

表-3 付着試験供試体の種類

CA	既設コンクリートの破壊試験供試体
MA	MAモルタルの破壊試験供試体
CA-MA滑面	CAとMAの打継ぎ供試体：型枠面
CA-MA粗面	CAとMAの打継ぎ供試体：チップング
CA-MB滑面	CAとMBの打継ぎ供試体：型枠面
CA-MB粗面	CAとMBの打継ぎ供試体：チップング

3. 結果および考察

3.1 荷重 - 開口変位曲線

材齢7日および28日における各種モルタルの荷重(F_h) - 開口変位(CMOD)曲線を図-5(a)および(b)に示す。ここで示した荷重 - 開口変位曲線は、同種供試体の結果を同一変位について平均化したものである。なお、楔挿入割裂試験法を適用した場合、最大荷重以降においても急激な荷重低下はみられず、軟化領域においても安定して荷重 - 開口変位の挙動を計測できた。

これらの計測結果から、モルタルの種類すなわち使用材料および配合の違いによって最大荷重および曲線の初期勾配は大きく異なることがわかった。発泡ポリスチレン粉砕品を用いたMCは、最大荷重および初期勾配は最も小さく、次いで軽量細骨材を用いたMBが小さくなった。一方、珪砂および乾燥砂を用いたMAおよびMDの最大荷重および初期勾配は、MCおよびMBに比べてかなり大きくなり、強度および弾性係数の大きいことを示している。

図-6は各種モルタルの最大荷重(F_{hmax})を示す。最大荷重はモルタルの切欠き引張強度に対応することから、計測値の大小関係は表-1に示した曲げ強さ f_b および引張強さ f_t のそれらとよく一致している。このような各種モルタルにおける強度差の原因としては、W/CやP/Cの相違による影響を無視できないが、骨材自身の強度が特に大きく影響していると考えられる。

3.2 破壊エネルギー

図-7は各種モルタルの破壊エネルギー(G_f)を表す。破壊エネルギーは単位面積のひび割れを作るのに必要なエネルギー量として定義される値であり、この値が大きいほどひび割れ進展に対する抵抗性が大きい。得られた試験結果によると、強度の最も小さいMCの G_f は、MBに比べて2倍以上大きくなった。発泡ポリスチレン粉砕品を用いたMCは、細骨材の粒径も比較的大きく、このため、ひび割れ進展時に骨材のかみ合い効果が大きくなり、破壊に至るまでの変形が増加したためと考えられる。また、

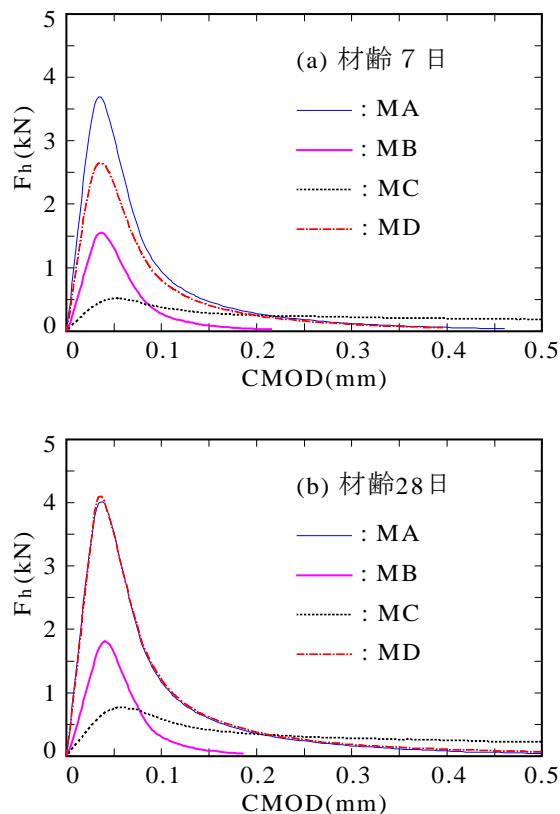


図-5 材齢7日および28日におけるモルタルの荷重(F_h) - 開口変位(CMOD)曲線

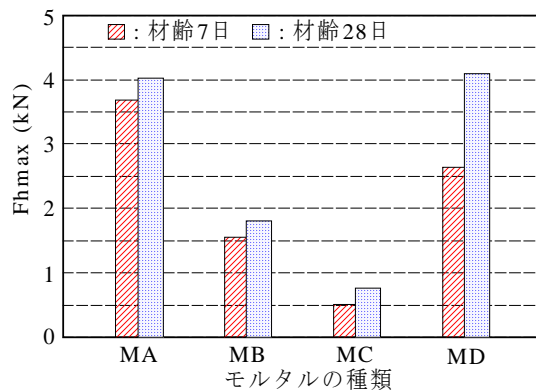


図-6 各種モルタルの最大荷重 (F_{hmax})

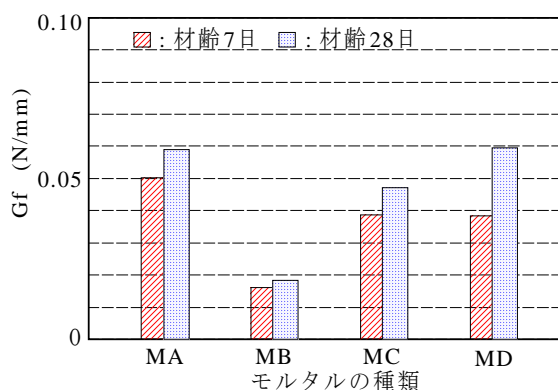


図-7 各種モルタルの破壊エネルギー (G_f)

MA および MD の Gf は、材齢 28 日ではともに 0.06N/mm 程度の値を示したが、材齢 7 日の Gf および強度の発現は前者のほうが大きくなった。

3.3 引張軟化曲線

各種モルタルの引張軟化曲線を図-8(a)および(b)に示す。これらは図-5(a)および(b)に示した荷重 - 開口変位曲線から推定した。推定した引張軟化曲線は各種モルタルのひび割れ特性を顕著に特徴づけている。MB の限界ひび割れ幅は 0.02mm 以下、MA および MD のそれは 0.04mm 以下となり、普通コンクリートの値 (0.15mm 以上) に比べて非常に小さい。これは、粗骨材を含まないので骨材のかみ合い効果が減少したためと思われる。特に、MB で用いた軽量細骨材は、骨材自身の強度が珪砂などに比べて小さいと考えられ、限界ひび割れ幅は MA および MD の 1/2 程度になった。

荷重 - 開口変位曲線から推定した引張強度 (軟化開始点応力) および弾性係数の結果によると、推定した引張強度の大小関係は、曲げ強さ f_b および引張強さ f_t のそれと一致した。しかし、推定した引張強度の値は、割裂試験より求めた引張強さ f_t よりもかなり大きくなった。また、図-8に示した弾性係数の推定値 (E_m) は、発泡ポリスチレン粉砕品を細骨材とした MC が最も小さく、次いで軽量細骨材の MB となっており、使用骨材の影響が顕著に現れている。材齢 28 日の MC の弾性係数は、一般的な普通コンクリートに比べると 1/8~1/9 であり、MC は MA および MD に比べて非常に変形しやすいモルタルといえる。また、材齢 28 日における MA および MB の弾性係数の計測値は、表-2に示したように 22100 MPa および 8760MPa であり、図-8(b)の推定値とも比較的良好に一致した。したがって、逆解析によって推定した弾性係数は妥当な値を示していると思われる。

3.4 付着特性

図-9は、付着試験における各種供試体の荷重(F_h) - 開口変位(CMOD)曲線を示す。各曲線は、同種供試体の結果を同一変位について平均

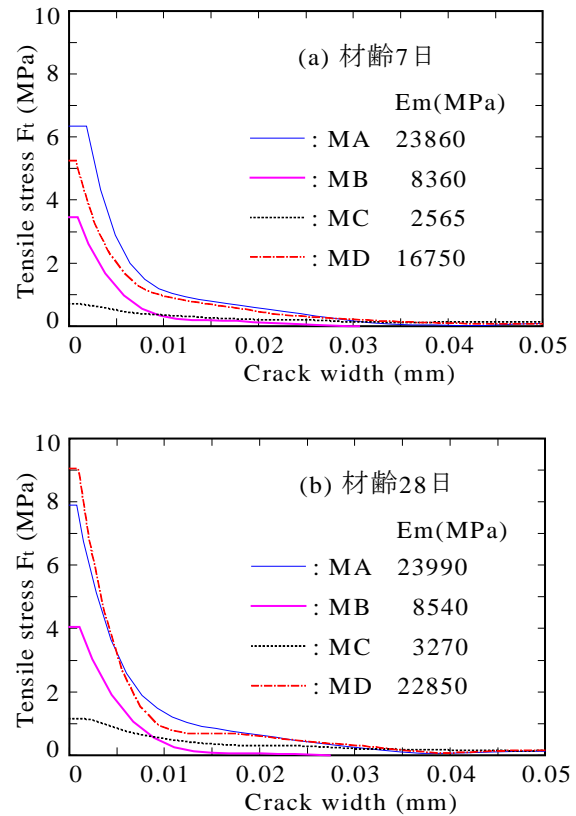


図-8 推定した各種モルタルの引張軟化曲線および弾性係数 (E_m)

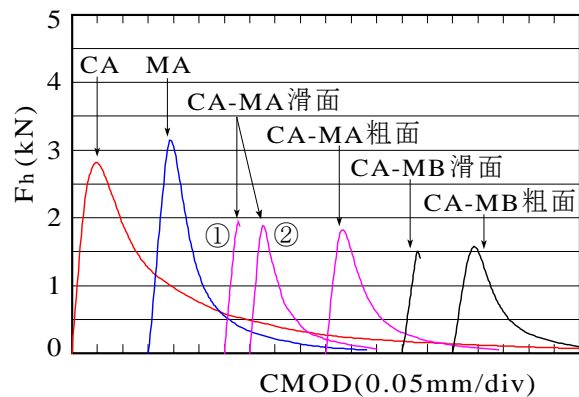


図-9 付着試験における各種供試体の荷重 (F_h) - 開口変位 (CMOD) 曲線

化したものである。ここで、CA および MA は、それぞれ打継ぎ面のない場合のコンクリートおよびモルタルを表す。また、CA-MA 滑面①および CA-MB 滑面は、付着面 (打継ぎ面) で破壊した供試体の結果を表す。付着面で破壊した場合、破壊性状は脆性的となり、同図に示すように最大荷重以降の挙動を安定して計測することは難しかった。なお、CA-MA 滑面の供

試体は、4個の供試体のうち2個が付着面破壊を起こし、他の2個は破壊面の30%程度をコンクリート部分、残りの70%程度を付着面の破壊が占めていた。ここでは、前者をCA-MA滑面①、後者をCA-MA滑面②として区別した。

一方、CA-MA粗面およびCA-MB粗面の供試体は、チップング処理によりコンクリート打継ぎ面に振幅2mm程度の凹凸を付けた場合であり、両者はコンクリート部分で破壊し、滑面(型枠面)の場合に比べて付着破壊性状は大きく異なった。

図-10は各種供試体の破壊エネルギー(Gf)を示す。打継ぎ面を有する供試体は、打継ぎ面のないCAおよびMAの両者に比べて最大荷重および破壊エネルギーは減少し、このことは、付着面(打継ぎ面)が弱点になることを示している。また、CA-MA滑面①およびCA-MB滑面のGfは、最大荷重時の変位までの面積から算定したものであるが、この場合には粗面供試体のGfはそれらの4倍程度になり、打継ぎ面の処理の効果が現れている。

ここで試験した打継ぎ供試体は、実施工における既設コンクリートと充てんモルタルの付着性状を模擬したものではない。しかし、楔挿入割裂試験法を採用した付着試験は、供試体の作製も容易であり、打継ぎ面の付着特性を評価する試験法として十分に適用可能と思われる。

4. まとめ

- (1) 楔挿入割裂試験法を適用することにより、各種ポリマーセメントモルタルの破壊挙動を安定して計測できた。
- (2) 使用材料および配合の異なる4種類の充てんモルタルについて、破壊エネルギーと引張軟化曲線の2つの破壊力学パラメータを得ることができた。
- (3) 得られた破壊力学パラメータは、管水路の補修・改修後の力学性能を予測および解析するための基礎データとして利用できる。
- (4) 楔挿入割裂試験法を採用した付着試験は、

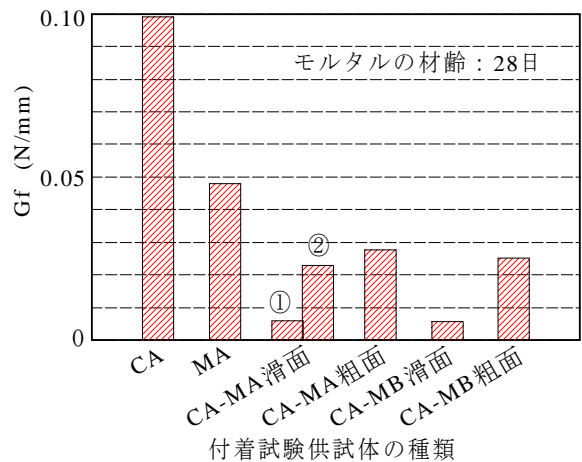


図-10 付着試験における各種供試体の破壊エネルギー (Gf)

充てんモルタルとコンクリートの付着特性を評価する試験法として適用できた。

謝辞 本研究で使用した各種モルタル試料は、積水化学工業(株)環境ライフラインカンパニー開発部の野崎善治様から提供して頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 野中資博, 石井将幸, 石黒 覚, 前田弘司: 農業用管水路施設の改修工法, 農業土木学会誌, Vol.70, No.12, pp.1103-1107, 2002.12
- 2) Tschegg, E. K.: New Equipments for Fracture Tests on Concrete, Materials Testing, Vol.33, pp.338-342, 1991
- 3) (社)日本コンクリート工学協会: コンクリートの引張軟化曲線の評価方法(案), コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書, pp.401-426, 2001.5
- 4) Tschegg, E. K., Stanzl, S. E.: Adhesive power measurements of bonds between old and new concrete, Journal of Material Science, Vol.26, pp.5189-5194, 1991
- 5) 国枝 稔, 栗原哲彦, 鎌田敏郎, 六郷恵哲: 引張軟化曲線による断面修復材の付着特性の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.407-412, 1998.6