

論文 グラウト材の力学的性能と破壊エネルギーの実験的評価

國本 拓也*¹・田嶋 和樹*²・白井 伸明*³

要旨：兵庫県南部地震以降，無収縮グラウトが耐震補強に活用されるようになり，グラウトを構造材料として扱うべき事例が増えている。しかし，現状ではグラウトの基本的な力学的性能を十分に把握できておらず，グラウト工法によって耐震補強された鉄筋コンクリート構造物を数値解析的に検討することを困難にしている。本研究では，グラウトの力学的性能および破壊エネルギーを実験的に評価するとともに，圧縮強度とその他の力学的性能の関係性について検討し，各種力学パラメータの推定式を示した。なお，グラウトが脆性的な破壊挙動を示したため，引張破壊エネルギーに関しては試験方法について検討した。

キーワード：グラウト，圧縮強度，ヤング係数，引張強度，破壊エネルギー

1. はじめに

JIS A 0203 に定義されるように，グラウトとは「空けき，目地，ひび割れなどの細かいすき間を充填するために，注入用材料として用いるセメントペースト又はモルタル」のことである。グラウトの利用実態は極めて多岐にわたっており，PC グラウトや鉄筋継手グラウト以外にも様々な用途に使用されてきた。日本コンクリート工学協会では，平成3年度から2年間にわたって充填材の品質評価研究委員会¹⁾を組織している。この委員会では，多用な用途に活用されているグラウトを中心とした充填材の要求性能と品質評価試験方法を調査し，充填材に要求される品質を分類・統一化して要求性能，評価項目および試験方法を整理している。また，充填材の材料特性として，流動性，材料分離抵抗性，無収縮性および強度特性を挙げており，特に流動性と材料分離抵抗性を評価する試験方法が重要であると指摘している。さらに，用途に応じては構造材料として正しく評価する必要があると述べているが，グラウトの力学的性能を詳細に検討するには至っていない。

兵庫県南部地震以降，鉄筋コンクリート（以下，RC）構造物の耐震補強に対する関心が高まるとともに，グラウトが鋼板巻立て工法²⁾などの耐震補強工事にも適用され始めた。枠付き鉄骨ブレース工法³⁾や外付ブレースの躯体への定着法⁴⁾など，グラウトを構造材料として扱うべき事例も報告されている。近年では，コンクリート構造物の耐震補強工事において，鋼板や鉄骨ブレースの間隙に無収縮グラウトを注入する「グラウト工法」が一般化しているが，これらの耐震補強の有効性は実験的に確認されているものの，実際に耐震補強工事が施されたRC構造物の耐震性能を評価する手法が確立されていると

は言い難い。

耐震補強後のRC構造物の耐震性能を評価することは重要な課題であるが，そのためには，数値解析に基づく耐震補強の性能評価手法を確立することが急務であり，さらに性能評価型の耐震補強設計法の開発を目指す必要がある。既往の研究では，グラウト工法を用いた耐震補強を対象として数値解析を実施している例は少ないが，大村ら⁵⁾は既存コンクリート骨組と鉄骨ブレースとの接合部に高強度無収縮グラウトを充填するだけのアンカーレス耐震補強を対象として，2次元静的弾塑性有限要素解析を実施している。この解析では，グラウト部に平面応力要素を使用し，パネを介して界面の軸方向およびせん断方向の特性を付与している。このように，グラウト工法を用いた耐震補強を対象にして解析を実施する際には，グラウトをモデル化する必要が生じる。つまり，グラウトの力学的性能の把握と具体的なモデル化に関する検討が必要となる。しかし，現状ではグラウトの力学的性能は十分に把握できていない。

本研究では，各メーカーから市販されている建築工事に一般的なプレミックスタイプの無収縮グラウトを対象とし，その力学的性能を把握するために圧縮強度試験および割裂引張強度試験を実施した。また，数値解析において，耐震補強されたRC構造物のポストピーク挙動まで対象にすることを想定して，圧縮破壊エネルギー試験および引張破壊エネルギー試験を実施し，グラウトの破壊靱性を評価した。なお，引張破壊エネルギー試験に関しては，グラウトが極めて脆性的な破壊挙動を示し，引張破壊エネルギーの評価が困難であったため，試験方法について検討した。

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻（正会員）

*2 日本大学 理工学部建築学科助教 工博（正会員）

*3 日本大学 理工学部建築学科教授 工博（正会員）

2. 圧縮強度試験および割裂引張強度試験

2.1 試験体製作方法

無収縮グラウトは、建築改修工事監理指針⁶⁾(以下、監理指針)が推奨するように、砂、セメントおよび混和剤が予め調合されたプレミックスタイプのものを使用した。なお、監理指針において、メーカーにより無収縮グラウトの品質が異なることが指摘されているため、圧縮強度試験および割裂引張強度試験では異なるメーカーの無収縮グラウトを5種類用意した。

表-1に水(W)とグラウト粉末(P)の重量比とJ₁₄ロート流下時間を示す。練混ぜ水量は各メーカーの仕様書に従い、温度20℃、湿度80%の恒温恒湿室内で練混ぜを行った。練混ぜにはハンドミキサー(回転数1500rpm)を使用した。2分間の攪拌の後、J₁₄ロート試験結果が8±2秒になることを確認した後、グラウトを試験体製作用型枠に充填した。なお、各試験体は翌日脱型とし、脱型後は標準水中養生とした。

圧縮強度試験では、日本道路公団「無収縮モルタル品質管理試験方法(JHS312-1999)」や土木学会「充てんモルタルの圧縮強度試験方法」⁷⁾に従い、50×100mmの供試体を製作した。試験材齢は3, 7, 28日であり、材齢毎に3体ずつ試験を行った。また、JIS A 1108並びにJIS A 1113に準拠し、100×200mmの供試体も併せて製作した。試験材齢は1, 3, 7, 14, 28日であり、材齢毎に3体ずつ圧縮強度試験および割裂引張強度試験を実施し、強度およびヤング係数の発現性を評価した。

2.2 圧縮強度試験結果とヤング係数の評価

図-1に5種類のグラウトの圧縮強度(σ_B) - 材齢関係を示す。図中には、50×100mm供試体を用いた結果と100×200mm供試体の結果を併せて示す。これは、指針等で定められた供試体寸法(50×100mm)と異なる寸法を有する100×200mm供試体で σ_B を確認可能であるか検討するためである。100×200mm供試体で σ_B を確認することが可能であれば、同時に現有のコンプレッソメーターを用いて容易にヤング係数を評価することが可能となる。図-1を見ると、供試体寸法の違いが σ_B に及ぼす影響は極めて小さく、100mm×200mmの供試体によって σ_B を確認可能であると判断できる。

次に、グラウトの強度発現性状を確認する。 σ_B はグラウト種類に関わらず、材齢7日まで著しい強度発現を示しており、その後は緩やかに上昇している。

グラウトの圧縮強度に関する規格はいくつかの指針に定められており、例えばJHS312-1999では、材齢3日で25N/mm²以上、材齢28日で45N/mm²以上としている。今回使用したグラウトは、すべて材齢3日で30MPa以上の圧縮強度を有しており、メーカーによって差異が認められるものの、材齢28日では52.4~77.8MPaの高い圧縮

強度が確認され、いずれもJHS312-1999に定められた品質規格を満足する結果となった。現在、グラウトの強度性状は、圧縮強度と鉄筋との付着強度によって規定されるが、最近では様々な耐震補強工法にグラウトが用いられており、補強形式によってグラウトに対する要求性能が異なることも指摘されている⁸⁾。そのため、グラウトの品質規格に関しては、グラウトの要求性能の観点から、様々な耐震補強を対象とした実験・解析を通じて詳細に検討する必要があると考えられる。

図-2に材齢28日におけるグラウトの圧縮強度時ひずみ(ϵ_m) - 圧縮強度(σ_B)関係を示す。数値解析において、グラウトの圧縮側の応力 - ひずみ関係を仮定する場合、 ϵ_m は解析結果の精度を左右する重要な因子となる。コンクリートの場合、一般的に高強度のものほど ϵ_m 値は大きくなる。例えば、渡部⁹⁾は普通コンクリートに関し

表-1 グラウトのW/P比およびJ14ロート流下時間

グラウト種類	W/P (%)	J14 ロート流下時間 (秒)
A	18.0	7.9
B	14.8	7.0
C	18.0	6.6
D	18.5	6.7
E	18.0	6.8

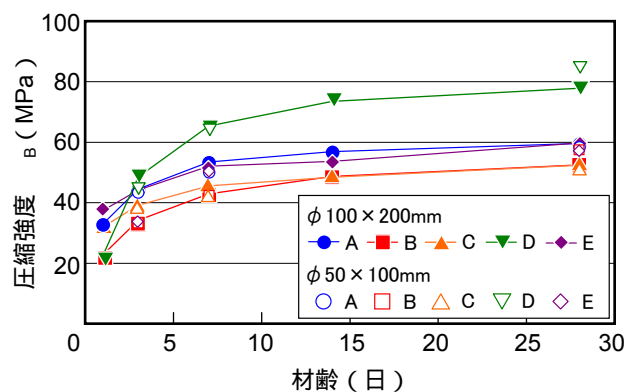


図-1 圧縮強度 - 材齢関係

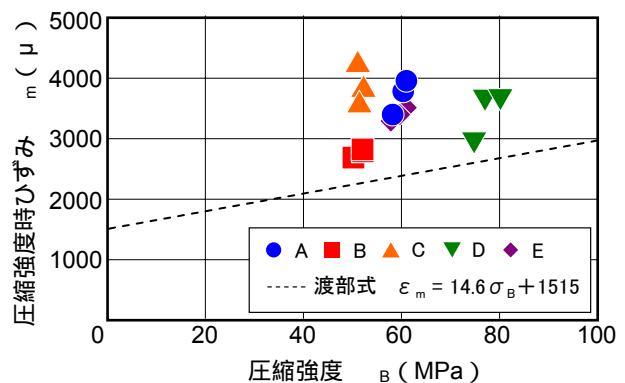


図-2 圧縮強度 - 圧縮強度時ひずみ関係

て既往の実験結果を整理し、25～150MPa 程度の範囲において図中に示す ε_m と σ_B の関係式を導いている。渡部式を参照し、グラウトの ε_m 値をコンクリートと比較すると、圧縮強度が等しい場合、グラウトの方がコンクリートよりも値が大きい結果となった。

グラウトの圧縮側の応力 - ひずみ関係を数値解析において仮定する場合、現状ではグラウトの圧縮強度のみが既知の場合が多く、圧縮強度に基づいてその他の力学的性能を推測しなければならない。しかし、圧縮強度時ひずみの推定式はコンクリートを対象にしたものしか提案されていないのが現状であり、渡部式を含め、その他の提案式をグラウトに適用すると、グラウトの圧縮強度時ひずみを過小評価することになる。これが解析結果の誤差要因となることが推測されるため、今後、グラウトに関する $\varepsilon_m - \sigma_B$ の関係式を実験に基づいて確立する必要がある。ただし、図中に認められるように、グラウト種類によって傾向が異なる可能性がある点に注意が必要である。

図 - 3 に 100×200mm 供試体の圧縮応力 - ひずみ関係から評価したヤング係数 (E_g) - 材齢関係を示す。なお、 E_g は圧縮強度の 1/3 に相当する点の割線により求めた。 E_g は材齢 7 日まで上昇した後、緩やかな上昇を継続しており、圧縮強度の発現傾向と同様の傾向となった。また、グラウト種類による違いは見られるが、材齢 28 日の E_g 値は 22.8～33.0GPa であった。

ここで、グラウトの圧縮強度 (σ_B) と E_g の関係に着目する。図 - 4 に材齢 28 日におけるグラウトの $E_g - \sigma_B$ 関係を示す。図中にはコンクリートに関するヤング係数推定式を用いて算出した E_g と σ_B の関係を併せて示す。なお、ヤング係数推定式として、NewRC 式¹⁰⁾、CEB 式¹¹⁾および AIJ 式¹²⁾を検討する。これらの式は式(2)～(4)に示すとおりである。

NewRC 式

$$E_c = 11400 \times \sqrt{f_c} + 58200 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (2)$$

CEB 式

$$E_c = 2.15 \times 10^4 \times \left(\frac{f_c + 8}{10} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

AIJ 式

$$E_c = 33500 \times \left(\frac{\gamma}{24} \right)^2 \times \left(\frac{f_c}{60} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{MPa}) \quad (4)$$

ここで、 f_c : コンクリートの設計基準強度、 γ : コンクリートの単位体積重量である。本検討では、 f_c にグラウトの圧縮強度 (σ_B) を代入し、 γ には各グラウトの単位体積重量の平均値 (=21.3 kN/m³) を代入した。図 - 4 を

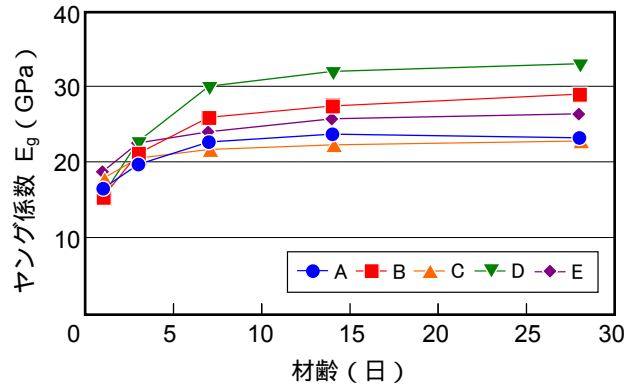


図 - 3 ヤング係数 - 材齢関係

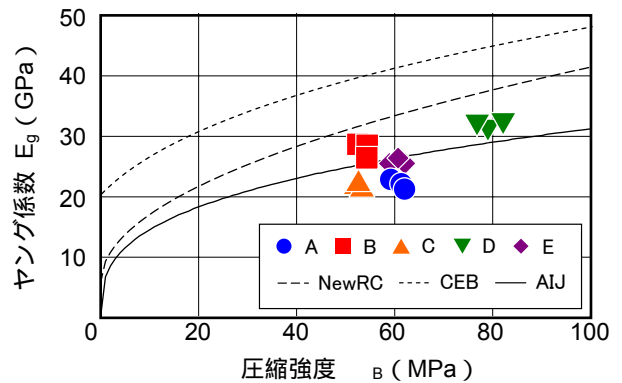


図 - 4 ヤング係数 - 圧縮強度関係

見ると、 σ_B の増大に伴って E_g が増大する傾向がみられ、 σ_B と E_g の間に高い相関性が確認できる。ヤング係数推定式から得られる $\sigma_B - E_g$ 関係に着目すると、AIJ式が概ねグラウトの傾向を模擬しており、グラウトのヤング係数の推定に準用可能であることが確認できる。また、NewRC式はグラウトのヤング係数の上限を示す結果となり、CEB式はヤング係数を過大評価することが確認できる。

2.3 割裂引張強度試験結果

図 - 5 に割裂引張強度 (σ_t) - 材齢関係を示す。材齢 7 日までは σ_t は上昇するが、それ以降は頭打ち傾向を示す種類と上昇を続ける種類が確認できる。また、グラウト種類による違いは見られるが、材齢 28 日の割裂引張強度は 3.1～5.3MPa であった。

次に、グラウトの割裂引張強度 (σ_t) と圧縮強度 (σ_B) の関係に着目する。図 - 6 に材齢 28 日におけるグラウトの $\sigma_t - \sigma_B$ 関係を示す。図中には、コンクリートに関する引張強度推定式から求めた $\sigma_t - \sigma_B$ 関係も示す。なお、引張強度推定式として、NewRC 式¹⁰⁾、CEB 式¹¹⁾および靱性保証型設計指針式¹³⁾(以下、靱性指針式)を検討する。これらの式は、式(5)～(7)に示すとおりである。

$$\text{NewRC 式} \quad f_t = 0.291 f_c^{0.637} \quad (\text{MPa}) \quad (5)$$

CEB 式 $f_t = 1.40 \left(\frac{f_c}{10} \right)^2$ (MPa) (6)

靱性指針式 $f_t = 0.33 \sqrt{f_c}$ (MPa) (7)

図 - 6 を見ると、圧縮強度の増大に伴って引張強度の増大する傾向が見られるものの、グラウト種類によるバラツキも確認できる。そのため、一意的に $\sigma_t - \sigma_B$ 関係を定めることはできないが、引張強度推定式に着目すると、CEB 式がグラウトの傾向を良好に模擬していると考えられる。同様に、NewRC 式もグラウトの実験結果の傾向を模擬しているが、CEB 式に比べると若干低めの引張強度を与えている。また、靱性指針式は、グラウトの引張強度を過小評価する傾向がみられる。このことから、グラウトの引張強度の推定には、CEB 式または NewRC 式が準用可能であると考えられる。

3. 圧縮破壊エネルギー試験

3.1 試験方法

試験体の製作方法は、「2.1 試験体製作方法」に示す方法と同様である。なお、5 種類のグラウトから 3 種類 (A, B, C) を選択して供試体を製作した。供試体は圧縮強度試験と同じであり、寸法は 100×200mm である。なお、試験材齢は 28 日である。

図 - 7 に試験装置を示す。载荷には 2000kN アムスラー試験機および簡易高剛性試験装置を使用した。载荷に際しては、最大耐力到達後に一度 0kN まで完全に除荷し、再载荷後は供試体の破壊に注意しながら適宜除荷を繰り返した。なお、今回の試験では、グラウトが脆性的に破壊することが予想されたため、各種類 6 体ずつの供試体を製作したが、A および B は 4 体、C は 2 体について安定したデータを取得できた。

3.2 圧縮破壊エネルギーの評価

図 - 8 に圧縮破壊エネルギーの評価方法を示す。本研究では、試験により得られた圧縮荷重 (P) - 縦変形 (δ) 関係を圧縮応力 (σ_c) - 塑性変形 (δ_p) 関係に変換し、 $\sigma_c - \delta_p$ 曲線下の面積を求め、これを圧縮破壊エネルギー (G_{Fc}) として評価した。

図 - 9 に G_{Fc} - 圧縮強度 (σ_B) 関係を示す。なお、 σ_B は平方根で表し、コンクリートに関して中村ら¹⁴⁾が提案している G_{Fc} 推定式を併せて示す。グラウトの G_{Fc} は、グラウト種類によるバラツキが認められ、その値は 21.3 ~ 48.9N/mm であった。 G_{Fc} の推定式に着目すると、中村式はグラウトの G_{Fc} を過大評価することが確認できる。今後実験データの補完が必要であるが、本研究ではグラウトの G_{Fc} 推定式として、今回の実験結果から得られた $G_{Fc} - \sigma_B$ 関係の近似式 (図 - 9) を提案する。

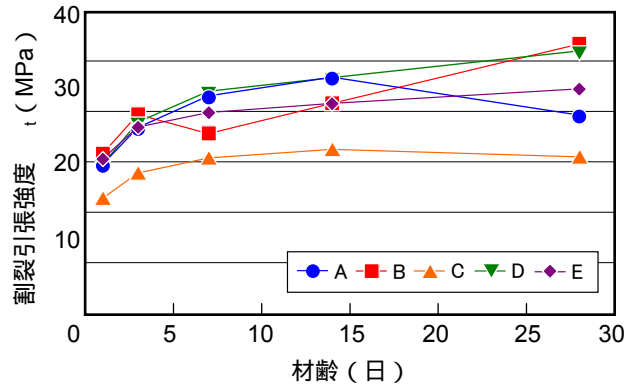


図 - 5 割裂引張強度 - 材齢関係

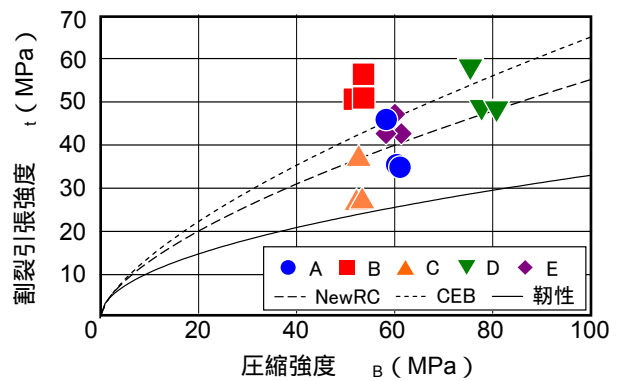


図 - 6 割裂引張強度 - 圧縮強度関係

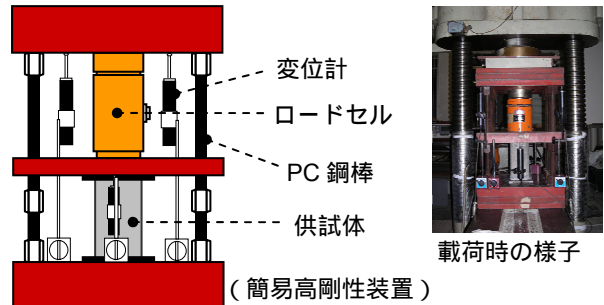


図 - 7 試験装置

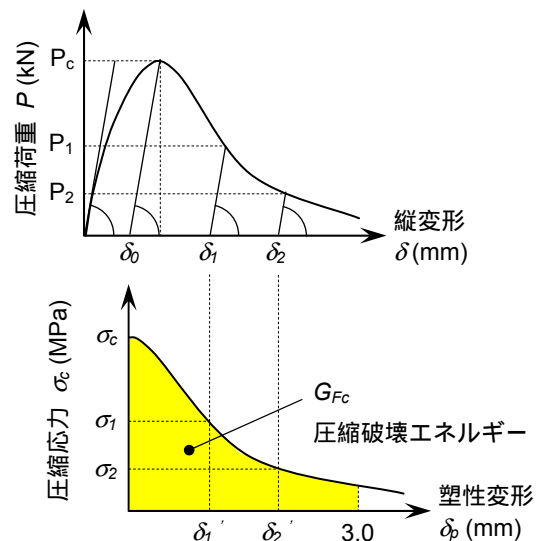


図 - 8 圧縮破壊エネルギーの評価方法

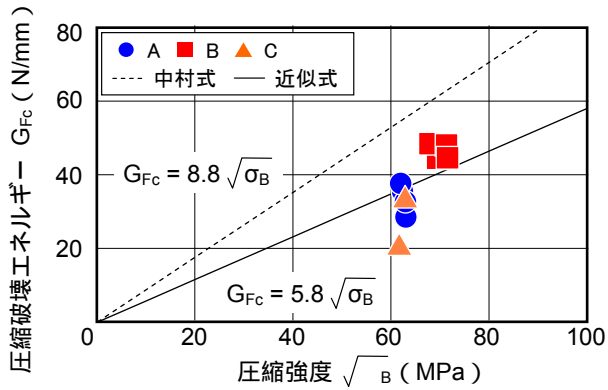


図 - 9 圧縮破壊エネルギー - 圧縮強度関係

4. 引張破壊エネルギー試験

4.1 試験方法

引張破壊エネルギー試験は、日本コンクリート工学協会の規準である「切欠きはりを有いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」(JCI-S-001-2003)¹⁵⁾に従った。試験体の製作方法は、「2.1 試験体製作方法」に示す方法と同様である。なお、5種類のグラウトから3種類(A, B, C)を選択して供試体を製作した。供試体寸法は100×100×400mmの角柱であり、深さ30mmの切欠きを有している。試験材齢は3, 7, 28日であり、グラウト種類と材齢に応じて4体ずつ供試体を製作した。なお、切欠きは、あらかじめ型枠にプラスチック板(厚さ2mm)を設置することにより製作した。

荷重には最大容量100kNの精密万能試験機を用いた。本試験では、クロスヘッド速度を0.005mm/minに設定した。荷重は試験機に固定されたロードセルを用いて検力し、開口変位(CMOD)はクリップゲージ(精度1/1000mm)により、荷重点変位(LPD)は変位計測器具に取付けた高感度変位計(精度1/200mm)により計測した。

4.2 試験結果および試験方法の検討

図-10に試験から得られた荷重(P) - CMOD関係の一例として、材齢28日における3種類のグラウトの試験結果を示す。いずれも最大荷重到達後に急激に破壊が進展し、不安定破壊を生じた。この傾向は、材齢およびグラウト種類に関わらず全ての試験において共通であった。グラウトは高強度材料であるため、最大荷重到達までに多くのエネルギーを蓄える。その後、ひび割れの進展に伴ってそのエネルギーが解放されるが、粗骨材が存在しないため、粗骨材の架橋効果を期待することができず、急激な破壊を生じてしまう。この問題に対処するため、本研究では供試体に設ける切欠き深さに着目する。

現行の規準では、切欠き深さは30mmと定められているが、コンクリートの破壊特性の試験方法調査研究委員会¹⁶⁾の当初の案では50mmであった。しかし、供試体寸

法と破壊進行領域の広がりについて検討し、ひび割れが進展するリガメント部の高さが少ないと安定した破壊進行領域の形成が妨げられることが指摘されていた。この点を考慮し、切欠き深さが30mmに変更されたと考えられるが、破壊進行領域の幅は粗骨材寸法の影響を強く受けることが知られている。粗骨材のないグラウトの場合、破壊進行領域の幅は狭く局所化すると考えられるため、切欠きを30mmより深くし、リガメント高さを減少させても影響は少ないと予想される。

本研究では、グラウトの引張破壊エネルギー試験法を検討するため、切欠き深さを30, 40, 50および60mmに変化させ、引張破壊エネルギー試験を実施した。なお、試験方法の検討が主な目的であるため、グラウトはAのみを使用し、切欠き深さ毎に2体ずつ供試体を製作した。試験材齢は28日である。なお、切欠き深さ40mmの供試体のうち、1体に切欠きの不備があったため、試験対象から除外した。

4.3 引張破壊エネルギーの評価

図-11に試験から得られた荷重(P) - CMOD関係を示す。切欠き深さ30mmの供試体はいずれも最大荷重到達後に不安定破壊を生じたが、その他の供試体は全て安定してP - CMOD関係を計測することができた。

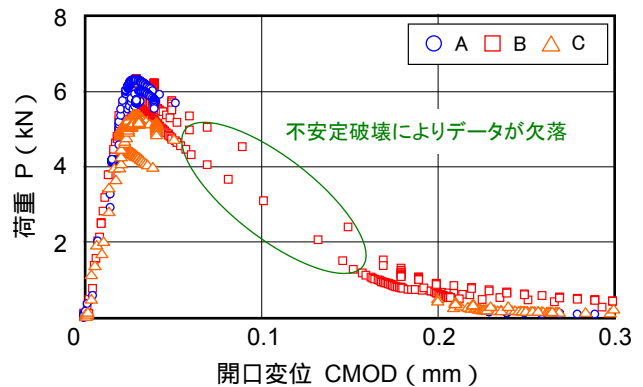


図 - 10 荷重 - CMOD 関係 (材齢 28 日)

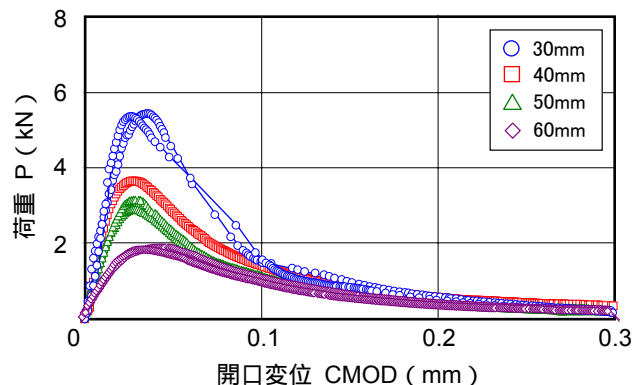


図 - 11 荷重 - CMOD 関係 (切欠き深さを変化)

図 - 12 に引張軟化曲線多直線近似解析ダウンロード用プログラム¹⁷⁾を用いて推定した引張軟化曲線を示す。不安定破壊を生じた切欠き深さ 30mm の供試体を除き、全ての供試体において引張軟化曲線を良好に推定できた。また、切欠き深さが 50mm の場合、2 体の供試体間のバラツキが少なく、安定した試験結果を得られた。そこで、切欠き深さ 50mm の供試体の引張軟化曲線に基づいて引張破壊エネルギー (G_F^{TSD}) を求めたところ、その平均値は 0.056N/mm であった。また、 $P - CMOD$ 関係から求めた引張破壊エネルギー (G_F^{WOF}) は、0.054N/mm であった。

5. まとめ

- 1) グラウトのヤング係数および割裂引張強度は、コンクリートに関する推定式を準用することにより、圧縮強度から推定可能である。
- 2) グラウトの圧縮破壊エネルギーに関しては、圧縮強度の平方根を 5.8 倍する推定式を提案した。
- 3) グラウトの引張破壊エネルギー試験では、切欠き深さを 50mm に設定したところ、荷重 - 開口変位関係を安定して計測できた。
- 4) 今後、グラウトの引張破壊エネルギーと圧縮強度の関係式を構築するとともに、せん断に対する挙動についても検討する必要がある。

謝辞

本研究の一部は文科省学術フロンティア推進事業（日本大学理工学部）：研究課題「環境・防災都市に関する研究（研究代表者：石丸辰治）」の一環として実施したものであり、一部は科学研究費補助金（基盤研究(C) 代表者：白井伸明）の助成を受けて行われたものである。また、研究の遂行にあたり、青木あすなる建設（株）の北嶋圭二博士および横内基氏に数々の助言を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

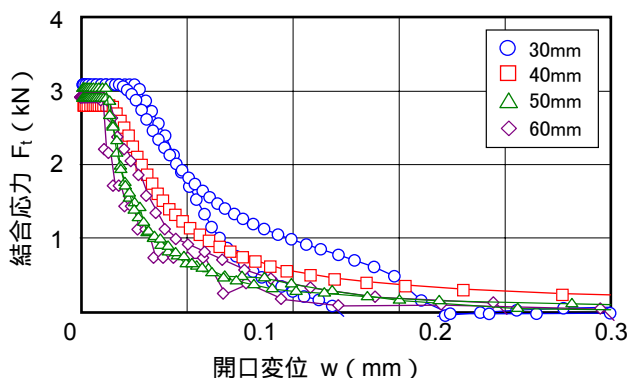


図 - 12 推定した引張軟化曲線

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：充填材の品質評価研究委員会報告，コンクリート工学，Vol.31，No.8，1993.8
- 2) 近藤直孝，半田実，福島一秋，柳沢直仁：特殊グラウト材の耐震補強工事・鋼板巻立て工法への適用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.2，pp.119-124，1996
- 3) 小宮山敏明，益男潔：高強度グラウトモルタルを用いた枠付き鉄骨ブレース用間接接合部の終局耐力，コンクリート工学年次論文報告集，Vo23，No.1，pp.1021-1026，2001
- 4) 野口隆，北嶋圭二，上田英明，安達洋：耐震補強のためのダンパーブレースの躯体定着方法に関する実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.345-350，1997
- 5) 大村哲也，林静雄，金田和浩，藤村太史郎：あと施工アンカーを用いずに耐震補強したフレームの補強効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1159-1164，2007
- 6) 国土交通省大臣官房官庁営繕部：建築改修工事監理指針（平成 16 年版），財団法人建築保全センター，2005
- 7) 土木学会：2005 年制定コンクリート標準示方書 [基準編] 土木学会基準および関連基準，2005
- 8) 社団法人セメント協会：すぐに役立つセメント系補修・補強材料の基礎知識，2006.8
- 9) 渡部憲：高靱性セメント複合材料の開発と耐震壁への応用，学位論文（日本大学），2003
- 10) 日本国土開発技術センター：NewRC 研究開発概要報告集，1990.3
- 11) CEB: CEB-FIP MODEL CODE 1990 DESIGN CODE, Tomas Telford Service Ltd., 1993
- 12) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 - 許容応力度設計法 - ，1999.11
- 13) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型設計指針・同解説，1999.8
- 14) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 1999.10
- 15) 日本コンクリート工学協会：切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法 http://www.jci-web.jp/jci_standard/
- 16) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊特性の試験方法調査研究委員会報告書，2001.5
- 17) 内田裕一：引張軟化曲線推定プログラム http://www.jci-web.jp/jci_standard/kitsutaka_dl.html