

論文 各種コンクリートの破壊特性の試験方法に関する研究

神山 力*¹・橋高 義典*²・田村 雅紀*³

要旨：コンクリートの破壊靱性を評価する試験方法として切欠き梁による3点曲げ試験が RILEM標準試験方法として標準化されているが、同時に小試験体でモード I 型(引張型)の破壊を得られるくさび割裂試験による評価方法も有用視されている。本研究では高性能コンクリートを含めた各種コンクリートについて両試験方法により荷重-開口変位曲線を求め、その結果より引張軟化曲線及び各種破壊パラメータを解析し両試験を比較・検討することでくさび割裂試験の有用性を検討した。その結果、両試験方法ともに同様の破壊特性が得られることが明らかになった。

キーワード：切欠き梁3点曲げ試験，くさび割裂試験，引張軟化曲線，破壊パラメータ

1. はじめに

次世代における建築物の性能設計においては、構造体の要求性能の明示及びその検証方法が必須となる。性能規定的な構造体を作る際に、最も重要とされる要求性能は構造体の安全性能であり、RC造構造体の安全性能を合理的に評価するには、コンクリートの強度のみではなく、最大荷重後ひび割れが卓越し、軟化挙動を示す終局限界状態における挙動の定量的な評価が必要となる。近年コンクリートの強度特性の評価方法として、このような破壊特性を評価出来る試験方法の確立が求められるようになった。

コンクリートは基本的に引張脆性破壊型の材料であるため、その破壊特性評価には引張特性の評価が必要となる。コンクリートの引張破壊の評価方法として破壊靱性試験があり、現在は切欠き梁による3点曲げ試験が RILEM標準試験方法として定められている。しかし切欠き梁による3点曲げ試験は一部の破壊特性評価のために大きな試験体が必要であり、効率的でない。また、破壊時のエネルギーの評価を行う場合には自重の影響が無視出来ず、実験値の誤差に影響

を及ぼすと考えられる。一方で、小試験体でモード I 型(引張型)の破壊の得られるくさび割裂試験による破壊特性の評価も提案されている。

本研究では現在使用されているコンクリートや繊維混入により靱性を向上化した高性能コンクリートを含めた各種コンクリートについて、切欠き梁3点曲げ試験とくさび割裂試験を行い、両試験で得られた荷重-開口変位曲線から多直線近似法による逆解析を行って引張軟化曲線を求め、解析結果及び各種破壊パラメータを比較し、くさび割裂試験方法の有効性を検討する。

表-1 使用材料

| 材料 | 記号 | 種類 | 物性 |
|------|-----------------|--------------|-------------------------------------|
| セメント | C ₁ | 早強ポルトランドセメント | 比重3.16 |
| | C ₂ | 普通ポルトランドセメント | 比重3.16 |
| 混和材 | SF | シリカヒューム | 比重2.3 比表面積200,000cm ² /g |
| | G ₁ | 長良川産玉砕石 | 比重2.63 粗粒率6.7 |
| 粗骨材 | G ₂ | 八王子美山産硬質砂岩砕石 | 比重2.65 吸水率0.66% |
| | G ₃ | 人工軽量骨材Gライト3M | 比重0.7 吸水率7.0% |
| | S ₁ | 長良川産砕砂 | 比重2.54 粗粒率2.64 |
| 細骨材 | S ₂ | 新潟県信濃川産川砂 | 比重2.62 吸水率1.63% |
| | S ₃ | 八王子美山産硬質砂岩砕砂 | 比重2.65 吸水率1.55% |
| | S ₄ | 富津市鶴岡産山砂 | 比重2.58 吸水率1.74% |
| | Ad ₁ | リグニンスルホン酸化合物 | ポゾリスNo.70 比重1.07 |
| 混和剤 | Ad ₂ | ポリカルボン酸エーテル系 | ポゾリスSP-8N 比重1.0 |
| | Ad ₃ | ポリカルボン酸エーテル系 | ポゾリスSP-8HE 比重1.0 |
| 繊維 | SF | 鋼繊維(タフグリッブ) | φ 0.6mm 繊維長30mm 比重7.8 |
| | VF | ビニロン繊維RF4000 | φ 0.6mm 繊維長30mm 比重1.3 |

*1 大成建設株式会社 (正会員)

*2 東京都立大学大学院教授 工学研究科建築学専攻 工博(正会員)

*3 東京都立大学大学院助手 工学研究科建築学専攻 工修(正会員)

2. 実験概要

2. 1. 同一試験体による試験方法の比較(実験 I)

切欠き梁3点曲げ試験後の試験体を用い、くさび割裂試験を行い、両試験方法を比較することを目的とする。各試験体の使用材料を表-1に、計画調査を表-2に示す。普通コンクリート(NC)、高強度モルタル(HM)、鋼繊維補強モルタル(FRM)の3種類において100×100×400mm(センターノッチ50mm)の切欠き梁3点曲げ試験用の試験体を各4体ずつ計12体作製した。切欠き梁3点曲げ試験終了後、半分に破壊した試験体の上部15mmをコンクリートカッターにてスライスし、くさび割裂試験用治具の固定部分をコンクリート用エポキシ樹脂接着剤で貼り付け、100×100×200mm(センターノッチ50mm)のくさび割裂試験体用の試験体とした。これらの実験フローを図-2に示す。

2. 2. 同一バッチ試験体による試験方法の比較(実験 II)

超軽量繊維補強コンクリート(LFRC)、繊維補強コンクリート(FRC35)、普通コンクリート(RC35)、高強度繊維補強コンクリート(FRC80)の4種類において同一バッチにより切欠き梁3点曲げ試験体(100×100×400mm, センターノッチ50mm)とくさび割裂試験体(100×100×120mm, センターノッチ50mm, 図-3参照)を各3体, 計24体作製した。これら4種類の試験体について荷重-開口変位曲線を求め、引張軟化曲線を比較した。

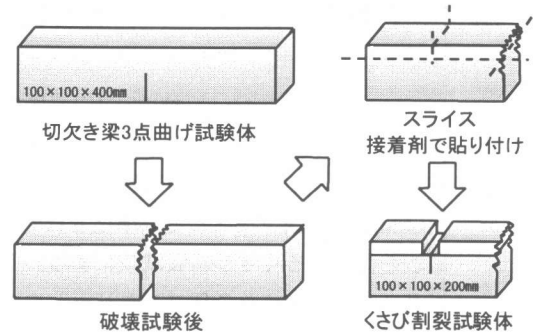


図-2 実験フロー

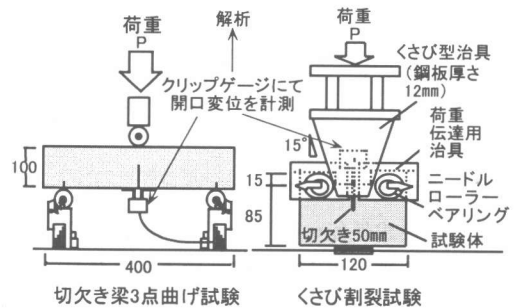


図-3 切欠き梁3点曲げ試験及びくさび割裂試験

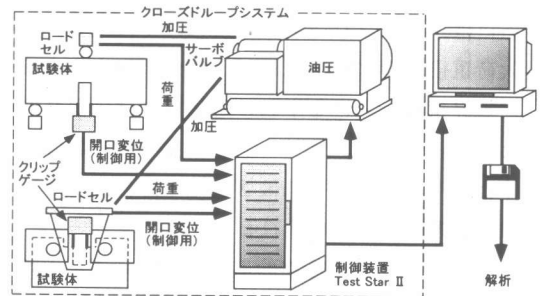


図-4 システムフロー

表-2 計画調査

| 記号 | 水結合材比 W/C (%) | 空気量 (%) | 細骨材率 s/a (%) | 絶対質量(kg/m ³) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|---------------|---------|--------------|--------------------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----|---------|----|
| | | | | 水 W (kg) | 混和材 SF (kg) | セメント (kg) | | | | 細骨材 (kg) | | | 粗骨材 (kg) | | | 混和剤 (kg) | | | 繊維 (kg) | |
| | | | | | | C ₁ | C ₂ | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ | G ₁ | G ₂ | G ₃ | Ad ₁ | Ad ₂ | Ad ₃ | SF | VF | |
| 実験 I | 普通コンクリート | 65 | 3.6 | 46.4 | 178 | — | 274 | — | 820 | — | — | — | 981 | — | — | 0.69 | 12.8 | — | — | — |
| | 高強度モルタル | 40 | 4.0 | 100 | 256 | — | 639 | — | — | 1279 | — | — | — | — | — | 5.75 | 12.8 | — | — | — |
| | 高強度繊維補強モルタル | 40 | 4.0 | 100 | 256 | — | 639 | — | — | 1279 | — | — | — | — | — | 5.75 | 12.8 | — | 78 | — |
| 実験 II | 超軽量繊維補強コンクリート | 28 | 3.4 | — | 203 | 110 | — | 620 | — | — | — | — | — | — | 553 | — | — | 3.3 | — | 13 |
| | 繊維補強コンクリート | 57 | 3.2 | 50.3 | 168 | — | — | 295 | — | — | 279 | 70 | — | 345 | — | — | — | 1.4 | — | 13 |
| | 普通コンクリート | 57 | 2.7 | 50.3 | 168 | — | — | 295 | — | — | 279 | 70 | — | 345 | — | — | — | 1.1 | — | — |
| | 高強度繊維補強コンクリート | 30 | 3.9 | 42.3 | 175 | — | — | 594 | — | — | 201 | 50 | — | 342 | — | — | — | 2.2 | — | 13 |

2. 3. 試験方法

図-3に切欠き梁3点曲げ試験及びくさび割裂試験、図-4に試験装置システムフローを示す。両試験とも試験体の切欠き部の開口変位制御用クリップゲージにより開口変位(COD)を計測し荷重速度を制御した。各試験とも閉回路機構を有するサーボ・コントロール式油圧試験機(MTS社製)により行った。安定破壊データを得るため、切欠き梁3点曲げ試験では開口変位の変位速度を0.06mm/min、開口変位上限を3mm、くさび割裂試験では変位速度を0.05mm/min、開口変位上限を3mmに設定した。両試験データから荷重-開口変位曲線(L-COD曲線)を求め、L-COD曲線から多直線近似法により結合力モデルにより破壊進展をモデル化した場合の結合力とひび割れ開口変位との関係を示す引張軟化曲線(TSD)を求めた。

3. 実験結果及び考察

3. 1. 力学的性質

表-3に試験体の力学的性質、図-5に試験の実測値とL-CODの逆解析で得られる初期結合応力(結合力モデルの初期切欠き長さと仮想ひび割れ長さを有するひび割れに対し、ひび割れ発生に要した外力に釣り合う伝達応力)とヤング率の比較を示す。ヤング率ではHM, RC35, FRC80は試験方法による差が確認されたが、他の試験体ではほぼ同値となった。また初期結合応力は、HM, FRM, FRC80は、両試験でほぼ同様の解析結果が得られたが、その他の試験体については若干値に差が確認された。また実測における割裂引張強度と、初期結合応力との比較では、初期結合応力が高めに評価される傾向にあった。

3. 2. 有効引張強度 f_t^{eff}

図-6にTSDから解析した有効引張強度 f_t^{eff} を示す。 f_t^{eff} は開口変位0~0.01mmまでの平均結合応力を示し、弾性域における材料のひび割れ発生するまでの引張抵抗性の有意な評価値となる。図-5に示す初期結合応力は各試験体において試験方法による差が確認されたが、 f_t^{eff} については両試験ともに結果の値がほぼ一致した。実測

表-3 力学的性質

| 種類 | 圧縮強度 Fc (N/mm ²) | 引張強度 Ft (N/mm ²) | ヤング率 E (kN/mm ²) | 切欠き梁 3点曲げ試験 | | くさび 割裂試験 | |
|-------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|---|--|-------------------------------------|
| | | | | 初期結合 応力 σ_0 (N/mm ²) | ヤング 率 Ea (kN/mm ²) | 初期結合 応力 σ_0 (N/mm ²) | ヤング率 Ea (kN/mm ²) |
| NC | 39.8 | 3.2 | 31.2 | 4.2 | 26.8 | 6.0 | 27.8 |
| HM | 80.5 | — | 31.7 | 5.0 | 28.4 | 5.1 | 24.4 |
| FRM | 79.1 | — | 32.4 | 5.6 | 28.1 | 5.3 | 32.7 |
| LFRC | 36.7 | 3.0 | 15.7 | 1.6 | 17.3 | 3.3 | 14.1 |
| FRC35 | 33.9 | 3.2 | 31.2 | 2.4 | 30.9 | 4.6 | 28.0 |
| RC35 | 30.3 | 2.9 | 24.2 | 2.9 | 27.5 | 4.3 | 29.9 |
| FRC80 | 79.4 | 5.2 | 35.5 | 5.3 | 30.6 | 5.2 | 28.0 |

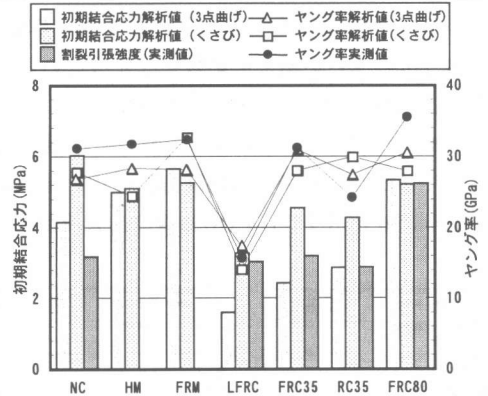


図-5 両試験方法の実測値と解析値の比較

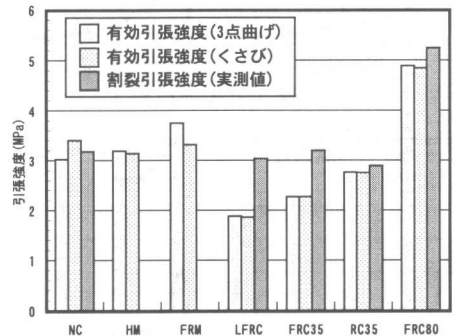


図-6 割裂引張強度と有効引張強度 f_t^{eff} の比較

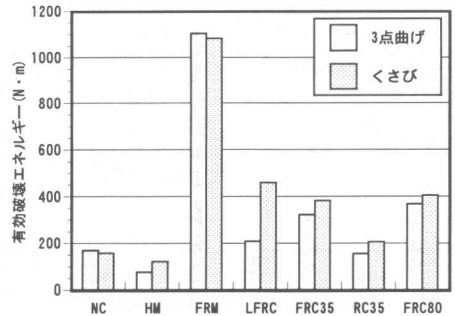


図-7 有効破壊エネルギー G_F^u

値である割裂引張強度と解析値である f_t^{eff} の比較について、一部の試験体では全体的には一致した結果が得られたが、若干割裂引張強度の値が高めに出る傾向が認められた。

3.3. 有効破壊エネルギー G_F^u

図-7に有効破壊エネルギー G_F^u を示す。有効破壊エネルギー G_F^u とは開口変位において0.5mmまでの破壊に要したエネルギーである。各試験体において図-9に示す各種コンクリートのTSDの曲線履歴で示されるように、 G_F^u はほぼ一致していることが確認されたが、LFRCについては、試験方法の違いが結果に影響を与えるといえる。

3.4. 荷重-開口変位曲線(L-COD曲線)

図-8に各種試験体における切欠き梁3点曲げ試験、くさび割裂試験の両試験方法のL-COD曲線による比較を示す。L-COD曲線は最大荷重到

達後のコンクリートの軟化及び破壊特性を容易に評価出来る。弾性域において切欠き部のひび割れ発生に必要な最大荷重に到達後のNC, HM, RC35の繊維非混入試験体では脆性的な破壊性状を示すのに対し、繊維混入により靱性向上を図ったFRM, LFRC, FRC35, FRC80は繊維のブリッジング効果によって引張硬化現象が認められた。また両試験方法において同荷重に関しては、全体的に切欠き梁3点曲げ試験の場合の方が高い値が出る傾向が認められた。各試験体を平

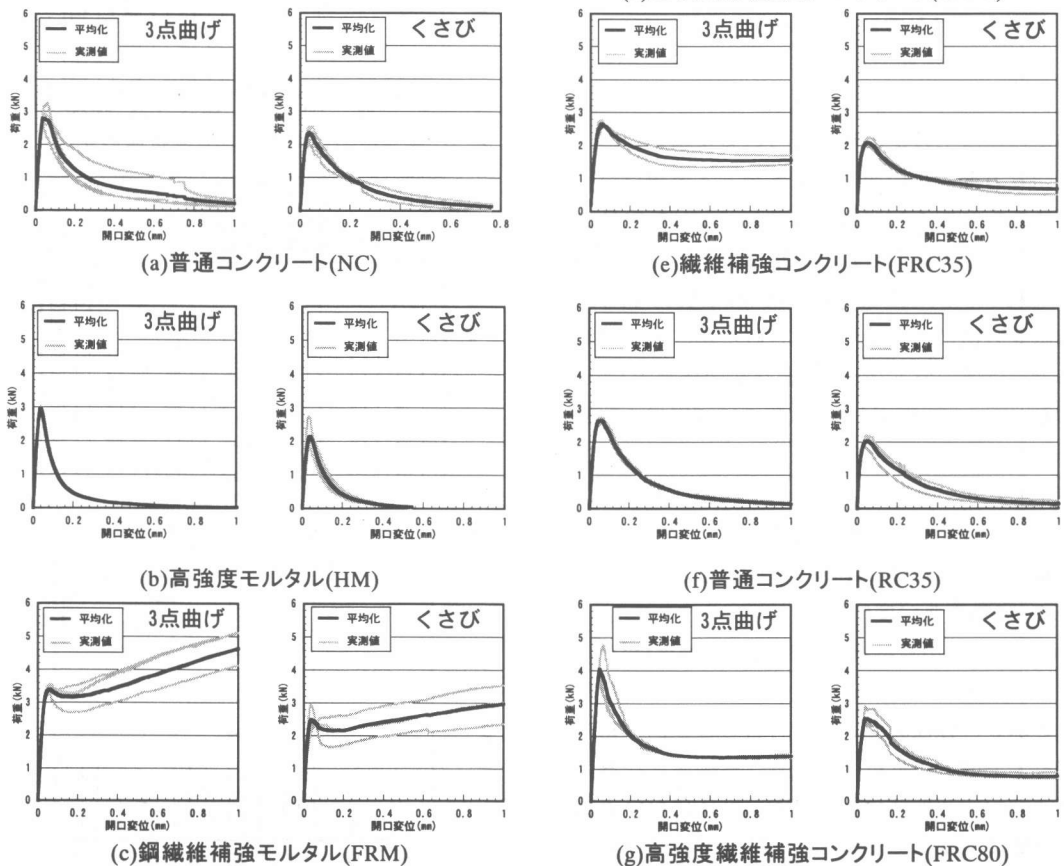


図-8 各種コンクリートの荷重-開口変位曲線(L-COD曲線)

均化したグラフの形状に着目すると、曲げ試験体からの転用を行った試験体を含め、いずれの試験体も両試験方法ともにほぼ同形のL-COD曲線が確認された。つまり両試験方法による試験体の降伏前勾配、最大荷重到達開口変位、降伏後軟化勾配、限界開口変位、引張硬化などの破壊性状は同様のものと考えられる。したがって両試験方法は破壊靱性の計測方法としてコンクリートが破断するまでの軟化特性の同等な評価が可能であることが認められた。

3. 5. 引張軟化曲線(TSD)

図-9にはL-COD曲線から逆解析によって求めたTSD(左:開口変位0.5mm,右:開口変位0.1mm)を示す。左は有効破壊エネルギー G_F^u の評価,右は初期結合応力の評価のグラフである。TSDはL-COD曲線の特徴を反映するものであり,NC, HM, RC35については脆性的な破壊性状を示し,

結合応力が0となり完全破断するのに対し,靱性の向上を図ったFRM, LFRC, FRC35, FRC80は繊維混入の影響によって開口変位が3mmに到達するまで載荷したが,繊維により完全な破断が起きず結合応力が保持されることが確認された。またLFRC, FRC35, RC35, FRC80については初期結合応力よりも最大結合応力の値が大きくなる傾向があった。これは解析時における初期結合応力の差が原因であると思われる。またTSDの周域面積は破壊エネルギー G_F^{TSD} とされるが,

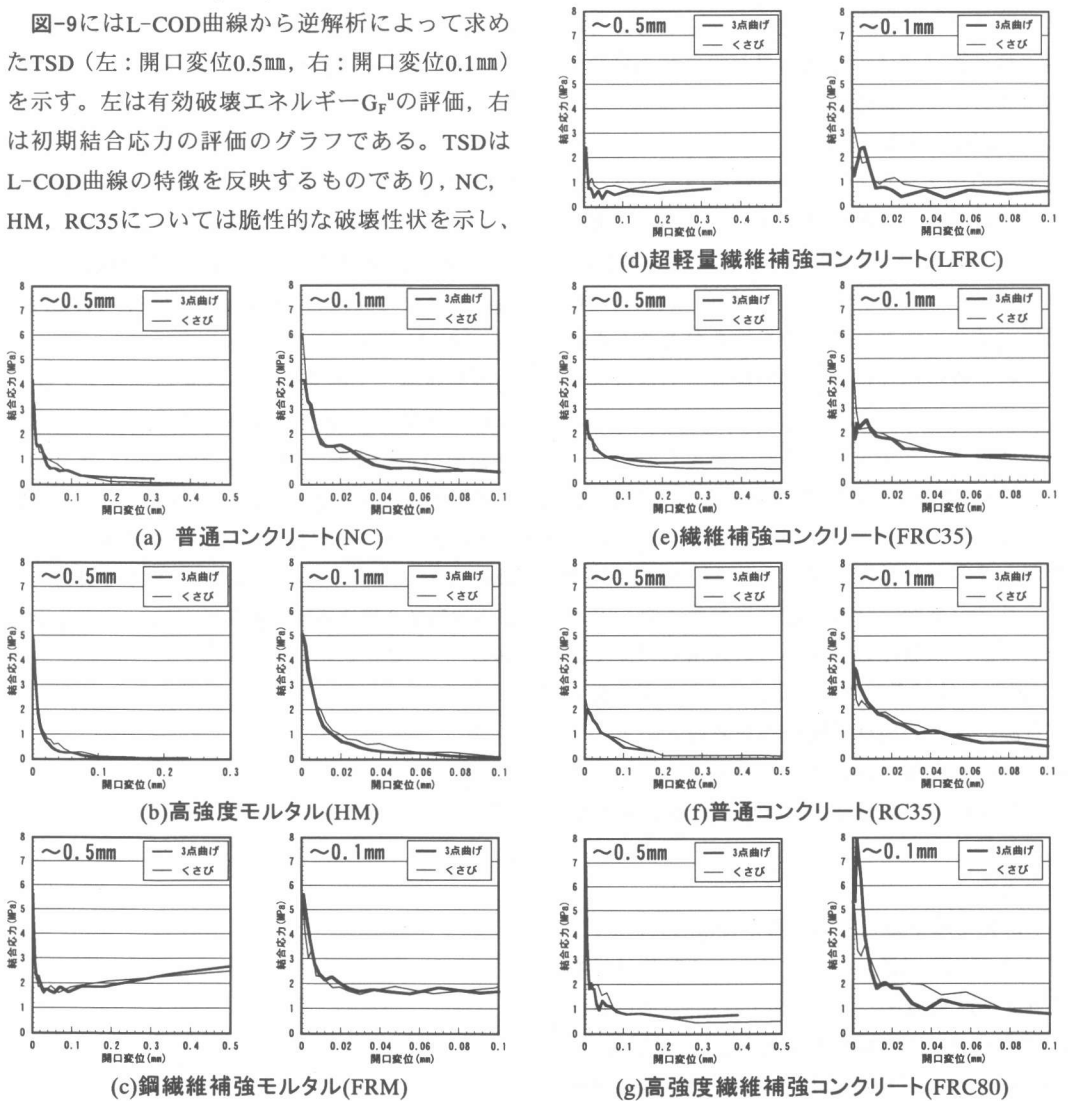


図-9 各種コンクリートの引張軟化曲線(TSD)

この場合の G_F^{TSD} は、開口変位0.5mmまで周域面積で示される有効破壊エネルギー G_{fu} の結果と、その後の開口変位3mmまでの曲線履歴により構成される引張軟化曲線の周域部分の面積部分で示されるとする。FRM, LFRC, FRC35, FRC80に関しては G_F^{TSD} 値が大きくなると考えられる。またグラフの形状は、曲げ試験体からの転用を行った試験体を含め、各試験体で両試験結果がほぼ一致することが確認された。各試験体で両試験においてTSDの曲線履歴が一致したことにより、両試験体のひび割れ進展、軟化勾配、破断時開口変位などの破壊性状は同様と考えられ、両試験方法は同様の破壊結果が得られる試験方法であることが認められた。

3. 6. 両試験方法の比較

上記の切欠き梁3点曲げ試験及びくさび割裂試験で得られた各種破壊力学パラメータに着目すると、現在一般的に用いられている切欠き梁3点曲げ試験と比較して、くさび割裂試験はほぼ同様の破壊力学パラメータを得られることが確認され、破壊過程における曲線履歴もほぼ同様の形状を示していた。したがって両試験方法は同等に扱うことが可能であると考えられる。切欠き梁3点曲げ試験は試験体が大きく、自重の影響も受けやすいが、くさび割裂試験ではその必要がなく容易な試験方法であると言える。同時に、くさび割裂試験体は通常行われるコンクリートの曲げ試験体の一部からの転用も可能である。近年の骨材資源の枯渇化、省エネルギー化・省資源化などの地球環境問題を考慮すると、試料容量の小さな試験体でコンクリートの引張軟化特性を評価出来ることは有用であると言える。

4. まとめ

本研究で以下のことが明らかになった。

- (1)くさび割裂試験はコンクリートの破壊特性を評価する試験方法として、切欠き梁3点曲げ試験と同様の引張軟化特性を評価することが出来る。
- (2)現在RILEM基準法として切欠き梁3点曲げ試験が標準化されているが、くさび割裂試験を

標準試験方法とすることで試験方法の高効率化・合理化、試験体の小容量化を成し得ることが可能である。

[謝辞]

本研究では、コンクリート工学協会主催「コンクリートの破壊特性の試験方法に関する共通試験」で提供されたコンクリート試験体（本論中の実験ⅠのNC, HM, FRM）を試験に用いました。また、我妻佳幸氏・相武生コン（株）には試料作製に多大なるご協力を頂きました。クリスタルクレイ（株）、（株）クラレ、山宗化学（株）には実験材料の提供を頂きました。記して関係者に謝意を表します。

[参考文献]

- 1)RILEM AAC13.1:Determination of the Specific Fracture Energy and Strain Softening of AAC, RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, E& FN SPN,, pp.156-158,1994
- 2)橘高義典, 上村克郎, 中村成春:コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 453, pp.15-25, 1993
- 3)橘高義典, 大岡督尚:高強度モルタルマトリックスの破壊パラメータに及ぼす短繊維の影響—高強度繊維補強コンクリートの破壊性状に関する研究—, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 497, pp.1-8, 1997