

6.4.3 結果および考察

普通強度と高強度の2水準の骨材回収型リサイクル指向コンクリートに関して、くさび割裂試験により実験的に求められる荷重－ひび割れ開口変位曲線(L-COD)およびそのデータより各種破壊力学パラメータを導出し、化学処理および物理処理による改質処理効果がコンクリートの破壊特性に及ぼす影響を評価した。

(1) 改質処理が荷重－ひび割れ開口変位曲線に及ぼす影響

くさび割裂型破壊試験はモード I (引張型)の破壊モードを小試験体で得ることが可能であり、試験体における 50mm 深さの切欠き部分に高感度クリップゲージを取り付け、安定した破壊が得られるように開口変位速度を制御した载荷を行い、コンクリートのひび割れ面における荷重－ひび割れ開口変位(L-COD)を測定した。

図 6.4.3 に普通強度(N)および高強度(H)の試験体における荷重－ひび割れ開口変位曲線(L-COD)を示す。砕石である L-series および S-series に関しては、物理処理および化学処理による改質処理を施した場合、L-COD のピーク荷重が低下し、周域面積も低下することがわかった。このピーク荷重は破断面におけるひび割れが進展する直前の最大引張抵抗力を示すのであるが、コンクリートの切り欠き面内に存在する改質骨材近傍の潜在クラックがボンドクラックに進展するための抵抗力が、改質処理により低減していると考えられる。なお、砂利である G-series に関しては、改質処理によりピーク荷重が低下する現象は明確には認められず、L-series および S-series の改質処理を施した場合と同程度の抵抗性を示す履歴になっているといえる。

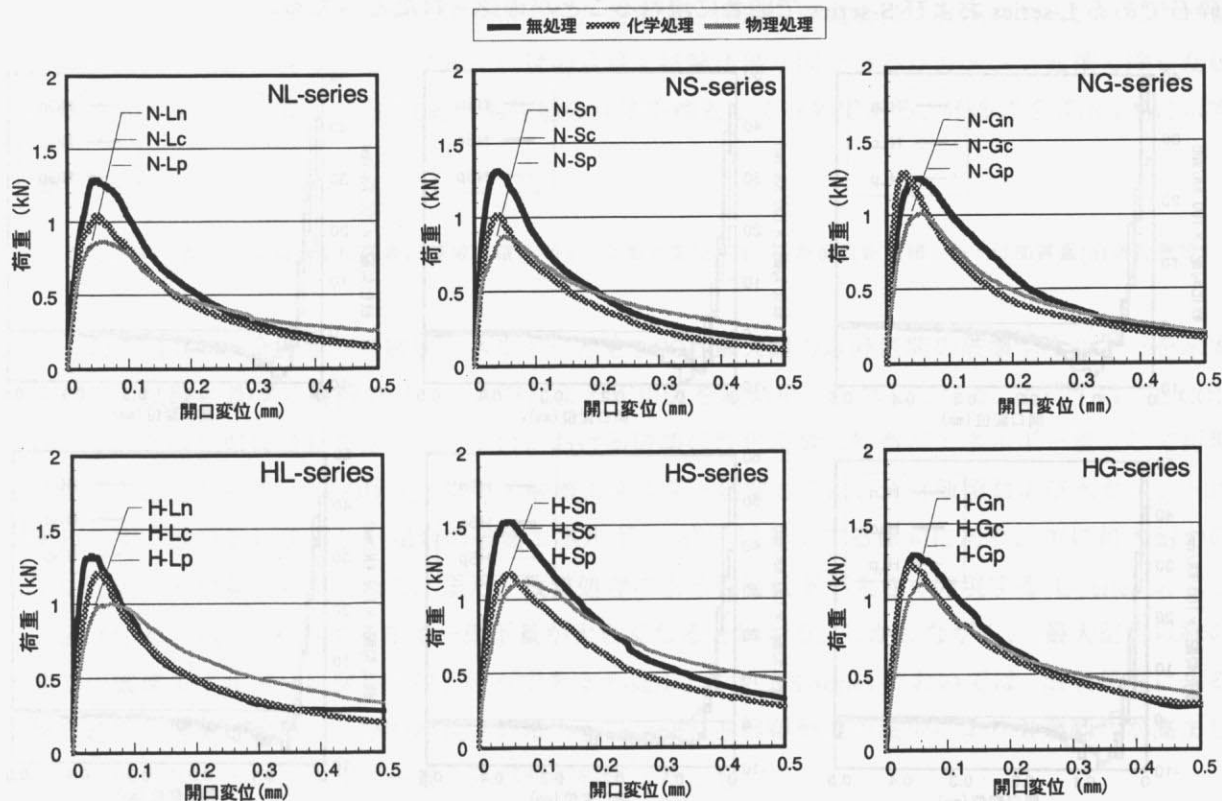


図 6.4.3 荷重－ひび割れ開口変位曲線 (L-COD) (上：普通強度 下：高強度)

図 6.4.4 に荷重－ひび割れ開口変位曲線(L-COD)の軟化勾配図を、図 6.4.5 に荷重－ひび割れ開口変位曲線(L-COD)ピーク荷重後の軟化勾配図を示す。

砕石である L-series および S-series に関しては、物理処理および化学処理による改質処理を施した場合、ピーク荷重以降の軟化勾配が、無処理の試験体と比較して緩やかになっており、特にピーク荷重以降の軟化勾配図では負の勾配が無処理の場合と比較して、小さい値を保持したまま開口変位が増大する履歴を描くことが確認される。また L-COD において、部材の耐久性、防水性、美観の観点から、その機能が大きく低下するひび割れ幅とされる 0.5mm[37]の開口変位時における残存荷重に着目すると、改質処理を施した場合は残存荷重が大きく軟化勾配が緩慢化した影響が確認された。また、急激な強度低下による破壊も回避できる可能性があるため、改質処理により破壊が延性化しているといえる。なお、砂利である G-series についても同様の現象が起こることが確認されたが、その程度は砕石である L-series および S-series 程には大きくはなかった。

上記の骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける破壊の延性化現象は、改質処理骨材を用いたコンクリートの大きな特徴であるといえる。破壊が延性化するメカニズムは、切り欠き面からコンクリートに発生したひび割れが、改質処理骨材におけるトラッピング現象の発生に伴い、骨材界面の脆弱部に迂回する形で進展し、その結果、ひび割れ長さの増大とひび割れ進展駆動力の減少を導くことで、逆に破壊靱性が高まるというクラックディフレクション効果[33]が作用していることが想定される。試験終了後の目視によるくさび割裂試験体の破断面観察からも、改質処理骨材の場合、骨材界面でひび割れが発生していることが確認される。つまりこの現象は、骨材回収型リサイクル指向コンクリートから原骨材を効果的に分離採取するために必要となる界面付着力低減効果として作用した結果と位置づけることも可能とする。そして、無処理の場合と相対比較した界面付着力低減効果は、砕石である L-series および S-series で顕著に現れることが確認されたといえる。

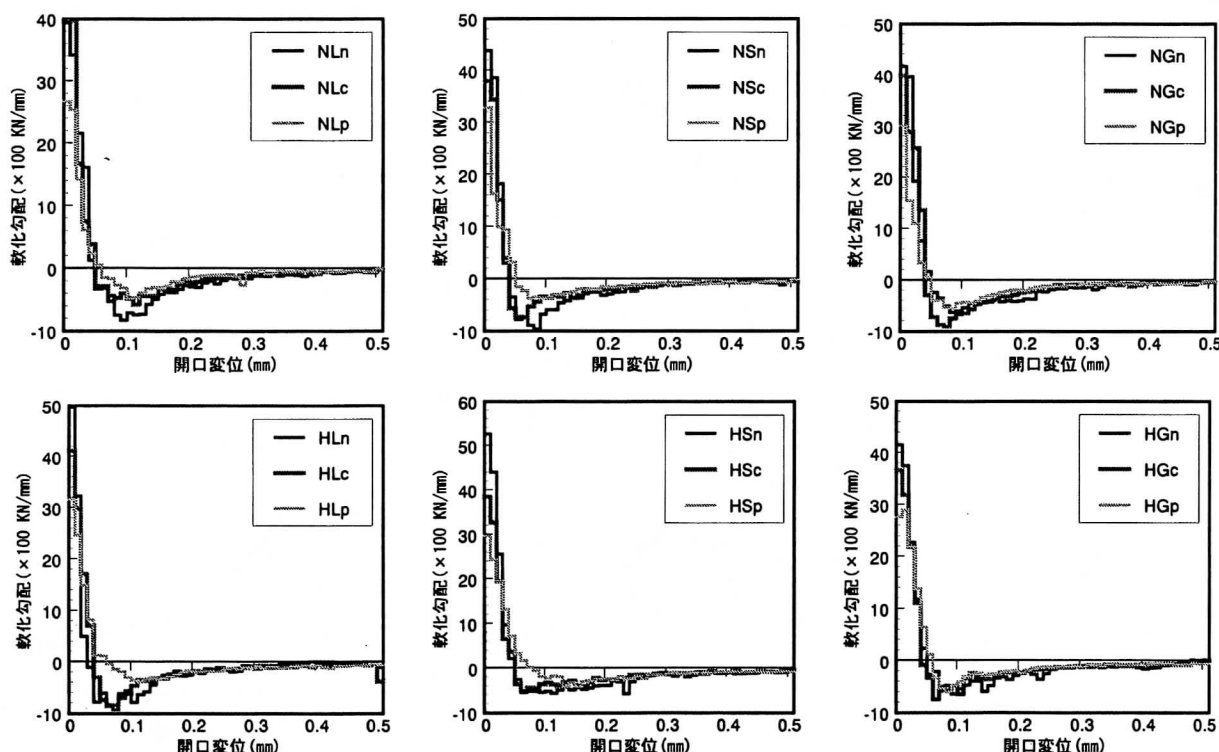


図 6.4.4 荷重－ひび割れ開口変位曲線(L-COD)の軟化勾配図 (上：普通強度 下：高強度)

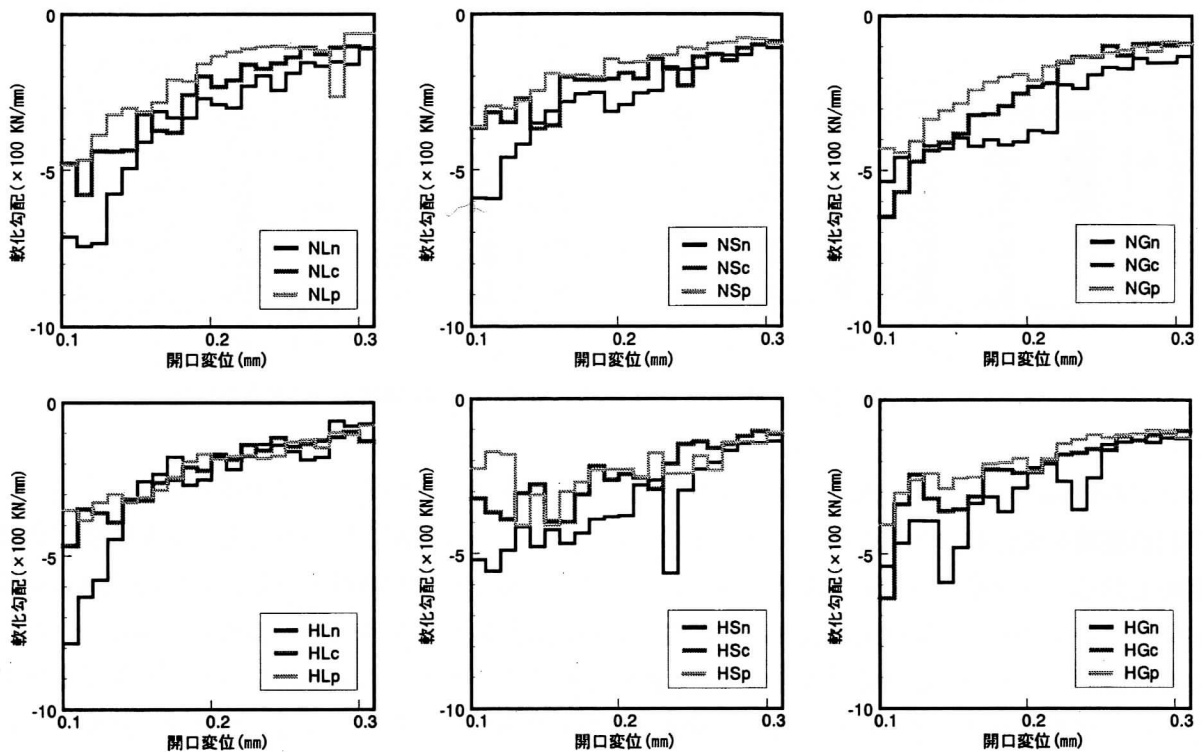


図 6.4.5 荷重－ひび割れ開口変位曲線(L-COD)ピーク荷重後の軟化勾配図 (上：普通強度 下：高強度)

(2) 改質処理が破壊エネルギー G_F^{WOF} に及ぼす影響

破壊エネルギー G_F^{WOF} は、ひび割れが単位面積を進展するのに必要な平均的な消費エネルギーである。RILEM 法では、破壊靱性試験により得られた荷重変位曲線の周域面積で表現されるエネルギー量と試験体の自重により発生するエネルギー量の合算を試験体破断面であるリガメント面積で除した値を破壊エネルギーと定義しており[30]、靱性能の評価指標として有効である。評価式を式(6.4.1)に示す。

$$G_F^{WOF} = \frac{W_0 + mg \delta_0}{A} \cdots \text{式(6.4.1)}$$

ここに、 W_0 ：荷重－荷重点変位曲線の周域面積、 δ_0 ：荷重点変位、 A ：破断面投影面積、 m ：付加質量(治具質量等)

図 6.4.6 に L-COD 全区間での破壊エネルギーと L-COD 最大耐力以降区間の破壊エネルギーを示す。くさび割裂試験に基づく解析では、くさびによる作用力を載荷重に換算している。 G_F^{WOF} は、L-COD で確認された改質処理骨材を使用した場合における破壊延性化現象の特徴がエネルギー量として再現されていると思われる。L-COD 全区間での破壊エネルギーに関しては、骨材種類および水セメント比に関わらず、改質処理を施した場合の破壊エネルギー G_F^{WOF} は低下する傾向にあり、主に最大耐力の低下に起因する現象と考えられる。また、改質処理による強度低下が大きく発現する L-series および S-series が、G-series よりもエネルギー低下量が大きくなるといえる。しかしながら、最大耐力以降の区間での破壊エネルギーに関しては、碎石である L-series および S-series においては、改質処理による破壊の延性化現象により、ひび割れ長さの増大とひび割れ進展駆動力の減少により破壊靱性が高まり、逆に無処理の場合とのエネルギー量の差が若干縮まったと想定できる。

コンクリートの破壊靱性が高くなる現象として、骨材の存在によりひび割れ進展を阻止するトラッピング効果およびひび割れの回り込み作用であるクラックディフレクション効果を始め、空気泡によ

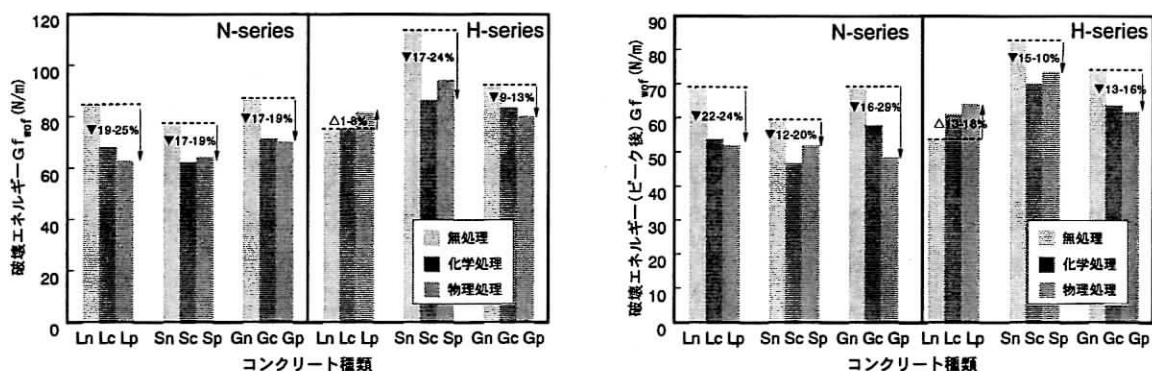


図 6.4.6 破壊エネルギー G_f^{WOF} (左: L-CMOD 全区間 右: LCMOD ピーク荷重以降区間)

るひび割れ偏向効果や、短繊維混入によるひび割れ分散効果などが具体的に挙げられる。そして、ひび割れ進展を変化させる条件としては、骨材とモルタルの強度差が挙げられ、モルタル強度が骨材強度を上回るコンクリートである場合、骨材クラックが卓越し、骨材破断モードによりひび割れが進展して、コンクリートは脆性的に破壊する傾向がある。これは、コンクリートの破壊エネルギーが骨材自身の破壊エネルギーに関係するという説[38]からも評価できる。またモルタルが骨材強度と同等かそれ以下である場合、骨材界面に向けて破壊進展領域が形成されやすくなる。この時、初期ひびわれ進展抵抗値は小さくなり、骨材種類の影響は受けにくくなるが、ひび割れの回り込み作用によりエネルギー消費量が増大する可能性があるため、骨材粒形および骨材界面の潜在クラック厚さなどの骨材条件により、回り込み易さへの影響を考慮する必要があるといえる。

(3) 改質処理が引張軟化曲線に及ぼす影響

引張軟化曲線(TSD)は、材料の引張強度と開口ひび割れ幅との関係における非回復性の変形挙動を表現する曲線であり、材料のひび割れ進展を推定するために必要な材料構成則であるといえる。これまで、コンクリートの引張軟化曲線を推定するために、直接引張試験から実験的に引張軟化曲線を求める試み[40]を始め、安定破壊を条件とした破壊靱性試験により荷重—荷重点変位を求め、ひびわれ進展数値解析結果を用いた逆解析により間接的に引張軟化曲線を推定する2直線逆解析法、破壊エネルギーを用いエネルギー等価条件から引張応力と開口変位の関係を求めるエネルギー推定法[31][42]などが示されており、その有効性が確認されている。しかしながら、問題点もいくつか指摘されており[29]、2直線逆解析法に関しては、Hillerborgの仮想ひびわれモデル[36]に基づく、2直線逆解析手法を例に挙げると、これは仮想ひびわれ面に結合力を作用させて非線形挙動のモデル化を可能にし、荷重—変位曲線からも推定が可能なバイリニアモデルによる結合応力—開口変位引張軟化曲線を導出しているのであるが、その解析プロセスに、仮想ひびわれ開口変位は、結合応力に支配されるとしつつも、結合応力は開口変位の関数で構成されている点[43]があるなどにより、解の導出が困難になっていることが挙げられる。またエネルギー推定法に関しては、特殊な実験装置を必要としないで、実験から直接に引張軟化曲線を求められるのであるが、引張応力がひびわれ消費エネルギーにおける開口変位の微分値で算定されるため、開口変位となる変位量および、ひび割れ形成のみに使用された消費エネルギーを精度良く測定することが前提条件となる。また、非線形連立方程式の解を求めるための結合応力分布を一定とする仮定条件が必要となることなどが挙げられている。別の問題として、昨今のコンクリートは、繊維混入コンクリートのように、結合応力—開口変位の曲線がバイリニアで再

現できない複雑な荷重変形曲線となるものも存在するため、簡便なモデルにより多直線で引張軟化曲線が再現できれば、より正確にコンクリートの破壊特性の検証が可能になると考えられている。

本研究で採用した多直線近似による引張軟化曲線推定法[29]は、上記問題の解決を図ることも視野にいて検討されたものであり、実験により求められた荷重－ひび割れ開口変位曲線のデータを利用して結合応力－開口変位の関係を非線形ひびわれ方程式の繰り返し演算により求める際に、計算により既に求めている一部の結合応力－開口変位関係を繰り返し演算の構成則として適用し、逐次解析をするという新たな手法を採用したものであり、コンクリートの引張軟化曲線および破壊力学パラメータを正確に表現するための基礎的な材料構成則を導く手法としてその有効性が期待されている。計算の概要は、式(6.4.2)に示す試験体形状、結合応力および開口変位の条件式と、式(6.4.3)に示す引張軟化曲線の多直線近似基本式からひび割れ方程式を立て、荷重－ひび割れ開口変位関係の解析値と実験値が一致し、開口変位と結合応力の関係が式(6.4.3)を満たすまで、軟化勾配の最適化計算を繰り返し、最終的に引張軟化曲線の形状を決定するというものである。図 6.4.7 に引張軟化基本式の多直線近似により形成される引張軟化曲線と軟化勾配図の概要を示す。なお本章末尾の Appendix に、多直線結合力モデルでのひびわれ数値解析方法および多直線近似解析による引張軟化曲線の推定方法を概説する。

$$\delta(a,x)=\int_0^a\sigma(a,c)\cdot H(a,x,c)dc \quad \cdots\text{式(6.4.2)}$$

$$\sigma(\delta)=m_k\cdot\delta+n_k \quad \cdots\text{式(6.4.3)}$$

ここに、 $\sigma(a,x)$ ：仮想ひび割れ長さ a の場合の接点 x の結合応力、 $\delta(a,x)$ ：開口変位、 $H(a,x,c)$ ：試験体の形状係数、 c ：結合応力の作用位置

図 6.4.8 に普通(N)および高強度(H)シリーズの引張軟化曲線を示す。引張軟化曲線は骨材回収型リサイクル指向コンクリートの特性値であり、各種破壊力学パラメータの導出に利用されるものである。

改質処理が引張軟化曲線に及ぼす影響に関しては、荷重－ひび割れ開口変位曲線において示した改質処理効果が及ぼす影響と同様の傾向が確認され、初期結合応力の減少および軟化勾配の緩慢化に起因する破壊の延性化現象が、骨材粒形および水セメント比の特性に関連した形で再現されている。

なお本章では、実験より求めた骨材回収型リサイクル指向コンクリートの荷重－ひび割れ開口変位曲線について、開口変位 0.5mm までの軟化勾配をグラフに示し、骨材の改質処理により破壊が延性化する効果を確認したが、引張軟化曲線を逐次解析する際に多直線近似基本式から求められる軟化勾配を利用して確かめることも可能であるといえる。

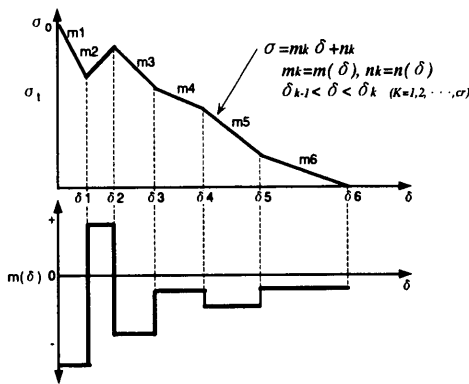


図 6.4.7 多直線近似基本式による引張軟化曲線と軟化勾配図[29]

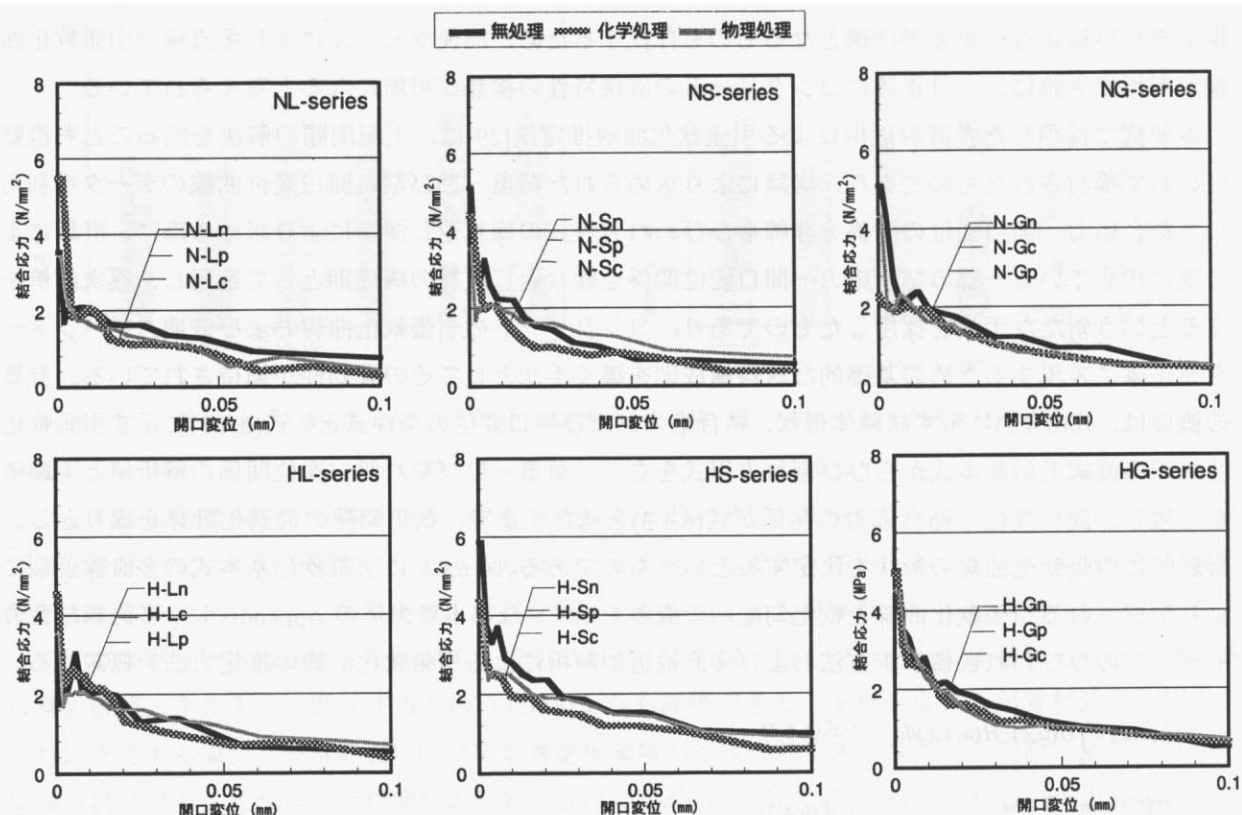


図 6.4.8 引張軟化曲線 (TSD) (上：普通強度 下：高強度)

(4)改質処理が初期結合応力に及ぼす影響

初期結合応力は、引張軟化曲線における開口変位が0である場合の結合応力であり、引張軟化曲線の開始点(結合応力軸の切片)である。実験により求めた荷重—ひび割れ開口変位曲線の初期勾配から、一時的に軟化勾配を0として解析し、引張軟化曲線の形状を決定する繰り返し演算により最適化して求められる。材料の引張強度を評価するための指標になり、脆性材料および疑似脆性材料に特有の粘りのない破壊形態を示す材料の特性値として有効に利用することができる。

図 6.4.9 に初期結合応力を示す。普通強度(N)および高強度(H)シリーズを通じて、無処理の試料と比較した改質処理試料の初期結合応力は全体的に低下する傾向にあるが、高強度シリーズの G-series の場合は改質処理の有無に関わらず、初期結合応力の差が小さくなることから、高強度で骨材粒形が良くなる場合、改質処理による界面付着力低減性の影響が初期結合応力にほとんど影響しなくなることが特徴として挙げられるといえる。

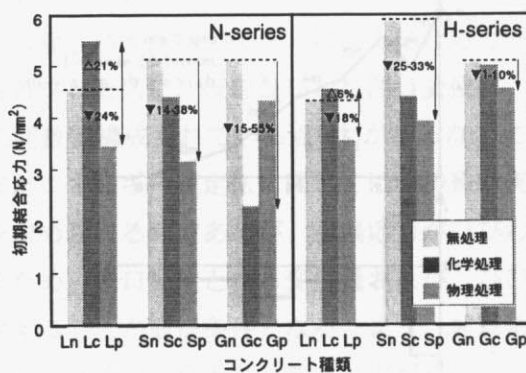


図 6.4.9 初期結合応力

(5) 改質処理が有効引張強度 f_t^{eff} に及ぼす影響

コンクリートの引張強度評価方法としては、割裂引張試験が一般的であるが、引張軟化曲線における開口変位 0.01mm までの平均結合応力で表現される有効引張強度 f_t^{eff} は、割裂引張強度と等価な破壊力学パラメータとして扱うことができる[38]。有効引張強度は、割裂引張強度と比較して、骨材のブリッジングにより強度増加を示すような荷重変形特性を保持するコンクリートの場合や、繊維混入コンクリートのように繊維の引き抜け防止による完全破断が困難である場合においても、正確に引張強度を評価することを可能にするものである。

有効引張強度は、引張軟化曲線において、開口変位がゼロの状態から 0.01mm までの周域面積を式 (6.4.4) により計算することで求められる。これにより、破断面における骨材界面の付着力低減性を考慮した平均結合応力を評価することが可能になり、割裂引張強度との相関を見出すことも可能となる。

$$f_t^{eff} = \frac{1}{\delta_1} \int_0^{\delta_1} \sigma(\delta) d\delta \quad ; \delta_1 = 0.01mm \quad \cdots \text{式(6.4.4)}$$

ここに、 $\sigma(\delta)$: 開口変位 δ における結合応力

図 6.4.10 に割裂引張強度と有効引張強度について示す。実験により求めた割裂引張強度は、圧縮強度の試験結果とほぼ同様の傾向を示しており、物理処理および化学処理による改質処理を施した試料は、無処理の場合よりも強度が低下する。その傾向は、砂利を使用した G-series よりも、碎石を使用した L-series および S-series に顕著であることが分かる。

有効引張強度は、割裂引張強度の実験結果を精度良く反映しており、G-series よりも碎石を使用した L-series および S-series の場合、改質処理により破断面における改質処理骨材およびマトリックスの平均結合応力が無処理の場合と比較して低下しやすい傾向がある。各種コンクリートにおけるモルタル部分の調合がほぼ同様であることを考慮すると、有効引張強度で示された強度低下は、骨材界面の強度低下量そのものであるという見方も可能になるといえる。

なお G-series は、改質処理の有無に関係なく普通強度および高強度ともに引張強度が 3.0N/mm² 前後でとどまっているのに対し、L-series および S-series は、普通強度(N)において改質処理を施した場合においても、G-series の無処理の場合の強度と同程度であるため、碎石の粒形に起因する機械的かみあわせ力により有効引張強度が保持されることが確認できる。

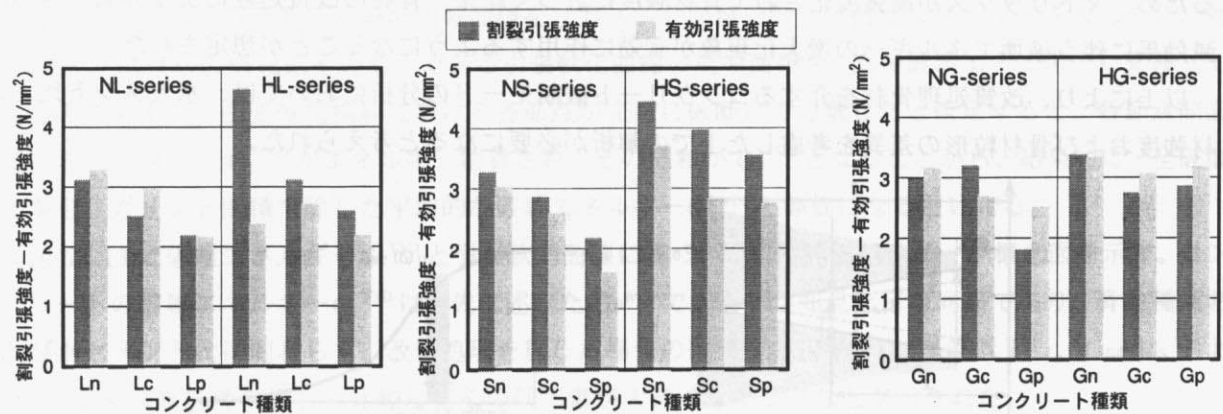


図 6.4.10 割裂引張強度と有効引張強度

(6) 改質処理がエネルギー解放率に及ぼす影響

ひび割れ進展に伴い消費されるエネルギーは、結合力モデルでのエネルギー変化から推定できる。図 6.4.11 に示す結合力モデルにおいて、単位ひび割れ進展長さ da 当たりに結合力が成す仕事量をエネルギー解放率 $G_p(N/m)[38]$ として定めることが可能であり、ひび割れ進展の抵抗性を示すパラメータとなる。引張軟化曲線における節点間の結合力に開口変位 δ の変化を乗じた面積分を、仮想ひび割れの進展面積で除すことで求められ、多直線解析の過程で得られる開口変位および結合応力の分布が利用されることになる。また G_p と仮想ひび割れ進展量の関係により、結合力モデルでのひび割れ進展抵抗曲線を得ることができる。 G_p の算定式を以下の式(6.4.5)に示す。

$$G_p = \frac{dW}{da} = \frac{1}{da} \int_a^b \sigma(\delta) \cdot \Delta\delta(a, x) dx \cdots \text{式(6.4.5)}$$

ここに、 $\sigma(\delta)$: 開口変位 δ における結合応力、 $\delta(a, x)$: x での開口変位

図 6.4.12 に普通強度(N)および高強度(H)シリーズにおける仮想ひび割れ長さとエネルギー解放率 G_p の関係を示す。普通強度および高強度シリーズともに、曲線履歴が仮想ひび割れ長さが 20~30mm 程度までは緩やかなひび割れ進展抵抗性を示し、以降のひび割れ進展長さが大きい領域では、エネルギー解放率も増大し、ひび割れ進展抵抗は増大するといえる。改質処理によるひび割れ進展のエネルギーに明確な差はないといえるが、普通強度(N)においては、全体的に無処理の場合におけるエネルギー解放率が大きい、仮想ひび割れ長さに比例して、物理処理および化学処理を施した改質処理試験体における曲線履歴の勾配が大きくなり、エネルギー解放率も若干増大する傾向が示されている。碎石である NL-series と NS-series にその特徴が明確に現れていることから、骨材界面へのひび割れ回り込み作用に伴うひび割れ進展抵抗性の増大化現象が現れているものと考えられる。同様に、高強度(H)については、砂利である HG-series と碎石である HS-series は、改質処理の有無に関わりなくひび割れ進展抵抗曲線はほぼ同じ曲線履歴を描くため、破壊に要するひび割れ進展抵抗性が同程度であり、かつモルタルの高強度化に伴ない弱点部の骨材界面への限定化が予想される。碎石である HL-series は、仮想ひび割れ幅がそれほど大きくない段階より、改質処理の試験体におけるひび割れ進展抵抗性が大きくなる傾向が示されており、内部組織において骨材クラックの卓越する骨材破断モードもしくはボンドクラックに起因する骨材界面破断モードによるひび割れ進展が特徴的に発生していることが想定された。試験終了後における破断面観察結果によると、その多くが後者である骨材界面で発生しているため、マトリックスが高強度化されて骨材強度に近づく結果、骨材の改質処理による界面付着力低減効果に伴う破壊エネルギーの増大化現象が有効に作用するようになることが想定された。

以上により、改質処理骨材を介するコンクリート破断モードの分析においては、水セメント比、骨材強度および骨材粒形の差異を考慮した上での解析が必要になると考えられた。

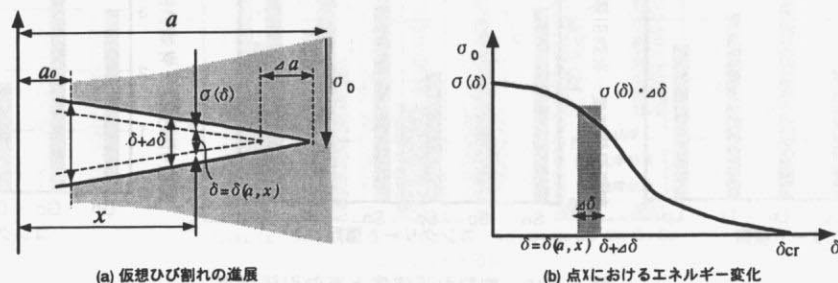


図 6.4.11 結合力モデルのエネルギー変化

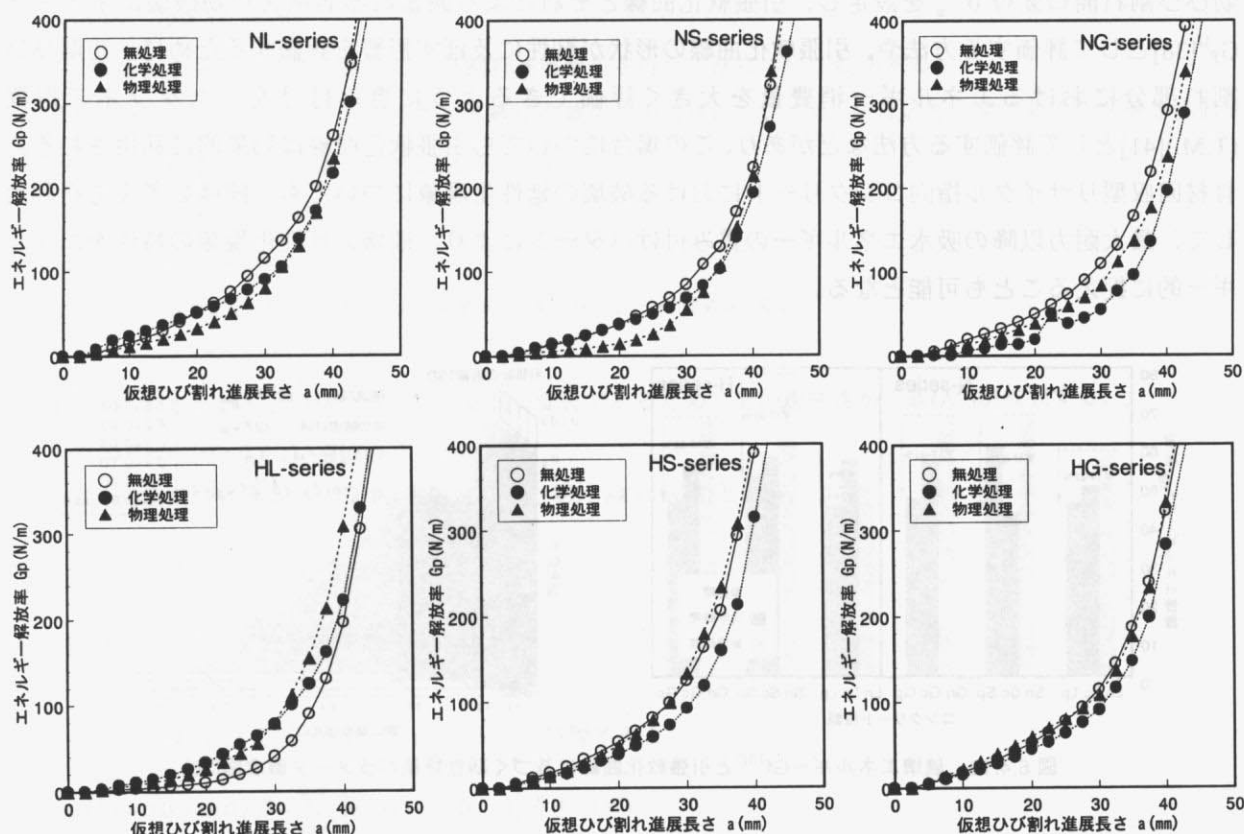


図 6.4.12 仮想ひび割れ長さとエネルギー解放率 G_p (上：普通強度 下：高強度)

(7) 改質処理が破壊エネルギー G_F^{TSD} に及ぼす影響

破壊エネルギー G_F^{TSD} は、仮想ひび割れの任意節点が限界開口変位 δ_{cr} に達し、結合力が 0 になるまでに要する単位エネルギーのことであり、弾性変形エネルギーを微小と仮定した場合、引張軟化曲線で囲まれた面積より求めることが可能となる[38]。 G_F^{TSD} の算定式を、以下の式(6.4.6)に示す。

$$G_F^{TSD} = \int_0^{\delta_{cr}} \sigma(\delta) d\delta \cdots \text{式(6.4.6)}$$

ここに、 $\sigma(\delta)$ ：開口変位 δ における結合応力

なお G_F^{WOF} は、荷重変形曲線の周域面積をリガメント面積で除して破壊エネルギーを求めるのに対し、 G_F^{WOF} は材料の構成則そのものである引張軟化曲線の周域面積を、直接破壊エネルギーに変換しているのであるが、引張軟化曲線における各節点が完全に破断して分離したと仮定すると、各節点間面積において同一の G_F^{TSD} がエネルギー消費され、その総和が G_F^{TSD} となることから、結果的に、全破壊仕事をリガメント面積で除した平均的な破壊エネルギー G_F^{WOF} と等価になるといえる。

図 6.4.13 に破壊エネルギー G_F^{TSD} と引張軟化曲線に基づく、靱性評価パラメータ概念図を示す。コンクリートの破壊エネルギー G_F^{TSD} は、先に述べた G_F^{WOF} で得られた知見とほぼ同様であり、骨材種類および水セメント比に関わらず、改質処理を施した場合の破壊エネルギー G_F^{TSD} は低下し、L-series および S-series は無処理の場合と比較してその低下量が大きくなることなどが示された。

なお繊維補強コンクリートのような高靱性材料で、最大荷重後も耐力が低下せず、限界開口変位 δ_{cr} の計測が困難である場合、部材の耐久性、防水性、美観の観点から、その機能が大きく低下する有

効ひび割れ開口変位 δ_u を設定し、引張軟化曲線とそれにより囲まれる面積を有効破壊エネルギー G_F^U [38] として評価する方法や、引張軟化曲線の形状が靱性に及ぼす影響を評価するために、初期ひび割れ部分におけるエネルギー消費量を大きく評価できるように重み付けをしたタフネス指数 (T.M.) [41] として評価する方法などがあり、この場合についても引張軟化曲線は効果的に利用される。骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける破壊の延性化現象についても、同様の考え方を利用して、最大耐力以降の吸水エネルギーの重み付けパターンにより、破壊の延性化現象の特性をエネルギー的に捉えることも可能となる。

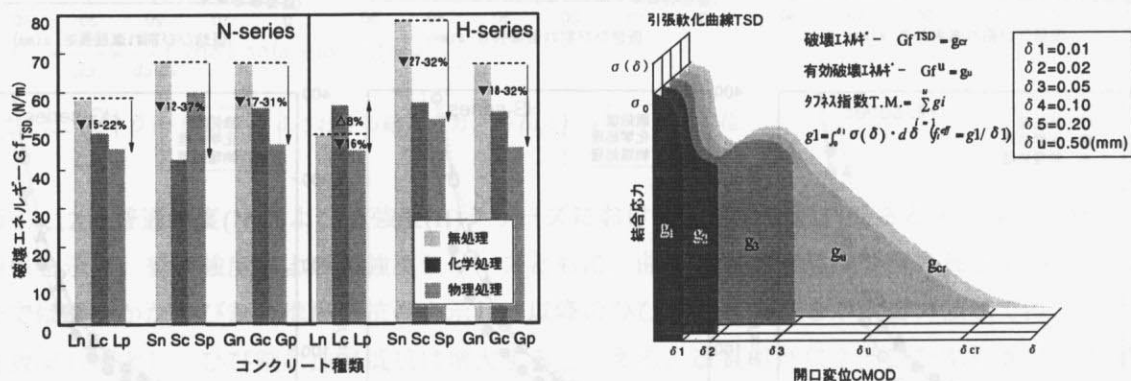


図 6.4.13 破壊エネルギー G_F^{TSD} と引張軟化曲線に基づく靱性評価パラメータ概念図 [38]

6.4.4 まとめ

本節は、骨材回収型リサイクル指向コンクリートの破壊特性について検討した。以下に得られた知見を示す。

1) 骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける骨材界面剥離効果により、荷重－ひび割れ開口変位曲線における最大耐力後の軟化勾配が無処理の場合と比較して緩慢になる傾向が確認されたが、これは、骨材界面の脆弱部に破壊進展領域が優先的に形成され、ボンドクラックの発生傾向が高まり、結果として延性的な破壊形態となるためである。なお、この現象は、モルタルが高強度になり、骨材界面が骨材およびモルタル部分対して相対的に脆弱となる場合に顕著に発生する可能性がある。

2) 骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける骨材界面剥離効果により、破壊の延性化が著しくなる現象は骨材が砕石である場合に顕著である。これは、骨材が砂利である場合、骨材界面の機械的かみ合わせが本質的に小さくなるため、改質処理の有無に関わらずひび割れは骨材界面に優先的に形成されるのに対し、砕石である場合は無処理の場合、通常は骨材界面の機械的かみ合わせが大きい場合、改質処理の場合のみ脆弱な界面にひび割れが優先的に形成される性質が保持されるためである。

3) 骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける破壊エネルギーは、ひび割れの骨材界面への迂回現象により破壊が延性的になることで、破壊エネルギーの低下率を緩和させる可能性がある。

Appendix [29,46 参照]

多直線近似引張軟化曲線を用いてひび割れ進展解析を行う方法について説明する。

まず多直線近似による結合力モデルである軟化曲線の表現方法については、結合応力—開口変位の関係を多直線で近似すると仮定し、その基本式を式(A1)に表す。

$$\sigma(\delta) = m_k \cdot \delta + n_k \quad \cdots (A1)$$

$$;\delta_{k-1} < \delta \leq \delta_k ; k = 1, \dots, cr$$

ここに、 δ : 開口変位、線要素の傾き : m_k 、線要素の σ 軸切片 : n_k 、 cr : 線要素の総数

δ_k は線要素 k と $k+1$ との接合点における開口変位であるため、その連続性から式(A2)が成立する。

$$\sigma(\delta) = m_k \cdot (\delta - \delta_{k-1}) + \sigma(\delta_{k-1}) \quad \cdots (A2)$$

ここで、初期条件 $\delta(0) = \sigma_0$ 、 $\delta_0 = 0$ を設定すると切片 n_k は式(3)となる。

$$n_k = \sigma_0 + \sum_{i=0}^{k-1} [(m_i - m_{i+1}) \cdot \delta_i] \quad \cdots (A3)$$

また傾き m_k は開口変位 δ の関数より、

$$m(\delta) = m_k \quad \cdots (A4)$$

となり、式(3)および式(A4)を式(A1)に代入して整理すると

$$\sigma(\delta) = \sigma_0 + m(\delta) \cdot \delta + \sum_{i=0}^{k-1} [\{ m(\delta_i) - m(\delta_{i+1}) \} \cdot \delta_i] \quad \cdots (A5)$$

$$;\delta_{k-1} < \delta \leq \delta_k ; k = 1, \dots, cr$$

が算定され、軟化勾配の変化である $m(\delta)$ により軟化曲線を表現することができる。なお $m(\delta)$ は軟化曲線の区間微分の近似値であるため、その変化図はひび割れ進展における応力伝達挙動を考察する指標になる。

続いて、外力とひび割れ進展の関係を導くために必要なひび割れ進展解析方法について説明する。以下の式(A7)(A8)(A9)にひび割れ進展解析の基本条件を示す。

$$K(a) = K_p(a) + K_r(a) = 0 \quad (\text{応力拡大係数のつり合い式}) \quad \cdots (A7)$$

$$\delta(a, x) = \delta_p(a, x) + \delta_r(a, x) \quad (\text{仮想ひび割れ面の開口変位つり合い式}) \quad \cdots (A8)$$

$$\sigma(a, x) = f[\delta(a, x)] \quad (\text{結合応力—開口変位関係式}) \quad \cdots (A9)$$

ここに、 a : 仮想ひび割れ長さ、 x : 仮想ひび割れ上の開口変位を求める点の座標、 $k(a)$: 仮想ひび割れ先端での応力拡大係数、 $K_p(a)$: 荷重による応力拡大係数、 $k_r(a)$: 結合力による応力拡大係数、 $\delta(a, x)$: x での開口変位、 $\delta_p(a, x)$: 荷重による x での開口変位、 $\delta_r(a, x)$: 結合力による x での開口変位、 $\sigma(a, x)$: 結合応力、 $f[\delta(a, x)]$: 結合応力—開口変位関数

ひび割れ進展解析の基本条件から、引張軟化曲線となる結合応力—開口変位関係の基本式を得るため、線形破壊力学における応力拡大係数の解析結果[44]を利用して、式(A7)の右辺の項である式(A10)(A11)を導く。なおくさび割れ試験での応力拡大係数は、コンパクトテンション試験による場合と同等とみなし[45]、式の算定を行う。

$$K_p(a) = \sigma_N \sqrt{d-a} F(a, d) = \sigma_p \cdot k_p(a) \quad \cdots (A10)$$

$$K_r(a) = \int_0^a \frac{2\sigma(a, c)}{\sqrt{\pi a}} \cdot G(a, c, d) dc = \int_0^a \sigma(a, c) \cdot k_r(a, c) dc \quad \cdots (A11)$$

ここに、 $\sigma_N = \sigma_{N \text{ tension}} + \sigma_{N \text{ bending}} = P_H / (d-a)t + [6P_H(a + (d-a)/2) + 6P_H t] / (d-a)^2 t$
 $P_H = P / 2 \tan \theta$ 、 $P_V = P / 2$ 、 $F(a, d)$: 形状関数[参考式①]、 $G(a, c, d)$: ひび割れ面への集中心力[参考式②]

続いて、線形破壊力学におけるひび割れを有する弾性体の任意変位 x における変位 dy の関係は、Castigliano の定理により、式(12)における応力拡大係数の積分式で示される。式(A10)(A11)をこの式に代入することで、式(A8)の右辺の項である変位関数式(A13)(A14)を導く。

$$dy = d_0 + \int_x^a \frac{2K(z)}{E^*} \left[\frac{\partial K_F(z)}{\partial F} \right] dz \cdots (A12)$$

$$\delta_p(a, x) = \frac{4\sigma_p}{E^*} \int_x^a F(z, d) \cdot G(z, x, d) dz = \sigma_p \cdot d_p(a, x) \cdots (A13)$$

$$\delta_r(a, x) = \frac{8}{\pi E^*} \int_0^a \sigma(a, c) \times \left[\int_x^a \frac{1}{z} \cdot G(z, x, d) \cdot G(z, c, d) dz \right] dc = \int_0^a \sigma(a, c) \cdot d_r(a, x, c) dc \cdots (A14)$$

ここに、 d_0 ：ひび割れが生じてない時の変位、 E^* ：弾性係数（ $E^*=E$ は平面応力状態、 $E^*=E/(1-\nu^2)$ は平面歪み状態、 E ：ヤング率） ν ：ポアソン比、 z ：ひび割れ進展方向の座標、 $K(z)$ ：変位 dy を生じる作用力に対する応力拡大係数、 $K_F(z)$ ：任意点 x に変位方向に仮想力 F が生じたときの応力拡大係数

ひび割れ進展解析の基本条件から導いた式(A10)(A11)(A13)(A14)から、 σ_p を消去して整理すると結合応力—開口変位関係の基本式(A15)を得る。

$$\delta(a, x) = \int_0^a \sigma(a, c) \cdot H(a, x, c) dc \cdots (A15)$$

$$\text{ここに } H(a, x, c) = \frac{k_r(a, c) \cdot d_p(a, x)}{k_p(a)} - d_r(a, x, c)$$

これに引張軟化曲線構成則式(A1)を代入し、ひび割れ面上に設定する節点数 n で離散化すると式(A17)のひび割れ方程式が得られる。

$$[A_{ij}] \{d_i\} = \{b_j\}; i, j = 1, \dots, n \cdots (A17)$$

$$\text{ここに、} A_{ij} = -m_k \cdot I_j \cdot H(a, x_i, c_j) + \phi(i, j); \phi(i, j) = \begin{cases} 1 & (i=j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases}; k=1, \dots, cr \quad d_i = \delta(a, x_i) \quad b_j = \sum_{i=1}^n b_k \cdot I_i \cdot H(a, x_i, c_j)$$

繰返し計算により、式(A17)における m_k の最適値が得られると、仮想ひび割れ長さ a での任意の x 点での開口変位 $\delta(a, x)$ が求まる。求められた開口変位を式(A12)に代入して、結合応力を求める。さらに結合応力を、ひび割れ進展の基本条件である式(A7)に代入することで σ_p が定まり、最終的に求める荷重—変形曲線の荷重 P が求められる。

荷重—開口変位の解析フローを図 1A に、多直線近似軟化曲線の解析フローを図 2A に、くさび割裂試験の試験体形状を図 3A に示す。

[参考式]

$$F(a, d) = (0.05A + 0.95) \cdot (0.443 + 2.32A - 6.66A^2 + 7.36A^3 - 2.8A^4), \quad A = a/d \cdots ①$$

ここに、 a ：切欠き長さ、 d ：試験体高さ

$$G(a, c, d) = \frac{G^1(a, c, d)}{(1-A)^{1.5} \cdot (1-B^2)^{0.5}}, \quad A = a/d, \quad B = c/a \cdots ②$$

ここに、 a ：切欠き長さ、 d ：試験体高さ、 c ：試験体下端からの集中荷重位置

$$G(a, c, d) = g_1(A) + g_2(A) \cdot B + g_3(A) \cdot B^2 + g_4(A) \cdot B^3, \quad g_1(A) = 0.46 + 3.06 \cdot A + 0.84 \cdot (1-A)^5 + 0.66 \cdot A_2(1-A)^2, \quad g_2(A) = -3.52 \cdot A^2$$

$$g_3(A) = 6.17 - 28.22 \cdot A + 34.54 \cdot A^2 - 14.39 \cdot A^3 - (1-A)^{1.5} \cdot 5.88 \cdot (1-A)^5 - 2.64 \cdot A^2(1-A)^2$$

$$g_4(A) = -6.33 + 25.16 \cdot A - 31.04 \cdot A^2 + 14.41 \cdot A^3 + 2 \cdot (1-A)^{1.5} + 5.04 \cdot (1-A)^5 + 1.98 \cdot A^2(1-A)^2$$

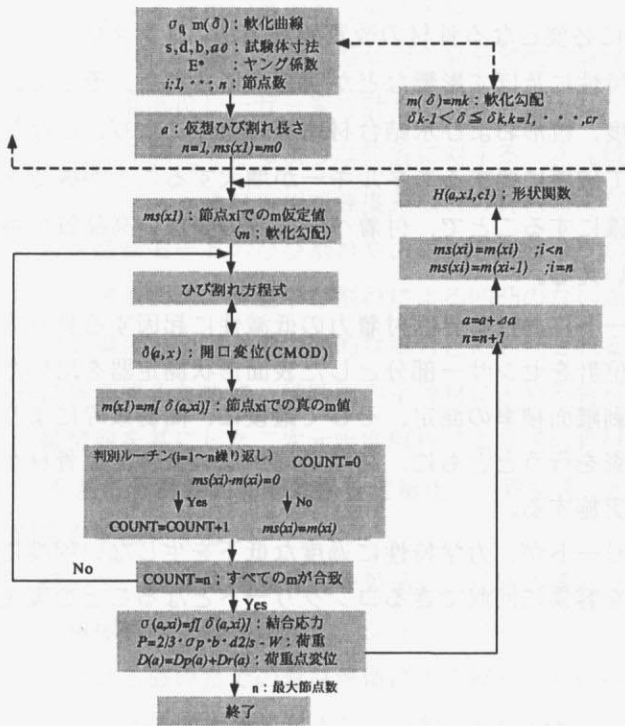


図 1A 荷重—開口変位曲線の解析フロー

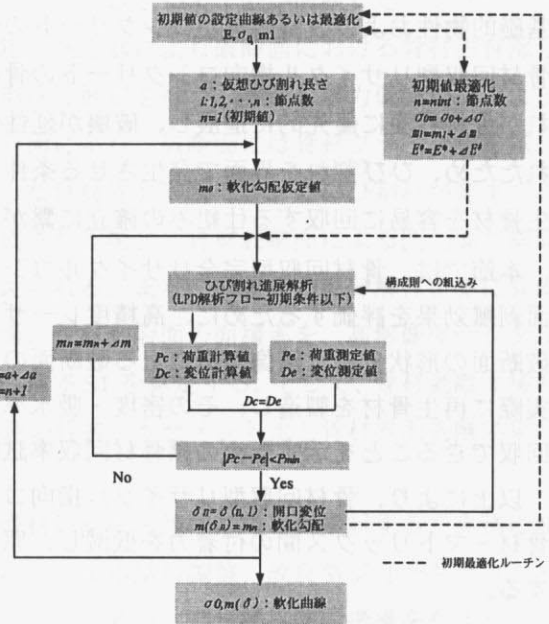


図 2A 多直線近似引張軟化曲線の解析フロー

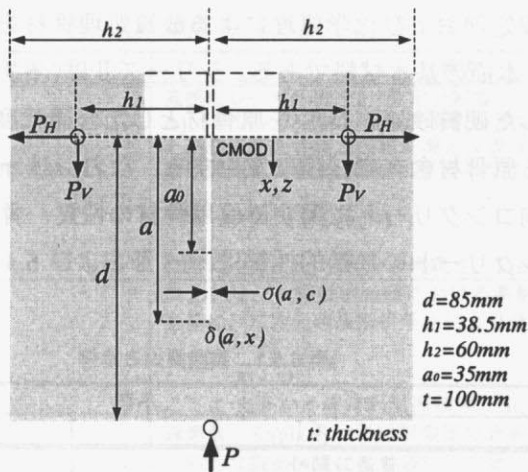


図 3A くさび割裂試験の試験体形状