

コンクリートの各種強度試験法に関する研究

1. 序

構造設計においてより経済的で合理的な設計法が試行されている現在、コンクリートの引張特性を積極的に考慮する必要性が生じてきた。また、SFRCのように特に引張特性のすぐれた高靱性材料が実用化段階に入り、標準強度試験法の規格化が急がれているが、その際プレーンコンクリートでは問題とならなかった諸点についても十分な注意を要する。このような最近のコンクリート工学の現状を考えるならば、コンクリートの引張特性に関する実験データの蓄積はもとより試験条件の影響については再考を要する。それには、コンクリートの引張特性を良く説明しうる解析方法の発展が望まれるところである。本研究では、以上の観点を踏まえて既往の強度試験を中心にコンクリートの引張特性について考察した。考察の対象とした試験法は、曲げ強度試験法、破壊靱性試験法（切欠き曲げ供試体の中点曲げ）、および直接2面せん断試験法である。

2. 解析方法

コンクリートの引張破壊の特徴は、破壊が局所的であり、破断面近傍でのマイクロクラックの発生がまず先行し、破断面を貫通する主ひび割れが生じると静的載荷試験の下では急激にその耐力を失うことである。本解析では、主ひび割れに先行するマイクロクラックの発生をコンクリートにおける見掛けの塑性現象と考え、コンクリートの引張破壊に結合カモデルを適用した。結合カモデルは、線形破壊力学を小規模降伏状態の範囲を越えて外挿する手段としてDugdaleによって提案された。塑性域がき裂方向に細長く進展するという仮定の下に塑性域は仮想き裂面に結合力（降伏応力）が作用するモデルとして近似的に表せるとするのがその基礎的概念である。コンクリートへの適用にあたっては、結合カモデルにおける塑性域およびき裂をコンクリートにおいてはそれぞれマイクロクラックの発生領域および主ひび割れと定義する。その定義に基づいて、コンクリートが結合カモデルの仮定を満足するかどうかはまず解明されるべき前提条件であるが、二

正会員 岸谷 孝一* 同 平居 孝え**
○同 村上 聖***

れに関してはアコースティックエミッション法によるマイクロクラックの発生源推定位置がコンクリートの引張破壊においては破断面のごく近傍に集中的に分布することが実験的に確かめられている。また、主ひび割れは最大耐力域以降に生じることが報告されているので、最大耐力域を問題にする限りコンクリートへ結合カモデルを適用するにあたっては塑性域のみを考慮する。

以下に、曲げ強度試験について結合カモデルの解析手順を述べる。右

図に示すように曲げ引張縁の塑性域を仮想き裂面に一様な引張強度 σ_t が作用するモデルaで近似的に表す。モデルaの応力状態は、モデルbおよびcの応力状態をそれぞれ重ね合わせて求められ、仮想き裂先端でもはや応力の特異性を生じない条件および仮想き裂先端での応力の連続条件から、モデルbおよびcのき裂先端の応力拡大係数は相等しい。即ち、モデルbおよびcのき裂先端の応力拡大係数はそれぞれ

$K_{Ib} = \sigma_b \sqrt{a} F_b(a/w)$ および $K_{It} = \sigma_t \sqrt{a} F_t(a/w)$ と表せるから、 $K_{Ib} = K_{It}$ より

$$\sigma_b / \sigma_t = F_t(a/w) / F_b(a/w) \quad (1)$$

(σ_b : 公称曲げ強度, σ_t : 引張強度, F_b, F_t : 形状係数)

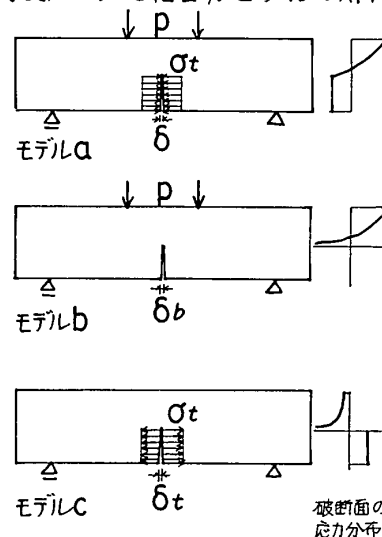
また、破断条件としてはモデルaの仮想き裂端部の開口変位 δ を考える。 δ はモデルbおよびcのき裂端部の開口変位 δ_b および δ_t の差として求められ、

$\delta_b = \frac{4\sigma_b a}{E'} V_b(a/w)$ および $\delta_t = \frac{4\sigma_t a}{E'} V_t(a/w)$ と表せるから、 $\delta = \delta_b - \delta_t$ より

$$\frac{\delta E'}{\sigma_t w} = 4 \frac{a}{w} \left\{ \frac{\sigma_b}{\sigma_t} V_b(a/w) - V_t(a/w) \right\} \quad (2)$$

($E' = E$ (平面応力), $E/(1-\nu^2)$ (平面ひずみ); ヤング率, V_b, V_t : 形状係数)

(2) 式の左辺は破断条件として定義したパラメータ



である。また、形状係数の解析には境界要素法(重み荷重一定の間接法)を用いた。

3. 結果および考察

3.1 曲げ強度試験法

曲げ強度試験法は、応力勾配が存在する場合のコンクリートの引張特性を知る上で、またSFRCの材料性状の解明には重要な試験法となる。その意味で試験条件の影響については前もって解明されねばならない。そこで、曲げ強度と引張強度との関係、載荷形式の違いおよび支承部拘束が見掛けの曲げ強度に及ぼす影響について解析および実験的に検討した。その結果を以下に示す。

図、1は、曲げ強度と引張強度との関係を示す結合カモデルによる解析結果である。図から、載荷形式の違いやスパン長さによりその関係が異なることが分かる。これは、それらが見掛けの曲げ強度に及ぼす影響を説明する。それを説明したのが図、2である。図は、スパン・高さ比が3.0の場合の3等分点載荷および中点載荷の両載荷法による見掛けの曲げ強度比を実験結果とともに示す。ただし、実験結果は引張強度に対する曲げ強度比から $\frac{\delta E'}{\sigma t W}$ を推定し図上にプロットした。解析的には、塑性域が大きくなる程載荷形式の違いによる影響は若干小さくなる傾向が予測され、実験的にもその傾向が見られる。このことから、プレーンコンクリートと比べて載荷形式の違いによる影響はSFRCにおいては特に重要な影響因子とならないことが予想される。

図、3は、支承部拘束の影響を示す結合カモデルによる解析結果である。拘束度として完全拘束の場合、完全拘束のときの支承部水平反力のそれぞれ1/3および2/3の反力が作用する場合の3種類について解析を行った。図から、支承部拘束が大きくなる程見掛けの曲げ強度が増大すること、また同一拘束度でも塑性域が大きくなる程無拘束の場合に対する見掛けの曲げ強度比が増大することが分かる。従って、見掛けのためみ変形の大きいSFRCにおいて支承部拘束には十分な注意を要することが解析的に予測される。これに関しては無拘束の場合とローラ支承の場合について実験的に検討を行った。本実験では、無拘束曲げ載荷装

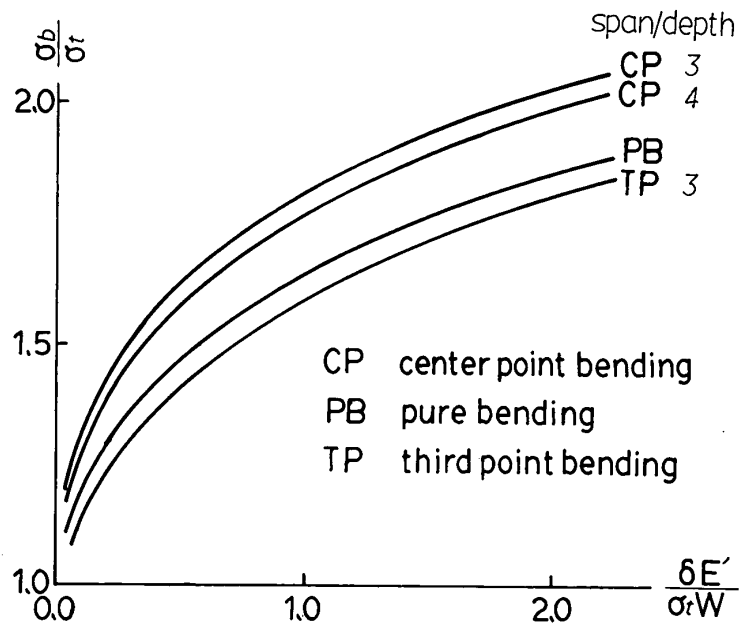


図.1 曲げ強度と引張強度との関係

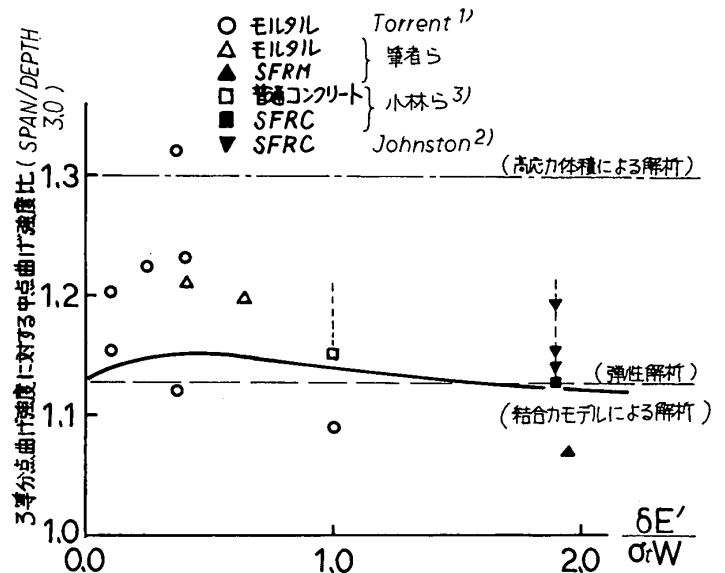


図.2 載荷形式の違いによる影響

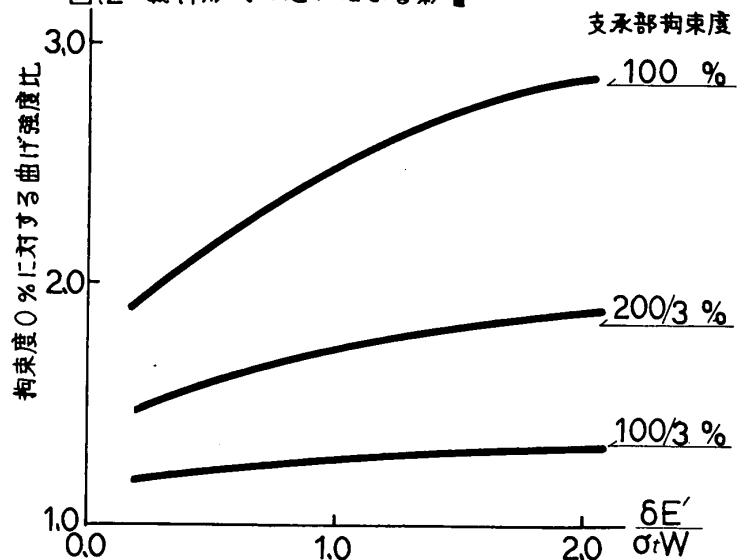


図.3 支承部拘束による影響

置として図、4 に示す支承構造を用いた。その支承部は、支承脚の軸方向の自由回転により水平方向の移動拘束を防ぎ、またねじれの影響を除くために一方の支承部に鋼棒を挿入した構造になっている。図、5 にその実験結果を示す。図中の解析結果は、無拘束曲げ載荷装置の支承間を鋼平板で連結し、その中央に貼り付けたワイヤーストレインゲージによるひずみ測定値とキャリブレーションとの比較から支承部拘束度が約20%であったことから、拘束度20%の場合について示す。実験結果と解析結果との比較はさらに広範な実験的検討を行うつもりであるが、ほとんど全ての測定値がローラ支承において大きいことは、一般に拘束の小さいと考えられているローラ支承においても無視できない影響があると思われる。また、SFRMにおいて無拘束の場合にはひび割れ荷重が最大荷重であったのに対してローラ支承の場合に主ひび割れ発生後約20%の耐力増加があった。この耐力増加は見掛けのものと考えられ、繊維体積率を種々変えた場合についてさらに実験的検討を要する。

3.2 破壊靱性試験法

コンクリートへの稜形破壊力学の適用は、Kaplan により最初に試みられて以来、それに類する研究報告は多いが、コンクリートへの破壊靱性試験法の適用限界や供試体寸法の規定などの試験条件の影響について不明な点が多い。これは、人工切欠き先端からの不安定なき裂伝播の前にコンクリートの不均質性によるマイクロクラックの発生が先行するためと考えられる。そこで、切欠き曲げ供試体の中点曲げ（スパン・高さ比3.0）の場合について人工切欠き先端の塑性域の影響を結合モデルを用いて検討した。その結果を示したのが図、6 である。図中には既往の実験結果をプロットした。図から標準砂モルタル、川砂モルタル、川砂利コンクリートの順に塑性域寸法が大きくなっており、コンクリートにおいて人工切欠き寸法に比べ無視できない大きさであることが分かる。また、塑性域寸法は同一調合において人工切欠き寸法によらずほぼ同程度であり、骨材寸法に依存しているように思われる。そこで、人工切欠き寸

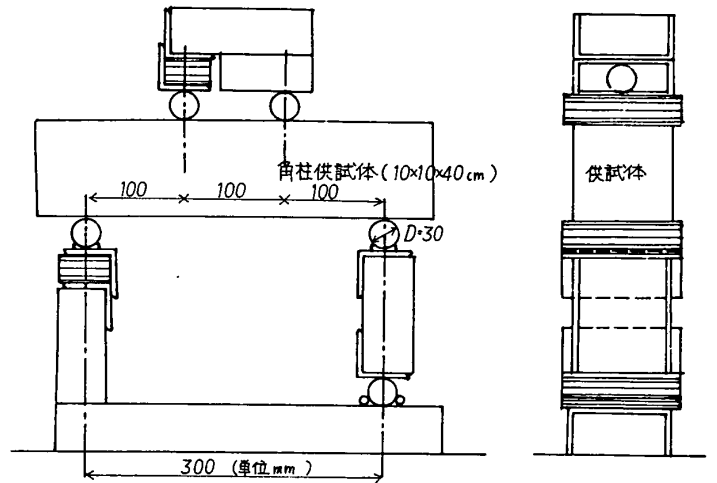


図.4 本実験に用いた曲げ載荷装置

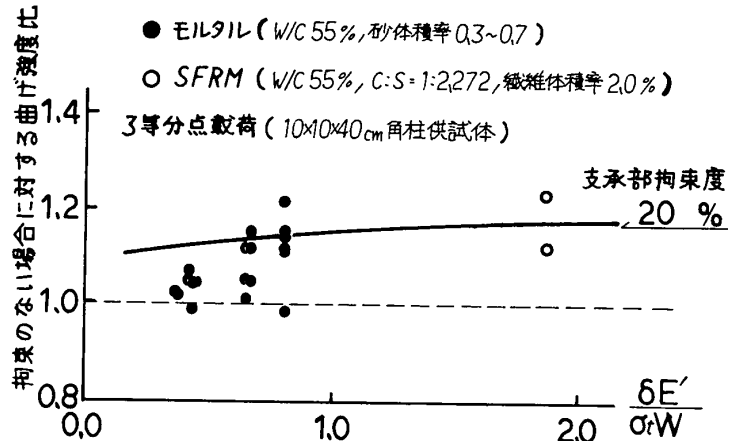


図.5 ローラ支承が見掛けの曲げ強度に及ぼす影響

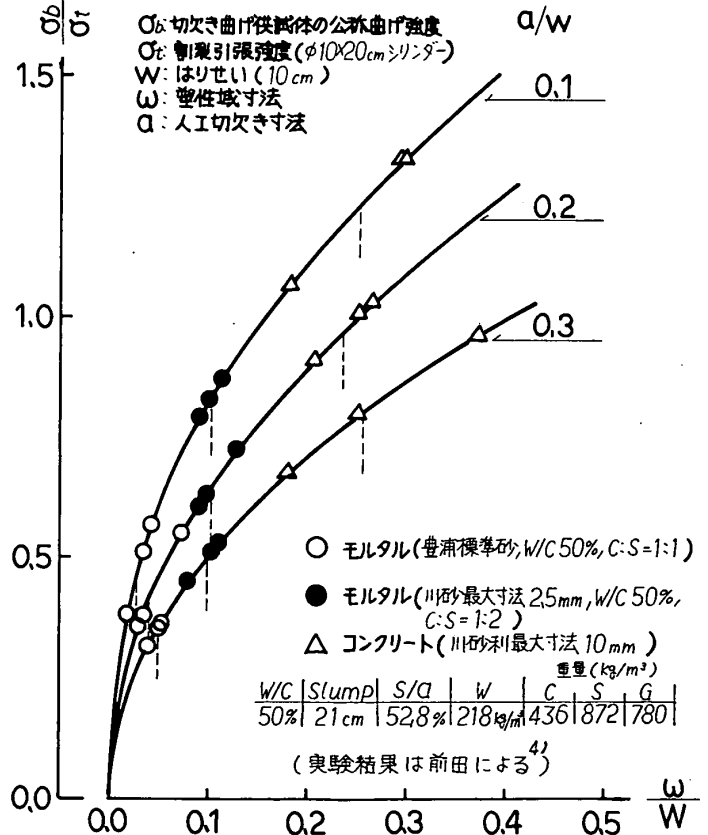


図.6 人工切欠き先端の塑性域の影響

法をはりせいの1/2にとり、塑性域寸法が切欠き寸法の1/10以内のときに破壊靱性試験が有効とすると、標準砂モルタル、川砂モルタル、川砂利コンクリート（砂利最大寸法10mm）において必要な最小供試体寸法はそれぞれ10、20、50cm（はりせい）となり、コンクリートにおいてはかなり大型の供試体を必要とする。

3.3 直接2面せん断試験法

純せん断強度は一般に多軸載荷試験によりモールの破壊包絡線を描いて求めるのが正確であるが、実用上利用しにくいことから簡便でしかも純せん断強度に近い値が得られるせん断試験法が望まれている。最近、直接2面せん断法の改良型として図7に示す載荷装置が提案され、従来直接2面せん断法で問題となっていた載荷部のめり込みや供試体中央下部の曲げひび割れが生じにくく、測定されるせん断強度も純せん断強度に近い値が得られることが報告された。しかし、直接2面せん断法の問題点は破断面の応力分布が角柱による割裂破断面のそれと類似しており、破壊性状も割裂引張破壊のように見受けられる。そこで、直接2面せん断法において両せん断面で割裂試験を行っているものと仮定して、測定される最大せん断荷重を割裂強度に換算した値と、支承材の幅を直接2面せん断法の載荷部の幅と同一寸法とした角柱による割裂強度を比較検討した。本実験で用いた直接2面せん断載荷装置は、市販のもので、アレーンコンクリートおよびSFRCについて実験を行った。その結果を示したのが図8である。図から、換算割裂強度と角柱による割裂強度はほぼ一致しており、直接2面せん断法はせん断試験としては問題があると考えられる。

4. 結論

本解析でコンクリートへ適用した結合カモデルにより、コンクリートの引張特性についてかなり広範な解析的検討を行うことができた。

曲げ強度試験法において、載荷形式の違いによる影響はアレーンコンクリートと比べてSFRCにおいては特に重要な影響要因とはならないが、支承部拘束の影響は特にSFRCにおいて重要因子となることが予想される。

破壊靱性試験をコンクリートへ適用するにあたって

(* 東京大学教授・工博 ** 大分大学助教授・工博 *** 東京大学大学院生)

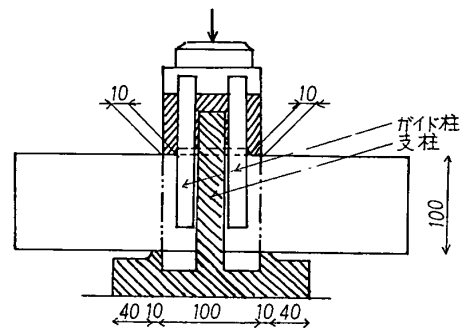


図7 改良型直接2面せん断載荷装置⁵⁾

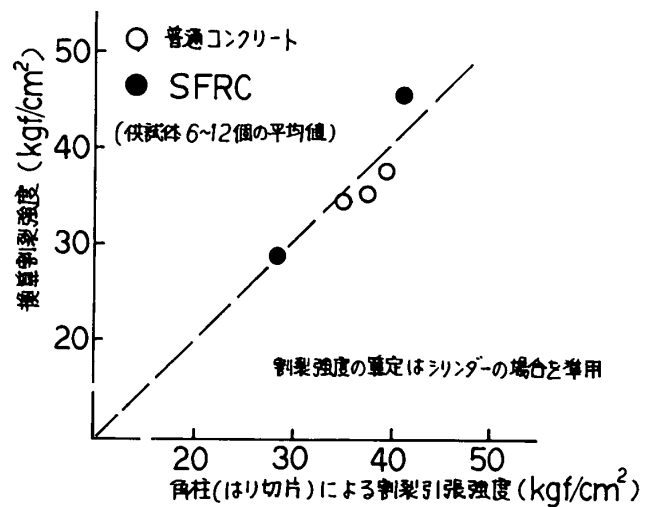


図8 直接2面せん断法による換算割裂強度と角柱による割裂強度との関係

はかなり大型の供試体を必要とするように思われる。直接2面せん断法は、破断面でせん断でなく割裂引張破壊が生じていると考えられ、せん断試験としては問題があるように思われる。

謝辞

岐阜大学土木学科の穴郷氏から直接2面せん断載荷装置を借用したことを記し、ここに厚く感謝致します。住友セメント株式会社の佐藤氏には実験にあたり御助力を受けたことをここに感謝の意を表します。最後に、解析にあたって東京大学大型計算機センターのHITAC 200Hを使用したことをここに記す。

参考文献

- 1) R.J. Torrent (大即抄訳), コンクリート材料の引張強度と供試体形状の一般的关系, コンクリート工学, Vol. 16, No. 12, Dec. 1978, pp. 38-40
- 2) C.D. Johnston, Steel Fiber Reinforced and Plain Concrete; Factors Influencing Flexural Strength Measurement, ACI Journal, March-April, 1982, pp. 131-138
- 3) 小林, 岡村, 梅山, 鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度試験法に関する実験的研究, 生産研究, 才31巻, 才2号, S. 54. 2, pp. 133-136
- 4) 前田, コンクリートの強度と破壊に関する研究, 東京大学博士論文, S53.12
- 5) 魚本, 峰松, コンクリートのせん断強度試験方法に関する基礎的研究, コンクリート工学, Vol. 19, No. 4, April, 1981, pp. 106-117