論文 高靭性セメント複合材料の圧縮破壊領域長さ

松木 雄一郎*1·渡部 憲*2·高橋 龍市*3·田口 皓也*3

要旨:本研究では、水セメント比および試験体寸法の異なるPVA短繊維を補強材として使用した、高靱性セメント複合材料の1軸圧縮試験を行い、高靱性セメント複合材料の圧縮破壊領域長さについて検討を行った。その結果、高靱性セメント複合材料の圧縮破壊領域長さは、評価方法の相違により、ある程度の誤差範囲をもって算出されるものの、この誤差範囲内(試験体高さ200mmでは±38mm, 400mmでは±28mm)において推定できる等の知見を得た。また、本研究の範囲において、各評価方法により算出された高靱性セメント 複合材料の圧縮破壊領域長さー圧縮強度関係に関する近似式が得られた。

キーワード: 高靱性セメント複合材料, 圧縮破壊領域長さ, 圧縮試験, 内部ひずみ

1. はじめに

圧縮応力下にあるコンクリートの破壊は、特定の領域 に集中して進行し、その他の領域では除荷現象が起きて いることが知られている。このような現象が、鉄筋コン クリート(以下, RCと略記)構造物全体の破壊挙動にも影 響を及ぼすため、これまでにも数多くの研究が実施され ている。例えば、中村ら^{1, 2)}やTorsakら³⁾の研究では、異 形加工したアクリルバー製角棒にひずみゲージを貼り付 けたものを試験体内部に埋設し、圧縮応力下にあるコン クリート試験体内部の局所的なひずみを測定することに より、圧縮破壊領域長さ(以下, L_Pと略記)の評価を試み ている(以下, アクリルバー法と略記)。また、伊藤ら⁴⁾ は、短繊維補強コンクリートのL_Pの評価を試みている。

ところで、最近、既存の繊維補強コンクリートをはる かに上回る性能を有する高靱性セメント複合材料(以 下、DFRCCと略記)⁵⁾が開発されている。DFRCCとは、 セメント系材料を繊維で補強した複合材料であり、曲げ 応力下における複数ひび割れ特性を示し、曲げ、引張、 圧縮破壊時の靱性が大幅に向上した材料⁵⁾である。この ような材料をRC構造物に適用しようとする場合、圧縮 応力下にあるDFRCCの破壊状況について検討しておく ことは有用なことである。

| 試験体名 | 水セメ ント比 (W/C) | 細骨材 試験体 | | 4寸法 | 繊維体積 | |
|------------------------------|---------------------------|--------------------|------|-----------|--------------------------|--|
| | | セメン ト比 (S/C) | 直径 | 高さ (h) | 混入率 (V _f) | |
| | (%) | (%) | (mm) | (mm) | (%) | |
| N-D40-200-T | 40 | 40 | | 200 | | |
| N-D40-400-T | 40 | 40 | | 400 | | |
| N-D50-200-T | 50 | 65 | 100 | 200 | 3.0 | |
| N-D50-400-T | 30 | 05 | 100 | 400 | 5.0 | |
| N-D60-200-T | 60 | 00 | | 200 | | |
| N-D60-400-T | 00 | 90 | | 400 | | |
| *1 東海大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員) | | | | | | |
| *2 東海大学 | 2 東海大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員) | | | | | |
| *3 東海大学 | 工学部建築学科 (非会員) | | | | | |

表一1 実験概要

そこで本研究では、水セメント比(W/C)および試験体 寸法の異なるDFRCC試験体を用意し、アクリルバー法 を用いた1軸圧縮試験を行い、DFRCCのL_Pについて検討 を行った。具体的には、まず、圧縮試験後の試験体破壊 状況から、圧縮強度(F_c)の相違するDFRCCのL_Pを明らか にする。次に、コンクリートのL_Pを評価する手法^{2,3)} の、DFRCCのL_P評価への適用性について明らかにす る。最後に、DFRCCのL_PとF_cの関係に関する近似式を 示すことを目指した。

2. 実験方法

2.1 実験概要

本研究では、表-1に示すDFRCCの1軸圧縮試験を 行った。細骨材は、砕砂(表乾密度: 2.69g/cm³, 吸水 率:1.13%,最大骨材寸法:5.0mm)と山砂(表乾密度: 2.57g/cm³, 吸水率: 2.75%, 最大骨材寸法: 1.2mm)を質 量比7:3で混合使用した。セメントは、普通ポルトラン ドセメント(密度: 3.16g/cm³)を用いた。使用繊維はPVA 繊維(径:0.2mm,長さ:18mm,ヤング係数:27kN/ mm², 引張強度: 975N/mm²)とし, 繊維体積混入率(V_f) を3%とした。W/Cは、40、50および60%とした。試験 体寸法は、直径を100mm、高さhを200および400mmと した。なお、hを200mmとした理由は、圧縮試験に用い られる試験体の一般的な寸法であること, また, hを 400mmとした理由は、以下の通りである。文献¹⁾から、 本研究と同程度のF。を有するコンクリートでは、Lpが 200mm前後となることがわかった。F.が同程度であれ ば、コンクリートとDFRCCのLpに極端な相違はないと 考えた。そこで、予想されるLpに対して十分な長さ(2 倍程度)となるh=400mmを採用した。アクリルバーを 埋設した試験体(以下,アクリルバー有りと略記)を各要 因1体、アクリルバーを埋設していない試験体(以下、ア



クリルバー無しと略記)を各要因3体用意した。載荷は, 2000kN耐圧試験機を使用し,2枚のテフロンシート (厚:0.1mm)の間にシリコンオイルを塗布したものを鋼 製載荷盤と試験体上下間に挿入して行った。1軸圧縮試 験の概要を図-1に示す。測定項目は,荷重,コンプ レッソメーターによる試験体中央部の縦・横ひずみ,試 験体間変位,載荷盤間変位およびアクリルバーによる試 験体内部の縦ひずみとした。各計測データは,データロ ガーを使用して取り込んだ。アクリルバーは,長さを h=200mm用では180mm, h=400mm用では380mmとし,

図-2に示す溝を設けることにより、h=200mm用では長 さ方向に6分割、h=400mm用では10分割とした。そし て、アクリルバーの各分割区間にひずみゲージを貼り付 け、防水処理後、上下端面から10mmの隙間を設け、試 験体中央部に設置し、試験体高さ方向各部位の内部ひず みを測定できるようにした。試験体は打設後2日で脱 型,試験時(材齢28日)まで標準養生した。

2.2 圧縮破壊領域長さの評価方法

本研究では、以下に示す3種類の手法により、Lpを評価した。

まず, 圧縮試験後に試験体外部に発生した, 巨視的な ひび割れ領域の長さをOLpとした(試験体全周を確認 し, 試験体の高さ方向に, ひび割れが5~6本以上入って いる領域の長さを計測)。一例として, 図-3に破壊状況 のスケッチを示す。

次に、中村らの文献²⁾に準じて、以下の手順でLpを評価した(NILp)。1)実験より得られた各部位の圧縮応力



 (σ_c) -内部ひずみ(ϵ_{ii})関係を,局所化領域と除荷領域の $\sigma_c - \epsilon_{ii}$ 関係に区別する。 F_c 以降,ひずみが増加する場合 が局所化領域(図-4中の(1)),ひずみが減少する場合が 除荷領域(図-4中の(4))の $\sigma_c - \epsilon_{ii}$ 関係である。なお筆者ら は、図-4中の(2)および(3)のような場合, F_c 以降, F_c の 50%時の ϵ_{ii} が、 F_c 時の ϵ_{ii} より大きいもの(図-4中の(2))を 局所化領域、小さいもの(図-4中の(3))を除荷領域の $\sigma_c - \epsilon_{ii}$ 関係とした。2)局所化領域と除荷領域に区別され た $\sigma_c - \epsilon_{ii}$ 関係をそれぞれ平均し、文献²⁾に示されている 式(1)および(2)を用いてNIL_Pを算出した(文献²⁾中での式 番号は、式(2)である)。

$$\varepsilon_{av} = f \cdot \varepsilon + (1 - f)\varepsilon_{u}$$
(1)

$$NIL_{p} = h \cdot t \tag{2}$$

ここに、 ϵ_{av} : 平均ひずみ(試験体全長の平均縦ひずみ)、 ϵ :局所化領域のひずみ、 ϵ_{u} :除荷領域のひずみ、f:局所化領域の試験体全長に対する容積比(断面一定の場合、NIL_p/h)であり、一定値に収束するとされる。

さらに、Torsakらの文献³⁾に準じて、以下の手順でLp を評価した(WIL_P)。1)実験で得られた各部位の $\sigma_c - \varepsilon_{Ii}$ 関係を、荷重一変位関係に変換する。2)得られた荷重一変 位関係において、載荷開始から最大荷重の30%(Torsakら の文献³⁾では、10%)まで荷重が低下した時点までの荷 重一変位曲線下の面積(**図**-5中の網掛け部分)を求め、



各部位の局所吸収エネルギー量(A_{INTi})とする。なお, A_{INTi} を算出する際,載荷開始から最大荷重の30%まで荷 重が低下した時点までの荷重-変位曲線下の面積と定め た理由は,繊維混入効果により,繊維を混入していない コンクリートやモルタルと比較して, F_c 以降, σ_c が低下 する負勾配が緩やかとなり,最大荷重の10%まで荷重が 低下した時点までの計測が困難となるためである。3) A_{INTi} の総和が,試験体全体で吸収されたエネルギー量 (A_{INT})であり, A_{INTi} が A_{INT} の15%以上を示す領域がWILp となる($\mathbf{20}-6$ を参照)。Torsakらが文献³⁾で15%と設定し た理由は、この値を用いて算出したLpと圧縮試験後に目 視観察により得られたLpが概ね同様の値を示したためで ある。そこで本研究においても、 A_{INTi} が A_{INT} の15%以上 を示す領域を、WILpとして算出した。

3. 結果と考察

3.1 各種材料特性

図-7に、hの異なる試験体より得られた、F_cおよび圧縮破壊エネルギー(以下、G_{Fc}と略記)とW/Cの関係を示 す。G_{Fc}については、文献⁶に示す手法により評価した。 なお、図-7中のF_cおよびG_{Fc}は、アクリルバー無し試験 体より得られた値を示している。図-7によれば、hの相 違に係わらず、W/Cの増加に伴いF_cおよびG_{Fc}は低下し ている。また、同-W/Cの場合、hの増加に伴い、F_cは 若干低下し、G_{Fc}は若干増加している。

3.2 圧縮応カー縦ひずみ関係

図-8に、W/Cの異なる試験体(アクリルバー無し)よ り得られた σ_c -縦ひずみ(ϵ_c)関係を、h別に示す。なお、 ϵ_c は試験体両脇に設置した変位計より得られた縦ひずみ である。また、各 σ_c - ϵ_c 関係は代表的な値である。図-8 によれば、h=200mmの結果では、F_c以降、急激に σ_c が低 下する際の負勾配は、W/Cの増加に伴い緩やかとなる傾 向にある。しかし、h=400mmの結果では、このような 傾向が、多少、不明瞭となる。また、同一W/Cの場合、 F_c以降、急激に σ_c が低下する際の負勾配は、h=200mmと 比較してh=400mmの結果が急勾配となる。これは、試 験体直径に対する高さの比率の影響^{例えば、7}と思われる。

図-9に、一例としてW/C=40%のアクリルバー有り試 験体より得られた $\sigma_c/F_c - \epsilon_i$ 関係および $\sigma_c/F_c - \epsilon_c$ 関係を 示す。なお、 ϵ_i は、各部位の ϵ_{ii} を用いて算出された、試 験体全長の縦ひずみであり、 ϵ_c は試験体両脇に設置した 変位計より得られた縦ひずみである。また、図-9中の 破線で示したものが $\sigma_c/F_c - \epsilon_i$ 関係(図-9中の(I))であ り、実線で示したものが $\sigma_c/F_c - \epsilon_c$ 関係である。図-9に よれば、hの相違に係わらず、同一試験体より得られた $\sigma_c/F_c - \epsilon_i$ 関係と $\sigma_c/F_c - \epsilon_c$ 関係は、概ね一致している。 なお、W/Cの異なるその他のアクリルバー有り試験体に おいても、同様の傾向が確認できた。今回作成したアク リルバーは、文献⁴⁰に示されている、短繊維補強コンク リートの内部ひずみを計測するために提案された形状で ある。即ち、文献⁴⁰で示されたアクリルバーの形状は、 DFRCCの内部ひずみの計測にも適用できる。



3.3 E縮破壊領域長さ

図-10に,各試験体より得られたL_P-h関係を,W/C 別に示す。なお、図-10中のOLpはアクリルバー無し試 験体の値を、OLp(A)はアクリルバー有り試験体の値を示 している。また、h=200mmでは、全ての試験体におい て試験体全長が破壊していたため、OLpおよびOLp(A)の 値は、各試験体の実測hとなっている。まず、図-10(a) によれば、hの増加に伴い、NIL_Pの値は増加している。 一方, OL_P, OL_P(A)およびWIL_Pの値は, hの増加に係わ らず, 概ね一定の値(200mm程度)を示している。OLp(A) とNIL_Pの差は、h=200mmでは79mm、h=400mmでは5mm であり、OL_P(A)とWIL_Pの差は、h=200mmでは83mm、 h=400mmでは75mmである。次に、図-10(b)によれ ば、hの増加に伴い、NILpの値は増加し、WILpの値は減 少している。一方,hの増加に伴い,OLp(A)の値は,若 干, 増加するものの(h=200mmでは200mm程度, h=400 mmでは210mm程度), OLpの値は、hの増加に係わら ず, 概ね一定の値(200mm程度)を示している。OLp(A)と NIL_Pの差は、h=200mmでは42mm、h=400mmでは12mm であり、OL_P(A)とWIL_Pの差は、h=200mmでは58mm、h= 400mmでは106mmである。さらに、図-10(c)によれ ば、hの増加に伴い、NILpの値は増加し、WILpの値は減 少している。OL_PおよびOL_P(A)の値は、hの増加に伴 い, 増加している(h=200mmでは200mm程度, h=400mm では220~240mm程度)。このことから、特に、W/Cが 60%程度になると、OL_PおよびOL_P(A)の値は200 mmを超 えるため、h=200mmの試験体では正しく評価できない 可能性がある。なお、OL_P(A)とNIL_Pの差は、h=200mm では42mm, h=400mmでは4mmであり, OL_P(A)とWIL_Pの 差は, h=200mmでは53mm, h=400mmでは125 mmであ る。

以上, OL_P(A)と, NIL_PおよびWIL_P間の差は, 1)OL_P (A)は, 試験後の最終破壊状況から計測されているこ と, 2)NIL_PおよびWIL_Pは, 2.2節に示した手法で評価さ れていること等に起因すると考えられ, 次章で詳細な検 討を行う。

4. 圧縮破壊領域長さの再評価

4.1 NIL_Pの再評価

前掲,図-10によれば、W/Cの相違に係わらず、 h=400mmにおけるNIL_Pの値は、OL_P(A)の値と比較し て、概ね同様の値を示した。しかし、h=200mmにおけ るNIL_Pの値は、OL_P(A)の値と比較して低い値となっ た。2.2節では、前掲、図-4中の(2)および(3)のような 場合、F_c以降、F_cの50%時の ε_{ii} が、F_c時の ε_{ii} より大きいも のを局所化領域、小さいものを除荷領域の σ_c - ε_{ii} 関係と 区別してNIL_Pを算出している。そこで、残留圧縮応力 (F_cに対して、残留している σ_c の割合)を50、40および 30%と変動させ、それぞれの残留圧縮応力時の ε_{ii} が、F_c 時の ε_{ii} より大きいものを局所化領域、小さいものを除荷 領域の σ_c - ε_{ii} 関係と区別してNIL_Pを算出した。

図-11に、アクリルバー有り試験体より得られた NILp-残留圧縮応力関係を示す。図-11によれば、 h=400mmにおけるNILpの値は、W/C=40および60%の場 合、残留圧縮応力の変動による大きな変化は見受けられ ないが、W/C=50%の場合、残留圧縮応力が40から30% に低下すると増加している。h=200mmにおけるNILpの 値は、残留圧縮応力の低下に伴い増加する傾向を示して おり、前掲、図-10に示したOLp(A)の値に近づいた。

ここで、図-12に、圧縮試験中に計測した、W/Cの異 なるアクリルバー有り試験体(h=400mm)の残留圧縮応 カーOL_P(A)関係を示す。なお、図-12中には、最終破 壊時のOL_P(A)の値も示してある(図-12中の灰色印)。 図-12によれば、W/Cの相違に係わらず、残留圧縮応力 の低下に伴い、OL_P(A)の値は増加しているものの、残 留圧縮応力30%以下となると、OL_P(A)の増加は鈍る(W/ C=40%)、もしくは頭打ち(W/C=50および60%)となって いる。このことから、DFRCCのOL_P(A)の値は、残留圧 縮応力30%以下となれば大きく変化しない。

以上より、NIL_Pを算出する際、W/Cおよびhの相違に 係わらず残留圧縮応力の30%時の ϵ_{ii} が、F_c時の ϵ_{ii} より大 きいものを局所化領域、小さいものを除荷領域の $\sigma_c - \epsilon_{ii}$ 関係と区別し、NIL_Pの再評価を行う。



4.2 WIL_Pの再評価

前掲,図-10によれば、W/Cおよびhの相違に係わら ず、WILpの値は、OLp(A)の値と比較して低い値を示し た。2.2節では、A_{INTi}がA_{INT}の15%以上を示す領域を WILpとして算出した。そこで、A_{INT}に対するA_{INTi}の割合 (x)を15,10,7および5%以上と変動させ、本研究で得ら れたOLp(A)の値を基に、WILpを算出した。なお、前述 の通り、残留圧縮応力30%以下となると、OLp(A)の増加 は鈍る、もしくは頭打ちとなる。そのため、2.2節と同 様に、載荷開始から最大荷重の30%まで荷重が低下した 時点までの荷重-変位曲線下の面積(図-5中の網掛け部 分)を求め、各部位のA_{INTi}とした。

図-13に、W/Cの異なるアクリルバー有り試験体より 得られたWIL_P-x関係を示す。なお、図-13中には、得 られたWIL_P-x関係に対して、直線近似した結果も示し てある。図-13によれば、W/Cの相違に係わらず、xを 低下させることで、WIL_Pの値は増加した。ここで、 図-13(a)~(c)に示す近似式にOL_P(A)を代入し、xを算 出した。その結果、W/C=40%において、h=200mmでは 6.78 %、h=400mmでは8.04 %となった。W/C=50%にお いて、h=200mmでは6.87 %、h=400mmでは5.22 %となっ た。W/C=60%において、h=200mmでは0.76 %、h=400 mmでは3.64 %となった。即ち、DFRCCのWIL_Pを算出す る際のxは、W/Cおよびhの相違により異なる。

今後、W/Cおよびhの相違が、WILpを算出する際のx に与える影響について、詳細に検討を進める必要があ る。しかし、多少大胆ではあるが、WILpを算出する際 のxを, h=400mmにおける全ての値の平均値である 5.63%とし, A_{INTi} が A_{INT} の5.63%以上を示す領域をWIL_P として, 再評価を行う。

図-14に、再評価したNIL_pおよびWIL_pを用いたL_p-h 関係を,W/C別に示す。図-14および前掲,図-10によ れば、W/C=50%における、h=400mmのOL_P(A)と再評価 したNILpの差が、再評価前の差と比較して大きくなっ た。しかし、その他の要因におけるOLp(A)と再評価し たNIL_pおよびWIL_pの差は、再評価前の差と比較して同 値もしくは小さくなった。なお,W/C=40%における, OL_P(A)と再評価したNIL_Pの差は、h=200mmでは38mm、 h= 400mmでは5mmであり、OL_P(A)と再評価したWIL_Pの 差は, h=200mmでは0mm, h=400mmでは15mmである。 W/C=50%における, OL_P(A)と再評価したNIL_Pの差は, h=200mmでは0mm, h=400mmでは28mmであり, OL_P(A) と再評価したWILpの差は、h=200mmでは0mm、h= 400mmでは6mmである。W/C=60%における, OL_P(A)と 再評価したNILpの差は、h=200mmでは0mm、h=400 mm では4mmであり、OL_P(A)と再評価したWIL_Pの差は、 h=200mmでは18mm, h=400mmでは25mmである。

以上より、DFRCCのL_Pの値は、評価方法の相違によ り、ある程度の誤差範囲をもって算出されるものの、こ の誤差範囲内(前述の差の最大値を許容範囲とすると、 h=200mmでは±38mm、h=400mmでは±28mm)において 推定できる。ただし、W/Cおよびhの相違が、WIL_Pを算 出する際のxに与える影響について、今後、詳細に検討 を進める必要がある。



図 - 15に、再評価したNIL_pおよびWIL_pを用いた L_P-F_c関係(h=400mm)を示す。ここで、h=400mmの結果 のみを取り上げる理由は、前述の通り、W/Cが60%程度 になると、OL_PおよびOL_P(A)の値は200mmを超えるた め、h=200mmの試験体では正しく評価できない可能性 があるからである。なお、図-15中には、各評価方法よ り得られたLp-F。関係に対して、累乗近似した結果も示 してある。図-15中の太曲線は、中村らの文献¹⁾で提案 されている式(3)(コンクリートに対して提案された式で あり、文献¹⁾中での式番号は、式(2)である)を用いて算出 したLp-Fc関係であり、細曲線は、伊藤らの文献4)で提 案されている式(4)(短繊維コンクリートに対して提案さ れた式であり、文献4)中での式番号は、式(5)である)を用 いて算出したLp-Fc関係である。

E縮強度 F_c (N/mm²)

図-15 圧縮破壊領域長さ-圧縮強度関係

$$L_{p} = \frac{1300}{\sqrt{F_{c}}}$$
(3)

$$L_{\rm P} = \frac{4100}{F_{\rm c}} \cdot \beta_{\rm LP} \tag{4}$$

ここに、β_LP: 試験体直径の影響を考慮する係数であ り、本研究では1.0である。

図-15によれば、いずれの評価方法で算出したLpも、 一部を除けば、式(3)から(4)の範囲内に収まっている。 DFRCCのL_P-F_c関係を累乗近似すると、図-15に示す 近似式が得られた。

5. まとめ

本研究で得られた知見を、以下にまとめる。

- 程度の誤差範囲をもって算出されるものの、この誤 差範囲内(h=200mmでは±38mm, h=400mmでは±

今後、W/Cおよびhの相違が、WILpを算出する際のx に与える影響等について, 試験項目を追加し, 詳細に検 討する必要がある。

参考文献

- 1) Nakamura, H., Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Ssismic Loads, pp.259-272, 1999.10
- 2) 平井圭, 中村光, 檜貝勇: コンクリートの圧縮破壊 領域の推定に関する実験的研究, コンクリート工学 年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.339-344, 1995
- 3) Torsak, L., Watanabe, K., Matsuo, M., Niwa, J.: Experiment al Study on Parameters in Localization of Concrete Subjected to Compression, JSCE, No.669/V-50,pp.309-321,2001.2
- 4) 伊藤始, 岩波光保, 横田弘, 岸添拓, 石川靖晃, 久 保全弘:短繊維補強コンクリートの圧縮破壊性状に 関する実験的研究, 土木学会論文集E, Vol.62, No.2, pp.341-355, 2006.5
- 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究 5) 委員会:高靱性セメント複合材料を知る・作る・使 う、高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用 研究委員会報告書,日本コンクリート工学協会, pp.128, 2002.1
- 渡部憲,大岡督尚,白井伸明,森泉和人:各種コン 6) クリートの圧縮軟化挙動, コンクリート工学年次論 文集, Vol.22, No.2, pp.493-498, 2000
- 金子佳生,三橋博三,桐越一紀,下川博之:繊維補 7) 強セメント系材料の圧縮軟化特性-繊維混入率と試 験体寸法をパラメータとした圧縮試験と数値解 析一, 日本建築学会構造系論文集, 第592号, pp.19-26, 2005.6