

二軸方向拘束力を受ける四辺単純支持 SFRC 床版の耐衝撃挙動

Impact Behavior of Laterally Confined Fiber Reinforced Concrete under Impact Loading

専修大学道短期大学 土木科 ○正会員 三上 敬司 (Takashi Mikami)

UBC Dept of Civil Eng.

Piti Sukontasukkul

UBC Dept of Civil Eng.

Sidney Mindess

UBC Dept of Civil Eng.

Nemkumar Banthia

1. まえがき

プレーンコンクリート材料は非等質であるために脆性的であり、特に引張力に対して脆弱でありかつ靱性に乏しいことが上げられる。このことから、プレーンコンクリートの靱性を向上させるために、プレーンコンクリート内にファイバーを混入することによって耐久性が改善されることが知られている。しかし、FRC 梁および床版の静的挙動に関する研究は多く行われている。しかし、動的挙動に関する研究は静的問題ほど多くの研究が成されていないようである。衝撃問題に関して、Mindess, Banthia ら^{1),2),3)}は数多くの FRC 梁

や床版の重錘落下衝撃実験を行い、高強度コンクリート梁および普通強度のプレーンコンクリート梁と FRC 梁を衝撃力の評価および破壊エネルギーについて比較検討している。Gupta ら⁴⁾は多種類のファイバーにおける吹付け FRC 梁および床版の靱性、吸収エネルギーに関して、静的な場合と衝撃的荷重の場合とを比較検討して、吹付け FRC 梁および床版は衝撃荷重の場合の方がより良く改善されることを明らかにしている。Piti ら^{5),6)}は四辺単純支持されたプレーンコンクリートを含めた 4 種類の SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete) 矩形床版について静的および重錘落下衝撃実験を行い、床版の破壊モード、破壊エネルギー等について両者を比較検討している。外山、梶谷ら⁷⁾は SFRC 版における静的試験、重錘落下による繰返し試験を行い、破壊形式の特徴や床版の貫通エネルギーについて明らかにしている。しかし、いずれの研究における境界条件は単純支持で、拘束された FRC 床版の耐衝撃挙動についてはほとんど見られないようである。

そこで、本研究では重錘落下衝撃力を受ける二軸方向から拘束された四辺単純支持 SFRC 矩形床版の耐衝撃性挙動に対して、三種類 (Hooked END, Crimped, Flattened END) の Steel Fiber の混入率が及ぼす影響について衝撃実験を行ってプレーンコンクリートと比較検討した。

2. 実験の概要

本実験は写真-1 に示したように、ブリティッシュ・コロンビア大学土木工学科に設置されている大型衝撃実験装置を用いて行った。衝撃力は質量 578kg の重錘を所定の高さから自由落下させることによって発生させている。なお、重錘の先端 (Tup) の形状は平底、その半径が 50mm である。本実験は重錘の落下高さを $H=250$ mm として行った。試験体は形状寸法 $400 \times 400 \times 75$ mm で、寸法 300×300 mm の鋼製支持台上に単純支持され、さらに写真-2 に示したように供試体は油圧ジャッキによって二軸方向から鋼製版の寸法 $400 \times 75 \times 50$ mm で挟まれ 5MPa の拘束力を受けている。また、Tup 内には重錘が受ける衝撃力を測定するために、またジャッキ内には供試体への拘束力を測定するためにロードセルが埋め込まれている。床版中央裏面には床版載荷点直下の変位と床版の慣性力を求めるために加速度計が取り付けられている。実

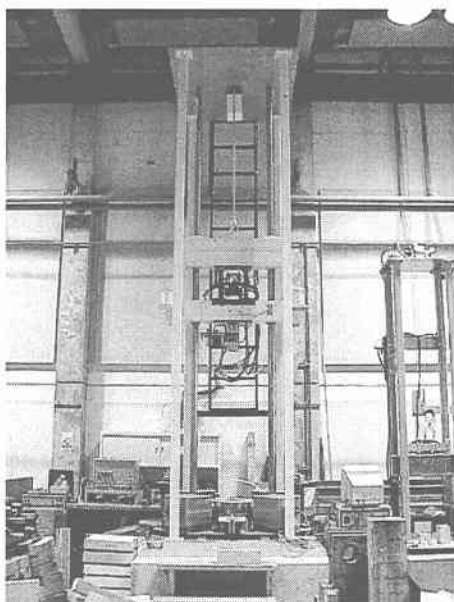


写真-1 UBC に設置されている大型衝撃実験装置

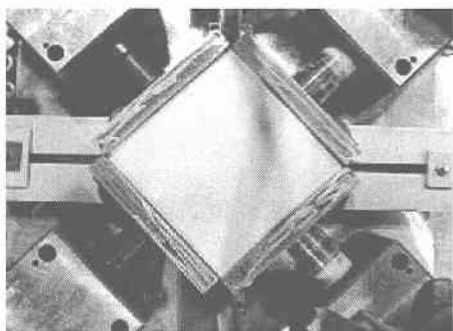
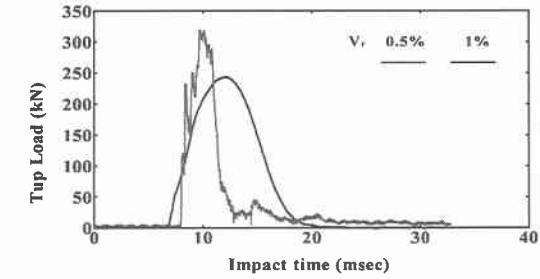


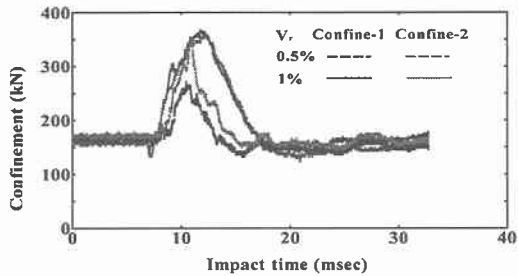
写真-2 二軸方向から 5MPa で拘束力を受ける四辺単純支持 FRC 床版

表-1 ファイバーの形状および寸法

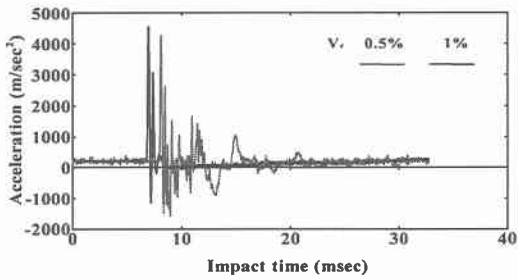
Type	Length (mm)	Cross-section	
		Shape	Dia.(mm)
Hooked End	30	circular	d=0.50
Crimped	35	Rectangular	0.8×3.0
Flattened End	30	circular	d=0.75



(a) Tup が受ける衝撃力の時刻歴応答



(b) 拘束力の時刻歴応答



(c) 床版裏面における加速度の時刻歴応答

図-1 $V_f=0.5,1.0\%$ における各時刻歴応答(Crimped)

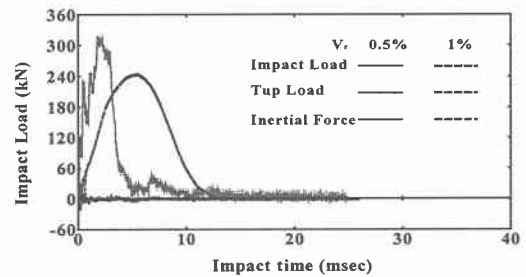
験データはデータ処理システムに基づいた高速コンピュータによって得られている。表-1は試験体名を示している。これらの試験体名はPLがプレーンを、HEがHooked ENDを、FLがFlattened ENDを、CPがCrimpedを意味している。例えば、5HE25EB51の5はファイバーの混入率、25は落下高さ250mm、EBはBiaxial、5は拘束力5MPa、末尾1は試験体の順序番号を表している。なお、コンクリートの28日圧縮強度はプレーンコンクリートに対して44.5MPa、FRCに対して44.1MPaになるように設計されている。

3. 実験結果

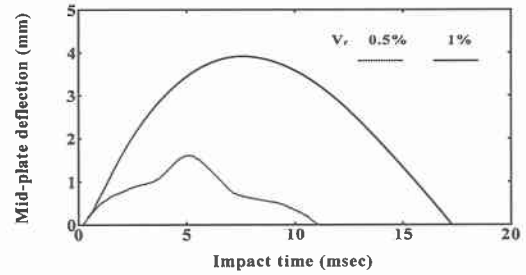
図-1(a)及び図-2(a)はファイバー混入率0.5、1%における衝撃力の時刻歴応答を示している。文献1)～3)に従って、衝撃力 P はTupにセットされているロードセルから得られた衝撃力 P_t (図-1(a))から

表-2 供試体一覧

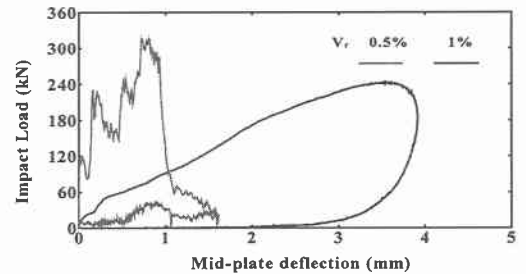
Specimen Designation	Percent volume fraction of fibers(%)	Dropped Height (mm)	Confinement Type and Stresses (MPa)
PL25EB51	0	250	5
5HE25EB51	0.5	250	5
1HE25EB51	1.0	250	5
5CP25EB51	0.5	250	5
1CP25EB51	1.0	250	5
5FL25EB51	0.5	250	5
1FL25EB51	1.0	250	5



(a) 各衝撃力の時刻歴応答



(b) 床版裏面中央たわみの時刻歴応答



(c) 衝撃荷重と床版中央たわみとの関係

図-2 $V_f=0.5,1.0\%$ における各時刻歴応答 (Crimped)

床版の慣性力 P_i (図-2(a))を差し引いて次式のように求めている。

$$P(t) = P_t(t) - P_i(t) \quad (1)$$

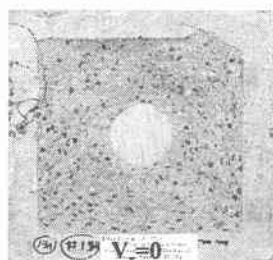
i) 押し抜きせん断型破壊における床版の慣性力

$$P_i(t) = m_b \ddot{u}_0(t) \quad (2)$$

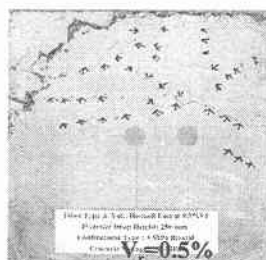
ii) 弾性から弾塑性領域における床版の慣性力

$$P_i(t) = \rho \cdot h \cdot \ddot{u}_0(t) \frac{l^2}{4} \quad (3)$$

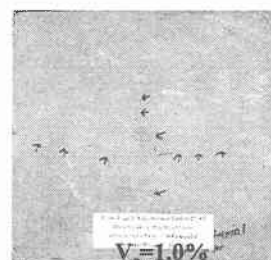
ここで、 ρ : FRCの密度、 h : 床版の高さ、 $\ddot{u}_0(t)$:



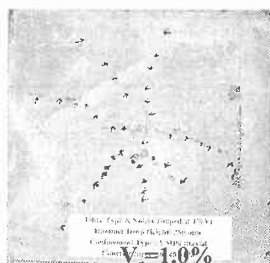
(a) Plain の場合



(b) Hooked END の場合



(c) Crimped の場合



(d) Flattened END の場合

写真 - 3 ファイバー混入率 $V_f=0.5\%$, 1% における床版裏面のひび割れおよび剥離状況

表 - 3 最大衝撃力, 最大慣性力および吸収エネルギー

Categories	Measured Peak load (kN)	Inertial load (kN)	Energy Absorption (J)
PL25EB5	255	21	800
5HE25EB5	290	21	1100
1HE25EB5	319	18	440
5CP25EB5	315	26	209
1CP25EB5	243	31	547
5FE25EB5	321	21	322
1FE25EB5	301	19	17

床版裏面に設置された加速度計から得られた加速度

図 - 1 (b), (c)はファイバー混入率 $V_f=0.5\%$, 1% における床版に作用する拘束力及び裏面中央の加速度の時刻歴応答波形を示している。(b)図において、 0.5% の場合における拘束力波形は2軸方向のバランスがやや崩れており、Confinement-1の拘束力では最大260kN、Confinement-2の場合では350kNの拘束力が作用していることがわかる。この相違はTup底面形状が平底のために重錘が床版と衝突する際に若干傾いたものと考えられる。一方、 1% の場合は2軸方向共に拘束力がほぼ一致しており、また 0.5% の場合と比較して大きな拘束力を受けていることがわかる。このことは鉛直方向から衝撃力を受け 1% の場合の床版が横方向に等方的に広がることを意味している。(c)図において、 0.5% の場合の最大加速度は約4000m/sec²、 1% の場合には約4300m/sec²となり 0.5% の場合に比べてやや大きな値を示している。図 - 2 (a)において、 0.5% の場合における最大衝撃力は315kN、 1.0% の場合では243kNとなり、その慣性力はそれぞれ約26kN、31kNとなる。最大衝撃力に達する時間は、 0.5% の場合では

1.8msecで、 1% の場合では5.3msecとなり、衝撃作用時間は 0.5% の場合では約10msecで、 1% の場合では約15msecとなっている。このことから、 1% の場合は 0.5% の場合に比べて、衝撃力が低く、最大衝撃力に達する時間および衝撃作用時間が短いことから、緩衝性が高いことがわかる。(b)図の床版中央たわみは図 - 1(c)の加速度を台形則より二重積分して求めている。両者を比較すると、 0.5% の場合における最大たわみは約1.6mm、 1% の場合では3.9mmとなり 0.5% の場合より約3倍大きい値を示し、また 0.5% の場合における作用時間は約11msec、 1% の場合では17msecとなり、 0.5% の場合より1.5倍長い値を示している。(c)図は衝撃荷重と床版中央たわみとの関係を示している。 0.5% の場合では 1% の場合に比べて衝撃荷重はやや大きい、たわみは 1% の場合より1/2倍小さい値を示しており、(c)図および後述する表 - 3より 1% の場合の方が 0.5% の場合より2倍以上吸収エネルギーが大きい値を示している。また、 1% の場合の方が 0.5% の場合に比べて、床版の損傷度が小さくかつほぼ弾性的な挙動を示していることが考えられる。

写真 - 3はファイバー混入率 $V_f=0.5\%$, 1% における床版裏面のひび割れおよび剥離状況を示している。Plainの場合は押し抜きせん断で裏面コンクリート片がコーン状に抜け落ちた。Hooked ENDの場合は 0.5% では床版上面左隅斜め(支持部付近)にやや大きなひび割れおよび剥離が生じ、上面中央付近から上方に放射状にひび割れが発生し、一方、 1% ではほぼ中央部に数本のひび割れが発生している程度の損傷度であることがわかる。 0.5% の場合は曲げおよび押し抜きせん断による影響を受けているものの、弾塑性的状態を示している。 1% の場合は曲げによる影響を受けて

いるもののほぼ弾性的状態を保持しているものと考えられる。Crimped の場合は 0.5%では支持部エッジに沿ってひび割れおよび剥離が生じていることから、曲げよりもせん断力による影響が大きいものと考えられる。1%の場合は床版ほぼ中央から放射状にひび割れが発生し、さらに支持部エッジに沿って僅かながらひび割れが発生していることから、この場合は押し抜きせん断よりも曲げの影響を受けているものと思われる。Flattened END の場合は曲げの影響によって床版中央から発生したひび割れが確認できる。一方、1%の場合の床版は若干ひび割れが確認できるが、ほぼ弾性的状態を保持しているものと考えられる。以上のことから、床版は Plain の場合よりファイバーを混入した FRC 床版の方が耐衝撃性に優れており、特に $V_f=1\%$ における Hooked End および Flattened END が混入した FRC 床版が耐衝撃性に優れていることがわかる。

表-3 は各床版における最大衝撃荷重および床版の最大慣性力を、衝撃荷重と床版中央たわみの関係より数値積分して求めた吸収エネルギーを示している。PL25EB5 の場合における最大衝撃力は 1CP25EB5 の場合とほぼ等しく、その他の床版よりはやや小さな値を示している。このことは Plain の場合では押し抜きせん断破壊を生じ、コンクリート片が抜けることから他に比べて最大衝撃力が小さな値を示しているものと考えられる。最大衝撃荷重に対する慣性力は 8%程度である。5HE25EB5 の場合における最大衝撃力は 290kN、1HE25EB5 の場合は 319kN となり、ファイバー混入率が大きくなることによって衝撃力がやや大きな値を示していることがわかる。しかし、Crimped および Flattened END の場合における最大衝撃力ではファイバー混入率が大きくなると Hooked END の場合と異なり逆にやや小さな値を示していることがわかる。一方、5CP25EB5 と 1CP25EB5 以外における慣性力はほぼ 20kN 前後の値を示しており、最大衝撃力に対する慣性力の比率は 10%前後の値を示していることがわかる。吸収エネルギーに関しては、Plain, Hooked End の場合が他の FRC 床版に比べて大きな値を示している。Crimped の場合は 0.5%の吸収エネルギーよりも 1%の場合の方が大きい値を示している。このことは高い混入率の Crimped の場合では他の床版に比べてやや低め衝撃力を示しているものの、床版中央のたわみがほぼ弾性状態を保持しながらやや大きな値を示しているためと考えられる。一方、1FE25EB5 の場合における吸収エネルギーは Crimped の場合とは逆に 0.5%の場合よりも極端に小さい値を示している。このことは前述したように 1FE25EB5 の場合では床版裏面のひび割れ状況から推測するとこの床版はほぼ完全な弾性状態を保持しているものと考えられる。

4. あとがき

本研究では Plain コンクリート床版も含め 4 種類の FRC 床版を作製し、5Mpa の拘束力を受ける単純支持された FRC 床版への重錘落下衝撃実験を行い、ファイバーの有無やファイバーの混入率による耐衝撃挙動

への影響に関して検討を行った。その結果を以下に示すと、

- 1) 本実験で求めた衝撃力は Tup に作用する衝撃力から床版裏面における加速度より求めた慣性力を引いた式(1)を求めた。
- 2) FRC 床版は Plain コンクリート床版に比べて靱性および耐久性を優れていることがわかった。
- 3) 高い混入率の FRC 床版は低い混入率の場合に比べて耐衝撃性が優れていることがわかった。
- 4) 最大衝撃力および慣性力は、Crimped の場合以外ファイバー混入率による影響がそれ程受けていないことがわかった。
- 5) 床版裏面のひび割れ状況および吸収エネルギーから耐衝撃性を検討すると、3)の場合と同様なことが言え、特に Hooked END および Flattened END 床版は優れているものと考えられる。

参考文献

- 1) Banthia,N.,Mindess,S.,Bentur,A.Pigeon,M.:”Impact Testing of Concrete Using a Drop-Weight Impact Machine, Experimental Mechanics 29(2),pp.63-69, 1989.
- 2) Banthia,N.,”Impact Resistance of Concrete”,Ph.D. Thesis, University of British Columbia,1987
- 3) Sindney,M., Banthia,N.,and Yan,C. “The Fracture Toughness Concrete under Impact Loadings”, Cement and Concrete Research, Vol.17, pp.231-241, 1987.
- 4) Gupta,P., Banthia,N.,and Yan,C. :”Fiber Reinforced Wet-Mix Shotcrete under Impact”, ASCE,1999.
- 5) Sukontasukkul, P., Mindess, S. and Banthia,N.:”Fiber Reinforced Concrete Plates under Impact Loading”, 2nd Asia-Pacific Specialty Conference on Fibre Reinforced Concrete, pp.189-196, Singapore, 1999.
- 6) Sukontasukkul, P., Mindess, S.:”The Fracture of Fiber Reinforced Concrete Plates under Impact Loading”, Construction Materials-Theory and Application, Hans-Wolf Reinhardt zum 60.Geburtstag, pp.191-200, 1999.
- 7) 外山正修, 榎谷浩, 西本耕一郎, 山本満明 :SFRC 版の衝撃破壊と耐衝撃性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1799-1807, 2000 年 3 月.