

四辺単純支持された鋼繊維補強コンクリート板の衝撃挙動

Impact Behavior of Simply Steel Fiber Reinforced Concrete Plate

専修大学北海道短期大学土木科 ○ 正員 三上 敬司 (Takashi Mikami)

King Mongkut Institute of Technology Dpt. Civil Eng. Piti Sukontasukkul

University of British Columbia Dpt. Civil Eng. Sidney Mindess

University of British Columbia Dpt. 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、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、このことは耐衝撃挙動に対しても同様なことが言われている。これに対して、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、そのコンクリートは静的にも動的にも靱性を改善させることができる。

繊維補強コンクリート梁の衝撃問題に関する研究は、Banthia らが重錘落下衝撃実験を行い、普通強度や高強度の場合のプレーンコンクリート、鉄筋コンクリート、ポリプレーン繊維補強コンクリート梁の破壊に対する靱性や吸収エネルギーについて、普通強度、高強度の場合のコンクリートと鋼繊維補強コンクリート梁の衝撃挙動について検討した^{1)~3)}。また、Mindess らは低速度衝撃力を受けるプレーンと繊維補強コンクリート円板の貫入について落下高さ、コンクリート強度およびファイバーが及ぼす影響を検討した⁴⁾。Mindess, Sukontasukkul らは重錘落下衝撃を受ける繊維補強コンクリート梁に4種類のV字切り欠きがある場合の破壊挙動について検討した⁵⁾。繊維補強コンクリート板に関する研究は、Mindess, Sukontasukkul が重錘落下衝撃による単純支持された鋼繊維補強コンクリート矩形板の破壊挙動について⁶⁾、また二軸方向周辺拘束力を受ける場合の単純支持された鋼繊維補強コンクリート矩形板の衝撃破壊挙動について検討した⁷⁾。外山、榊谷らはSFRC板に対し静的試験ならびに重錘落下による繰り返し衝撃実験を行い、破壊形式の特徴やスラブの貫通エネルギーについて明らかにし、その簡易な評価法を示した⁸⁾。Mindessや著者らは二軸方向から周辺拘束された四辺単純支持SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete) 矩形板の耐衝撃性挙動に落下高さおよび三種類 (Hooked END, Crimped, Flattened END) の鋼繊維、繊維混入率 V_f が及ぼす影響に関する実験的研究を行った^{9)~11)}。さらに、周辺拘束力条件 (周辺拘束力を受けない場合、一軸や二軸方向周辺拘束力を受ける場合)、鋼繊維の種類、繊維混入率による相違が鋼繊維補強コンクリート矩形板の衝撃破壊挙動に及ぼす影響についても検討した¹²⁾。しかし、エネルギー論の観点から十分に検討されておらず、特に単純支持されたSFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete) 矩形板の破壊エネルギーに着目しても肝要であると思われる。

これより、本研究では重錘落下衝撃力を受ける四辺単純支持SFRC矩形板の衝撃挙動に対して、三種類 (Hooked END, Crimped, Flattened END) の鋼繊維が及ぼす影響について静的および衝撃実験を行い、主として各種FRC板の

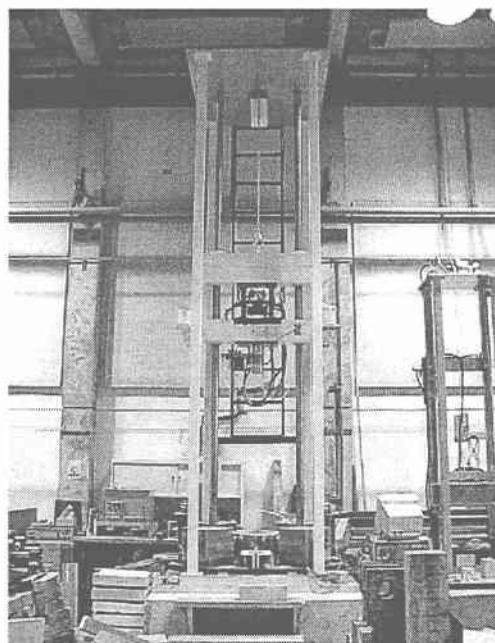


写真-1 大型衝撃実験装置

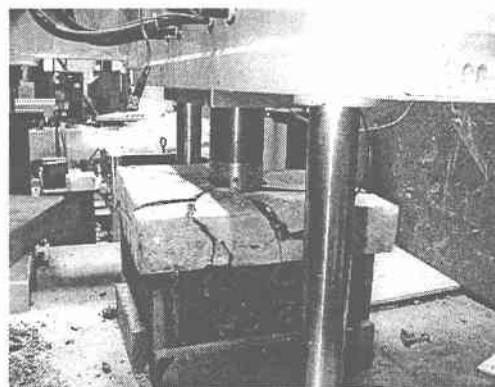


写真-2 四辺単純支持 SFRC 床板

表-1 3種類の鋼繊維の寸法および形状

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

表-2 供試体名一覧

Specimen Designation	Fiber Type	Percent volume fraction of fibers V_f (%)	Drop Height (mm)
PL0	Plain	0	0
5HE0	Hooked End	0.5	0
5CP0	Crimped	0.5	0
5FL0	Flattened End	0.5	0
PL250	Plain	0	250
PL500	Plain	0	500
5HE250	Hooked End	0.5	250
5HE500	Hooked End	0.5	500
1HE250	Hooked End	1.0	250
1HE500	Hooked End	1.0	500
5CP250	Crimped	0.5	250
5CP500	Crimped	0.5	500
1CP500	Crimped	1.0	500
5FE250	Flattened End	0.5	250
5FE500	Flattened End	0.5	500
1FE250	Flattened End	1.0	250
1FE500	Flattened End	1.0	500

破壊エネルギーについて Plain 板と比較検討した。

2. 実験の概要

静的実験はブリティッシュ・コロンビア大学土木工学科に設置されている直径 100mm の平底円柱形状の載荷版をもつ最大容量が 1781kN の万能試験機によって行なわれた。一方、衝撃実験は写真-1 に示したように大型衝撃実験装置を用いて行なわれた。衝撃力は質量 578kg の重錘を落下高さ $H=250, 500\text{mm}$ 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)の形状は平底でその直径が 100mm の円形である。試験体は形状寸法 $400 \times 400 \times 75\text{mm}$ で、写真-2 に示したように寸法 $300 \times 300\text{mm}$ の鋼製支持台上に単純支持されている。また、重錘が受ける衝撃力は Tup 内に埋め込まれているロードセルによって測定されている。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。両実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 がプレーンコンクリートを、HE が Hooked END を、FL が Flattened END を、CP が Crimped を、5, 1 は繊維混入率 $V_f=0.5, 1\%$ を、静的載荷の場合は 0 を、250, 500 は各重錘の落下高さ 250, 500mm を意味している。コンクリートの 28 日圧縮強度はいずれの試験体も 40MPa になるように設計されている。

3. 実験結果

3.1 曲げ衝撃力および慣性力の評価

曲げ衝撃力 P_b の評価式は参考文献1)~4)より Tup のロードセルから得られた衝撃力 P_i から板の慣性力 P_i を差し引いた式となり、また板の慣性力 P_i の評価式は板の破壊モード

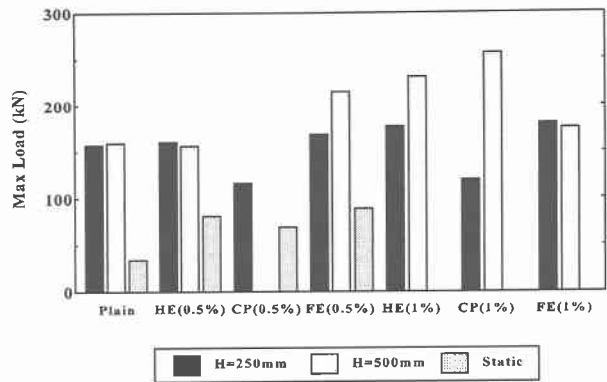


図-1 $V_f=0.5, 1\%$ 、静的、 $H=250, 500\text{mm}$ の場合の各種 SFRC 板が受ける最大荷重

またはひび割れ状況から、板中央で得られた加速度 $\ddot{u}_0(t)$ より板の加速度分布を仮定して次式のように示される。

$$P_b(t) = P_i(t) - P_i(t) \quad (1)$$

$$P_i(t) = \frac{320}{243} \rho h \ddot{u}_0(t) l_d^2 \quad (2)$$

ここで、 l_d : 純スパン長の斜め方向長さ/2, h : 板の厚さ

3.2 曲げ衝撃力

図-1 は繊維混入率 $V_f=0.5, 1\%$ における各種 SFRC 板が静的荷重を、重錘の落下高さ $H=250, 500\text{mm}$ における最大曲げ衝撃荷重を示している。なお、 $V_f=1\%$ における静的実験データと $V_f=0.5\%$, $H=500\text{mm}$ における CP の衝撃実験データは得られなかった。

静的実験の最大荷重と最大衝撃荷重と比較して、Plain の場合の最大荷重は 34kN となり約 1/3 以下、HE の場合は 81kN となり 1/2 強、CP の場合も 69kN となり 1/2 強、FE の場合は 89kN となり約 1/2 倍以下を示している。このことから、静的載荷の場合の各最大荷重は各 FRC の最大衝撃荷重よりかなり低い値を示していることがわかる。繊維混入率 $V_f=0.5\%$ において、Plain と SFRC 板の場合とを比較すると両落下高さにおける CP の場合では Plain の場合よりやや低い値を示している。それ以外の SFRC 板の場合はやや同等かまたはそれ以上の値を示している。同程度の位置エネルギーにおける SFRC 板の場合は繊維混入率の増加に比して最大衝撃荷重も増加傾向にあることがわかる。また、両落下高さを比較すると、Plain, HE(0.5%) および FE(1%) の場合は同程度でそれ以外の最大衝撃荷重は両者の差が顕著に現れていることがわかる。

3.3 破壊エネルギー

破壊エネルギー E_{ab} は次式で表わされる。

$$E_{ab}(t) = \int P_b(t) du_0 \quad (3)$$

ところで、 u_0 : 板中心変位

図-2(a)~(d)および図-3(a)~(d)にはそれぞれ $H=250\text{mm}$, 500mm における各床板における重錘衝撃力(静的荷重)と床版中央変位との関係を示している。なお、各 Plain では静的載荷の場合を破線で、衝撃荷重の場合を実線で、SFRC 板では静的載荷の場合を破線で、 $V_f=0.5$ の場合を実線で、1% の場合を 1 点鎖線で示している。

図-2 において、Plain における静的載荷の場合では荷

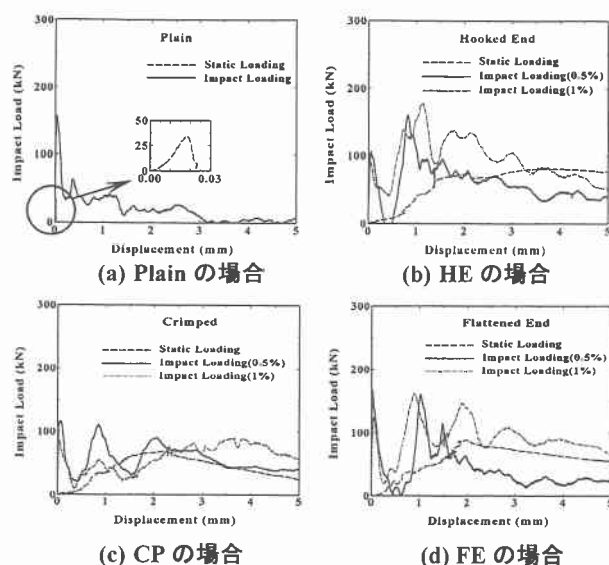


図-2 各床板における衝撃荷重(静的荷重)と変位との関係(H=250mm)

重および変位ともに極微小であることから、瞬間的に脆性的な曲げ破壊を生じ、衝撃荷重の場合でも静的載荷と同様に脆性的な曲げ破壊を生じるものの、その最大荷重および変位はそれぞれ 157kN、3.5mm となり静的載荷に比べるといずれも相当大きな値を示している。図 (b) の静的載荷の場合では放物線的で滑らかな波形を、衝撃の場合では多くのピーク点を持つ波形を示している。この現象は鋼繊維のブリッジングやアンカー効果によって強度復元が生じるためにピーク点が多く現れていることが推察される。特に、 $V_f=1\%$ の場合の衝撃荷重では 0.5% の場合に比べて変位 1mm 以降で大きくなっていることがわかる。これは、鋼繊維の増加に伴うブリッジング効果等がより衝撃荷重に対して有効に作用しているものと思われる。このことは、図 (c)、(d) における CP および FE の場合でも同様な傾向を示している。

H=500mm において、図-3(a)の Plain では H=250mm の静的載荷および衝撃荷重における挙動とほぼ同様な挙動を示しているが、この場合は H=250mm に比べて耐衝撃性が低下していることがわかる。図(b)の HE の最大荷重は H=250mm の場合と比較してそれ程大差がないものの、それらのピーク点の数は減少していることがわかる。このことは、H=500mm における位置エネルギーが H=250mm の場合に比べて 2 倍大きいことから、それに比して SFRC 板の損傷度も大きいことがわかる。また、繊維混入率の相違による影響は H=250mm の場合に比して変位 1mm 以降それほど顕著には現れていないことがわかる。なお、CP の場合では $V_f=0.5\%$ の場合の実験データがないので繊維混入率による影響については検討できなかった。 $V_f=1\%$ における両落下高さを比較すると、H=250mm における衝撃荷重のピーク点の数は概ね 3 箇所発生しかつ変位 5mm での衝撃荷重も 60

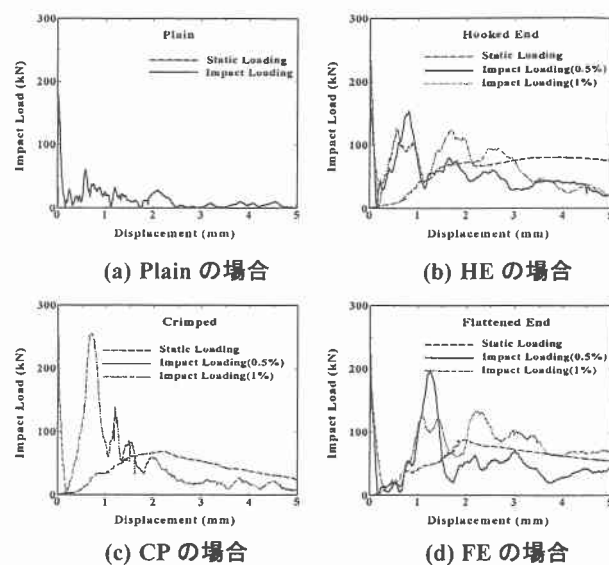


図-3 各床板における衝撃荷重(静的荷重)と変位との関係(H=500mm)

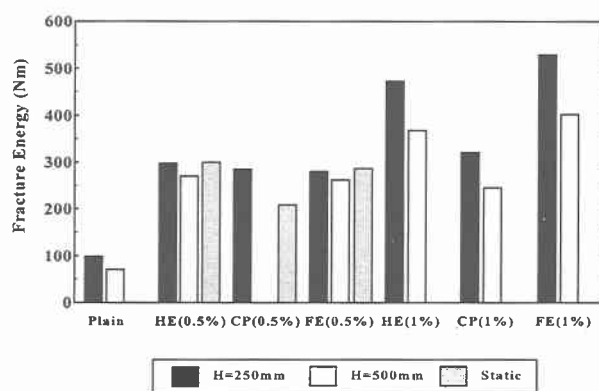


図-4 $V_f=0.5\%, 1\%$ 、静的、H=250, 500mm の場合の各種 SFRC 板の破壊エネルギー

kN 前後の値を示していることから、繊維混入率の相違による影響が H=250mm に比較してやや少ない。一方、H=500mm における衝撃荷重 ($V_f=1\%$) では変位が 1mm 以下で卓越した 2 つのピーク点が生じ、その後急激に減少し変位 5mm ではほぼゼロに近似している。このことから、CP における H=500mm の場合では H=250mm の場合(図-2(c))に比べて位置エネルギーが 2 倍大きいことから、 $V_f=1\%$ では変位 1mm までブリッジング効果等が現れ、その後はそれらの効果が薄れ急激に耐衝撃性が低下していることがわかる。図(d)における FE の場合 ($V_f=0.5\%$) では変位が約 1.5mm 以降で衝撃荷重が小さくピーク点の数も若干減少している。一方、 $V_f=1\%$ では変位 1mm 以降でも衝撃荷重がそれ程低下していないことがわかる。

以上より、H=250mm および 500mm の SFRC 板はいずれの場合も曲げ破壊を生じ、それらの最大衝撃力は繊維混入率の増加に伴ってその影響を顕著に受けており、特に H=250mm の場合の方が H=500mm に比べてブリッジング、

延性、強度復元効果が現われていることがわかった。

図-4 には(3)式を用いて、前述した各 FRC 床板の重錘衝撃力(静的荷重)と床板中央変位との関係から変位 5mm まで数値的に積分して求めた破壊エネルギーを示している。

Plain における静的載荷では前述したように瞬時に脆性的な曲げ破壊となることから、破壊エネルギーは僅かな値を示している。Plain における両落下高さの場合はいずれも 100Nm 以下で、両者を比較すると H=500mm の方が小さな破壊エネルギーを示していることがわかる。このことは、Plain の場合では H=250mm に比べて H=500mm での位置エネルギーの方が FRC 板のエネルギー損失が大きいためと思われる。V_f=0.5%における HE の破壊エネルギーは静的載荷の場合と比較するとほぼ等しく、H=500mm の場合と比較するとやや大きいことがわかる。また、HE の破壊エネルギーはそれぞれの Plain の場合に比べて約 2.5 倍以上大きいことがわかる。V_f=0.5%における CP の破壊エネルギーは静的載荷の場合と比較するとやや大きめ値を示し、HE の場合とほぼ等しいことがわかる。なお H=500mm の場合のデータはない。各 FE の破壊エネルギーは各 HE の場合とほぼ等しいことがわかる。一方、V_f=1%における各 FRC 板の場合は各 V_f=0.5%の場合に比べて CP の場合では若干大きい程度であるが、HE と FE の場合は約 1.5、2 倍の破壊エネルギーを示していることがわかる。V_f=1%における両落下高さを比較して、H=250mm の方が 1.1~1.3 倍大きい、これは V_f=0.5%の場合と同様な傾向を示している。

以上より、Plain の破壊エネルギーは SFRC の場合と比較して約 1/3 以下と小さく、特に静的載荷の場合は極端に小さいことがわかった。静的載荷における SFRC の場合は CP の場合以外 H=250mm の場合とほぼ等しいことがわかった。SFRC 板の場合は繊維混入率が多くなると破壊エネルギーが向上する。特に、H=250mm の場合は H=500mm の場合に比べてその傾向が顕著であることがわかった。

4. あとがき

本研究は重錘落下衝撃力を受ける四辺単純支持 SFRC 矩形板の衝撃挙動に対して、三種類(Hooked END, Crimped, Flattened END)の鋼繊維が及ぼす影響について静的および衝撃実験を行い、主として各種 FRC 板の破壊エネルギーについて Plain 板と比較検討を行った。

その結果を以下に示すと

- 1) SFRC 板の衝撃挙動は Plain の場合と異なった挙動を示していることがわかった。SFRC 板の荷重と変位曲線は多くのピーク点が生じ、これは SFRC 板の主な特徴であることがわかった。
- 2) SFRC 板は Plain 板に比較して破壊エネルギー(吸収エネルギー)が大きいことがわかった。

3) SFRC 板の場合は繊維混入率が多くなると破壊エネルギーが向上する。特に、H=250mm の場合は H=500mm の場合に比べてその傾向が顕著であることがわかった。

4) 破壊エネルギーより、SFRC 板の耐衝撃性は鋼繊維 Hooked End および Flattened End が Crimped より優れていることがわかった。

5. 参考文献

- 1) Banthia N., Mindess S., Bentur S. Impact behavior of concrete beams, *Material and Structural/Materials et constructions*, Vol.20, pp.293-302, 1987.
- 2) Banthia N.: Impact Resistance of Concrete, Ph.D. Thesis, University of British Columbia, 1987.
- 3) Banthia N., Mindess S., Bentur S., Pigeon M.: Impact testing of concrete using a drop-weight impact machine, *Experimental Mechanics*, pp.63-69, 1988.
- 4) Mindess S., B Yan C.: Perforation of plain fibre reinforced concretes subjected to low-velocity impact loading, *Cement and Concrete Composites*, Vol.23, pp. 83-92, 1993.
- 5) Sukontasukkul P., Mindess S., Banthia N.: Fracture of fiber reinforced concrete notched beams under impact loading, *RILEM Symposium on Fiber-Reinforced Concrete (FRC)*, Lyon, France, pp.1-9, 2000.
- 6) Sukontasukkul P., Mindess S., Banthia N.: Fiber reinforced concrete plates under impact loading, *2nd Asia-Pacific Specialty Conference on Fibre Reinforced Concrete*, Singapore, pp.189-196, 1999.
- 7) Sukontasukkul P., Mindess S., Banthia N.: Fiber reinforced concrete plates under impact loading, *Construction Materials-Theory and Application*, Hans-Wolf Reinhardt zum 60, Geburtstag, Stuttgart, Germany, pp.191-200, 1999.
- 8) 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.
- 9) Sukontasukkul P., Mindess S., Banthia N., Mikami T.: Fracture of laterally confined fibre reinforced concrete under impact loading, *Concrete under Severe Condition*, Vancouver, Canada, pp.746-753, 2001.
- 10) 三上敬司, Sukontasukkul P., Mindess S., Banthia N.: 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, *土木学会北海道支部論文集*, Vol.57, pp.2-5, 2001.
- 11) 三上敬司, Sukontasukkul P., Mindess S., Banthia N.: 拘束力が SFRC 版の耐衝撃挙動に及ぼす影響, 第 56 回年次学術講演会講演概要集, Vol.56, pp.139-140, 2001.
- 12) Sukontasukkul P., Mindess S., Banthia N., Takashi Mikami: Impact Resistance of Laterally Confined Fibre Reinforced Concrete Plates, *RILEM*, 2001.