

周辺拘束力を受ける繊維補強コンクリート板の衝撃挙動

Impact Behavior of Laterally Confined 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)
University of British Columbia 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韌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韌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韌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、梶谷らは 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てきた^{9)~11)}。さらに、周辺拘束を受けない場合、一軸や二軸方向周辺拘束力を受ける場合の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拘束力の有無および鋼繊維の種類による FRC 板の破壊状況、最大衝撃力や慣性力の相違、また繊維混入率、周辺拘束力条件による影響による検討は勿論のこと、エネルギーの観点から重錘によるエネルギー損失および FRC 板の吸収エネルギーも含めた板の耐衝撃挙動について検討することも重要であるものと考えられる。

そこで、本研究では拘束力を受けない場合、一軸または二軸方向から拘束力を受ける場合、これらの周辺拘束条件、繊維

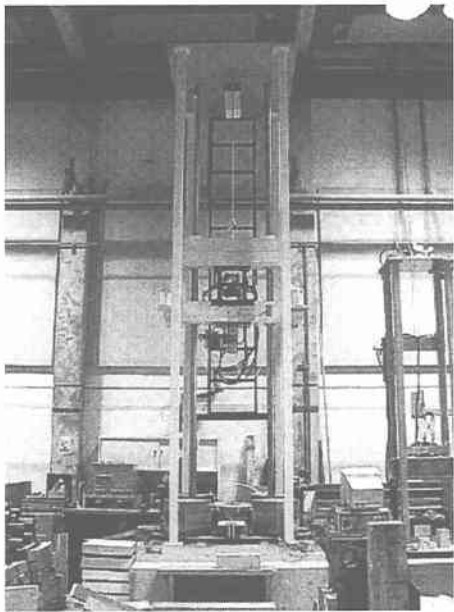


写真-1 大型衝撃実験装置

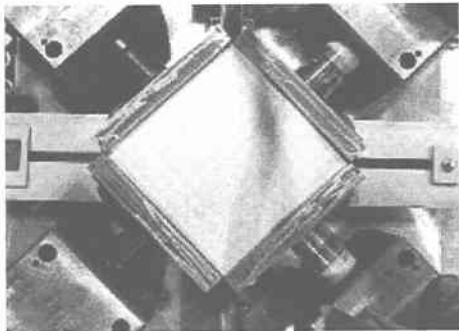


写真-2 二軸方向から 5Mpa の拘束力を受けている四辺単純支持 FRC 板

表-1 3種類の鋼繊維の寸法および形状

Type	Length	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

受ける四辺単純支持 SFRC 矩形板の耐衝撃性挙動に及ぼす影響に関して重錘落下衝撃実験を行い、それらに関する検討を行うこととする。

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、その直径が 100mm 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 400×400×75mm で、寸法 300×300mm の鋼製支持台上に単純支持され、さらに供試体は油圧ジャッキによって一軸または二軸方向から鋼製板の寸法 400×75×50mm で挟まれ 5MPa の周辺拘束応力を受けている。また、Tup 内には重錘が受ける衝撃力を、ジャッキ内には供試体への拘束力をチェックするためにロードセルが埋め込まれている。板中央裏面には板載荷点直下の変位と板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-2は試験体名を示している。いずれの試験体名は先頭から 5 は繊維混入率 $V_f=0.5\%$ 、PL が Plain を、HE が Hooked END を、FL が Flattened END を、CP が Crimped を表し、25 は落下高さ 250mm、EB は Biaxial、UN は Uniaxial、0 は拘束力がないことを意味し、5 は拘束応力 5MPa、末尾1は試験体の順序番号を表している。また、本実験で用いた鋼繊維は前述したように 3 種類でそれらの寸法および形状を表－1に示している。なお、コンクリートの平均圧縮強度 45.1Mpa であった。

3. 実験結果

3. 1 曲げ衝撃力および慣性力の評価

表 2 試験体一覧および拘束条件

Specimen Designation	Percent volume fraction of fibers V_f (%)	Confinement Type and Stresses (MPa)	Specimen Designation	Percent volume fraction of fibers V_f (%)	Confinement Type and Stresses (MPa)
PL250	0	Without Confinement	5FL25EB51	0.5	Biaxial and 5
PL25UN51	0	Uniaxial and 5	1HE250	1.0	Without Confinement
PL25EB51	0	Biaxial and 5	1HE25UN51	1.0	Uniaxial and 5
5HE250	0.5	Without Confinement	1HE25EB51	1.0	Biaxial and 5
5HE25UN51	0.5	Uniaxial and 5	1CP250	1.0	Without Confinement
5HE25EB51	0.5	Biaxial and 5	1CP25UN51	1.0	Uniaxial and 5
5CP250	0.5	Without Confinement	1CP25EB51	1.0	Biaxial and 5
5CP25UN51	0.5	Uniaxial and 5	1FL250	1.0	Without Confinement
5CP25EB51	0.5	Biaxial and 5	1FL25UN51	1.0	Uniaxial and 5
5FL250	0.5	Without Confinement	1FL25EB51	1.0	Biaxial and 5
5FL25UN51	0.5	Uniaxial and 5			

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_t から板の慣性力 P_i を差し引いて次式のように示される。

$$P_b(t) = P_t(t) - P_i(t) \tag{1}$$

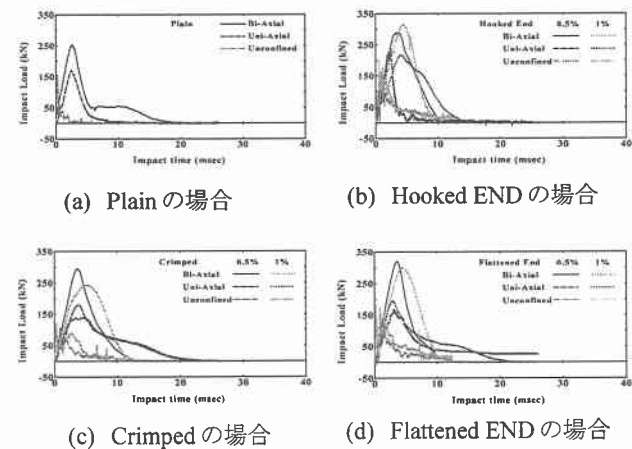
上式の板の慣性力 P_i の評価式は板の破壊モードまたはひび割れ状況から、板中央で得られた加速度 $\ddot{u}_0(t)$ より板の加速度分布を仮定して次式のように示される。

i) 曲げ破壊の場合

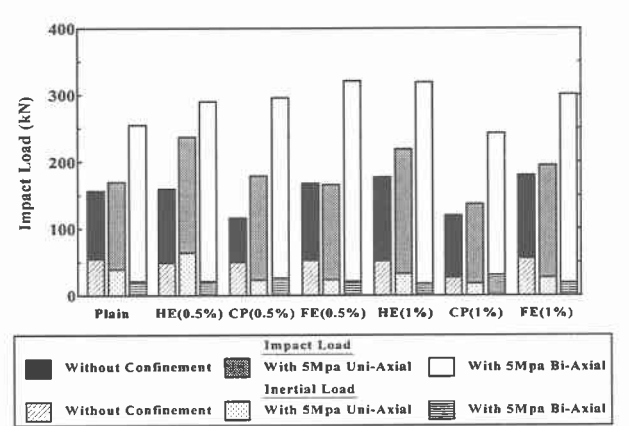
$$P_i(t) = \frac{320}{243} \rho h \ddot{u}_0(t) l_d^2 \tag{2}$$

ii) 押し抜きせん断破壊の場合

$$P_i(t) = m_b \ddot{u}_0(t) \tag{3}$$



図－1 重錘衝撃力の時刻歴応答



図－2 最大重錘衝撃力および板の慣性力

iii) 梁と酷似した曲げ破壊の場合

$$P_i(t) = 0.0225 \rho \ddot{u}_o(t) \frac{l}{3} \quad (4)$$

iv) 弾性的挙動の場合

$$P_i(t) = \rho h \ddot{u}_o(t) \frac{l^2}{4} \quad (5)$$

ここで、 l : 純スパン長、 l_d : 純スパン長の斜め方向長さ/2、 ρ : コンクリートの密度、 h : 板の厚さ、 m_b : 押し抜きせん断破壊によって生じたコンクリート片の質量

3. 2 重錘衝撃力の時刻歴応答

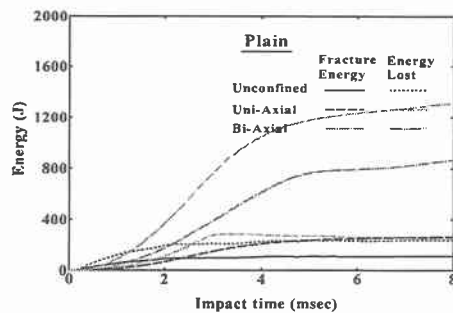
図-1(a), (b), (c), (d)は落下高さ $H=250\text{mm}$ 、繊維混入率 $V_f=0.5\%$ および 1% の場合における Plain および Hooked END, Crimped, Flattened END で補強されたコンクリート板への重錘衝撃力の時刻歴応答を示している。

図(a)は周辺拘束されていない Plain コンクリートの場合、一軸方向および二軸方向拘束された

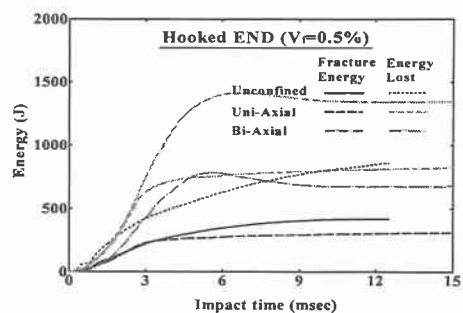
FRC の場合である。Plain および FRC 板は拘束力を受けない場合では曲げ破壊、一軸拘束力の場合では曲げと押し抜きせん断の混合型破壊を示し、二軸拘束力の場合で押し抜きせん断破壊に至っているが、二軸拘束の場合は周辺拘束力が有効に作用している間では他の場合に比べて最大衝撃力が大きく、最大衝撃力に達する時間および作用時間が長くなっていることから、耐衝撃性が優れていることがわかる。

図(b)の $V_f=0.5\%$ における Hooked END の場合、最大重錘衝撃力および最大衝撃力に達する時間は Plain の場合と同様に拘束条件の影響を受け、拘束力を受けない場合、一軸拘束の場合、二軸拘束の場合の順で大きな値を示している。また各破壊形式は拘束力を受けない場合では曲げ破壊、一軸拘束力の場合では曲げと押し抜きせん断の混合型破壊を示し、二軸拘束力の場合ではほぼ弾性領域に近い状態が保持されている。一方、 $V_f=1\%$ の場合の衝撃力波形も $V_f=0.5\%$ の場合とほぼ同様な傾向を示し、拘束力の影響を受けていることがわかる。 $V_f=0\%$ 、 0.5% および 1% を比較すると、最大衝撃力は 0.5% と 1% における繊維混入率にはあまり大きな影響は受けていないものの、最大衝撃力に達する時間ではやや影響を受けていることがわかった。以上のことから、Hooked END の場合における最大衝撃力および最大値に達する時間は拘束力なし、一軸拘束、二軸拘束の順に大きくなり、周辺拘束条件による影響を受けていることがわかる。また繊維混入率に関しては最大衝撃力より最大値に達する時間の方がややな影響を受けていることがわかる。

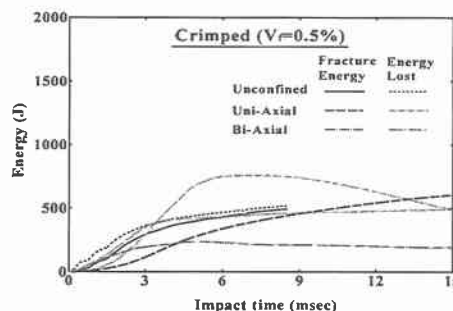
図(c)および(d)での最大衝撃力、最大値に達する時間および衝撃作用時間に関しては図(a)および(b)と同様な傾向を示し、拘束なしの場合では脆性的な破壊を、一軸拘束の場合ではやや靱性的な破壊を示しており、一方、二軸拘束の



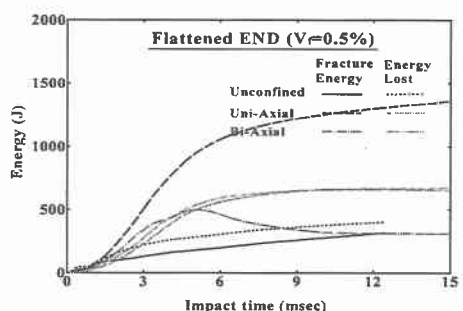
(a) Plain の場合



(b) Hooked END の場合



(c) Crimped の場合



(d) Flattened END の場合

図-3 重錘のエネルギー損失および Plain, 各 FRC 板の破壊エネルギー

場合ではほぼ弾性的な状態を保持しているものと考えられる。また、両者は繊維混入率が大きくなると、拘束力なしおよび二軸拘束力の場合は若干大きくなり、一軸拘束力における Crimped の場合では 0.5% の方が 1% よりやや大きく、逆に Flattened END の場合は 0.5% の方が若干小さくなるのがわかる。以上より、Crimped および Flattened END で補強された FRC板も Hooked END の場合と同様に周辺拘束条件および繊維混入率に影響を受けていることがわかった。

3. 3 最大衝撃力および最大慣性力

図-2 は拘束条件、繊維混入率 $V_f=0.5\%$ 、 1% および繊維補強材ごとの最大重錘衝撃力と最大慣性力を示している。最大重錘衝撃力は前述でも述べたように拘束なしの場合、一軸拘束の場合、二軸拘束の場合の順で増加し、二軸拘束の場合が最大値を示している。板の最大慣性力では概ね二軸拘束、一軸拘束、拘束力なしの順で大きくなり、二軸拘束の場合が最小値を示している。拘束力なしの場合の最大慣性力は最大重錘衝撃力に対する割合が $23\sim43\%$ 、一軸拘束力における FRC の場合では $13\sim27\%$ 、二軸拘束力における FRC の場合では $6\sim13\%$ の範囲にあり、拘束力のない場合が最大値を示すことがわかる。

以上より、最大重錘衝撃力および板の慣性力は拘束条件による影響が顕著に見られるが、繊維混入率や繊維の種類による影響をやや受けている程度であることがわかった。

3. 4 重錘のエネルギー損失と板の破壊エネルギー

時間 t に対する重錘のエネルギー損失 $\Delta E(t)$ は次式で求められる。

$$\Delta E(t) = \frac{1}{2} m_h \left[2gh - \left(\sqrt{2gh} - \frac{1}{m_h} \int P_i(t) dt \right)^2 \right] \quad (6)$$

ところで、 m_h :重錘質量、 h :落下高さ、 g :重力加速度
時間 t に対する板のエネルギー損失 E_{ab} は次式で表わされる。

$$E_{ab}(t) = \int P_b(t) du_0 \quad (7)$$

ところで、 u_0 :板中心変位

図-3(a)~(d)は各拘束条件における式(6)および(7)より求められた重錘のエネルギー損失と Plain、 $V_f=0.5\%$ における FRC 板の破壊エネルギーまたは吸収エネルギーを示している。なお、重錘質量 578kg の重錘が落下高さ 250mm から FRC 板上に初速度 0.49m/s で落下する場合、その衝撃エネルギーは 1410J となる。図(a)は Plain の場合である。拘束力なしおよび一軸拘束の場合ではエネルギー損失および破壊エネルギーともに 100~300J の範囲にあり、両者の差もあまり見られない。一方、二軸拘束の場合は 800~1300J と両者ともに大きなエネルギーを示しており、その差も約 400J となっている。これより、二軸拘束の場合は拘束条件の影響を受け、この拘束力がエネルギーを吸収し、1000J 以上のエネルギーで重錘を貫通させているものと思われる。

図(b)は $V_f=0.5\%$ における Hooked END の場合である。二軸拘束における Hooked END の場合はエネルギー損失が約 1400J を示すことから、ほぼ全エネルギーを失っているものの、破壊エネルギーは他の拘束条件の場合と比較して 2 倍以上の値を示している。拘束力なしおよび一軸拘束の場合は破壊エネルギーがともに約 400J 以下を示し、二軸拘束の場合に比べてかなり低い値を示していることがわかる。このことは二軸拘束の場合では板表面に重錘による貫入が若干見られることから弾塑性から初期の塑性領域を示しているものと思われる。一方、他の拘束条件の場合では脆性的な破壊に至っていることから低いエネルギーを示しているものと思われる。

図(c)は $V_f=0.5\%$ における Crimped の場合である。二軸拘束の場合は Hooked END の場合に比べて両エネルギーともに 1/3 倍程度の値を示している。これはファイバー混入と拘束力によって板全体がほぼ弾性領域を保持しているために思われる。一方、他の拘束条件の場合は Hooked END の場合に比較してもあまり大差は見られないことがわかる。

図(d)は $V_f=0.5\%$ における Flattened END の場合である。二軸拘束における吸収エネルギーは $t=5\text{msec}$ で最大エネルギー約 500J を示し、その後 $t=12\text{msec}$ まで約 300J に減少している。エネルギー損失も約 600J 程度と低い値を示していることから、板全体がほぼ弾性領域を保持しているものと思われる。拘束力なしの場合は Plain や Crimped の場合と同様に板が破壊していることから、両エネルギーは低くかつ両者の大差が見られないことがわかる。一方、一軸拘束の場合は板中央の変位が大きいことから吸収エネルギーが他に比べて大きい値を示していることがわかる。

以上より、Plain および FRC 板 ($V_f=0.5\%$)は拘束力に影響を大きく受けており、拘束力なしの場合では脆性的な破壊に至っているために吸収エネルギーおよびエネルギー損失が他の拘束条件に比べて低い値を示している。また、二軸方向の場合は拘束力の効果が顕著であり、特に、Flattened END の場合がほぼ弾性領域を保持していることから両エネルギーともに低く目のエネルギーを示していることがわかった。

4. まとめ

周辺拘束力を受けない場合、一軸方向の周辺拘束力 5MPa を受ける場合、二軸方向の周辺拘束力 5MPa を受ける SFRC 板の耐衝撃挙動について検討するために重錘落下衝撃実験を行った。

以上より、検討した結果を以下に示す。

1. 重錘衝撃力波形は周辺拘束条件による影響が大きく、繊維混入率および繊維補強材の種類に対する影響はやや受けている程度であることがわかった。
2. 最大慣性力は拘束なし、一軸拘束、二軸拘束の順に概ね小さくなっていることがわかった。
3. Plain および FRC 板の重錘のエネルギー損失および板の破壊エネルギーまたは吸収エネルギーに関して検討すると、両エネルギーともに拘束条件およびファイバー混入による影響を受けていることがわかった。特に、Flattened END の場合が耐衝撃性に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, 梶谷浩, 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.