PVA 短繊維を混入した四辺支持 RC 版の漸増繰り返し衝撃載荷実験

Iterative falling-weight impact tests for 4-side supported RC slabs mixed with PVA short-fiber

| 室蘭工業大学 | フェロー | 岸 | 徳光 (Norimitsu Kishi) |
|---------------|------|----|-----------------------|
| 三井住友建設(株) | フェロー | 三上 | 浩 (Hiroshi Mikami) |
| (独)北海道開発土木研究所 | 正 員 | 栗橋 | 祐介 (Yusuke Kurihashi) |
| 室蘭工業大学 | ○学生員 | 宮川 | 健太 (Kenta Miyakawa) |

1. はじめに

一般的にコンクリート材料は引張力に対して脆性的な 破壊性状を示すことから、短繊維混入によりひび割れ発生 後における引張靱性能を向上させることをねらいとした研 究が実施されてきた.これまで、短繊維材料としては鋼繊 維が NATM 工法による山岳トンネルの1次ライニングや RC 床版の上面増厚コンクリートへ適用されている.しか しながら、鋼繊維を用いる場合には、1)練り混ぜ時におい てミキサーに損傷を与える可能性があること、2)構造物表 面に錆が生じ美観を損ねる可能性があること、等が指摘さ れている.そのため、最近では鋼繊維の代替として、軽量 で耐食性に優れる合成繊維を用いた研究が行われている. 特に、PVA 繊維は、親水性材料であり、モルタルとの付着 性能に優れることから、モルタルやコンクリートの引張靱 性向上に着目した研究に多く用いられている.

著者らも、これまで PVA 短繊維を混入した RC 梁の静 的および衝撃載荷実験を行い、^{1),2)} 短繊維の混入によって RC 梁のせん断耐力が飛躍的に向上し、破壊形式がせん断 破壊型から曲げ破壊型に移行すること、衝撃載荷時の吸収 エネルギー量が最大で3倍程度にまで向上することが明ら かになっている.また、RC 版を対象とした実験では³⁾、 短繊維の混入により RC 版の押し抜きせん断耐力が増加す るとともに、脆性的な破壊が抑制されることや有効高さ内 に形成される押し抜きせん断面がよりゆるやかになること 等が明らかとなっている.しかしながら、衝撃載荷実験で の RC 版の破壊性状の研究は未だ実施されていない.

このような観点より,本研究では,PVA 短繊維を混入した RC 版の衝撃破壊性状に及ぼす短繊維混入率の影響について実験的に検討を行った.本実験では,四辺支持条件のもと,普通コンクリートおよび短繊維混入コンクリートを用いた RC 版の重錘落下衝撃実験を実施した.

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1には、本実験に用いた RC 版試験体の一覧を示している. 試験体数は、短繊維混入率 $V_f \approx 4$ 種類 ($V_f = 0, 1, 2, 3$ %)に変化させた全4体である. 試験体名は、短繊維混入率に対応して F0, F1, F2, F3 としている. なお、各試験体のコンクリートの圧縮強度は 60 ± 10 MPa 程度である.

図-1には、試験体の形状寸法および配筋状況を示している. RC版の寸法は 2,000 × 2,000 × 180 mm である. 鉄筋には D16 を用い、版中央部より 150 mm 間隔で格子状に配置した. なお、鉄筋は RC版の四辺に設置した溝型鋼に

溶接し,定着を確保することとした.

2.2 実験方法

衝撃実験の支持条件は、純スパン長1.75mの四辺支持 とした.支点部は試験体の浮き上がりを防止し、かつ回転 のみを許容するピン支持に近い構造となっている.なお、 用いた重錘は質量が300kg、載荷点部の直径が60mmで 底部に高さ2mmのテーパが付いた球面状の鋼製重錘であ る.載荷方法には、初速度および増分速度を1m/sと設定 して、終局に至るまで繰り返し重錘を自由落下させる漸増 繰り返し載荷法を採用した.なお、本実験では、各試験体 とも明瞭な押し抜きせん断ひび割れが発生し、試験体が著 しく損傷した時点を終局と定義している.測定項目は、重

表-1 試験体の一覧

| 試験 体名 | 短繊維 混入率 V _f (vol. %) | 材齢 (日) | 圧縮強度 (MPa) | 衝突速度 V (m/s) |
|----------|---------------------------------------|-----------|---------------|-----------------|
| F0 | 0 | | 69.6 | $1 \sim 5$ |
| F1 | 1 | 17 | 59.1 | $1\sim 6$ |
| F2 | 2 | 17 | 50.0 | $1\sim 6$ |
| F3 | 3 | | 55.4 | $1 \sim 7$ |



平成16年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第61号



図-3 支点反力-変位履歴曲線

錘衝撃力P, 合支点反力R (以後, 支点反力) および載荷点 変位 δ (以後, 変位) である.また,実験終了後には, RC 版裏面のひび割れをスケッチし,版中央部を主鉄筋方向に 切断することにより破壊面を観察した.

3. 実験結果および考察

3.1 重錘衝撃力,支点反力および変位波形

図-2には、各試験体の重錘衝撃力P,支点反力Rおよび変位 δ に関する各応答波形を $4 \text{ m/s} \sim 6 \text{ m/s}$ について示している.なお、時間軸は重錘衝撃力が励起した時刻を0 msとして整理した.

重錘衝撃力波形 P は、衝撃初期の振幅が大きく周期の短 い第1波とその後の振幅が小さく周期の長い第2波で構成 されている.なお、第2波目の波形は、F0 試験体は V = 4m/s、F1 試験体は V = 5 m/s、F2/F3 試験体は V = 6 m/s で消 失し、押し抜きせん断面が形成され、塑性化が一気に進展 したものと考えられる.

支点反力波形 R は、各試験体とも衝突速度にかからわず 継続時間が 8 ms 程度の正弦半波状を示している。各試験体 ごとに着目すると、F0 試験体の最終衝突速度(V = 5 m/s) 時の支点反力は、V = 4 m/s 時に比べて大幅に低下してい ることがわかる。これは、押し抜きせん断コーンが完全に 押し抜けたためと推察される. F1 試験体のV = 6 m/s時に おける支点反力は、V = 5 m/s時に比べて大幅に低下し、脆 性的な破壊に至っていることが考えられる. それに対し て、F2/F3 試験体の支点反力はV = 5 m/s時よりも多少低下 しているものの、F1 よりも破壊は進行していないことが うかがえる. これは、 V_f の増加によるものと考えられる. 変位波形 δ は、各試験体とも衝撃初期に正弦半波状を 示し、以後振動状態を呈していない. F0試験体の場合は、 衝突速度V = 4 m/sにおける残留変位はわずかである. 一 方、最終衝突速度 (V = 5 m/s)では大きな変位が残留し、 この衝突速度でせん断コーンが完全に押し抜けているこ とがうかがわれる. それに対して、短繊維を混入している F1/F2/F3 試験体は衝突速度の増加とともに徐々に残留変位 が増大する傾向にある. また、 V_f の増加により、最大変 位、残留変位ともに抑制されていることが分かる.

3.2 支点反力-変位履歴曲線

図-3には、各試験体の $R-\delta$ 曲線を4m/s~6m/sについ て示している。V=4m/sの場合には、F0試験体で多少塑性 化の傾向が見られるものの、F1/F2/F3試験体では弾性的な 挙動を示していることが分かる。V=5m/sの場合には、F0 試験体の最大支点反力が大幅に低下し、かつ残留変位が他 に比べて大きいことが分かる。これは押し抜きせん断コー



図-4 各種応答値

表-2 実験および計算結果の一覧(V=4 m/s 時)

| 試験 体名 | 短繊維 混入率 V _f (Vol.%) | 圧縮強度 (MPa) | 実測押し抜き せん断耐力 <i>P_{us}</i> (kN) | 計算押し抜き せん断耐力 V _{pcd} (kN) | 最大 支点反力 <i>R_{ud}</i> (kN) | 最大 支点反力比 | 動的 応答倍率 R _{ud} /P _{us} |
|----------|--------------------------------------|---------------|---|--|--|-------------|--|
| F0 | 0 | 69.6 | 368.2 | 395.8 | 987.0 | 1 | 2.68 |
| F1 | 1 | 59.1 | 372.1 | 364.7 | 1146.2 | 1.16 | 3.08 |
| F2 | 2 | 50.0 | 362.0 | 335.5 | 1194.4 | 1.21 | 3.30 |
| F3 | 3 | 55.4 | 456.7 | 354.1 | 1409.0 | 1.43 | 3.09 |



図-5 最大支点反力比とV_fの関係

ンが完全に形成されたためと推察される。一方, F1/F2/F3 試験体では、Vf の増加に伴い変位が抑制されていること が分かる. V=6m/sの場合には、F1/F2/F3 試験体でも、最 大支点反力が低下し,残留変位も大きくなっていることか ら、押し抜きせん断コーンが形成されたものと考えられる.

以上のことより、V_fを増加させることにより、終局時 の衝突速度が増加し、脆性的な破壊が起こりにくくなるこ とや変位量が抑制されるなど,耐衝撃性が向上する傾向に あることが明らかとなった.

3.3 各種応答値の比較

図-4には、最大重錘衝撃力 P_{ud} 、最大支点反力 R_{ud} およ び最大変位 δ_{max} と衝突速度 V との関係を示している.

(a) 図より,最大重錘衝撃力 Pud は各試験体ともに V=4 m/s までは線形的に増加していることが分かる. F0 試験体 ではV = 5 m/s で急激に P_{ud} が低下している。これは、コン クリートが押し抜けたためと考えられる. F1/F2 試験体は F0 試験体とは異なり、V=4 m/s 以降徐々に Pud が減少し

ていることが分かる。F3 試験体は V=5 m/s で最大値を示 し、その後はF1/F2と同様に減少している.

(b) 図より, 最大支点反力 R_{ud} は重錘衝撃力 P_{ud} と同様に V=4 m/s まではほぼ線形的に増大していることが分かる. その後, F0 試験体では急激に Rud が低下している. これ は、押し抜きせん断コーンが形成され、入力エネルギーが その形成に費やされたために支点部に振動が伝達されない ためと考えられる. ただし, F1/F2/F3 試験体は Vf の増加 とともに Rud の低下割合が小さく示されている.これは、 押し抜きせん断ひび割れを短繊維で架橋する効果によるも のと考えられる.

(c) 図より,最大変位 δ_{max} は V = 4 m/s までは短繊維混入 率にかかわらず,ほぼ同様であることが分かる. V=5m/s では F0 試験体の δ_{max} が急激に増大している。また、F1 試 験体の δ_{max} の増加割合も多少大きくなっている. F2/F3 試 験体の場合には、全般的に F1 試験体よりも δ_{max} が小さい.

以上のことより、V_fの増加により脆性的な破壊が抑制 されること,最大支点反力は混入率順に大きくなり,最大 変位の増加割合は小さくなることが明らかとなった. 3.4 短繊維混入による耐力向上効果

表-2には、別途実施した静載荷実験の結果と衝撃実験 (V=4 m/s) で得られた最大支点反力 Rud を示している.表 中の計算押し抜きせん断耐力 V_{pcd}は、コンクリート標準 示方書⁴⁾に基づき算定している.また,動的応答倍率は 最大支点反力 Rud を実測押し抜きせん断耐力 Pus で除した 値である.動的応答倍率は2.7~3.3程度であり、短繊維を 混入した試験体の方が大きくなる傾向を示している.

図-5には、短繊維を混入している試験体のFO試験体 を基準とした最大支点反力比(動的耐力比)とVfの関係 を示している.最大支点反力比は,短繊維混入率の増加に 対応して、ほぼ線形的に増大していることが分かる.

3.5 ひび割れ分布性状

図-6には、各試験体の衝撃実験終了後におけるひび割



図-6 実験終了後のRC版底面のひび割れ分布性状





(b) F1 試験体(最終衝突速度 V=6 m/s)



(c) F2 試験体(最終衝突速度 V=6 m/s)



(d) F3 試験体(最終衝突速度 V=7 m/s)写真-1 切断面のひび割れ状況

れ分布性状を示している.図より,各試験体とも版中央を 中心とした円形状にひび割れが発生していることより,押 し抜きせん断破壊により終局に至っていることが分かる. また,円形状のひび割れ発生範囲は各試験体ともほぼ同様 であることが確認できる.F0試験体の場合には,円形状 のひび割れ発生範囲内のかぶりコンクリートが大きく剥落 していることが分かる.PVA 短繊維を混入した場合には, Vf の増加に伴って円形状ひび割れの発生範囲内で微細な ひび割れが分散して数多く発生する傾向にあることが分か る.また,押し抜きせん断コーンから支点部へ向けて曲げ およびねじりによるひび割れが分散しているのが分かる.

写真-1には, RC版中央部切断面のひび割れ状況を示している.写真より,各試験体においても RC版中央部に 押し抜きせん断コーンが形成されていることが分かる.また,短繊維を混入した試験体の場合には,ひび割れ開口部 において短繊維が破断もしくは引き抜けている状況が見ら れ、 V_f が大きい場合には、短繊維が一部のひび割れを架橋している状況が確認できる.F0試験体の場合には、載荷点部から鉄筋位置までほぼ45度の角度でひび割れが発生し、またかぶり部には45度よりもゆるやかな角度でひび割れが発生し、大きく剥落していることが分かる.一方、短繊維を混入しているF1/F2/F3試験体はF0試験体とは異なり、コンクリートの剥落が見られない.最終衝突速度 (V = 6 m/s)が同じF1/F2を比較すると、F1試験体では円錐状のひび割れがより大きく開口していることが分かる.一方、F3試験体の押し抜きせん断コーンは他の試験体に比べて低い版中央高さ付近から形成され、 V_f の増大に伴って有効高さ内の押し抜きせん断ひび割れの発生角度がゆるやかになる傾向にあることが分かる.

4. まとめ

本研究では, PVA 短繊維の混入による RC 版の衝撃耐荷 性状に及ぼす短繊維混入率の影響について検討した.本研 究の範囲内で得られた結果は以下の通りである.

- (1) 短繊維混入率にほぼ比例して最大支点反力比(動的耐力比)は増大する.
- (2) 短繊維混入率の増加に対応して応答変位は抑制される 傾向にある。
- (3)動的応答倍率は短繊維の混入によって増加し、3.1 ~ 3.3 程度を示す.

参考文献

- 岸 徳光,田口史雄,三上 浩,栗橋祐介,:ビニロン短繊維を混入した RC 梁の耐衝撃性に及ぼす短繊 維混入率の影響,構造工学論文集, Vol.50A, III.I5-6 pp.1337-1348, 2004.3
- 2) 竹本伸一,岸 徳光,三上 浩,栗橋祐介:ビニロン短 繊維混入軽量コンクリートを用いた RC 梁の繰り返し 衝撃載荷実験,コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1644-1650, 2004.
- 3) 三上 浩,岸 徳光,田口史雄,栗橋祐介,:ビニロン短繊維を混入した四辺支持 RC版の押し抜きせん断性状に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1555-1560, 2004.
- 4) コンクリート標準示方書(2002 年制定)構造性能照査 編,土木学会,2002