FRP 筋を用いたコンクリート版の 衝撃破壊挙動解析と耐衝撃性評価

宮本 文穂^{*1}・M.W. KING^{*2}・三戸 雅文^{*3}

概 要 本研究の目的は、鉄筋にかわる新しいコンクリート用補強材として注目されている連続繊維補強筋 (FRP ロッド) を用いたコンクリート版の、衝撃作用下における破壊挙動を解析的に検討することである。解析方法には、積層化非線形有限要素法を用い、動的平衡方程式の解法として Newmark- β 法を適用した。本研究より、連続繊維補強筋は、衝撃作用下で各種コンクリート版用補強材として有効であり、また、耐衝撃性指標に破壊時衝撃力、ひびわれ発生荷重、たわみ体積等を用いることにより、定量的に耐衝撃性を評価することが可能であることを示した。

キーワード：連続繊維補強筋、コンクリート版、衝撃作用、積層化非線形有限要素法、耐衝撃性評価、衝撃破壊モード

1. 緒 言

近年、土木の分野において新素材の開発気運が高まっており、コンクリート用補強材、または緊張材として連続繊維補強筋 (FRP ロッド) が注目されている^{1),2)}。FRP ロッドは、高強度、高耐食性、軽量、非磁性等、鉄筋に比べて優れた材料特性を有することから、鉄筋の腐食環境である海洋構造物や、帯電環境であるリニアモーターカーのガイドウェイ等への適用が期待されている。しかしながら、現状の FRP ロッドは鋼材に比べてヤング係数が小さいこと、また連続繊維は鋼材の降伏に相当する現象がなく、脆性的な引張破断を生ずる等の欠点と考えられる性質もあわせて持っている。

土木構造物への実用化に際しては、これらの利点および欠点をふまえ、静的荷重下のみならず動的荷重下における挙動を把握しておく必要があるといえる。そこで本研究では、この FRP ロッドを補強筋として用いたコンクリート版構造に対し、近年コンクリート構造物において重要視されてきているソフトな衝撃作用³⁾を与えた場合、どのような破壊挙動を示すかを解析的に検討しようとするものである。また、これらの結果を利用して、耐衝撃性を表すのに有効な指標を見だし、理想的と考えられる力学的特性を有する材料特性の提案を含め、種々のコンクリート版に対する耐衝撃性の評価を試みる。その際、使用する FRP ロッドは将来的にさらに高性能と

なることを見越して、既存の性能の他に近い将来開発の期待できる数種類の材料特性を設定している。

2. 連続繊維によるコンクリートの補強の現状⁴⁾

現在、建設分野で開発の対象となっており実用化の可能性の高い FRP 材の繊維は、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維等である。これら FRP ロッドは、直径数 $\sim$ 10 数 μ m の長繊維を束ね、そのままではバラバラなため結合材として耐アルカリ性の樹脂を含浸させて固めて作られる。これらの新素材の有する主な材料特性を以下にまとめて示す。

- ① 鋼のような腐食現象がなく、耐久性が高い。
- ② 連続繊維補強筋の比重は、1.3 $\sim$ 2.6 程度と鉄筋 (7.85) に比べて小さく軽量である。そのため、運搬や現場作業にとって大きな利点となる。
- ③ 引張強度が非常に高い (PC 鋼材にみままたはそれ以上である)。
- ④ 非磁性であるため、鋼材や鉄筋または PC 鋼材のように強い磁界により帯電し誘導電流を発生することがない。
- ⑤ 繊維混入率によって値は異なるが、現在、一般にヤング係数は鋼に比べて低い。このことは、引張強度が高いことも考えると弾性ひずみが非常に大きいことになる。したがってコンクリートにひびわれが生じたとき、ひびわれ幅が著しく大きくなったり、ひびわれ発生以前に比べて大きな剛性低下が起こり大きなたわみが生じることになる。

*1 神戸大学助教授 工学部建設学科 (正会員)

*2 神戸大学大学院 自然科学研究科 (正会員)

*3 神戸大学大学院 工学研究科土木工学専攻

- ⑥ 鋼における降伏現象に相当する性質がなく、弾性的な性状のまま脆性破断により引張破壊する。
- ⑦ 連続繊維を樹脂で固めただけの FRP ロッドでは、表面が滑らかでコンクリートとの付着性状は良くない。そのため樹脂の表面に凹凸の成形を行うなどの工夫を要する。
- ⑧ FRP ロッドは工場で成形して作られるため、現場での曲げ加工が出来ない。また、曲げ成形した部分の強度は直線部に比べてかなり低くなる。
- ⑨ FRP ロッドの引張試験結果をみると、母材で破断したもの、定着装置内あるいはその近傍で破断したもの等が見られ、強度のばらつきが一般に大きい。
- ⑩ 現在、材料費のみを比較すれば鋼材よりもかなり高価である。

上述のような特徴をもつ FRP ロッドを、PC 鋼材に代わる緊張材として用いた PC 橋梁はすでに試験的に公道に架設されている。例えば、石川県的一般国道 249 号線の新宮橋はプレテンション方式で架設されており、ドイツ連邦のアウトバーン上ではポストテンション方式で架けられている⁵⁾。これらの橋梁は新素材の技術開発を目的としており、実際の使用を通じて貴重なデータを提供することが期待されている。さらに、FRP ロッドはリニアモーターカーや海洋構造物、またウォーターフロント関連施設の補強材として大いに期待されている。しかしながら、FRP ロッドのダボの作用下での直接せん断力に対する特性およびコンクリート中での圧縮特性などの力学的問題や、耐久性、耐火性の評価をはじめ、解決しなければならない問題が数多く残っている。

3. 衝撃破壊挙動解析と材料特性

3.1 衝撃破壊挙動解析の概略⁶⁾

一般に衝撃問題を取り扱う場合、衝撃体の性状と構造物の破壊機構の差異により〈ハードな衝撃〉と〈ソフトな衝撃〉に分類される⁷⁾。〈ハードな衝撃〉とは衝撃体の変形がほとんどなく衝突速度が速い場合で、ひずみ速度 50 sec^{-1} 以上、立ち上がり時間が 10^{-3} sec 以下の衝撃作用をいい、衝突速度が速いために構造物内に発生する応力波の影響が重大となる衝撃作用である。一方、〈ソフトな衝撃〉とは衝撃体の変形を伴い衝突速度が比較的遅い場合で、ひずみ速度 $10^{-1} \sim 50 \text{ sec}^{-1}$ の範囲であり、立ち上がり時間が $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{ sec}$ 程度の衝撃作用をいい、衝撃体および被衝撃体の変形をとまなうことにより、応力波の影響はそれほど重要とはならない衝撃作用である。本研究では、後者の〈ソフトな衝撃〉に主眼をおいた検討を行う。本研究に用いる解析方法は、薄板の曲げ有限要素解析⁸⁾を、積層化手法を用いて準 3 次元

Fig. 1 Layered model and coordinate axes

に拡張した積層化非線形有限要素法⁹⁾を用いる。この有限要素解析法は、Fig. 1 に示すように、コンクリート版をいくつかのコンクリート層と補強筋層の重なりとして考え、各層を平面応力状態とする。各節点は 5 自由度($u, v, w, \theta_x, \theta_y$)を有し、各要素は 4 節点からなる非適合長方形要素⁸⁾とする。コンクリートの破壊条件は、Ottosen により提案された 4 パラメーター破壊モデル¹⁰⁾を用いる。また、動的平衡方程式の解法には Newmark- β 法¹¹⁾を用いるが、衝撃作用下でのコンクリート構造物の挙動は荷重の作用時間が短いため減衰の影響は小さいと考えられるので、ここでは減衰の影響を無視した。解析における基本仮定を以下に示す。

- ① コンクリート版を仮想コンクリート層と、軸力と平面方向のせん断力を負担する線材として取り扱う。補強筋層でモデル化する。なお、コンクリート層と補強筋層の層間の付着は完全付着とする。
- ② 要素で代表されるコンクリート各層は平面応力場にあるものとみなし、層間にすべりは生じないものとするが、衝撃作用時に生じる面外せん断応力の影響⁶⁾については解析に取り入れている。
- ③ コンクリートの破壊条件には、Ottosen の 3 軸応力条件下での破壊条件¹⁰⁾を用い、補強筋については一軸破壊条件¹¹⁾を適用する。コンクリートの材料特性は静的材料一軸特性に基づくものを用い、3 軸応力状態における相当応力 $\sim$ 相当ひずみ関係⁶⁾に変換した特性を用いる。
- ④ 弾性範囲を越えるコンクリート要素は直交異方性体と仮定する。なお、各要素の破断および破壊条件の取り扱い、その部分に蓄積されたひずみエネルギーを、内部応力に等価な要素節点力に置換する方法とする。
- ⑤ 本解析では、ひずみ速度効果の影響については無視する。しかし、運動方程式中に慣性項が含まれており、ソフトな衝撃においてみられる見掛けの応力の上昇が考慮されている⁷⁾。

3.2 解析モデルおよび材料特性

本解析で対象とするコンクリート版は、 $130 \times 130 \times 13$ cm の 2 辺単純支持複補強筋コンクリート版（スパン長 120 cm；補強筋比 $p=1.1\%$ ， $p'=0.55\%$ ）で、このコンクリート版を Fig. 2（1/4 有限要素モデル）に示すようにモデル化し解析を行う。この解析モデルの積層数は、コンクリート層 6 層、補強筋層 2 層の計 8 層で 2 層目と 7 層目を補強筋とする。衝撃力は、Fig. 2 に示すコンクリート版中央の要素①に部分等分布（パッチ）で作用するものとする。本解析に使用するコンクリートは、既往の実験結果¹²⁾を参考にした普通コンクリート（RC、圧縮強度 ≈ 350 kgf/cm²）、高強度コンクリート（HRC、圧縮強度 ≈ 900 kgf/cm²）、鋼繊維混入コンクリート（SF-RC、圧縮強度 ≈ 400 kgf/cm²）の 3 種類とする。Fig. 3 に各種コンクリートの静的一軸材料特性を示す。ただし、普通コンクリートと高強度コンクリートの引張材料特性は、Ottosen の破壊モデルのパラメーターを決定する際に、圧縮強度の 0.12 倍の引張強度を有するように設定してある。また、SFRC の引張材料特性は Fig. 3 (b) に示してある¹¹⁾。補強筋は、鉄筋 2 種類（SD 35、SD 70）と FRP 筋 8 種類（Type A1～D）の計 10 種類とし、Fig. 4 および Table 1 にその材料特性を示す。

Fig. 2 Layered finite element meshes (1/4 section)

一般に FRP ロッドは、繊維の素材や繊維の含有率、結合材、成形方法等により無限に近い組み合わせがあると考えられるため、本解析において特定の製品を対象とすることは合理的であるとはいいがたい。そこで、FRP 筋の材料特性は以下のような考えのもとに設定している。補強筋 Type D を除く FRP ロッドはすべて、普通鉄筋（SD 35）の静的引張一軸応力～ひずみ曲線で囲まれる面積、すなわち鉄筋の吸収エネルギーと等しい吸収エネルギーを有するように設定してある。初期ヤング係数に関しては、補強筋 Type A1～A3 は鉄筋のヤング係数の 1.3 倍、Type B は 1.0 倍、Type C1～C3 は 0.5 倍とする。一方、Type D に関しては炭素繊維とガラス繊維

(a) Compression region

(b) Tension region (SFRC)

Fig. 3 Idealized stress-strain curves of concrete

Table 1 Mechanical properties of reinforcement

Reinforcement	Yield stress (kgf/cm ²)	Yield strain (μ)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Tensile strain (μ)	Young's modulus (x10 ⁶ kgf/cm ²) [ratio]	
Steel (SD35)	3500	1667	4800	50000	2.10	[1.0]
Steel (SD70)	7000	3333	10800	45000	2.10	[1.0]
FRP Type A1	-	-	32900	12000	2.73	[1.3]
FRP Type A2	23030	8400	23400	12800	2.73	[1.3]
FRP Type A3	2460	899	6480	45000	2.73	[1.3]
FRP Type B	-	-	28800	13700	2.10	[1.0]
FRP Type C1	-	-	20400	19400	1.05	[0.5]
FRP Type C2	14280	13580	14900	20500	1.05	[0.5]
FRP Type C3	2650	2517	6520	45000	1.05	[0.5]
FRP Type D	7090	15720	7490	23700	0.451	[0.21]

Fig. 4 Idealized stress-strain curves of reinforcement

維を組み合わせることによって降伏点をもたせることを想定したもので、他の降伏点を有する FRP 筋と比較するために取り上げている。補強筋 Type A1, C1 は弾性域のまま破断するが、補強筋 Type A2, C2 はそれぞれ Type A1, C1 の破断強度の 70 % で降伏点をもつように設定してある。一方、補強筋 Type A3, C3 は破断ひずみが 45 000 μ となるように設定してある。これは高張力鉄筋や普通鉄筋のように降伏ひずみに比べて破断ひずみが非常に大きい場合の挙動が、衝撃作用下で補強筋 Type A1, A2, C1, C2 を用いたコンクリート版の挙動とどのように異なってくるかを比較するためである。な

お、以上の補強筋のうち、現在生産可能であると考えられるものは Type B, C1~C3, D であるが、将来的にはさらに高性能な FRP 筋の開発が期待できる。

3.3 破壊条件および破壊形式の定義

(1) 破壊条件の定義

各種コンクリート版の衝撃破壊挙動解析を行うにあたり、解析上でのコンクリート版の破壊について定義しておく必要がある。衝撃作用下では、静的荷重下におけるコンクリート構造物のように破壊基準の定義が明確となっておらず、いまだ統一された定義はなされていない。そこで本解析においては、コンクリート要素および補強筋要素の破壊をコンクリート版の構造的破壊とみなし、以下の状態をコンクリート版の破壊と定義する。

a) コンクリート要素の破壊

Ottosen の破壊モデル¹⁰⁾において、要素の組み合わせ応力が次式で表される破壊条件 (f) を越えたとき、すなわち、

$$f(I_1, J_2, \theta) \geq 0 \quad (1)$$

ここで、 I_1 : 応力の第一次不変量

J_2 : 偏差応力の第二次不変量

θ : 相似角

b) 補強筋要素の破断

補強筋要素の主ひずみ (ε_{sl}) が、破断ひずみ (ε_{su}) を越えたとき、すなわち、

$$\varepsilon_{sl} \geq \varepsilon_{su} \quad (2)$$

以上の状態をコンクリート版の構造的破壊とみなすのは、上述 2 式の内の一方でも成立した場合、コンクリート版の剛性は著しく低下し、それ以上の耐荷力（衝撃作用に対する抵抗力）の期待はできないと考えられるためである。

Table 2 Definition of impact failure modes and related failure conditions

Type of failure mode (Analysis)	B	B→PS (Mild)	B→PS (Severe)	PS
Deformation mode in primary stage	Bending	Bending	Bending	Punching shear
Deformation mode in secondary stage	Bending	Bending + Punching shear	Punching shear	Punching shear
Final failure mode	Bending	Punching shear	Punching shear	Punching shear
Deformation mode & failure condition				
B: Bending, PS: Punching shear, C.L.: Center line "Arrow" indicates typical area of element failure (Concrete crushing or reinforcement failure) "Dotted line" indicates deformation in primary stage "Solid line" indicates deformation in secondary stage

(a) Bending

1) Intermediate stage

(b) Punching shear

(c) Bending to punching shear

Fig. 5 Typical deformation modes of concrete slabs

(2) 破壊形式の定義¹³⁾

本研究で対象とする〈ソフトな衝撃〉の場合、被衝撃体の破壊性状は静的と比べてわずかに異なる程度であるので、破壊形式は曲げ (B) もしくは押し抜きせん断 (PS) 破壊のどちらかになるものと考えられる。押し抜きせん断破壊の場合、せん断変形性状が、载荷初期から破壊に至るまで支配的となる純押し抜きせん断破壊モードと、载荷初期段階では曲げ変形性状が現れ、衝撃作用途中に押し抜きせん断破壊に変化する混合型破壊モードに分類できる。後者に対しては、破壊時点での曲げ性状の有無によって、さらに細かく分類できるが、ここでは、便宜上曲げ挙動先行の押し抜きせん断破壊 (B→PS) モードと定義する。これらの破壊形式およびその

破壊状態を Table 2 に分類して示す。また、各破壊形式に対する変形モードを Fig. 5 に立体的に示す。

解析上の最終的な破壊形式は、コンクリート版の変形性状、各要素の破壊状態、衝撃力～変位関係、ひびわれ性状およびひびわれ進展状況を総合して決定するものとする。

4. 各種コンクリート版の衝撃破壊挙動の比較

解析には Fig. 3 に示す 3 種類それぞれのコンクリート版の補強に、Fig. 4 および Table 1 に示す補強筋 10 種類を適用し、計 30 種類のコンクリート版について解析を行った。本解析では、ソフトな衝撃を対象としてい

Fig. 6 Impact force-time function and definition of loading rate

るため立ち上がりの比較的遅い衝撃波形を用いている。入力する衝撃力データは、過去に行われた同寸法のコンクリート版に対する衝撃破壊挙動実験¹²⁾から得られた衝撃力波形を基本モデル (Fig. 6) として用いた。Fig. 6 に示すように、衝撃力の載荷速度 (曲線の勾配) は時間とともに変化しており一定でない。そこで、ここでは衝撃力の載荷速度を規定するための便宜的な指標として、衝撃力作用始点から破壊時衝撃力までの平均載荷速度 (Loading rate) V_L を用いた。まず 4.1 節では、使用するコンクリートの種類を同一にし、補強筋を数種類組み合わせたものについて解析を行っている。また、4.2 節では、補強筋の種類を同一にし、コンクリートの種類を変化させて解析を行っている。その際、入力する衝撃力波形のデータは衝撃力作用時から最大衝撃力までの時間をほぼ 0.002 秒で一定にしている。衝撃破壊挙動解析は、最大衝撃力の異なる種々の波形の衝撃作用をコンクリート版に与えて行ったが、解析結果には各種コンクリート版の破壊したもののうち、それぞれ最大衝撃力が最も小さくなる衝撃作用を与えた際のコンクリート版の挙動について示している。次に 4.3 節では、同一のコンクリート版に載荷速度の異なる衝撃力を作用させ、衝撃破壊挙動への載荷速度の影響について検討を行っている。

4.1 補強筋の違いによる比較

Table 3 は、普通コンクリートに各種補強筋を組み合わせた場合の、RC 版についての衝撃破壊挙動解析結果をまとめたものである。また、Fig. 7 は、各種 RC 版の衝撃力～版中央変位関係を示している。ここで、「RC-A1」等の記号については、前半分の「RC」が普通コンクリートを使用していることを表し、その後の「-A1」が FRP 筋 Type A1 を組み合わせていることを表している。また、「-35」は普通鉄筋 (SD 35) を表し、「-70」は高張力鉄筋 (SD 70) を表わしている。Table 3 と Fig. 7 から、破壊時衝撃力について比較すると、ヤング係数の大きい補強筋を使用した RC 版は

Table 3 Details of analytical results of concrete slabs with various types of reinforcement

Slab	Load at Failure (tf)	Deflection at Failure (mm)	Cracking Load (tf)	Failure Mode ¹⁾	Failure Condition ²⁾
RC-A1	50.00	2.46	17.78	B	C
RC-A2	50.00	2.46	17.78	B	C
RC-A3	45.00	2.13	17.73	B	C
RC-B	33.76	1.84	16.00	B→PS	R
RC-70	39.44	1.92	15.76	B→PS	C
RC-35	34.51	1.68	15.13	B→PS	R
RC-C1	19.00	1.06	11.79	B→PS	R
RC-C2	18.00	1.15	11.86	B→PS	R
RC-C3	24.48	1.27	12.70	B→PS	R
RC-D	13.74	1.34	10.46	PS	R

¹⁾ B: Bending, B→PS: Bending to Punching Shear, PS: Punching Shear

²⁾ C: Concrete Crushing, R: Reinforcement Failure

Fig. 7 Impact force-midspan deflection curves of concrete slabs with various reinforcement types

ど破壊時衝撃力は大きいことが分かる。例えば、「RC-A1」版の破壊時衝撃力は「RC-B」版の 1.4 倍、「RC-C1」版は「RC-B」版の 0.6 倍となっている。なお、ひびわれ発生荷重にも同様の傾向が現れている。また、補強筋のヤング係数を大きくすることによって、破壊形式は押し抜きせん断破壊モードから曲げ破壊モードに改善されることが分かる。ヤング係数が等しい補強筋を用いた RC 版同士で比較すると、破壊時衝撃力はほぼ等しい値を示しているが、「RC-A1～A3」版においては、補強筋の引張強度が小さい「RC-A3」版の破壊時衝撃力が最も小さくなっている。一方、「RC-70」、

Fig. 8 Comparison of deformation modes of concrete slabs with various reinforcement types

「RC-35」, 「RC-B」版においては, 降伏点をもたない FRP 筋 Type B を用いた「RC-B」版の破壊時衝撃力が最も小さくなっている。次に, Fig. 8 (a)~(d) は, それぞれ「RC-A1」版, 「RC-B」版, 「RC-C1」版, 「RC-D」版の破壊時変形モードを示したものである。これより, 「RC-A1」版は, 主鉄筋および配力筋方向ともに版端部から中央に向かって滑らかな変形を呈する曲げ破壊モードとなっていることが分かる。「RC-B」版および「RC-C1」版は, 高次の振動の卓越により波打ったように変形しており, 曲げ挙動先行の押し抜きせん断破壊モードとなっている。これに対して, 「RC-D」版では主鉄筋および配力筋両方向の変形が版端部でほとんど生じず, 版中央部での局部変形が卓越する純押し抜きせん断破壊モードとなっている。

4.2 コンクリートの種類による比較

Table 4 は, FRP 筋 Type B, C1, C2 と, 各種コンクリートをそれぞれ組み合わせたコンクリート版の衝撃破壊挙動の解析結果であり, また, Fig. 9 は衝撃力～版中央変位関係を示している。ここでは, FRP 筋 Type B, C1, C2 を対象に, SFRC, HRC 版が現状の FRP ロッドの弱点であるヤング係数の小さいことおよび脆性的な破断を生じることを, コンクリートの性能改善によって如何に補うことができるかを解析的に検討するものである。Table 4 および Fig. 9 より, この 3 種類の補強筋を使用した場合, 破壊時衝撃力は, RC 版, HRC 版, SFRC 版の順に大きくなっている。また, 各種コンクリートにおいては, FRP 筋 Type B を用いたコンクリート版の方が, Type C1, C2 よりも破壊時衝撃力

Table 4 Details of analytical results of concrete slabs with various concrete types

Slab	Load at Failure (tf)	Deflection at Failure (mm)	Cracking Load (tf)	Failure Mode ¹⁾	Failure Condition ²⁾
RC-B	33.76	1.84	16.00	B→PS	R
HRC-B	44.69	1.62	26.20	B	R
SFRC-B	82.35	2.89	21.70	B	R
RC-C1	19.00	1.06	11.79	B→PS	R
HRC-C1	30.00	1.90	20.92	B→PS	R
SFRC-C1	40.00	1.77	15.76	B→PS	R
RC-C2	18.00	1.15	11.86	B→PS	R
HRC-C2	30.00	1.99	20.92	B→PS	R
SFRC-C2	48.95	1.96	16.02	B	R

¹⁾ B: Bending, B→PS: Bending to Punching Shear, PS: Punching Shear

²⁾ C: Concrete Crushing, R: Reinforcement Failure

Fig. 9 Impact force-midspan deflection curves of concrete slabs with various concrete types

は大きくなっている。Type C1, C2 の破壊時衝撃力について比較すると、RC 版、HRC 版ではあまり違いはみられないが、SFRC 版では 2 種類の補強筋のうち破断ひずみの大きい FRP 筋 Type C2 を用いた SFRC 版の方が破壊時衝撃力は大きくなっている。一方、各種コンクリート版の剛性について比較すると、HRC 版、RC 版の剛性はひびわれ発生後に大きく低下しているが、SFRC 版の剛性低下の割合は他の版ほど大きくないことが分かる。これは、コンクリートに混入されている鋼繊維によって、ひびわれの進展が抑制されているためと考えられる。FRP 筋 Type C1, C2 を用いた場合、HRC 版、SFRC 版とすることによって、破壊性状（破壊時衝撃力、破壊時変位、ひびわれ発生荷重）を大きく改善することができる。また、FRP 筋 Type B を用い

る場合には、SFRC 版とすることによって同様に破壊性状は大きく改善される。さらに、破壊形式を比較すると、ヤング係数が小さく降伏点をもたない FRP 筋 Type C1 を用いたコンクリート版は、HRC 版、SFRC 版と組み合わせることによる改善効果は認められないが、FRP 筋 Type B と Type C2 を用いたコンクリート版に関しては、SFRC 版にすることで曲げ破壊モードへ改善されるのが分かる。

4.3 載荷速度の違いによる比較

ここでは最大衝撃力および作用時間を変化させ、コンクリート版の衝撃破壊挙動に対する載荷速度の影響について検討を行う。解析には、普通コンクリートと FRP 筋 Type B を組み合わせた「RC-B」版を用いる。

解析結果を Table 5 に、また衝撃力～変位関係を Fig. 10 にそれぞれ示す。これらより、載荷速度が速くなると破壊時衝撃力は大きく増加しているのが分かる。また、ひびわれ発生荷重に関しても、載荷速度が速くなることにより増加する傾向がみられる。次に、各載荷速

Table 5 Details of analytical results of concrete slabs under various loading rates

Code	Loading Rate (tf/ms)	Load at Failure (tf)	Deflection at Failure (mm)	Cracking Load (tf)	Failure Mode	Failure Condition ²⁾
1B	221.81	99.81	0.08	35.74	PS	C
2B	86.78	73.76	1.46	21.54	PS	R
3B	41.59	58.22	2.38	19.04	PS	R
4B	14.13	34.62	2.15	14.71	B→PS	C
5B	11.90	34.52	2.72	13.90	B→PS	R
6B	8.91	29.41	2.18	12.71	B	C
7B	8.30	28.22	2.20	12.74	B	C
8B	5.50	23.66	2.03	11.04	B	C
9B	4.99	20.47	1.49	10.37	B	C

¹⁾ B: Bending, B→PS: Bending to Punching Shear, PS: Punching Shear

²⁾ C: Concrete Crushing, R: Reinforcement Failure

Fig. 10 Impact force-midspan deflection curves of concrete slabs under various loading rates

(a) 1B slab ($\nu_L=221.81\text{tf/msec}$)

(b) 8B slab ($\nu_L=5.50\text{tf/msec}$)

Fig. 11 Crack propagation in cross section under different loading rates

度におけるコンクリート版の剛性を比較すると、Fig. 10の曲線の勾配から、載荷速度が速くなることによって初期剛性が著しく高くなることが分かる。また、載荷速度が10 tf/msec程度の場合、ひびわれ発生後にコンクリート版の剛性は大きく低下し、衝撃力～変位関係は緩やかな曲線を描くのにに対し、載荷速度がかなり速くなる(200 tf/msec程度)とコンクリート版の剛性の低下は小さくなり、衝撃力～変位関係はほぼ直線的に変化しているのが認められる。これらのことから、一般的に言われている「載荷速度が速くなると、慣性力の影響が大きくなるため見かけの剛性が高くなり、破壊時衝撃力は増大する。」という傾向が確認される。一方、破壊形式に関しては、載荷速度が速くなることにより、曲げ破壊モードから押し抜きせん断破壊モードへの移行がみられる。これは、載荷速度が速くなることにより局部的に変形が集中し易くなるためと考えられる。破壊時変位を各載荷速度について比較すると、載荷速度が比較的遅い場合(10 tf/msec程度)、破壊時変位はほぼ等しくなっているのが分かる。しかしながら、載荷速度がかなり速くなる範囲(1B～3B)では、載荷速度が速くなるにしたがって、破壊時変位は大きく減少しているのがわかる。次に、Fig. 11に一例として「1B」版と「8B」版のひび

われ進展状況を示す。これより、載荷速度が比較的遅い場合(8B)、版下面中央部からひびわれは発生し、上に伸びるとともに横にも広がっている。一方、載荷速度が比較的速い場合(1B)には、ひびわれは版下面中央部に発生するとともに、版上面にも発生しており、高次振動の卓越の影響が認められる。また、ひびわれは、横方向へは広がらずに版の内側へ伸びていき、押し抜きせん断破壊を呈しているのが確認される。

5. 耐衝撃性の評価

5.1 耐衝撃性指標の概略

従来の衝撃作用下におけるコンクリート構造物の挙動に関する研究より、載荷速度が増すと破壊時衝撃力は増加するが、破壊時変位は減少するという靱性低下の現象が指摘されている¹¹⁾。また載荷速度が速くなると、破壊形式は曲げ破壊から押し抜きせん断破壊に移行することが知られている¹³⁾。したがって、耐衝撃設計の確立のためにはこれらの結果をふまえ、耐衝撃性を定量的に評価するための指標が必要である。本研究では衝撃作用を受けるコンクリート構造物の耐衝撃性は、おおむね次の項目で評価できると考えた。

a) 耐衝撃力(破壊時衝撃力)の向上…衝撃作用時

間が等しい場合、破壊時衝撃力が大きいほど耐衝撃性に優れている。

- b) 破壊時変位低下の抑制…コンクリート構造物が小さい変位で破壊に至るより、大きく変位してから破壊に至る方が、エネルギーを吸収するという面から耐衝撃性に優れている。
- c) 破壊エネルギーの向上…破壊エネルギーは、衝撃力と変位から決定されるものであるから、コンクリート構造物に加えられた衝撃作用を総合的に評価するのに適している。
- d) 局所変形の抑制…破壊形式を大きく分けると、曲げ破壊と押し抜きせん断破壊に分けられ、押し抜きせん断破壊は曲げ変形後に押し抜きせん断破壊する形式と、変形が中央部にのみ集中して起こる押し抜きせん断破壊に大別することができる。これらの破壊形式のうち RC 版全体がなめらかに変形する曲げ破壊では、RC 版に作用するエネルギーが分散吸収されるが、押し抜きせん断破壊の場合、エネルギーがある部分に集中されるため局所的に変形し、エネルギーの吸収が曲げ破壊に比べかなり小さくなる。
- e) 破壊形式の改善…d) の場合と共通し、全体が大きく変形する曲げ破壊の方が耐衝撃性に優れている。

これらの項目による耐衝撃性を定量的に評価するため、ここでは以下の指標を用いることにする：①破壊時衝撃力、破壊時変位およびひびわれ発生荷重、②全エネルギーおよび力積、③局所変形指数、たわみ体積および衝撃破壊モード。ここで全エネルギーとは、衝撃力～変位曲線で囲まれる面積のことで、力積とは、衝撃力～時間曲線で囲まれる面積のことである。指標①は耐衝撃性 a), b), c) を、指標②は耐衝撃性 c) を、指標③は耐衝撃性 d), e) をそれぞれ検討するために用いる。解析対象は 3. で示したコンクリートと補強筋を組み合わせた計 30 種類のコンクリート版で、上述の指標を基に耐衝撃性の検討を行うとともに、上述各指標の有効性を考察する。解析モデルは 3. で示したものを使用し、解析方法は 4.1 節、4.2 節と同じ方法を適用する。

5.2 破壊時衝撃力

Fig. 12 は、各種コンクリート版の破壊時衝撃力の変化を図示したものである。これより、鋼繊維混入コンクリートを用いることによる破壊時衝撃力の改善効果の大きいことが分かる。SFRC 版および HRC 版それぞれにおいて、補強筋による破壊時衝撃力の改善効果を比較すると、両者とも補強筋 Type B 以上のヤング係数をもつ補強筋を適用した場合の破壊時衝撃力の変化にあまり差がなくなることが分かる。したがって、SFRC 版、

Fig. 12 Impact force at failure of various concrete slabs

HRC 版に用いる補強筋としては、FRP 筋 Type B (鉄筋とのヤング係数比が 1.0) 程度の材料特性を有する補強筋が最適であると考えられる。これに対して RC 版の場合は、補強筋のヤング係数の大きい補強筋と組み合わせるほど、破壊時衝撃力は大きくなることが分かる。また、この図から FRP 筋 Type C1～C3 に SFRC, HRC を組み合わせることによって、「RC-35」版と同程度もしくはそれ以上の破壊時衝撃力が得られることが明らかであることから、現時点で FRP 筋 Type C1～C3 を用いる場合、高強度もしくは、鋼繊維混入コンクリートと組み合わせるのが妥当と考えられる。

5.3 破壊時変位

Fig. 13 は各種コンクリート版の破壊時変位の変化を示したものである。これらと破壊時衝撃力 (Fig. 12) とをあわせて考察すると、本解析の範囲内では、鋼繊維混入コンクリートは、FRP 筋 Type C 以上のヤング係数 (鉄筋の 0.5 倍) を有する補強筋を組み合わせることで、RC 版に比べて破壊時変位は大きく改善されることが分かる。一方、「RC-A1」版と「HRC-A1」版、および「RC-A2」版と「HRC-A2」版を比較すると、破壊時衝撃力はほぼ等しいが、破壊時変位は「RC-A1」版および「RC-A2」版の方が大きくなっている。したがって FRP 筋 Type A1, Type A2 と高強度コンクリートを組み合わせることの利点はほとんどないと推察され

Fig. 13 Deflection at failure of various concrete slabs

る。一方、鉄筋 (Type SD 35) と FRP 筋 Type C 等は、HRC 版において破壊時変位および破壊時衝撃力の改善がみられることから、高強度コンクリートとの組み合わせとしては、鉄筋または Type C と同程度の材料特性をもつ補強筋が適していると思われる。

5.4 ひびわれ発生荷重

Fig. 14 に各種コンクリート版のひびわれ発生荷重の変化を示す。Fig. 14 から、どの補強筋と組み合わせたコンクリート版においても、RC 版、SFRC 版、HRC 版の順にひびわれ発生荷重が大きくなっている。この現象の主な原因として、各種コンクリートの引張破断ひずみが RC, SFRC, HRC の順に大きくなっていることがあげられる。したがって、ひびわれ発生を効果的に抑制するには、高強度コンクリートを用いるのが適切である。また、FRP 筋 Type C1~C3 においては、SFRC 版、HRC 版とすることで、FRP 筋 Type D に関しては HRC 版とすることで、「RC-35」版と同程度もしくはそれ以上のひびわれ発生荷重とすることが可能である。また、RC 版の場合は、ヤング係数の大きい補強筋を用いるほど、ひびわれ発生荷重は大きくなっているが、SFRC 版および HRC 版の両者の場合、補強筋 Type B 以上のヤング係数を有する補強筋を組み合わせた際のひびわれ発生荷重はあまり改善されない結果を示している。したがって、SFRC 版、HRC 版の場合、FRP 筋 Type B (鉄筋とのヤング係数比が 1.0) 程度の

材料特性を有する補強筋が適当であると考えられる。

5.5 全エネルギー

Fig. 15 に、各種コンクリート版の全エネルギーの変化を図示している。ここで、全エネルギーとは衝撃力～コンクリート版中央変位曲線で囲まれた面積と定義した。この場合、全エネルギーは 1 回の衝撃作用で破壊に至るのに必要なエネルギーと考えられる。この図より、RC 版、SFRC 版においてはヤング係数の大きい補強筋を用いるほど全エネルギーは増加することがわかる。特に、Type A1~A3 等のヤング係数の大きい FRP 筋を SFRC 版に用いることによって、全エネルギーはかなり大きくなっていることが分かる。また、FRP 筋 Type C1~C3 を HRC 版、SFRC 版に適用することにより、「RC-35」版と同程度もしくはそれ以上の全エネルギーとすることが可能である。しかしながら、Type D のようなヤング係数の小さい補強筋を用いた場合には、どのコンクリート版としても全エネルギーに差がなくなることが分かる。また、HRC 版に Type A1, A2 の補強筋を組み合わせた場合には全エネルギーは RC 版に比べて小さくなっていることや、鉄筋を用いた場合とほとんど差がないことも明らかである。したがって、全エネルギーの増加を期待するには、SFRC 版とすることが適当であり、少なくとも鉄筋の 0.5 倍 (FRP 筋 Type C1 等) 以上のヤング係数を有する FRP ロッドを用いる必要がある。

5.6 力 積

力積は、衝撃力～時間曲線で囲まれた面積のことである。Fig. 16 に各種コンクリート版の力積の変化を示す。本解析では衝撃力作用時から、最大衝撃力までの時間をほぼ 0.002 秒と一定としており、衝撃力～時間曲線の衝撃力の軸のみを拡大、縮小して求めているため、Fig. 16 は破壊時衝撃力の図と類似していることが分かる。したがって、FRP 筋 Type A1 程度のヤング係数 (鉄筋の 1.3 倍) をもつ補強筋は、鋼繊維混入コンクリートと組み合わせることにより、力積はかなり増加することが分かる。また、FRP 筋 Type D を使用する場

Fig. 14 Cracking load of various concrete slabs

Fig. 15 Total energy of various concrete slabs

Fig. 16 Impulse of various concrete slabs

Fig. 17 Calculation of curvature at failure of concrete slabs

合、力積の面からは普通コンクリートと組み合わせるのにとどめておくのが適切であると考えられる。

5.7 局部変形指数

一般に衝撃作用下において、コンクリート構造物は局部的に変形した状態で破壊し易くなる。ここでは破壊時における局部変形を定量的に評価するための指標として、版中央における破壊時曲率 ($1/R$) を取り上げる(式(3), Fig. 17 参照)。しかしこの破壊時曲率には、破壊時変位の大小の影響が含まれ直接比較することができない。そこで破壊時曲率から破壊時変位の大小の影響を取り除くため、式(4)のように破壊時曲率を破壊時変位で除した値を局部変形指数 (I_L) と定義する。

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{\Delta x^2} (\delta_1 + \delta_3 - 2\delta_2) \quad (3)$$

(ただし $\Delta x = 18 \text{ cm}$)

$$\text{局部変形指数 } (I_L) = \frac{\text{破壊時曲率 } (1/R)}{\text{破壊時変位 } (\delta_u)} \quad (4)$$

各種コンクリート版の、スパン方向に対する局部変形指数の変化を Fig. 18 に示す。この図より Type D を用いたコンクリート版の局部変形指数は、いずれも他のコンクリート版に比べてかなり大きな局部変形指数を示しており、コンクリート版中央部の局部変形が大きいことがわかる。他のコンクリート版の局部変形指数は $5 \sim 15 \times 10^{-4}/\text{cm}^2$ 程度となっており、コンクリート版中央部の変形は滑らかであると推察される。しかしながら、FRP 筋 Type C1 を用いたコンクリート版の局部変形指数にはかなりむらがあり、RC 版、HRC 版に比べて SFRC 版の局部変形指数がかなり小さいことがわかる。これは、Fig. 19 に示すように(実線は曲げ挙動先行の押し抜きせん断破壊モードを示しており、点線は曲げ破壊モードを示している)、 $\Delta x \leq 18 \text{ cm}$ の範囲では

Fig. 18 Index of local deformation of various concrete slabs

Fig. 19 Distribution of deflection for different failure modes

曲げ性状の変形を呈し、 $\Delta x > 18 \text{ cm}$ において変形が集中したためと考えられる。したがって、局部変形指数は、Type D のように衝撃作用によってコンクリート版の中央部のみ局部変形する破壊モードを、定量的に評価する指標として非常に有効となると考えられる。

5.8 たわみ体積

たわみ体積とは、版全体の変位が0の状態、つまり衝撃力が作用する前の状態を基準面とし、破壊時におけるコンクリート版の版全面のたわみ分布を積分し、その変形状態を体積で表示できるものである。したがって、コンクリート版の破壊形式が曲げ破壊である場合、コンクリート版全体がなめらかに大きく変形しているため、たわみ体積は大きくなるのに対し、押し抜きせん断破壊に至る場合には、変形が一部分に集中するため、たわみ体積は小さくなると考えられる。Fig. 20 に各種コンクリート版のたわみ体積の変化を示す。この図より、FRP 筋 Type D を除く補強筋に対し SFRC を適用すると、普通コンクリートと組み合わせた場合よりもたわみ体積を著しく大きくすることが可能となり、エネルギー吸収能、すなわち靱性の改善が見込める。一方、高強度コンクリートを用いた場合、「HRC-A1」版および「HRC-A2」版においては、たわみ体積は少し増加している程度であり、また、破壊時衝撃力の増加はない (Fig. 12 参照) ことを考慮すると、靱性の改善はあまり見込めないと考えられる。他の HRC 版の場合、たわみ

Fig. 20 Volume displaced of various concrete slabs

Fig. 21 Failure mode of various concrete slabs

体積はRC版に対して増加しており靱性の改善がみられる。一方、FRP筋 Type C1～C3 では、HRC版、SFRC版に適用することにより、たわみ体積は「RC-35」版と同程度もしくはそれ以上とすることができる。しかしながら、FRP筋 Type Dを用いたコンクリート版に関しては、どの種類のコンクリートを用いた場合においてもほとんど差がみられなくなる。

5.9 衝撃破壊モード

Fig. 21は、各種コンクリート版の破壊形式の変化を分類して示したものである。この図より、ヤング係数の大きいFRP筋 Type A1～A3では、3種類のどのコンクリートと組み合わせた場合においても曲げ破壊モードとなっている。一方、Type B, SD 35, SD 70については、HRC版、SFRC版とすることでRC版の曲げ挙動先行の押し抜きせん断破壊モードを曲げ破壊モードに改善できることが分かる。FRP筋 Type C1～C3について比較すると、Type C2, C3ではSFRC版とすることによって曲げ破壊モードに改善されるが、Type C1についての破壊モードは依然として曲げ挙動先行の押し抜きせん断破壊モードであり、降伏点を持つType C2, C3の方が衝撃破壊モードの改善という点では優れていると考えられる。なお、FRP筋 Type Dについては、他のコンクリート版の破壊形式と著しく異なり、「RC-D」版は押し抜きせん断破壊モードとなり、HRC, SFRC

と組み合わせることにより、曲げ挙動先行の押し抜きせん断破壊モードに改善できる。

6. 結 論

本研究は、近年鉄筋にかわる新しい補強筋として注目されている連続繊維補強筋 (FRP ロッド) に注目し、衝撃作用下における破壊挙動特性を把握することを試みたものである。解析方法には積層化非線形有限要素法を用い、近い将来開発の期待できるFRP ロッドを含め、数種類の材料特性をもつFRP筋コンクリート版に対して解析を行った。また、種々の指標を用いて耐衝撃性を材料面からとらえ、定量的に評価することを試みた。以下に本研究の結果をまとめる。

- ① HRCは鉄筋のヤング係数以下のヤング係数を有するFRP筋に適用した場合、コンクリート版の耐衝撃性の改善が期待できる。また、コンクリート版のひびわれ発生を抑制するには、高強度コンクリートを用いるのが最適である。
- ② SFRCを用いることによって、コンクリート版の破壊時衝撃力、破壊形式、靱性等を総合的に改善することができる。また、鋼繊維がひびわれの進展を抑制するため、ひびわれ発生後の剛性低下はHRC版、RC版に比べて小さくなる。
- ③ FRP筋に降伏点をもたせることによって、コンクリート版の耐衝撃性をさらに改善できる可能性がある。
- ④ 载荷速度が増すと、慣性力の影響により見かけの剛性が増加し、ひびわれ発生荷重および破壊時衝撃力は著しく増加する。また、コンクリート版の変形が局部的になりやすく、破壊形式は曲げ破壊モードから押し抜きせん断破壊モードへ移行する。
- ⑤ 耐衝撃性評価の指標には、破壊時衝撃力、破壊時変位、ひびわれ発生荷重、全エネルギー、力積、局部変形指数、たわみ体積および衝撃破壊モードが有効であることが分かった。
- ⑥ 現在、製品化が行われているFRP筋 (Type C1～C3等) を、従来の普通鉄筋コンクリート版 (「RC-35」版) に鉄筋の代替として使用する場合は、HRC版あるいはSFRC版とすれば鉄筋コンクリート版 (「RC-35」版) と同程度かそれ以上の耐衝撃性が期待できる。
- ⑦ 破壊時衝撃力や破壊時変位等を総合的に評価している全エネルギーと、コンクリート版のエネルギー吸収能を表しているたわみ体積の2つの指標が、総合的観点からコンクリート版の耐衝撃性を評価していると考えられるので、設計を考える場合の指標として最も有効である。

〔謝 辞〕 本研究にあたって種々の援助を頂いた神戸大学大学院生 石橋照久氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会コンクリート委員会, 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用, コンクリート・ライブラリー第 72 号, 土木学会, 145 pp., 1992. 4
- 2) 土木学会: 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集, コンクリート技術シリーズ 1, 314 pp., 1992. 4
- 3) 藤井 学・宮本文穂: 衝撃荷重下におけるコンクリート構造物の挙動, コンクリート工学, Vol. 21, No. 9, pp. 25~36, 1983. 9
- 4) コンクリート工学編集委員会: 新素材-連続繊維によるコンクリートの補強, コンクリート工学, Vol. 29, No. 11, pp. 3~116, 1991.11
- 5) 日本建築学会, 連続繊維複合材料研究委員会: 新補強材のコンクリート構造物への適用に必要な評価項目の整理と現状の評価方法, 142 pp., 1990. 3
- 6) Miyamoto, A., King, M.W. and Fujii, M.: Non-linear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 4, pp. 411~419, Jul./Aug.

1991

- 7) 岡田 清編: 最新コンクリート工学, 国民科学社, pp. 147~165, 1986
- 8) Zienkiewicz C.C.: Finite Element Method, 3rd Edition, McGraw-Hill, UK, 787 pp., 1977
- 9) 内山武司・上田正生・土橋由造: 鉄筋コンクリート床版の弾塑性解析, 日本建築学会論文報告集, 第 276 号, pp. 33~41, 1979. 2
- 10) Ottosen N.S.: Failure Criterion for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, EM 4, pp. 527~535, 1977
- 11) 藤井 学・宮本文穂・森川英典: 衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの力学的挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 360 号, V-3, pp. 51~60, 1985. 8
- 12) 藤井 学・宮本文穂・鮎子多浩一・中辻純一郎: 鉄筋コンクリート版構造の衝撃破壊挙動解析に関する基礎的研究, 第 9 回 JCI 年次論文報告集, pp. 609~614, 1987. 6
- 13) Miyamoto, A., King, M.W. and Fujii, M.: Analysis of Failure Modes for Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 5, pp. 538~545, Sept./Oct. 1991

(原稿受理年月日: 1992 年 5 月 4 日)

Nonlinear Dynamic Analysis and Evaluation of Impact Resistance of FRP Reinforced Concrete Slabs

By Ayaho Miyamoto, Michael William King and Masafumi Mito

Concrete Research and Technology, Vol. 4, No. 1, Jan. 1993

Synopsis Practical application of FRP reinforcement to reinforced concrete structures is at present attracting technical attention. The object of this study is to make an analytical examination on how FRP rods influence the impact resistance of concrete slabs. The concrete slabs are modeled using the layered finite element method and the Newmark- β method is employed to solve the equations of motion during discrete time intervals. As a result, FRP rods are efficient as reinforcement, and the degree of contribution to impact resistance can be evaluated quantitatively by the following indexes; impact force at failure, volume displaced, impact failure mode, etc.

Keywords: FRP reinforcement, concrete slab, impact, nonlinear dynamic FEM, impact resistance, failure modes