

## 論文

## [2111] 連続繊維補強筋を用いた RC 版の衝撃破壊挙動解析と耐衝撃性評価

正会員 宮本文穂 (神戸大学土木工学科)

正会員 M.W.KING (神戸大学大学院)

正会員 石橋照久 (神戸大学大学院)

三戸雅文 (神戸大学大学院)

## 1. はじめに

近年、新素材の開発気運の隆盛とともに、コンクリート構造の分野で、補強材としての連続繊維補強プラスチック(FRP)材が注目を集め、その実用化に向けての研究が多方面で行われている<sup>1)</sup>。FRPは、軽量、高耐食性、高強度、非磁性等の優れた特性を持つことから、鉄筋の代替として腐食環境の海洋構造物やリモーターカーの非磁性がトウェイ等への適用が期待されている。

FRPロッドを鉄筋の代替として適用する場合、現状のFRPロッドは、①鋼材に比べヤング係数が小さい、②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こと等から、RC部材に対する主に静的荷重下での検討結果、①変形(たわみ、ひびわれ幅等)が大きくなる、②破壊が脆性的となり易い等の欠点が目立ちつつある<sup>1)</sup>。これらに対する対策として、FRPロッドの高強度を利用したプレストレス効果の付与等の検討が試みられている<sup>2)</sup>。

本研究は、FRPロッドに対する上述の利点・欠点が、エネルギー的観点からの評価基準が必要となる、偶発的外力である衝撃作用下での破壊挙動にどのような影響を及ぼすかを、理想的と考えられる力学特性を有する材料の提案を含めて解析的に検討するものである。

以上の観点から、本研究ではFRPロッドを鉄筋の代替としてRC版に適用した場合の衝撃破壊挙動解析<sup>3)</sup>を行い、これに基づいて各種RC版の耐衝撃性評価を試みる。その際、FRPロッドの製造方法および構成新素材の研究・開発はここ数年活発に行われており、将来的にはさらに高性能なFRPロッドの出現の可能性も見受けられることより、本研究では、既存の性能のほかに、近い将来開発の期待できるFRPロッドを含めて、数種類の特性を設定したFRPロッドRC版について耐衝撃性評価を行い、その優位性等を検討するものである。

## 2. 衝撃破壊挙動解析の概要と材料特性

2.1 解析手法の概要<sup>3)</sup>

衝撃破壊挙動解析には、非線形積層化有限要素法に動的解法の1つであるNewmark- $\beta$ 法( $\beta = \frac{1}{4}$ )を適用した。本解析で対象とするRC版は、 $130 \times 130 \times 13$ cmの2辺単純支持された複補強筋コンクリート版(補強筋比:  $\rho = 1.1 \times 10^{-2}$ ,  $\rho' = 5.5 \times 10^{-3}$ )で、スパンを120cmとする版中央部分等分布(ハッチ)载荷とした。本解析モデルでは、積層をRC版の厚さ方向にコンクリート層6層、補強筋層2層の計8層に分割した。なお、補強筋層の弾性係数は、実際の補強筋を等分布された薄い板状と仮定し、要素内のポアソン比をx, y両方向の補強筋量によって換算したものを与えた。また、各要素は20自由度を有する4節点(各節点5自由度)非適合長方形要素を用いた。本解析は以下のような仮定に基づいている<sup>3)</sup>: 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、コンクリートと補強筋の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

応力の影響については解析に取り入れた。③コンクリートの破壊条件には、Ottosenの3軸応力状態下での破壊条件<sup>4)</sup>を、また、補強筋については一軸破壊条件を適用した。コンクリートの材料特性は、各種コンクリート(普通コンクリート(RC), 高強度コンクリート(HRC), 鋼繊維混入コンクリート(SFRC))の静的材料一軸特性に基づくものを用いて<sup>5)</sup>、3軸応力状態における相当応力～相当ひずみ関係に変換した特性を用いた。④弾性範囲を超えるコンクリート要素は直交異方性体と仮定した。なお、各要素の破断および破壊条件の取扱いは、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した。

## 2.2 補強筋の力学的特性

図-1は、解析に用いた補強筋、すなわち、鉄筋2種類(SD35, SD70)とFRPロッド4種類(FRP Type A～D)の計6種類の応力～ひずみ関係を図示したものである。ここで、FRPロッドの力学的特性は繊維素材、結合材、繊維含有率、成形方法等により変化し、ある製品を特定して解析に用いるのは本研究のような場合あまり合理的とは言えない。そのため、設定したFRP Type A～Cの力学的特性は、FRPロッドの、鉄筋(SD35)に対するヤング係数比をそれぞれ1.3, 1.0, 0.5として、応力～ひずみ関係によって囲まれる面積、つまり、ひずみエネルギーが鉄筋(SD35)と同等という条件のもとで仮定したものである。また、異種の繊維を組み合わせることで、鋼材の降伏に似た現象を生じさせることが可能であるので、FRP Type Dはロッドの持つひずみエネルギーが鉄筋(SD35)とは異なるが降伏を持つように設定した。

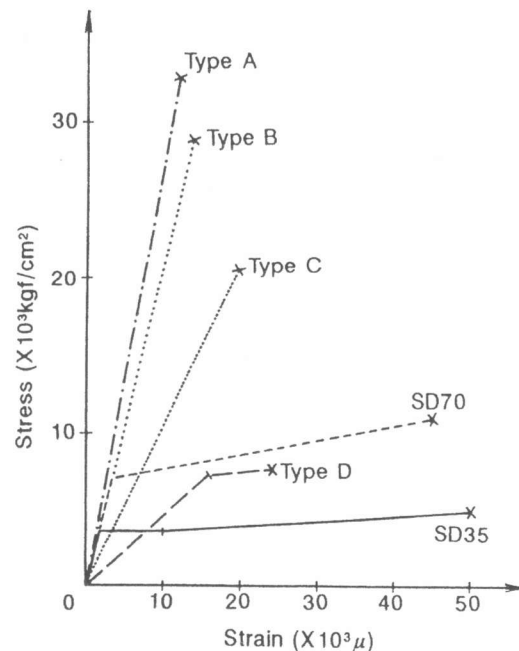


図-1 各補強筋で設定した応力～ひずみ関係

## 3. 解析結果と耐衝撃性評価

### 3.1 衝撃破壊挙動の比較

普通、高強度、鋼繊維混入の3種類それぞれのコンクリートに、図-1に示す補強筋6種類を適用し、計18種類のコンクリート版について解析を行った。本研究では、ソフトな衝撃<sup>6)</sup>を対象としているため、立ち上がりの比較的遅い衝撃力波形を基本モデルとした。今回の解析では、衝撃荷重作用時からほぼ0.002sec後に最大衝撃力に達する衝撃力波形を入力データとして与え、コンクリート強度および補強筋の種類を組合わせた個々のRC版について入力する衝撃力波形の最大衝撃力を漸増させ、最初に破壊した状態で種々の比較を行った。この入力波形の最大衝撃力到達時間は、過去に行われた同寸法の各種コンクリート版についての実験結果<sup>5)</sup>から得られたものである。本解析におけるコンクリート版の破壊は、コンクリートの圧壊または補強筋の破壊のどちらかが生じた時点とした。なお、破壊形式に関しては、変形性状、要素の破壊状態、ひびわれ分布等からソフトな衝撃現象に特有な曲げ(B)、曲げ挙動先行の押し抜きせん断(B→PS)および押し抜きせん断(PS)破壊に分類した<sup>6)</sup>。

#### (1) 補強筋の違いによる比較

表-1は、普通強度コンクリート版を各種補強材で補強した場合に対する解析結果をまとめて示した

ものであり、図-2はそれぞれのRC版の衝撃力～変位関係を示したものである。これより、破壊時衝撃力について比較してみると、ヤング係数の大きい補強筋を使用したコンクリート版ほど最大衝撃力が大きいことがわかる(表-1, 図-2参照)。これらのうち、FRPロッドのヤング係数を鉄筋と等しくした

表-1 普通コンクリート版に対する解析結果

Slab	Bar type	Loading rate* (tf/ms)	Load at failure (tf)	Deflection at failure (mm)	Cracking load (tf)	Concrete plasticity load**(tf)	Failure mode***
RC-A	A	25.00	50.00	2.46	17.78	29.12	B→PS
RC-B	B	18.84	33.91	1.41	15.13	23.06	B→PS
RC-70	SD70	20.76	39.44	1.92	15.76	23.29	B
RC-35	SD35	18.16	34.51	1.68	15.13	23.06	B→PS
RC-C	C	10.58	19.58	1.51	11.65	15.20	B→PS
RC-D	D	8.59	13.74	1.34	10.46	12.25	B→PS

\*Loading rate=Load at failure/Time to maximum impact force

\*\*Compression zone \*\*\*B:Bending, B→PS:Bending to Punching Shear

「RC-B」版は、「RC-35」版とほぼ同じ破壊性状(衝撃力, 破壊時変位, 破壊形式等)を示した。次に、図-3(a)～(d)は代表的RC版の破壊時変位モードを比較したものであるが、これより、「RC-A」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のに対して、「RC-35」版および「RC-B」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変形せず、版中央部での局部的変形が卓越するモードとなっている。これは、高次振動の卓越によるものであり、せん断の影響が大きくなる結果、押抜きせん断型の破壊モードに至ったものと考えることができる。さらに、押抜きせん断型破壊モードに至った「RC-B」版と「RC-35」版を比較すると、前者の方が主鉄筋および配力筋方向ともに破壊時変形モードの勾配が比較的緩やかであることから、「RC-B」版の方がより高次振動が卓越する結果、典型的な押抜きせん断破壊モードに至っていると言える。

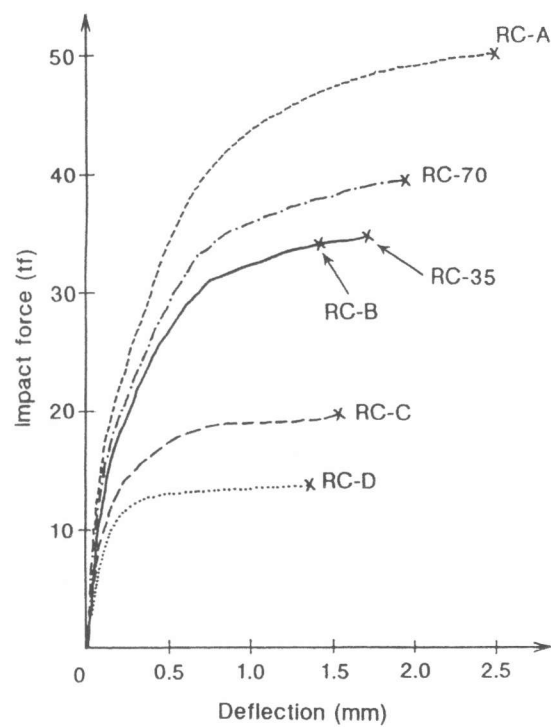


図-2 衝撃力～変位関係(RC版)

## (2) コンクリート種類の違いによる比較

表-2 および図-4は、FRP Type B, C補強材と各種コンクリートとを組合わせたRC版に対する衝撃破壊挙動の解析結果を比較したものである。すなわち、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解析的に検討するものである。図-4より、FRP Type B, C補強材を使用したRC版は、ともにSFRC, HRC, RC版の組合わせ順に破壊時衝撃力が大きく、中でもSFRC版が、特に破壊時衝撃力向上に優れていることが推測できる。また、表-2のひびわれ発生荷重をみると、FRP Type B, C補強材を使用したRC版は、ともに「SFRC」版の方が「HRC」版よりも小さな衝撃力でひびわれが生じているにもかかわらず、破壊時衝撃力は「SFRC」版の方がかなり大きくなっている。これは、「SFRC」版では「HRC」版よりも小さな荷重で一旦ひびわれが発生しても、コンクリート中に混入されている

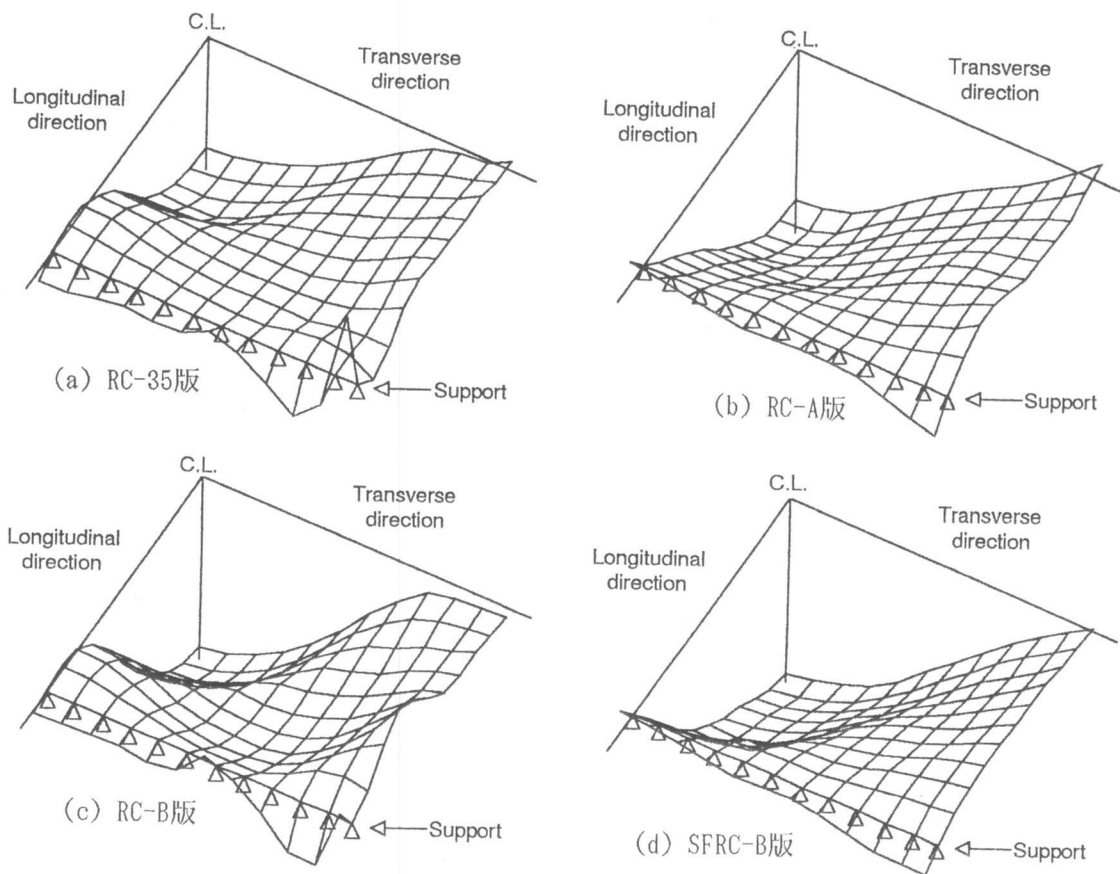


図-3 破壊時変形モードの比較

表-2 解析結果(FRP Type B, C)

Slab	Concrete type	Bar type	Loading rate (tf/ms)	Load at failure (tf)	Deflection at failure (mm)	Cracking load (tf)	Failure mode*
RC-B	Normal	B	18.84	33.91	1.41	15.13	B→PS
HRC-B	High	B	22.92	44.69	1.62	26.20	B
SFRC-B	SFRC	B	45.75	82.35	2.89	21.70	B
RC-C	Normal	C	10.58	19.58	1.51	11.65	B→PS
HRC-C	High	C	15.00	30.00	1.90	20.92	B→PS
SFRC-C	SFRC	C	20.00	40.00	1.77	15.76	B→PS

\* B:Bending, B→PS:Bending to Punching Shear

鋼繊維がひびわれの進展を抑制する結果、破壊時衝撃力の増大につながっているものと考えられる。一方、破壊モードについては表-3から、ヤング係数の小さいFRP Type C補強材を使用した場合、コンクリートの種類による破壊モードについての改善効果は認められないが、FRP Type B補強材を使用した場合にはSFRC版とすることにより、前出図-3(c)に示す「RC-B」版から図-3(d)の「SFRC-B」版のように破壊モードが押抜きせん断型から曲げ破壊モード型へ大きく改善されることがわかる。

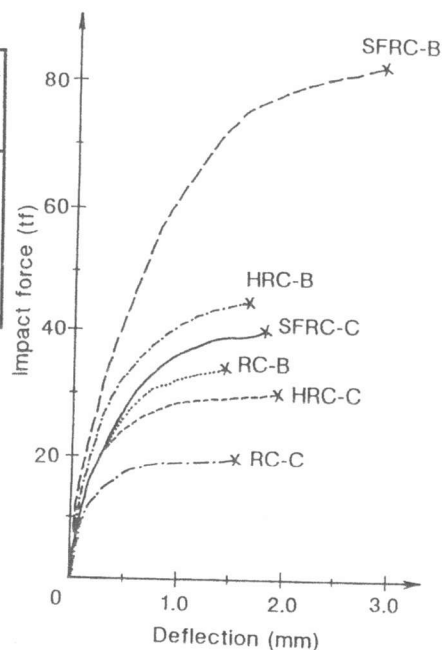


図-4 衝撃力～版中央変位関係 (FRP Type B, C)

### 3.2 耐衝撃性評価

ここでは、各種RC版の耐衝撃性評価指標として、①破壊時衝撃力、②衝撃力～版中央変位曲線で囲まれる全エネルギー、③局部変形指数および④衝撃破壊モードに着目し、それぞれの観点から耐衝撃性の検討を行うことにする。図-5～図-8は、横軸に補強材のヤング係数の大きい順に補強材の種類をとり、縦軸には、各評価指標をとったものをそれぞれ示したものである。

①破壊時衝撃力：図-5より、HRC版を使用する場合には、単に高強度、高弾性のFRPロッドを適用するよりも、ロッドのヤング係数の確保とともに降伏領域を持たせることにより破壊時衝撃力の向上が計れることがわかる。高強度、高弾性のFRPロッドは、SFRC版に適用することによってその破壊時衝撃力を大きく向上させることが可能となる。一方、ヤング係数の小さい補強筋には、高性能コンクリートを組合わせてもあまり破壊時衝撃力の向上は認められず、RC版への適用にとどめるのが妥当であると考えられる。

②全エネルギー：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であり、コンクリート版の吸収エネルギーにほぼ等しいと考えられる。図-6より、エネルギー的にはSFRC版とすることにより各補強筋を使用した場合に対する全エネルギーが他の版に比べてかなり大きく、鋼繊維混入による靱性効果の向上が期待できる。また、ヤング係数の小さいFRPロッドを使用した場合、RCおよびHRC版では、「RC-35」版よりも全エネルギーが小さく、靱性の改善効果を期待するにはヤング係数が少なくとも鉄筋の0.5倍(FRP Type C)程度以上のFRPロッドをSFRC版に対して適用する必要がある。

③局部変形指数：一般に、衝撃作用下では破壊時に局部変形を起こし易くなる。そこで、局部変形を評価する指標としては版中央付近の破壊時曲率(1/R)があるが、破壊時変位( $\delta_0$ )が異なる場合には直接比較することはできない。そこで、変位量の影響を除去するために破壊時曲率(1/R)を破壊時変位量( $\delta_0$ )で除した値を局部変形指数( $I_L$ )と定義する。図-7は主鉄筋方向についての局部変形

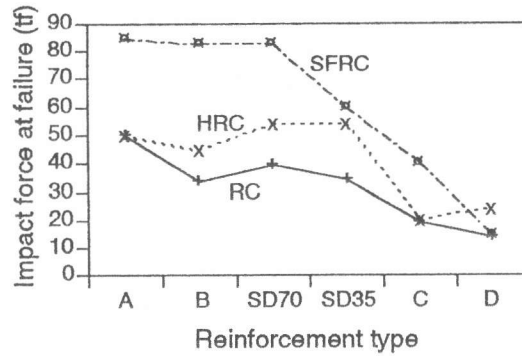


図-5 破壊時衝撃力

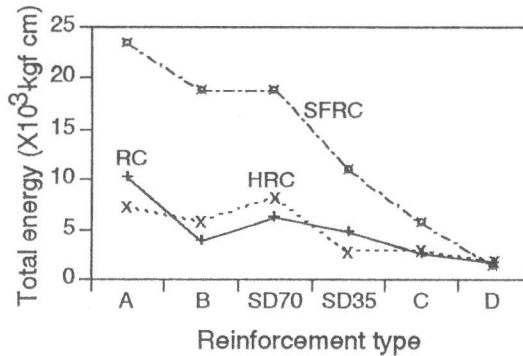


図-6 全エネルギー

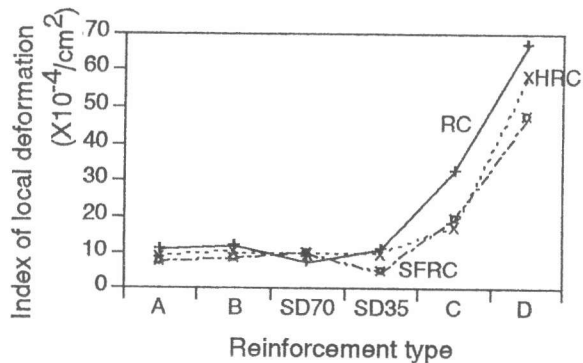


図-7 局部変形指数

B: Bending, B→PS(M): Bending → Punching Shear (Mild), B→PS(S): Bending → Punching Shear (Severe)

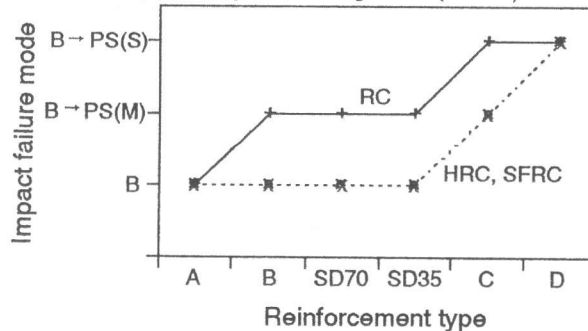


図-8 衝撃破壊モード

指数を表したものであるが、補強筋のヤング係数が小さくなると指数の値が急激に増大し、局部変形を生じ易い(押し抜きせん断破壊となり易い)ことがわかる。逆に、補強筋のヤング係数はある一定以上大きくしても局部変形指数にはあまり影響がない。

④衝撃破壊モード：図-8は、衝撃破壊モードを補強筋の種類で分類したもので、曲げ挙動先行の押し抜きせん断(B→PS)をその度合いによってさらに重(S)と軽(M)に分けた。これより、ヤング係数を鉄筋と等しくしたFRP Type Bを使用したRC版は鉄筋の場合と同じ破壊モードを示し、一方、ヤング係数を大きくしたFRP Type Aは3種類のコンクリート版とも曲げ破壊となり、FRPロッドのヤング係数を鉄筋より小さくすると、FRP Type C, Dのように押し抜きせん断破壊へ移行する傾向があることがわかる。

以上の各指標から総合的に検討すると、耐衝撃性を考慮したコンクリート版の設計を行う上で、破壊モードの改善を優先する場合は、鉄筋以上のヤング係数を持つ補強筋をHRC版またはSFRC版に適用するのが効果的であるが(図-8参照)、衝撃作用を受ける場合には破壊時衝撃力(図-5参照)やエネルギーの吸収性能(図-6参照)も重要な評価要因であり、これらを考慮するとSFRC版への適用がより効果的である。しかし、現状では鉄筋よりも高弾性なFRPロッドは開発されておらず、早期開発が期待される場所である。例えばType Cのような現状のFRPロッドを使用する場合には、SFRC版に適用することにより鉄筋コンクリート版(「RC-35」版)に対して衝撃破壊モード、破壊時衝撃力およびエネルギー吸収能に関して同等あるいはそれ以上の性能が得られるものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究によって得られた主な結果をまとめると次のようになる。

①各種コンクリート版の変形挙動を3次元表示することにより、高次振動の影響を含めた衝撃破壊モードを容易に判断することが可能となった。②ヤング係数の大きい補強筋を使用したコンクリート版ほど破壊時衝撃力を大きくでき、特に、破壊時衝撃力、衝撃破壊モードおよび靱性の総合的改善にはSFRCが有効であることが確認できた。③耐衝撃性を考慮した設計を行う場合には、破壊時衝撃力やエネルギー吸収性能の向上、破壊モードや靱性改善の面から、鉄筋以上のヤング係数を持つFRPロッドをSFRC版に対して適用する必要があることがわかった。④既存のFRPロッドを、従来の普通鉄筋コンクリート版(「RC-35」版)に鉄筋の代替とする場合は、衝撃破壊モード、破壊時衝撃力、エネルギー吸収能および靱性の改善効果の高いSFRCに適用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。⑤破壊時衝撃力、全エネルギー、局部変形指数および衝撃破壊モードは、各種RC版の耐衝撃性を評価するうえで有効な指標であることがわかった。

**参考文献：**1)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材への適用に必要な評価項目の整理と現状の評価方法、1990.3, 2)辻・関島・中島・斉藤：格子状FRPで補強したコンクリートはりの力学的性状とゲージレストレスによる改善効果、コンクリート工学論文集、第2巻、第1号、pp.85-94、1991年1月、3)Miyamoto, A., King, M. W., Fujii, M. : Nonlinear Dynamic Analysis of RC Slabs under Impulsive Loads, ACI Structural Journal, V. 88, No. 4, pp. 411-419, Jul./Aug. 1991, 4)Ottosen, N. S. : Failure Criterion for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, V. 103, EM4, pp. 527-535, Apr. 1977, 5)藤井・宮本・鮎子多・中辻：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年6月、6)Miyamoto, A., King, M. W., Fujii, M. : Analysis of Failure Mode for RC Slabs under Impulsive Loads, ACI Structural Journal, V. 88, No. 5, pp. 538-545, Sep./Oct. 1991