

(20) 連続繊維補強筋コンクリート版の衝撃破壊挙動と耐衝撃性評価

神戸大学大学院工学研究科 ○三戸 雅文
神戸大学工学部建設学科 宮本 文穂
神戸大学大学院自然科学研究科 M. W. KING
阪神高速道路公団 石橋 照久

1. まえがき

近年、コンクリート構造を対象とした補強材または緊張材として連続繊維補強筋(FRPロッド)の利用が注目されている^{1), 2)}。FRPロッドは、高強度、高耐食性、軽量、非磁性等の鉄筋に比べて優れた材料特性を持っており、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、鉄筋の代替として適用されることが期待されている。しかしながら、現状のFRPロッドは①鋼材に比べてヤング係数が小さい、②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て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て、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⁾を与えた場合に、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、コンクリート構造物の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なFRPロッドの出現の可能性が見受けられることから、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. 衝撃破壊挙動解析と材料特性

2.1 衝撃破壊挙動解析の概略⁴⁾： 本研究では、解析方法として積層化非線形有限要素法⁵⁾を、また、動的平衡方程式の解法としてNewmark- β 法⁶⁾を適用する。コンクリートの破壊条件は、Ottosenにより提案された破壊モデル⁷⁾を用いた。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⁴⁾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⁷⁾を用い、補強筋については一軸破壊条件⁶⁾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～相当ひずみ関係⁴⁾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を用いる。

2.2 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、130×130×13cmの2辺単純支持複補強筋コンクリート版(スパン長120cm；補強筋比 $\rho=1.1\%$, $\rho'=0.55\%$)で、このコンクリート版をFig. 1(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. 1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⁸⁾を参考にし

た普通コンクリート (RC, 圧縮強度 $\approx 350\text{kgf/cm}^2$)、高強度コンクリート (HRC, 圧縮強度 $\approx 900\text{kgf/cm}^2$)、鋼繊維混入コンクリート (SFRC, 圧縮強度 $\approx 400\text{kgf/cm}^2$) の3種類とする。補強筋は、鉄筋2種類 (SD35, SD70) と FRP 筋8種類 (Type A1~D) の計10種類とし、Fig. 2にその材料特性 (応力~ひずみ関係) を示す。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たい。そこで、FRP筋の材料特性を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 (SD35) の静的軸引張応力~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。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 $45,000\mu$ 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。

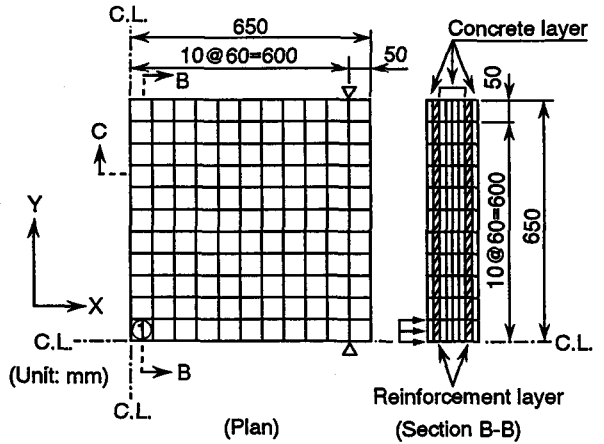


Fig. 1 Layered finite element meshes (1/4section)

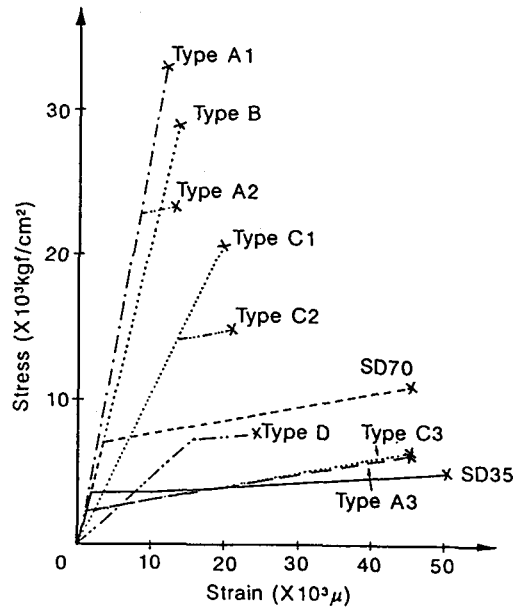


Fig. 2 Idealized stress-strain curves of reinforcement

3. 解析結果および耐衝撃性評価

3.1 各種コンクリート版の衝撃破壊挙動の比較： 解析には3種類 (RC, HRC, SFRC) それぞれのコンクリート版の補強に、Fig. 2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。本研究ではソフトな衝撃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用いている。本解析では、衝撃作用時からほぼ0.002sec後に最大衝撃力に達する衝撃力波形⁹⁾を入力データとして与え、各種コンクリート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ている。本解析におけるコンクリート版の破壊の定義を、コンクリート要素の圧壊または補強筋要素の破断のどちらかが生じた時点としている。また、解析上の最終的な破壊モードは、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。

(1) 補強筋の違いによる比較： Table 1およびFig. 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。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(SD35)を表し、「-70」は高張力鉄筋(SD70)を表わしている。Table 1とFig. 3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版ほど破壊時衝撃力は大きいことが分かる。また、ひびわれ発生荷重にも同様の傾向が現れている。破壊モードは、補強筋のヤング係数を大きくすることによって、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。次に、Fig. 4(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。

(2) コンクリートの種類による比較： Table 2およびFig. 5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と脆性的な破断を生じることが、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 2およびFig. 5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。

3.2 耐衝撃性の評価： 本研究では耐衝撃性の評価指標として、①破壊時衝撃力、②全エネルギーおよび③

Table 1 Details of analytical results of concrete slabs with various reinforcement types

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

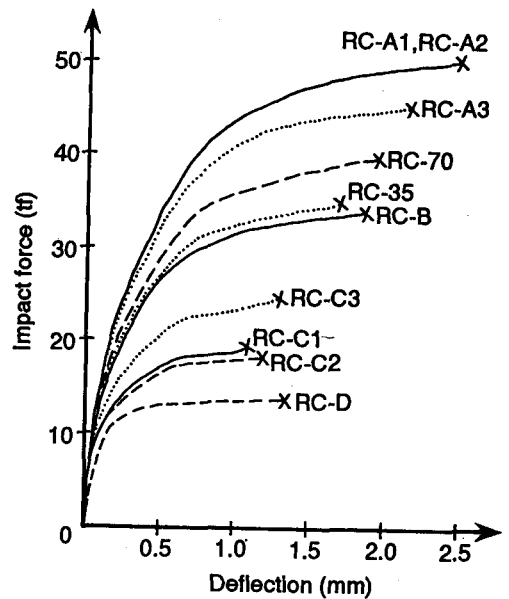


Fig. 3 Impact force-midspan deflection curves of concrete slabs with various reinforcement types

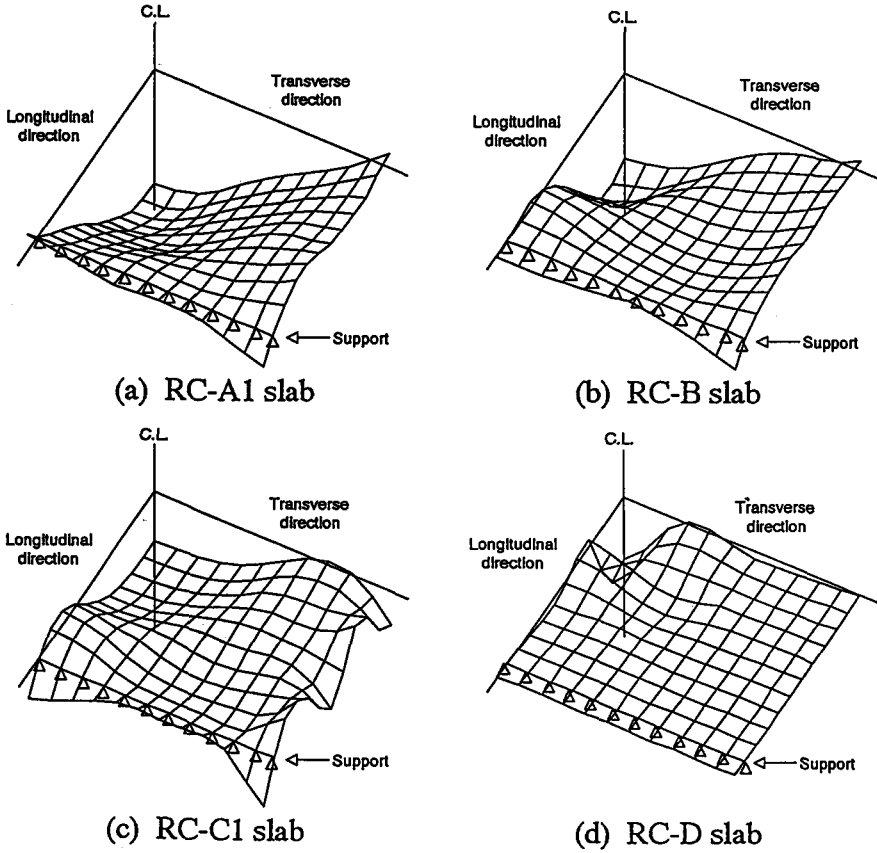


Fig. 4 Comparison of deformation modes of concrete slabs with various reinforcement types

Table 2 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

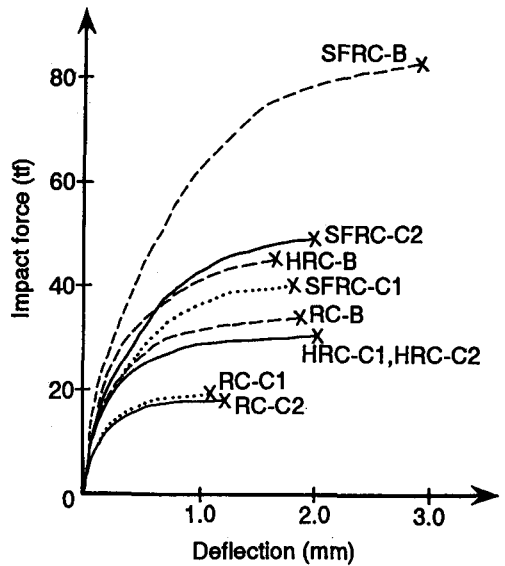


Fig. 5 Impact force-midspan deflection curves of concrete slabs with various concrete types

たわみ体積を設定した。これらの指標をもとに耐衝撃性を定量的に評価することを試みるとともに、それぞれの指標の有効性の検討を行う。

(1) 破壊時衝撃力： Fig. 6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。また、補強筋Type B以上のヤング係数をもつ補強筋をSFRC版およびHRC版に適用した場合、破壊時衝撃力の変化にあまり差がなくなることから、SFRC版、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。また、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認められる。

(2) 全エネルギー： Fig. 7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ている。したがって、全エネルギーとは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ると考えられる。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。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いことから、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。

(3) 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。コンクリート版の破壊モードが曲げ破壊の場合はコンクリート版全体が大きく変形するのに対し、押し抜きせん断破壊の場合は局部的に変形することから、この指標はコンクリート版の破壊モードと関連しており、コンクリート版の靱性を評価できると考えられる。Fig. 8に各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版を適用すると、普通コンクリートと組み合わせ

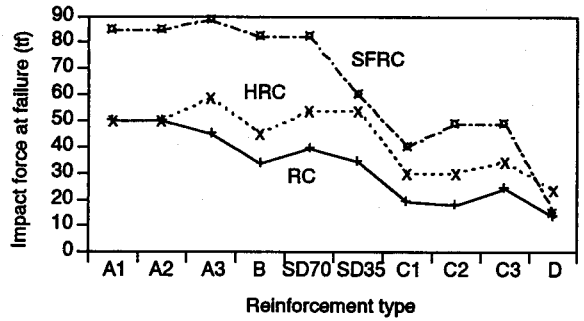


Fig. 6 Impact force at failure of various concrete slabs

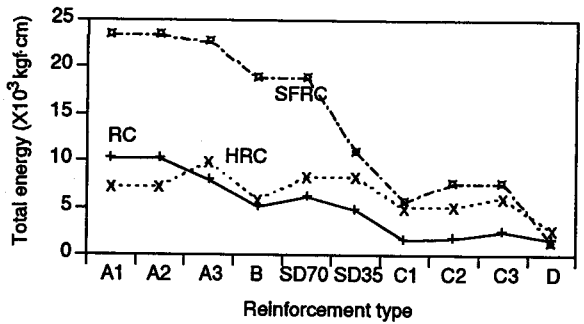


Fig. 7 Total energy of various concrete slabs

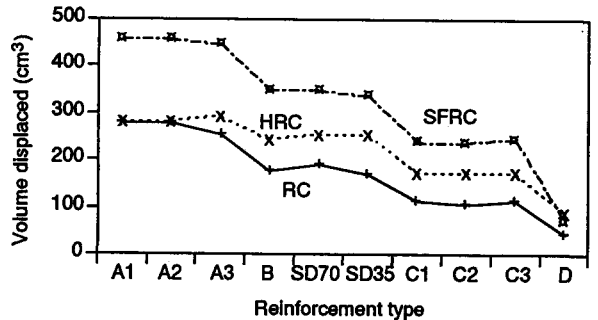


Fig. 8 Volume displaced of various concrete slabs

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。しかし、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い。また、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.6参照)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。

4. 結論

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 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。
- 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、破壊モード、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 耐衝撃性評価の指標には、破壊時衝撃力、全エネルギーおよびたわみ体積が有効であることが分かった。
- ⑤ 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。

参考文献

- 1)土木学会コンクリート委員会,連続繊維研究小委員会: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,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1,1992.4
- 3)藤井・宮本: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.9,1983.9
- 4)Miyamoto, A., King, M. W. and Fujii, M.: Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, ACI Structural Journal, Vol.88, No.4, Jul./Aug.1991
- 5)内山・上田・土橋: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,1979.2
- 6)藤井・宮本・森川: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-3,1985.8
- 7)N. S. Ottosen: Failure Criterion for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.103, EM4,1977
- 8)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, Sept./Oct.1991
- 9)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,1987.6