

積層コンクリート版の衝撃特性と耐衝撃性の評価

Impact Behavior and Resistance of Multi-Layered Composite Slabs

宮本文穂* 三戸雅文** 北山 篤***

Ayaho MIYAMOTO*, Masafumi MITO** and Atsushi KITAYAMA***

*工博 神戸大学助教授 工学部建設学科(〒657 神戸市灘区六甲台町)

**工修 建設省河川局防災課(〒100 東京都千代田区霞ヶ関2-1-3)

*** 神戸大学大学院 自然科学研究科博士前期課程(〒657 神戸市灘区六甲台町)

In this paper, some evaluations of the impact resistance of multi-layered composite slabs which were combined with normal concrete(RC), high strength concrete(HRC) and fibre reinforced concrete(SFRC) are performed based on a few indexes. Impact behaviors including the ultimate behavior and failure modes are analyzed using the dynamic layered finite element method. The results give an indication of the effective combinations of both the HRC and SFRC with the RC slab for the multi-layered composite slab under impact loading conditions.

Key Words: multi-layered composite slab, impact behavior, impact resistance, dynamic layered FEM

1. はじめに

衝撃荷重を受けるコンクリート構造物は非常に複雑な挙動を示し、静的荷重に衝撃係数を乗じて衝撃効果として割増しを行う従来の設計手法では不十分であると考えられる¹⁾。したがって、衝撃荷重の作用に対しては、独自の考え方に基づく設計手法の開発が望まれ、特に、効果的な耐衝撃性の評価が必要とされる。本研究では、種々の特性を有するコンクリートから成る積層構造が耐衝撃性向上に有利になると考えられることから、まず、普通コンクリート(RC)と、高強度コンクリート(HRC)および鋼繊維混入コンクリート(SFRC)とを、その特性に応じて組み合わせた積層コンクリート版を対象とする衝撃破壊挙動解析を行うことによって、各種積層版の破壊挙動特性を明らかにする。次いで、主にエネルギー的考え方に基づいた耐衝撃性指標を設定することによって、衝撃荷重下の各種積層コンクリート版の耐衝撃性がどのように変化するかを定量的、定性的に検討をするものである。

撃作用、すなわち最大荷重に達するまでの時間が $10^{-1} \sim 10^{-3}$ sec程度の衝撃作用に主眼をおいたコンクリート版の力学的挙動の解明、さらには耐衝撃性の評価法や改善策についての現状を明らかにするための解析を行う。

2.2 解析手法の概要

本研究では衝撃破壊挙動解析として、本来2次元の解法である薄板の曲げ有限要素法³⁾を、積層化手法を用いて準3次元解法へと拡張した積層化非線形有限要素法⁴⁾を用いる。本解析では、図1のようにまず対象とするコンクリート版を6層に分割したコンクリート層と、その間に鉄筋層を上部、下部にそれぞれ主鉄筋、配力筋方向の補強鉄筋を考慮した上で挿入するとして積層版構造を考え、各層は平面応力状態にあるものとして取り扱う。

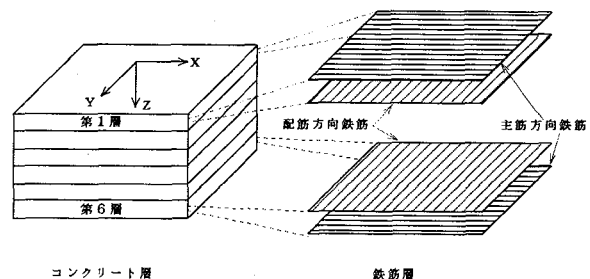


図1 積層版モデルと座標軸

2. 衝撃挙動解析手法と積層材の材料特性

2.1 概説

本研究では積層化非線形有限要素法を用いて、積層コンクリート版の衝撃挙動解析を行う。衝撃問題としては”ハードな衝撃”と”ソフトな衝撃”とに分類して考えるのが一般的となっている²⁾。そこで今回は、今後土木分野で重要な問題となると考えられるソフトな衝

また、動的平衡方程式の解法には、Newmark- β 法⁵⁾で $\beta=1/4$ とする定加速度法を用いた。各要素は4節点からなる非適合長方形要素とし、各節点は5自由度を有するものとした。コンクリートの破壊条件は、Ottosenにより提案された4パラメータ破壊モデル⁶⁾を用いる。従来、積層化非線形有限要素法で解析を行う場合に、コンクリートと鉄筋間の付着を完全付着として取り扱い解析を行っていた。しかしながら、コンクリートと鉄筋間の付着特性を無視して完全付着として解析を行うと、部材の破壊が進行した際に、構造物の変形の計算値が実験値に比べ小さくなる傾向にある。したがって、鉄筋コンクリートの解析にはコンクリートと鉄筋間の付着を考える必要がある。そこで、図2のように鉄筋のパネ定数を k_1 、コンクリートと鉄筋間の付着パネ定数を k_2 とし、それぞれのパネの相対変位が、 x_1 、 x_2 であるとする。

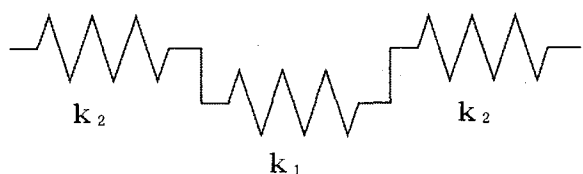


図2 付着パネモデル

パネにかかる力の釣合から、

$$F = k_1 x_1 = k_2 x_2 \quad (1)$$

の関係が得られる。

ここでは、鉄筋およびコンクリートと鉄筋間の付着の両方を含んだ系で考えて、その相対変位を X 、パネ定数を K とすると、

$$F = K X \quad (2)$$

の関係が得られる。ここで、 K は次式となる。

$$K = \frac{k_1 k_2}{2k_1 + k_2} \quad (3)$$

付着特性を考えた鉄筋要素の増分力 ΔF と増分変位 $\Delta \delta$ の関係は、

$$\Delta F = K \Delta \delta \quad (4)$$

ここで、 $K = \frac{AE^*}{l}$ (A =鉄筋要素の断面積、 l =鉄筋

要素長さ)とおくと、次式が得られる。

$$\begin{aligned} E^* &= \frac{K l}{A} = \frac{1}{A} \frac{k_1 k_2}{2k_1 + k_2} \\ &= \frac{E \times \frac{1}{A} k_2}{2E + \frac{1}{A} k_2} \end{aligned} \quad (5)$$

次に、単位面積当たりのコンクリートと鉄筋の付着パ

ネ定数を α とし、鉄筋要素の周長を $2B$ 、奥行き単位長さあたりの付着長を S_i とすると鉄筋要素の付着パネ定数は、

$$k_2 = \alpha S_i B \quad (6)$$

となる。

これより(6)式を(5)式に代入し、コンクリートと鉄筋の付着パネ定数を与えることによって、鉄筋の弾塑性マトリックスを算出し、解析において考慮する。

付着特性を取り入れた鉄筋要素のひずみが ϵ^* であるとすると、次式が得られる。

$$E A \epsilon = F = E^* A \epsilon^* \quad (7)$$

したがって、

$$\epsilon = \frac{E^* \epsilon^*}{E} \quad (8)$$

となる。

また、付着パネの相対変位を x_2 とおくと、

$$k_2 x_2 = F = E^* A \epsilon^* \quad (9)$$

よって、

$$x_2 = \frac{E^* A \epsilon^*}{k_2} \quad (10)$$

となる。

この方法は、積層化非線形有限要素法に対してそのメリットを失うことなく導入することが可能である。

2.2 解析モデルの概要

本解析では、図3示すような $130 \times 130 \times 13$ cmの2辺単純支持された複補強鉄筋コンクリート版(スパン長:120cm)を解析対象とする。要素分割モデルとして、図4に示すような1/4有限要素にモデル化し、解析を行う。この解析モデルの積層数は、コンクリート層を6層とし、コンクリート層の任意の位置の上部と下部に鉄筋層を挿入する積層版構造とする。なお、衝撃荷重は図4に示すようにスラブ中央の要素①の位置に部分等分布(パッチ)で作用するものとする。

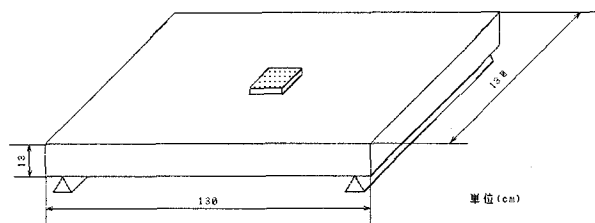


図3 解析対象のコンクリート版の概略図

2.3 解析に用いた積層材の材料特性

本解析に使用するコンクリートは、普通コンクリート(RC, $f_{ck}=331 \text{ kgf/cm}^2$)、高強度コンクリート(HRC, $f_{ck}=$

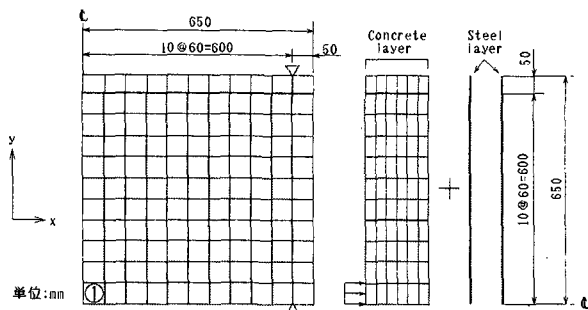


図4 積層版の1/4有限要素モデル

1033kgf/cm²), 鋼繊維混入コンクリート(SFRC, $f_{ck}=450$ kgf/cm²)の3種類とする。図5および図6に各種コンクリートの静的一軸材料特性を示す。ここで、圧縮側の応力～ひずみ関係は、著者らが過去の実験より求めたものを、また、引張側の応力～ひずみ関係は、RC,HRCについては著者らの引張強度試験から、SFRCの引張強度は0.08×(圧縮強度)より求めたものを用いる。また、本解析では、コンクリート版のひびわれ挙動に重要な影響を及ぼす破壊力学パラメータは、ひびわれ幅および結合力の関係を表す引張軟化則であると考えられるため、Bazantの引張軟化則⁷⁾によるヤング係数の低下を考慮した材料特性を用いた。なお、引張軟化則による応力～ひずみ関係は、2直線モデルや3乗モデルによるものが適切であると考えられるが、本解析では簡略化のため、図6に示すような1直線モデルを用いた。

2.4 解析に用いた積層コンクリート版の概要

本解析では、耐衝撃性に優れているとされている積層構造に着目し、上述の3種類のコンクリート(RC, HRC, SFRC)を組み合わせた積層コンクリート版を考えた。また、比較のためにRC, HRC, SFRCのみの単一材料のコンクリート版に対しても解析を行った。各種コンクリートの組み合わせとしては、コンクリートの圧縮強度を増加させたHRCおよび鋼繊維混入によって曲げ靱性を大幅に向上させたSFRCを、その特性に応じてRCと組合わせた積層構造を考える。これらの積層構造の材料の組み合わせを表1に示す。

表1 解析に用いた積層板の材料の組み合わせ

版	RC	HRC	SFRC	H1R5	H2R4	H3R3	H4R2	H5R1	R5S1	R4S2	R3S3	R2S4	R1S5
第1層	○	△	×	△	△	△	△	△	○	○	○	○	○
第2層	○	△	×	○	△	△	△	△	○	○	○	○	×
第3層	○	△	×	○	○	△	△	△	○	○	○	×	×
第4層	○	△	×	○	○	○	△	△	○	○	×	×	×
第5層	○	△	×	○	○	○	○	△	○	×	×	×	×
第6層	○	△	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×

注) ○ RC (普通コンクリート)
 △ HRC (高強度コンクリート)
 × SFRC (鋼繊維混入コンクリート)

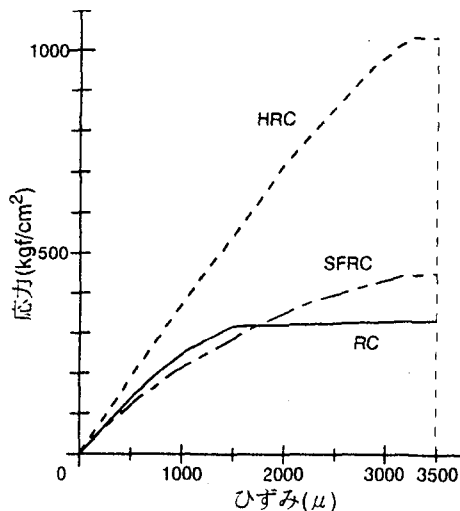


図5 各種コンクリートの圧縮側の応力～ひずみ関係

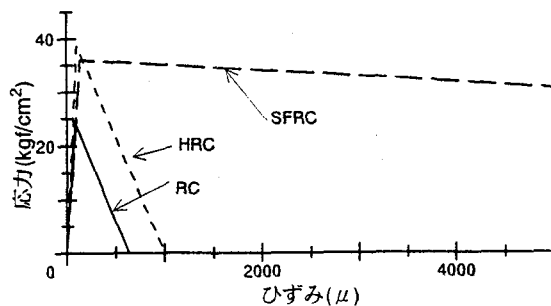


図6 各種コンクリートの引張側の応力～ひずみ関係

2.5 破壊条件および破壊形式の定義

(1) 破壊条件の定義

衝撃荷重の作用下などの動的な場合では、一般に静的荷重の作用下におけるコンクリート構造物のように破壊基準および破壊発生時を明確に判断することが困難な場合が多く、構造的な破壊基準に対する明確な定義付けがなされていない現状にある。しかし、コンクリート構造物の耐衝撃性を解析的に評価するためには、解析上で版構造の破壊条件を定義しておく必要がある。

そこで、本解析においては、次のような2つの破壊基準を設けた。まず第一に、コンクリート要素の圧縮破壊発生時($\epsilon_{cu}=3500\mu$)をコンクリート版の破壊とした。第二

に補強鉄筋要素の主ひずみが、破断ひずみ($\epsilon_{su}=45000\mu$)を越えたときの補強筋の破断をコンクリート版の構造的な破壊とした。これは部材がいずれかの状態に至るとコンクリート版の剛性は著しく低下し、それ以上衝撃作用に対する耐荷力は期待できないと考えられるためである。

(2) 破壊形式の定義

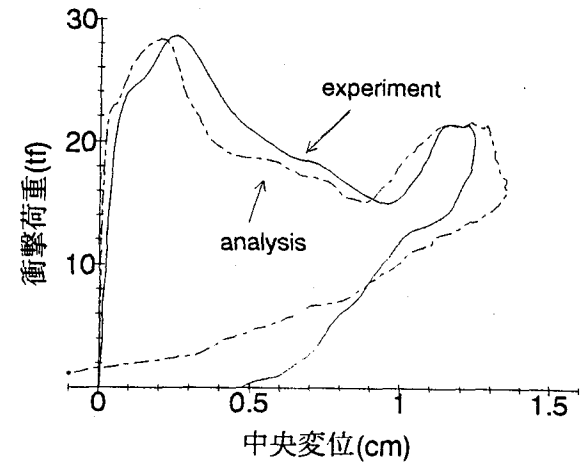
衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の破壊性状は、曲げ破壊、押し抜きせん断破壊、載荷速度が速くなるにつれて貫入、裏面剥離、貫通といった静的荷重下とは異なったさまざまな現象が考えられる。本解析で対象としているのは”ソフトな衝撃”であり、破壊性状は静的と比べてわずかに異なる程度であることより、破壊性状は、曲げ破壊モード(B)、もしくは、押し抜きせん断破壊モード(PS)のどちらかになるものとする。ここで押し抜きせん断破壊は、せん断変形状が載荷初期から破壊に至るまでみられる場合に押し抜きせん断破壊モード(P)とし、載荷初期段階では曲げ変形状で、衝撃作用途中で押し抜きせん断破壊に移行するタイプのモードを(B→PS)とした。これらの3つのモード(B,B→PS,PS)を用いて破壊形状を分類することとする。

2.6 解析精度の検証

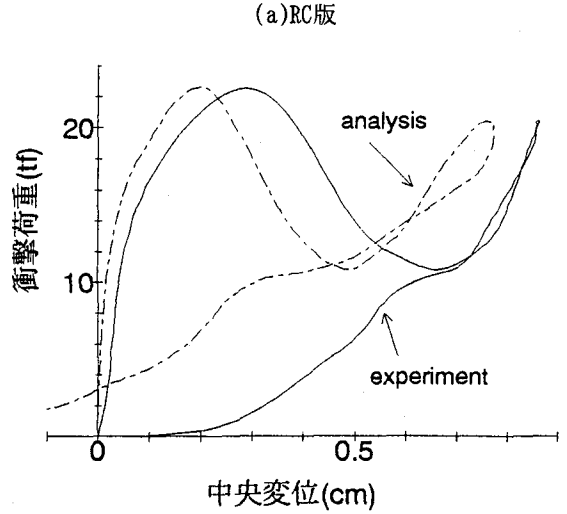
著者らはこれまで、図3に示した種々の複鉄筋普通コンクリート版供試体に対して、図7のような振り式衝撃実験装置を用いて衝撃実験を行ってきた。本解析における衝撃力の基本入力データは、これらの実験によって得られた衝撃荷重波形などを用いている。ここでは、本研究に適用した積層化非線形有限要素法による解析結果が、RC版などの弾塑性領域でどの程度の精度を有しているかを検証するため実験結果との比較を行ってみた。

図8(a),(b)にRC版とRC-A版の衝撃荷重～版中央変位曲線の解析結果と実験結果の比較を示す。ここで、RC版は普通コンクリートに鉄筋(SD35)を組み合わせたもの、RC-A版は普通コンクリートに破断ひずみ $\epsilon_u=7020\mu$ 、ヤング係数 $E=1.33\times 10^6\text{kgf/cm}^2$ の高弾性炭素繊維を用いた連続繊維補強筋(FRP)を組み合わせたものである。これらの図から、解析での衝撃荷重の第1ピークに対応する変位はいずれも実験値に比べて小さくなっている。これは実験

の際にコンクリート版の支点が微小ではあるが、衝撃作用によって動いたこと、また、実験結果と解析結果との間に、ひびわれ発生による慣性の影響に差が出たためではないかと思われる。これらのことを考慮にいと、今回適用した解析手法が実験結果に対して、破壊までの弾塑性範囲にわたって比較的精度良いことがわかる。



RC版の衝撃荷重～中央変位曲線



RC+Type(A)版の衝撃荷重～中央変位曲線

(b)RC-A版

図8 RC版の解析結果と実験結果の比較

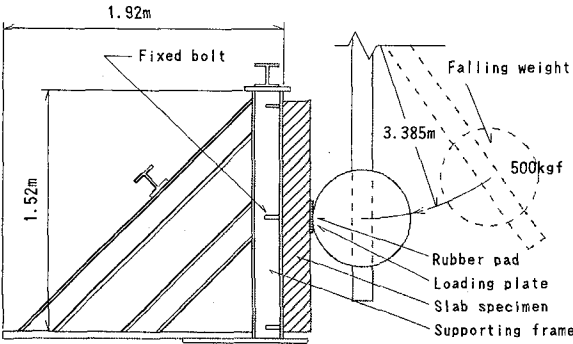


図7 衝撃実験装置

3. 積層コンクリート版の衝撃特性

3.1 解析対象の概略

2. で述べた積層化非線形有限要素法を用い、表1に示したRC版、HRC版、SFRC版および各種積層コンクリート版それぞれに対して衝撃破壊挙動解析を行い、その結果に基づいて各種コンクリート版の衝撃特性について考察する。

そこで、まず3.2では表1で示した(RC, HRC, SFRCやその組み合わせによる積層コンクリート版)13種類のコン

クリート版について衝撃破壊挙動解析を行う。ここで、入力する衝撃荷重データは、図9に示す過去の振子式衝撃破壊実験によって得られた衝撃荷重～時間関係を基本波形とし、各版の破壊がそのピーク時を示す2.0msec時点で破壊するようにそれを線形増加させた衝撃荷重データを入力することとした。

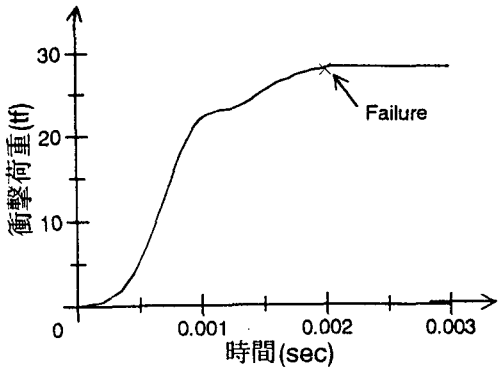


図9 衝撃荷重～時間関係の実測値

次に、3.3では、表1に示した13種類のコンクリート版に対し、載荷速度の異なる衝撃荷重を作用させ、衝撃破壊挙動への載荷速度の影響について考察する。その際に入力する衝撃荷重は、図9のような載荷速度が時間とともに変化する波形であるが、ここでは載荷速度を正確に規定するため、便宜上、衝撃荷重作用時からコンクリート版の破壊時まで線形増加し、破壊後も線形的に減少する三角形の衝撃荷重～時間波形(図10参照)を仮定し、これを入力データとする。解析は、載荷速度を比例増加(15,25,35,45,55tf/msec)させ、各版の破壊時における衝撃破壊挙動解析結果に基づく挙動特性について考察を加える。

3.2 積層コンクリート版の衝撃破壊挙動

ここでは、前述の13種類のコンクリート版に対して衝撃破壊挙動解析を行い、その結果の比較、検討を行う。これは、積層版のコンクリートの種類をどのように組み合わせると破壊挙動がどのように変化し、また、どの程度改善されるかを調べることを目的とする。

図11に積層コンクリート版の各種発生荷重と、破壊時版中央変位の関係

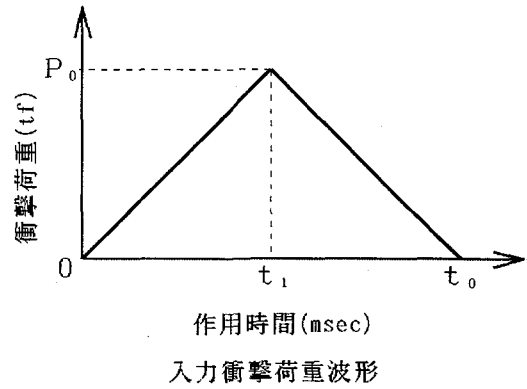


図10 理想化した衝撃荷重～時間関係と載荷速度の定義

を示す。なお、今回の解析では、積層板の全てがコンクリート要素の圧壊で破壊しており、図11における破壊時荷重、版中央変位は、その時点の値を示したものである。これより破壊時衝撃荷重については、RC版の上部にHRCを積層化したコンクリート版の中で、6層中、最上部1層にHRCを組み合わせたH1R5版において、破壊時衝撃荷重がRC版とHRC版の破壊時衝撃荷重のほぼ中間値を示すようになり、漸次耐衝撃性が向上することがわかる。しかし、H2R4版以降(図11の横軸の左方向の積層コンクリート版)は最大衝撃荷重の増加割合が小さくなる傾向が認められる。すなわち、H2R4版ではRC版の破壊時衝撃荷重の約2.2倍となり、HRCを1/3程度RC版上部に挿入することが破壊時衝撃荷重に対する性能の向上にかなり有効であると言える。

次に、RC版の下部にSFRCを積層したコンクリート版は、R5S1版、R4S2版と下部へのSFRCの挿入厚が多くなるほど破

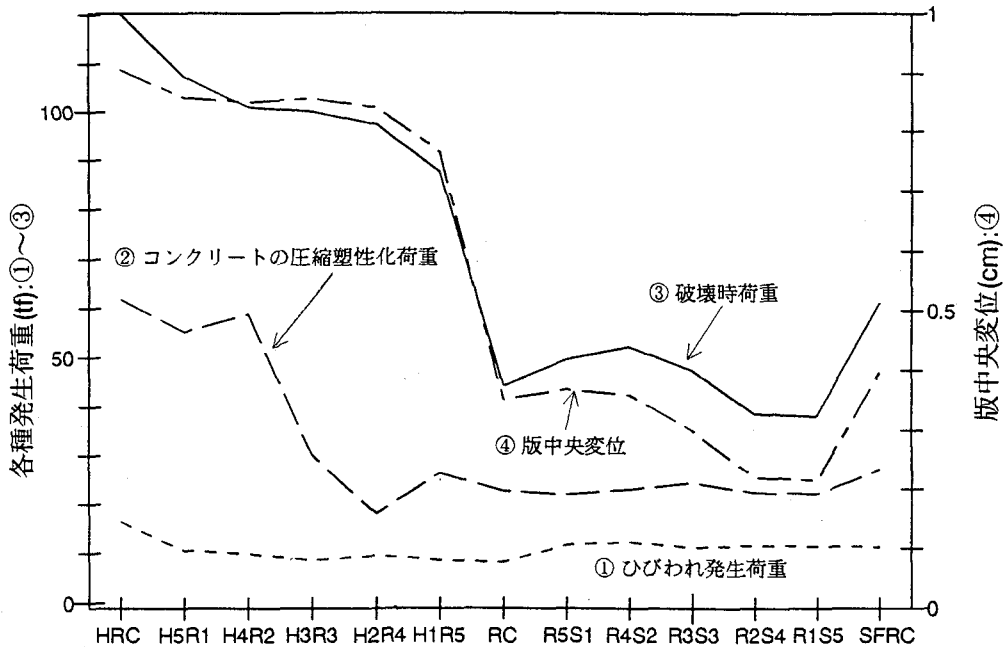


図11 積層コンクリート版の各種発生荷重と破壊時版中央変位

壊時衝撃荷重は、わずかに増加する傾向にあり、R4S2版では、RC版とSFRC版の破壊時衝撃荷重のほぼ中間値を示すようになる。しかし、R3S3版、R2S4版、R1S5版へと下部へのSFRC挿入厚をさらに増加させるに従って、破壊時衝撃荷重は減少していく傾向にある。これは、ひびわれ発生荷重がR5S1版、R4S2版に比べて小さく、しかも、コンクリートの圧縮塑性化荷重も他のコンクリート版に比べて小さくなっていることから、ひびわれなどの破壊現象の進展が早いにもかかわらず、ひびわれ発生にともなう剛性の低下が小さいためであると考えられる。

ここで、図11のひびわれ発生荷重について考察してみると、RC版、SFRC版、HRC版のひびわれ発生荷重はコンクリートの引張強度の大きいものの順に大きくなっている。各種コンクリート版は、コンクリートのひびわれ発生に伴って剛性低下が引き起こされているが、図11から判断されるようにSFRC版、もしくはSFRCをRC版の下部に挿入した積層コンクリート版では、SFRCを挿入されていないコンクリート版に比べて剛性の低下が小さいことが分かる。これらのコンクリート版のひびわれ発生後の剛性低下率が低いのは、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るためであると考えられる。RCとSFRCの組み合わせた積層コンクリート版は、R5S1版→R4S2版へとひびわれ発生荷重が増加するが、破壊時衝撃荷重と同様、R3S3版を境にして減少する傾向にある。しかし、SFRC版との比較をしてみると、積層したコンクリート版の方がSFRCの単層版よりひびわれ発生荷重が大きいといった特徴がみられ、ひびわれの抑制にはRC版の下部にSFRCを挿入することによる効果が大きいことが明らかとなる。

次に、破壊時変位の観点から、各種コンクリート版の衝撃破壊挙動を考察してみる。版中央変位は、小さい変位量で破壊に至るよりも、大きく変形して破壊に至る方がエネルギーの吸収という面で耐衝撃性に優れていると考えられる。図11よりRCとHRCを組み合わせたコンクリート版は、上部1層にHRCを挿入することでHRCの強度などの特性から破壊に至りにくく、そのため破壊時変位もRC版に比べ非常に増大することがわかる。また、H2R4版、H3R3版へとHRCの上部への挿入厚を増加させていくほど破壊時変位量は増加する傾向にあるが、その効果は小さく、HRCを多層上部に配置する利点は小さくなるものと考えられる。また、RCとSFRCを組み合わせたコンクリート版は、下部に挿入するSFRCの厚さの増加にともなって、逆に破壊時変位は減少していく傾向がみられる。これはSFRCがひびわれ発生後もRC、HRCに比べ剛性の低下が小さいため版下部に引張り抵抗力が存在することによって版の中央変位が小さい時点で破壊に至る脆性的な破壊現象が考えられる（図12参照）。これより、破壊時衝撃荷重と破壊時変位を同時に比較検討してみると、RCとHRCを組み合わせたコンクリート版は、上部へのHRC挿入により両者とも増加する傾向にあり、HRC挿入の効果が顕著に現れている

ことを示すものであると考えられる。しかし、RCとSFRCを組み合わせたコンクリート版は、R5S1版、R4S2版までの積層コンクリート版についてみると、破壊時衝撃荷重はRC版に対して増加するものの破壊時変位は減少する傾向にある。これより、本解析の範囲に限定するならば、RC版にSFRCを下部から50%以上挿入する意義や効果は小さいものであるという結論に達する。

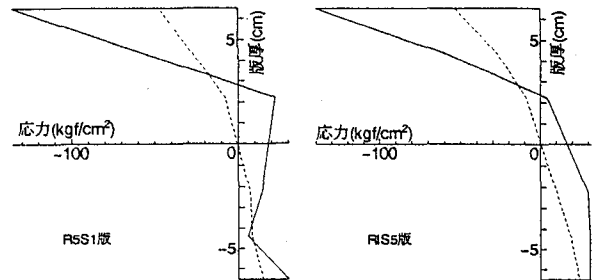


図12 R5S1版とR1S5版のひび割れ発生直後の断面内応力分布(実線:主筋方向,破線:配筋方向)

さらに、衝撃荷重によるコンクリート版の変形分布に基づく考察を行う。図13および図14はRC版の破壊時と破壊後0.75msec時の版中心を通る主鉄筋方向（実線）と配筋方向（破線）の変形分布を示したものである。これより、破壊時までは版中央に変形が集中するような変形分布を示すものの、破壊後は版全体として曲げ変形に移行するといった変形挙動を示す。これは他のコンクリート版でも同様の傾向がみられるものの、図15および図16に示すH1R5版の場合は、破壊時までは上述の場合と同様に版中央部分に変形が集中するものの、破壊後は押し抜きせん断破壊のような挙動を示すことが認められる。これは、HRCを上部に挿入することによって破壊時衝撃荷重、破壊時変位がRC版に対して向上するもののHRCの挿入厚が小さいため、破壊後は耐荷力を維持することができずコンクリート版が押し抜き破壊に至る挙動を示すことが考えられる。

3.3 衝撃破壊挙動の載荷速度による影響

前節では、設定した13種類のコンクリート版に対して衝撃破壊挙動特性を比較したが、本節では、それらの積層コンクリート版が異なる載荷速度を受ける場合にどのような破壊挙動を示すのか、載荷速度をパラメータとしてその影響について検討を行う。解析は、13種類の単層および積層コンクリート版を対象に行い、入力する衝撃荷重の載荷速度は、15tf/msec、25tf/msec、35tf/msec、45tf/msec、55tf/msecと10tf/msec間隔で増加させるものとする。ここでの衝撃荷重波形は、3.1で示した三角形波形を用いる。

RC版についての衝撃荷重～版中央変位関係を図17に示す。これより、コンクリート版は載荷速度が速くなるにしたがって、破壊時衝撃荷重の増加と破壊時変位能の減

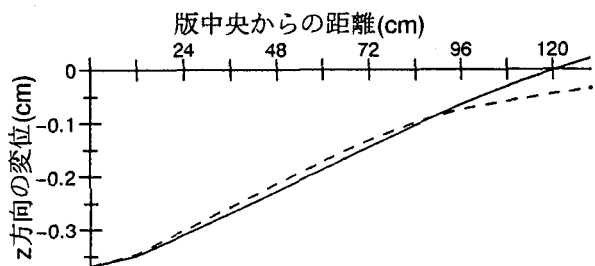


図13 RC版の変形分布

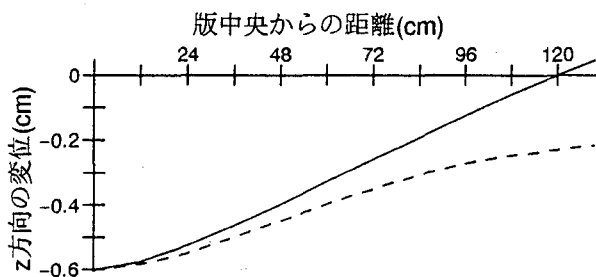


図14 RC版の変形分布:破壊後0.75msec時

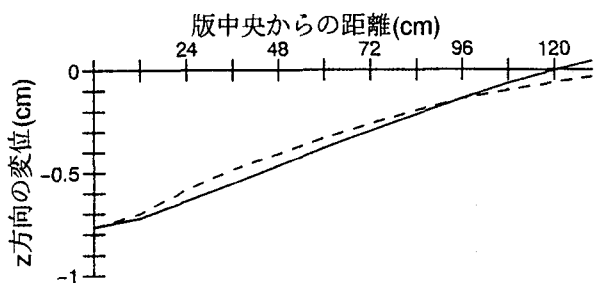


図15 H1R5版の変形分布

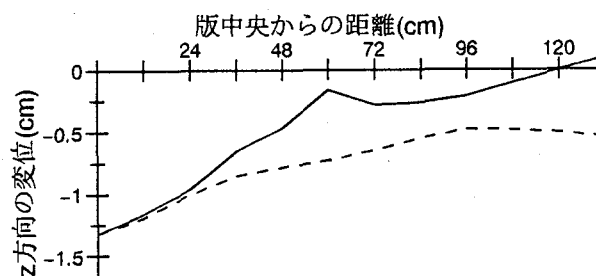


図16 H1R5版の変形分布:破壊後0.75msec時

少が対になって表れる傾向を示すことがわかる。また、図18は、各種版のひびわれ発生荷重に対する載荷速度の影響を示したものである。これより、ひびわれ発生荷重についてもHRCで一部逆傾向が見られるものの、載荷速度の増加に伴ってほぼ増加する傾向が認められる。これらの傾向から、載荷速度が速くなると慣性力が大きく作用し、見かけの剛性が大きくなるという一般的に言われている特徴に一致していることが分かる。

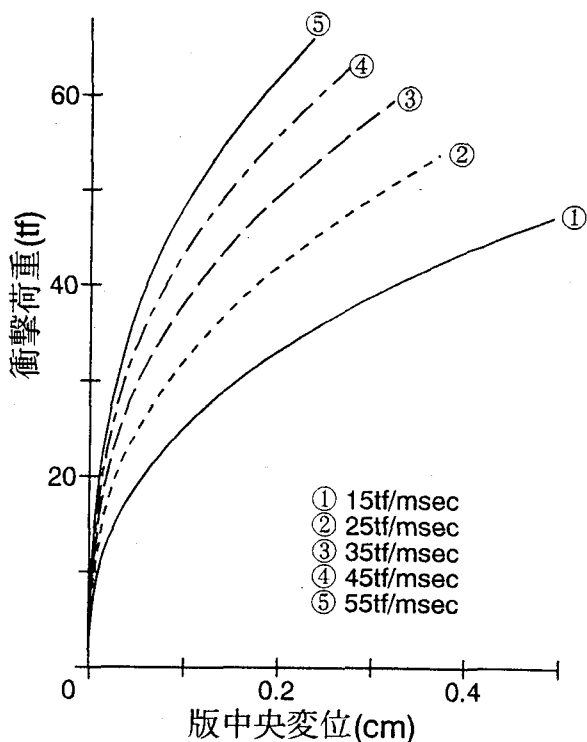


図17 RC版の載荷速度を変化させた場合の衝撃荷重～版中央変位曲線の変化

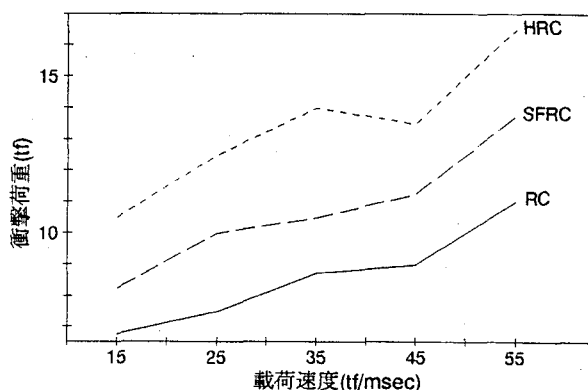


図18 ひびわれ発生荷重に対する載荷速度の影響

ここで、各積層コンクリート版それぞれに対して詳細に検討してみる。まず、破壊時衝撃荷重に関して、RCとHRCを組み合わせたコンクリート版の破壊時衝撃荷重～載荷速度の関係を図19に示す。これより、HRC挿入厚の増加にともなって破壊時衝撃荷重は増加する傾向にあり、耐衝撃性の向上に有効であると思われる。しかし、HRCを最上部に1層挿入したH1R5版の破壊時衝撃荷重は、載荷速度15tf/msecですでにRC版およびHRC版両者の破壊時衝撃荷重の中間値を大きく上回り、HRCの挿入厚増加とともに増加する結果となっている。しかし、載荷速度55tf/msec付近では、各積層版の破壊時衝撃荷重増加に及ぼすHRCの挿入厚増加の効果は小さくなる傾向がみられる。次に、RC

とSFRCの組み合わせたコンクリート版の破壊時衝撃荷重～載荷速度の関係を図20に示す。これより、載荷速度の遅い範囲においては、前節と同様に、R5S1版、R4S2版、R3S3版へとSFRCのRC版下部への挿入厚増加にともなうRC単一版に対する破壊時衝撃荷重の増加がみられるが、載荷速度の増加とともにその効果はなくなっている。また、R2S4版、R1S5版のようにSFRCを版厚の50%以上挿入しても、RC単一版より破壊時衝撃荷重は小さい値をとることがわかる。これは前述の場合と同様に、版下部に挿入したSFRCのひびわれ発生後の剛性低下の小さいことによる脆性の現象であると考えられる。

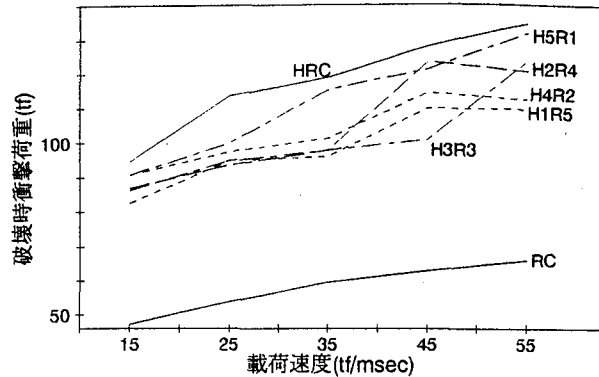


図19 破壊時荷重に対する載荷速度の影響
(RCとHRCの積層版)

らつきが見られるようになり、不安定となることが認められる。一方、図22からは、図20の破壊時衝撃荷重でみられた、R5S1版およびR4S2版での破壊時変位量がRC版より大きくなるといった傾向はみられない。また、図22からは図20で見られたようにR5S1版とR3S3版、R2S4版とR1S5版のグループは同様な逆傾向を示し、破壊時変位量はRC版の破壊時変位量を越えない結果となった。さらに、R4S2版は他の版に比べると破壊時変位量は大きいものの、RC版の破壊時変位量を下回っており、本解析の範囲内では載荷速度の増加に伴う耐衝撃性の向上にはSFRCの部分的挿入の効果が小さいものと考えられる。

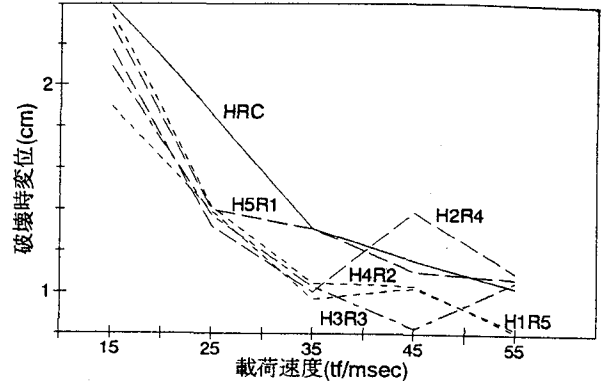


図21 破壊時変位に対する載荷速度の影響
(RCとHRCの積層版)

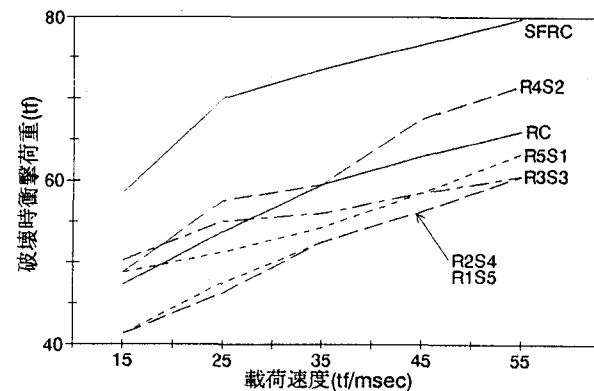


図20 破壊時荷重に対する載荷速度の影響
(RCとSFRCの積層版)

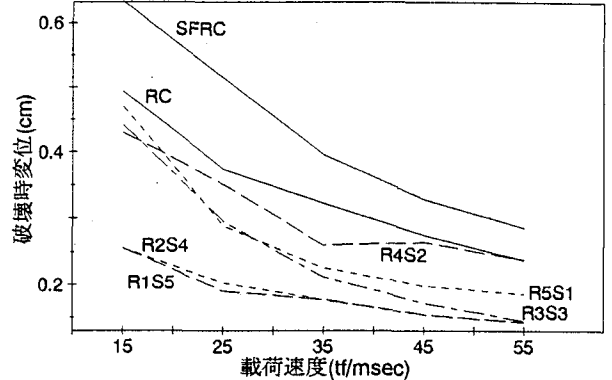


図22 破壊時変位に対する載荷速度の影響
(RCとSFRCの積層版)

破壊時変位に及ぼす載荷速度の影響を、RCとHRCを組み合わせたコンクリート版の破壊時変位～載荷速度の関係として比較したものを図21に、また、RCとSFRCを組み合わせたコンクリート版の破壊時変位～載荷速度の関係として比較したものを図22にそれぞれ示す。まず、図21より、HRCをRC版の上部に挿入することにより破壊時変位が大幅に改善されることが分かる。しかし、載荷速度の増加に伴う破壊時変位量の減少割合は35tf/msecまでは非常に大きく、それ以上の載荷速度では破壊時変位量にば

4. 耐衝撃性指標に基づく評価

ソフトな衝撃荷重を受ける各種積層コンクリート版に対し、3. では破壊挙動についての検討を行い、種々の解析結果から同一のコンクリート版でも載荷速度の変化によって破壊挙動が変化することがわかった。このような現象を定量的、定性的に取り扱うためには耐衝撃性指標を定義し、それによって効率よく耐衝撃性を評価することが不可欠となる。また、本解析では、コンクリート版の積層構造に着目した材料面からの耐衝撃設計を試み

るため、耐衝撃設計が耐衝撃性指標を用いることによって有効に実行できるかどうかについても検討する。

4.1 耐衝撃性指標の概略

3.での各種積層コンクリート版の衝撃破壊挙動特性より、載荷速度の増大に伴って破壊時荷重の増加と破壊時変位の減少が現れる、破壊形式が曲げから押し抜きせん断に移行する傾向が現れるなど、衝撃荷重下特有の現象が解析可能なことが明かとなった。従って、耐衝撃設計を行う際には、これらの結果をふまえて耐衝撃性指標を定義し、これに基づく設計法の確立が必要であると考ええる。従来のコンクリート構造物に関する研究^{8)・9)・10)・11)}により、種々の耐衝撃性指標が提案されてきた。ここでは以下の6つの指標を用いて、本解析で対象とした積層コンクリート版について、その有効性の検討を行ってみる。

① 破壊時衝撃荷重：衝撃荷重の作用時間が等しい場合には、破壊時衝撃荷重が大きいほど耐衝撃性に優れていると考える。

② 破壊時変位：コンクリート構造物は小さい変形で破壊に至るよりも、大きく変形した後に破壊に至る方がエネルギーを吸収するという面からみて耐衝撃性に優れていると考える。

③ ひびわれ発生荷重：コンクリート構造物によってはその機能、目的によってひびわれの発生を許容しない構造物がある。したがって、このひびわれ発生時の衝撃荷重を評価する必要があると考えられる。

④ 全エネルギー：破壊の起こる時点までの衝撃荷重～版中央変位関係の曲線で囲まれる面積で求める。これは、衝撃荷重と版中央変位の両方を考慮した評価指標となる。

⑤ たわみ体積：コンクリート版に衝撃荷重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たわみ分布を積分し、その変形状態を体積で表した指標である。コンクリート版の破壊形式が曲げ破壊であれば、版全体が大きくなめらかに変形しているためたわみ体積は大きくなり、逆に押し抜きせん断破壊の場合は、変形が局部に集中するためたわみ体積は小さくなると考えられる。

⑥ 局部変形指数：衝撃荷重作用下においては、コンクリート構造物は局部的に変形した状態で破壊しやすくなる。これを定量的に評価するため、版中央における破壊時曲率(1/R)を求め(式(11)、図23を参照)、これに含まれる破壊時変位の大小の影響を取り除くために、式(12)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。

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

($\Delta x = 18\text{ cm}$) (11)

$$\text{局部変形指数} (I_L) = \frac{\text{破壊時曲率} (1/R)}{\text{破壊時変位}} \quad (12)$$

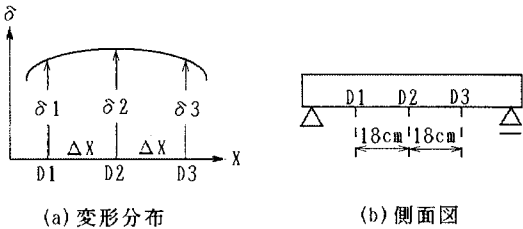


図23 コンクリート版の破壊時曲率の算定法

この指標が大きくなるということは、破壊時の曲率半径が小さくなることを示し、局所的な変形が破壊時変位の小さい時点で起こることを示していることになる。

なお、RCとHRC、RCとSFRCとの組み合わせの両グループの積層コンクリート版についてはこれまでの検討結果から判断されるように、衝撃特性がかなり異なるため以下では別々に耐衝撃性を検討するものとする。

4.2 全エネルギー

図24に各種コンクリート版の全エネルギーの変化を比較したものを示し、図25および図26に各コンクリート版の全エネルギーに及ぼす載荷速度の影響を示す。全エネルギーは、コンクリート版が破壊に至るまでの吸収エネルギーの大きさにほぼ対応するものと考えられる。したがって、この全エネルギーの大きい方がより耐衝撃性に優れていると考えられる。

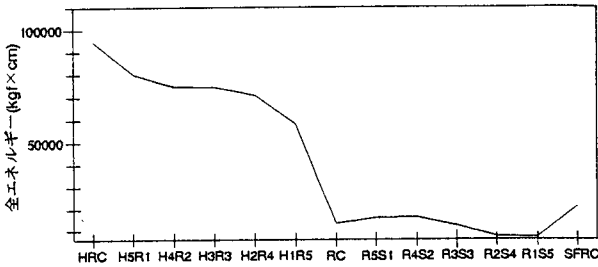


図24 積層コンクリート版の全エネルギーの比較

図24および図25より、RCとHRCを組み合わせたコンクリート版では、H1R5版、H2R4版のようにRC版の上部にHRCを挿入することで飛躍的に全エネルギーの増加が認められる。これは、HRCを上部に挿入することによって破壊時衝撃荷重、変位とも大幅に改善されるためであると考えられる。また、全エネルギーに対する載荷速度の影響に関しては、載荷速度の増加にともなって減少する傾向がみられ、RC版に比べると全エネルギーの低下割合の大きいことも認められる。2種類のコンクリートを組み合わせたコンクリート版の中でもH2R4版は、載荷速度が速くなると全エネルギーがHRC版と同程度、もしくはそれ以上期待できる結果が得られ、RC版上部にその版厚の約1/3にわた

ってHRCを挿入することは全エネルギーの改善に非常に効果的であると考えられる。

RCとSFRCを組み合わせたコンクリート版は、図24から判断されるようにR5S1版、R4S2版へとRC版上部へのSFRC挿入にともなって全エネルギーが大きくなり、耐衝撃性の改善に有効であると考えられる。しかし、それ以上の厚さにわたるSFRCの挿入は、全エネルギーを減少させる傾向にあることがわかる。また、図26より、RCとSFRCの積層版の全エネルギーは、荷重速度に関係なく全体にRC版より小さい値を示すものが多く、荷重速度の増加にともなってその差は大きくなる傾向がみられる。これはRC版の下部にSFRCを挿入することによってコンクリート版の衝撃初期の局所的な変形が抑制されるものの、ひびわれ発生後の急激な局部変形によって、変位の小さい時点で破壊に至るものと考えられ、全エネルギーの観点からはRCとSFRCとの組み合わせが必ずしも耐衝撃性の改善につながらない。

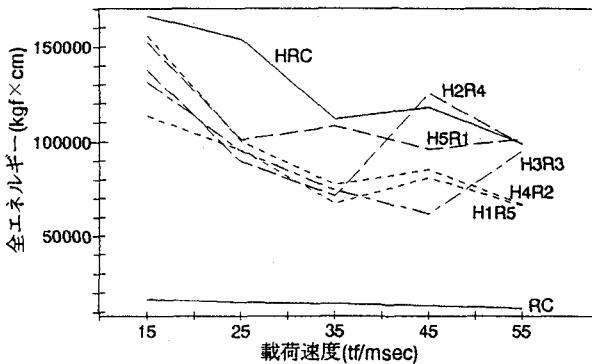


図25 全エネルギーに対する荷重速度の影響 (RCとHRCの積層版)

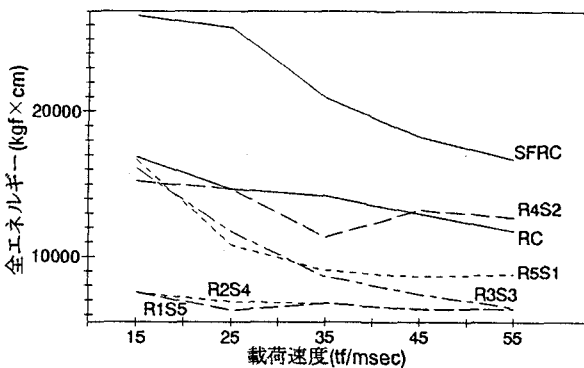


図26 全エネルギーに対する荷重速度の影響 (RCとSFRCの積層版)

4.3 たわみ体積

図27に各種コンクリート版のたわみ体積の比較を示し、図28および図29に各コンクリート版のたわみ体積に及ぼす荷重速度の影響を示す。

まず、図27および図28より、RCとHRCを組み合わせたコンクリート版では、各コンクリート版ともRC版に比べて、

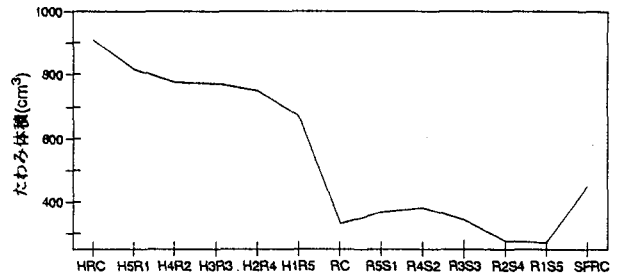


図27 積層コンクリート版のたわみ体積の比較

たわみ体積は大きくなっており、大幅な靱性の改善が認められる。たわみ体積は、H1R5版およびH2R4版のように高強度コンクリートの厚さを増やすことで大きく増加するが、H3R3版およびH4R2版のように高強度コンクリートをさらに増加させてもたわみ体積の増加の割合は小さくなっている。これより、ある程度以上の版厚にわたってHRCをRC版上部に挿入することの効果は小さいと思われる。また、荷重速度の影響についてみると、図21で見られたようにH2R4版やH5R1版ではHRCの破壊時変位を上回る場合があったが、たわみ体積についてはHRC版の値を上回るものではなく、HRC版に比べて局所的な変形がRCとHRCを組み合わせた積層版で起こっているものと思われる。また本解析において、H1R5版の破壊後0.75msec時での変形分布(図16参照)を見ると、押し抜きせん断破壊の傾向がみられたが、破壊時にはH1R5版はなお曲げ変形の状態を保っているため、破壊時のたわみ体積からは破壊後押し抜きせん断破壊のモードへ移行するするといったことがよくできない。

次に、図27および図29より、RCとSFRCを組み合わせたコンクリート版では、R5S1版、R4S2版とSFRCの下層部への挿入厚を大きくすることで、たわみ体積が増加する傾向にあり、SFRCをRC版の下部に挿入することによる靱性の改善効果があると考えられる。これは、RCとSFRCを組み合わせたコンクリート版は、RC版に比べて破壊時変位量は小さいものの、下部にSFRCを挿入することによって版全体が変形するように改善され、たわみ体積が増加すると思われる。また、荷重速度の影響についてみると、図21よりR4S2版では、RC版より破壊時の版中央変位が小さかったのに対し、たわみ体積ではRC版とほぼ同一の値を示している。これは、破壊モードを両者とも曲げ破壊と判断したが、下部のSFRCによってRC版よりR4S2版の方がなめらかな曲げ変形分布となったことが考えられる。また、R2S4版についてみてみると、破壊時変位はRC版より大きく下回っているものの、たわみ体積はRC版に近づく値を示している。これらからSFRCの鋼繊維混入が局所的な変形の抑制に影響を与えているものと思われ、荷重速度の速い範囲においてもSFRCが有効に働くことが考えられる。

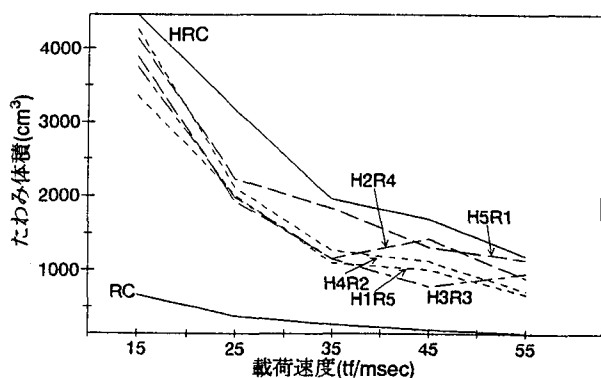


図28 たわみ体積に対する荷速度の影響
(RCとHRCの積層版)

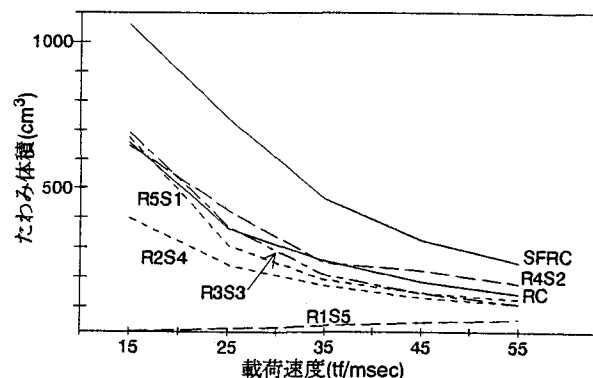


図29 たわみ体積に対する荷速度の影響
(RCとSFRCの積層版)

4.4 局所変形指数

図30に各種コンクリート版の局所変形指数の比較を示し、図31および図32に各コンクリート版の局所変形指数に及ぼす荷速度の影響を示す。

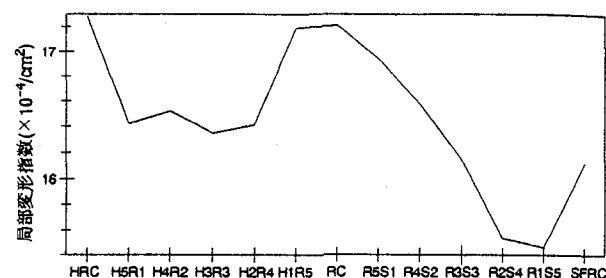


図30 積層コンクリート版の局所変形指数の比較

図30および図31より、RCとHRCを組み合わせたコンクリート版では、H1R5版とH2R4版～H5R1版との局所変形指数の間に大きな差がみられる。H1R5版の衝撃作用下の版の挙動は、図16で示したように破壊後に押し抜きせん断破壊のような挙動を示す。このことからRCとHRCの積層版に関しては、局所変形指数が破壊後のコンクリート版の挙動の予測に有効な指標となり得ることが考えられる。また、荷速度の影響に関しては、速度の比較的遅い範囲

では、HRCの挿入厚に関係なくHRC版と同程度の値を示し、変形分布からも同様の曲げ変形をしていることがうかがえる(図31参照)。しかし、荷速度が速くなると、局所変形指数は増加し、局所的な変形を起こしていることがわかる。従って、押し抜きせん断破壊の発生する時点の局所変形指数を決定できれば、破壊モードの判断に利用できるものと思われる。

次に、図30および図32より、RCとSFRCを組み合わせたコンクリート版において、これまでの指標による評価では耐衝撃性にあまり優れていなかったR2S4版、R1S5版が、局所変形指数の面からみるとその値は小さくなっている。このことから、版全体がなめらかな変形を起こしていることがわかる。また、荷速度の影響に関しては、SFRCの挿入厚が小さい場合ではあまりRC版との挙動差はみられないが、SFRCを版厚の50%挿入(R3S3版)することによってRC版とSFRC版との中間値をとり、挙動改善に効果が見られる。これらのことからSFRCを下部に多層挿入することは、耐荷力の向上というよりは、コンクリート版の変形状態の改善に大きく影響を与えるのではないかと考えられる。

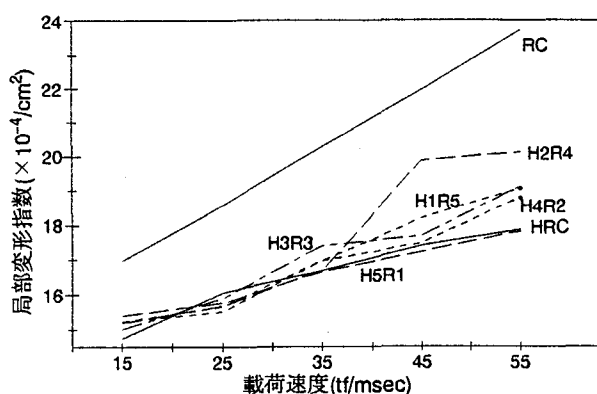


図31 局所変形指数に対する荷速度の影響
(RCとHRCの積層版)

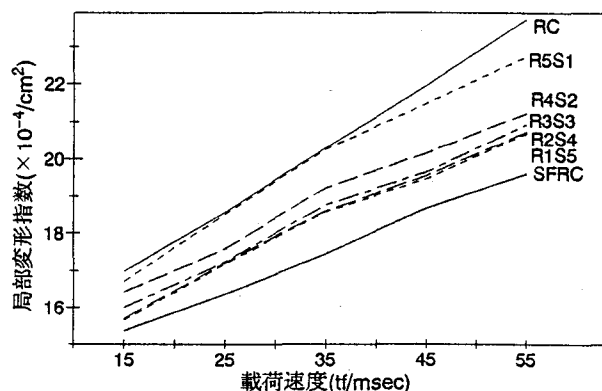


図32 局所変形指数に対する荷速度の影響
(RCとSFRCの積層版)

5. 結論

本研究は、耐衝撃性に優れていると考えられる積層構造に注目し、RC版、HRC版、SFRC版および各種積層コンクリート版それぞれに対して衝撃破壊挙動解析を行った。解析手法には積層化非線形有限要素法を用いて、コンクリート版の力学的挙動に対して検討を行い、耐衝撃性指標を定義することによって、衝撃荷重作用下特有の現象を定量的、定性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 載荷速度の影響については、載荷速度が速くなると初期剛性が著しく増加し、破壊時荷重、ひびわれ発生荷重は増加し、破壊時変位は減少する。版の変形分布は載荷速度の遅い場合は、破壊時も版全体として曲げ変形を示し、載荷速度が速くなると版中央に変形が集中するすり鉢状の変形で破壊に至る押し抜きせん断破壊への移行が推測される。

② RC版の上部にHRCを挿入した積層コンクリート版は、HRCの挿入厚の増加にともなって破壊時荷重、破壊時変位、ひびわれ発生荷重はともに大きくなる傾向がみられる。

③ RC版の下部にSFRCを挿入した積層コンクリート版は、SFRCの挿入厚の増加にともなって破壊時荷重、ひびわれ発生荷重が大きくなるが、その効果は挿入厚さが版厚の50%まででそれ以上の挿入厚では減少する傾向があらわれた。また、破壊時変位は、挿入厚さの増加にともなって減少する傾向がある。

④ 積層コンクリート版の耐衝撃設計に、耐衝撃性指標を用いる際、耐荷力の向上を目的とする場合は、破壊時衝撃荷重および全エネルギーが、変位量減少の抑制を目的とする場合は破壊時変位および全エネルギーが、変形モードや局部変形の抑制を目的とする場合はたわみ体積および局部変形指数が、それぞれ耐衝撃性の評価、判定に有効となる。

参考文献

- 1) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ6，1993.12
- 2) 岡田清 編：最新コンクリート工学，国民科学社，pp.147-149，1986
- 3) Zienkiewicz O.C. 著，吉識雅夫 監訳：マトリックス有限要素法，培風館，1984
- 4) King M.W., Miyamoto A. and Nishimura A.: Failure Criteria and Analysis of Failure Modes for Concrete Slabs under Impulsive Loads, Mem. Grad. Sci. & Technol., Kobe Univ., Vol.9-A, pp.1-40, March 1991
- 5) 矢川 元基，吉村 忍：有限要素法，培風館，pp.175-176，1991.7
- 6) Chen W.F. and Han D.J.: Plasticity for Structural Engineers, Springer-Verlag, New York, pp.345-405, 1998
- 7) Bazant Z.P., Oh B.H.: Crack Band Theory for Fracture of Concrete, Matériaux et Constructions, Vol. 16, No.93, pp.155-177, May-June 1983
- 8) King M.W.: Nonlinear Dynamic Analysis and Design Concepts for Concrete Structures Subjected to Soft Impact Loads, 神戸大学大学院自然科学研究科博士論文，1993
- 9) 宮本文穂，石橋 照久，三戸雅文：コンクリート版構造の耐衝撃性評価に関する研究，構造工学論文集，Vol. 40A, pp.1605-1618，1994.3
- 10) 宮本文穂，M. W. King，三戸 雅文：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，コンクリート工学論文集，4-1, pp.25-38，1993.1
- 11) Miyamoto A., King M. W., Masui H.: Non-Linear Dynamic Analysis and Evaluation of Impact Resistance of Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Load, コンクリート工学年次論文報告集，11-2, pp.643-648，1989.6

(1994年9月14日受付)