

コンクリート版構造の耐衝撃性評価に関する研究

Evaluation of Impact Resistance for Reinforced Concrete Slab Structures

宮本文穂* 石橋照久** 三戸雅文***

By Ayaho MIYAMOTO*, Teruhisa ISHIBASHI** and Masafumi MITO***

Evaluation of the degree of contribution of each type of reinforced concrete slab structures to impact resistance is necessary in the course of drafting design concepts for reinforced concrete slab structures that are subjectable to accidental impacts. Once each different type of reinforced concrete slab structures is quantitatively or qualitatively evaluated, an effective countermeasure for impact failure during accidental collisions is possible.

In this paper, some design concepts for reinforced concrete slab structures subjected to impact loads based on energy criterion and load criterion are firstly discussed. And then, a method of evaluating the degree of impact resistance for reinforced concrete handrails which were modeled using the layered finite element method, is proposed based on the following indexes: (1) Impact load at failure, (2) Deflection at failure, (3) Cracking load, (4) Total energy, (5) Impulse, (6) Index of local deformation, (7) Volume displaced, (8) Impact failure mode. The effects of impact loading on reinforced concrete handrails based on these indexes are discussed. The types of concrete considered are normal strength concrete, high strength concrete, and steel fiber reinforced concrete.

Key Words: reinforced concrete handrail, impact resistance, layered FEM

1. はじめに

近年の科学技術は目まぐるしく進展し、構造材料としてのコンクリートについても例外に漏れず、高強度化、高流動性、軽量化など、より高性能な材料を目指して研究開発が行われている。それに伴い、コンクリート構造が重要構造物へ適用されることもそれほど目新しく感じないようになりつつある。また、交通機関の高速化、複雑化などから、このような構造物へ天災としてではなく、人災として生じる衝突現象の発生確率も年々高まっていると言える。交通媒体によるコンクリート構造物への衝突現象としては、主だったものとして、自動車による高架橋高欄あるいは橋脚への衝突、原子力関連施設への航空機の衝突、船舶の防波堤、岸壁および橋脚等の海岸・海洋構造物への衝突等が挙げられる。このような衝突現象に対しては、衝突時の乗員保護とともに、衝撃作用による構造物の破壊を抑制し、破壊による2次災害の発生を防止するよう設計上の配慮が要求される場合がある。また、コンクリート構造物の受ける衝撃作用は交通媒体による衝突ばかりではなく、落石、土砂崩れ等自然災害によるものにも及び、構造物の破壊により大規模な被害を起こす恐れがあることより社会に及ぼす影響も大きいと言える。そのため、適切な位置に落石等の衝撃荷重にも耐え得るように設計された落石覆工（ロックシェッド）をはじめとする防護施設を設置する必要がある。

以上のような衝撃作用を受ける可能性のある構造物の設計では、従来より、衝撃荷重を活荷重の一つと考え、静的荷重を衝撃係数で割り増して動的効果を考慮した設計衝撃力に対して静的設計法が適用されている。しかし、衝撃荷重下でのコンクリート構造物の挙動は静的な場合とは大きく異なり、衝撃荷重初期に高次振動成分が卓越

* 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, 阪神高速道路公団, 大阪第一建設部 (〒542 大阪市中央区西心斎橋1-2-4)

*** 神戸大学大学院, 工学研究科 (〒657 神戸市灘区六甲台町)

する、あるいは、応力波の発生により破壊モードが変化し裏面剥離を生じる等、衝撃現象特有の破壊挙動を呈する。そのため、時間的に変化する応力の最大値等の衝撃作用の一面のみに着目した前述のような設計手法では、複雑な衝撃現象特有の破壊挙動に対処することは困難である。また、衝撃現象は偶発的に生じるものであり、その発生予測の困難さから設計上効果的な対処が施せないのが現状である。

このような現状を踏まえて、各方面で飛来物や落石等の衝突に対する、コンクリート構造物の耐衝撃性の評価や設計法に関する研究が進められている。アメリカやドイツなどでは、原子力施設への航空機の墜落や竜巻によって生じる飛来物の衝突を想定した耐衝撃設計に関する研究が盛んに行われている¹⁾。わが国では、1989年7月に福井県越前海岸（国道305号）の落石覆工（ロックシェッド）が巨岩の崩落によって破壊され、多数の死者を出すという事故が起きた。これを契機として、従来の設計法を見直すべく、各種の研究が盛んに行われるようになってきている²⁾。しかし、これらの研究は個々の衝突現象に対する評価や設計法について検討されているものであり、まだ実用的な耐衝撃設計法の確立に至っているとは言い難い。

本研究は、一般的な土木構造物の受ける衝撃作用が衝撃力の立ち上がりが比較的緩やかで、作用時間の比較的長いソフトな衝撃³⁾とみなせる場合が多いことから、ソフトな衝撃作用下でのコンクリート版構造の耐衝撃性を解析的に評価するため、鉄筋コンクリート（RC）製高欄を対象として、コンクリートの種類、載荷速度などをパラメータとした衝撃破壊挙動解析を行い、これに基づいて耐衝撃性の評価に有効であると考えられる種々の指標を設定することによって各種コンクリート版構造の耐衝撃性の評価を試みるものである。

2. コンクリート構造物の耐衝撃性評価に関する既往の研究

衝撃作用を受けるコンクリート構造物の耐衝撃性評価では、破壊モードの変化や構造物裏面の飛び散り等、衝撃現象に特有な高次振動モードの卓越による影響を考慮する必要がある⁴⁾。そのため、構造物によっては衝撃現象特有な破壊状態に対する耐衝撃性を考慮した設計が必要な場合があり、各方面で衝撃作用の発生頻度や危険度、構造物に作用する衝撃力の評価ならびに伝達機構、構造物の耐衝撃性の評価と設計等に関する研究が行われている。しかし、コンクリート構造物に対する衝撃現象は多様であり、それらすべての現象を包括して取り扱うことは困難な現状にあり、それぞれ個別のアプローチに従って研究が進められている。ここでは、その中の主だったものとして原子力施設への飛来物の衝突、落石覆工への落石、海岸・海洋構造物への船舶の衝突に関する耐衝撃性評価の研究をまとめる。

2.1 原子力施設等への飛来物の衝突に関する研究

耐衝撃性を考慮した設計を行うためには、衝撃作用の頻度、生起確率、構造物の損傷規模を把握し、設計のための基準を設ける必要がある。H. Liemersdorfら⁵⁾は、ドイツにおける原子力施設に作用する衝撃現象を、構造物に対して通常設計で考慮されている事故（Normal events）、突発的事故（Accidents）、極希にしか生じない事故（Hypothetical events）の3つに分類し、それぞれの生起確率の違いから設計のあり方を述べている。また、衝撃挙動解析を行う際には、衝撃力～時間関係を入力荷重データとする場合があり、構造物に作用する衝撃力の特性の把握とともに設計衝撃力のモデル化が必要となる。Anil K. Kar⁶⁾は、アメリカでの実状として、竜巻の発生で生じる飛来物による衝撃に対して安全性を確保するように原子力関連施設の設計が行われていることから、飛来物の減速度による設計衝撃力の簡易算定法を提案している。また、このような航空機の墜落や竜巻による飛来物、非爆発性のミサイルなど比較的ハードな衝撃を対象とした研究では、エネルギー的に耐衝撃性を評価する研究やエネルギー的な評価式を設計に取入れる手法の研究も行われている。G. J. Attwoodら⁷⁾は、剛な飛来物の衝突速度を一定とし、飛来物の径をパラメータとした場合の飛来物の衝突時の運動エネルギーと、コンクリートバリアを貫通するのに必要なエネルギー量を比較することにより耐衝撃性を評価する手法を提案している。また、P. Barr⁸⁾は、イギリスやフランスで行われた鋼製ミサイルを衝撃体とする鉄筋コンクリート版構造に対する300体以上の衝撃実験結果を利用して、飛来物の衝突直前と貫通直後のエネルギー収支から限界貫通速度（衝撃体が部

材を貫通するのに必要な衝突速度)を求める評価式を提案している。

一方、国内では、航空機などの飛来物に対する原子力関連施設の安全性評価手法の確立が望まれていることを踏まえて、(財)電力中央研究所(電中研)⁹⁾において、RC版構造を対象とした衝撃実験および衝撃応答解析を行っている。衝突速度が40～250m/secという比較的高速な飛来物を用いて、衝突速度、飛来物重量、版厚、コンクリート強度、飛来物先端形状、鉄筋の有無、プレストレスの有無、鋼繊維による補強の有無およびライナーの有無をパラメータとした広範囲の実験を行い、これらの結果から、貫通および裏面剝離を防ぐのに必要な構造物の版厚を求める評価式を提案している。さらに、電中研の提案式と他の多くの研究者による提案式を比較し、電中研の式が実験結果と最も良く一致していることを確認している⁹⁾。しかし、これらの実験による評価式では飛来物がコンクリート版構造に対して垂直に衝突した場合の限界版厚や破壊モードの評価には有効であるが、コンクリート版構造に対してある角度をもって衝突する場合については正確に破壊モードを推定することはできない。そこで、有限要素解析コードDYNA-3Dに3軸応力状態を考慮したコンクリートの圧縮破壊条件を取入れたモデルに破壊後の軟化領域やひずみ速度効果を考慮したモデルを組込んで衝撃応答解析を行い、コンクリート版の破壊モードの判定を試みている。

2.2 落石覆工への落石の衝突に関する研究

落石荷重に対する落石覆工(ロックシェッド)の現行設計では、落石対策便覧¹⁰⁾で示される落石時の最大衝撃力が覆工頂版に静的に載荷するものとして行われている。本名ら¹¹⁾は、落石荷重に対してロックシェッドを設計するには、落石対策便覧で「衝撃力に対する構造物の極限耐荷力を明確にした上で、構造物の弾塑性変形による吸収エネルギーを把握する必要がある」とされているにもかかわらず、これまで、落石荷重に対する動的設計法が具体的に示されていないことを指摘し、動的有限要素解析によって落石現象をシミュレートすることによってロックシェッドの極限設計法を提案している。すなわち、落石荷重を受けるRC版の耐荷力は、ひずみ速度効果によって鉄筋の降伏点ひずみが4000 μ まで上昇し、静的荷重の場合よりもはるかに高くなることから、落石荷重に対する覆道設計のあり方として、「高確率小荷重」に対しては従来の静的設計によるものとし、「低確率大荷重」に対しては鉄筋の許容ひずみ値をひずみ速度効果を取り入れた動的解析によって設計することを提案している。しかし、この研究で示されている設計例では、動的設計での最大許容荷重を静的設計の場合と比較し、静的設計で算定される荷重の4倍の荷重まで許容できることを確認しているが、衝撃現象に特有な破壊モードに対する検討も併行して行う必要があると考えられる。

吉田ら¹²⁾は、ロックシェッドの設計には限界状態設計法の適用が最も合理的であるとの見地から、以下に示すような現段階で可能な設計手法の提案を行っている。すなわち、落石の発生および落下経路、速度は不規則性の強いもので、それゆえ落石の衝撃力は本来確率変量として捉えるべきであり、ロックシェッドは使用限界状態および終局限界状態に対する安全性が確率的に保証されるように設計されるのが望ましい。これより、耐衝撃設計思想としては、現行の許容応力度設計法よりも限界状態設計法の方が合理的であるとの結論に至っている。従って、ロックシェッドの限界状態を次のように考えられている。すなわち、①使用限界状態:i)ひびわれの使用限界状態で、ひびわれにより美観を害するか、耐久性または水密性を損ねる状態。ii)損傷の使用限界状態で、ロックシェッドに各種の原因による損傷が生じそのまま使用するのが不適当となる状態。なお、これに対する荷重としては、生起確率の比較的大きな落石としている。②終局限界状態:部材の断面が破壊に至る場合に相当する。破壊に対する考え方には各種の状態が考えられるが、ここでは、部材の断面の破壊により、コンクリート片が落下し、通行車両などに被害が生じない程度の破壊としている。また、落石荷重は落石の発生、落下経路および速度ともに極めて不確実性が大きく、荷重算定法の不確実性から一般的に用いられている荷重係数の適用は困難であるとしている。

これに対し、梶谷¹³⁾は、落石覆工の設計には使用限界状態に対する安全性の照査は重要ではなく、終局限界状態での破壊に対する安全性照査のみが重要となるとの考えから、落石覆工の設計のあり方として次のように提言

している。すなわち、落石により落石覆工に入力されるエネルギーは、大部分はサンドクッションに吸収され、残りの大部分は落石覆工の弾性ひずみエネルギーと塑性変形によって吸収されるエネルギーに変換されると考えられる。エネルギー一定則によって、弾塑性応答変位と弾性応答変位を次式で関係づけている。

$$\xi_u = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{Q_e}{Q_v} \right)^2 + 1 \right\} \xi_v \quad (1)$$

ここに、 Q_v ：降伏点強度、 Q_e ：エネルギー一定則により定まる弾性強度、 ξ_v, ξ_e ： Q_v, Q_e に対応した変位、 ξ_u ：終局変位。

これより、強度の低減比率として次式を得る。

$$\frac{Q_v}{Q_e} = \frac{1}{\sqrt{2\eta - 1}} \quad \text{ここに、}\eta = \xi_u / \xi_v \text{ は塑性率。} \quad (2)$$

このような考えに基づいて、許容される強度の低減比率(Q_v/Q_e)を与え、必要保有耐力と破壊形式を算定する。

園田ら¹⁴⁾は、落石覆工の破壊に対する安全性照査としては、落石の持つ運動エネルギーに基づいたエネルギーの観点から、落石覆工の終局限界状態を調べることが合理的であり、サンドクッションを介して落石覆工へ伝達されるエネルギーを知る必要があるとの考えから、エネルギー伝達率算定法を提案している。さらに、このエネルギー伝達率を利用してエネルギー基準による安全性照査法を提案している。すなわち、落石覆工の吸収エネルギーが落石による外力エネルギーを上回っていれば安全であるとするものであり、安全性照査式は次式で表される。

$$U_A \geq \gamma_0 \cdot E \quad (3)$$

ここに、 U_A ：死荷重の影響を考慮した落石覆工の終局吸収エネルギー量、 γ_0 ：落石覆工へ伝達されるエネルギー伝達率、 E ：落石の運動エネルギー量。

2.3 海岸・海洋構造物への船舶の衝突に関する研究

海岸・海洋構造物の設計で考慮すべき問題は、船舶の衝突による構造物自体の損傷と基礎の地盤支持力の確保、上部構造への影響等である。例えば、橋脚の場合には、衝突の生起確率やそれによる危険度を予測し、橋脚に特殊な緩衝機構を設けるか橋脚自体を衝撃に対して耐え得るように設計しなければならない。現状ではまだ構想段階ではあるが、年間50,000隻もの船舶が航行するジブラルタル海峡への架橋が検討されており、供用期間中に生じる大型船舶の衝突から橋梁を保護するために、特別に設計されたエネルギー緩衝システムの設置が必要であると考えられている。さらに「ジブラルタル海峡は水深が450mとかなり深く潜水艦の航路にもなっていることから、潜水艦の衝突に耐えられ、上部構造へ過大な変形を与えないような橋脚を設置する必要がある、橋脚の形式選択の検討が行われている。また、船舶の衝突に対して、清宮ら¹⁵⁾は3次元有限要素プログラムPAM-CRASHを用いて、船舶、防波堤ケーソンおよび圧縮性流体の動的相互作用を考慮した大規模な計算を実行して耐衝撃性の検討を行っている。

3. 衝撃破壊挙動解析によるコンクリート版構造の耐衝撃性評価

前節で述べたように、衝撃荷重下におけるコンクリート構造物では、衝撃初期の高次振動成分の卓越や応力波の発生による破壊モードの変化等によって、コンクリート片の飛散や裏面剝離等の衝撃作用特有の破壊現象を呈するために静的荷重下とは異なった多様な評価法が必要となることが明かとなった。すなわち、衝撃作用の種類によって構造物の局部破壊が支配的となるか、あるいは全体破壊が支配的となるかによって耐衝撃性評価項目が異なってくると考える。しかし、現状の主要な研究の方向は、破壊モードの変化を含んだエネルギー基準による評価に進むと考えられる。ここでは、ソフトな衝撃作用下での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、一例として鉄筋コンクリート(RC)製高欄についてコンクリートの種類、載荷速度をパラメータと

した衝撃破壊挙動解析を行い、耐衝撃性の評価に有効であると考えられる、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、たわみ体積、局所変形指数および衝撃破壊モードの指標によって各種コンクリート版の耐衝撃性能の比較、検討を試みる。

3.1 衝撃破壊挙動解析の概要^{16), 17)}

3.1.1 解析手法の概要

衝撃破壊挙動解析は、準三次元的解析法である積層化非線形有限要素法に動的解析法であるNewmark- β 法($\beta=1/4$)を適用した。本解析法では、Fig. 1に示すように、コンクリート版を幾層かのコンクリート層と鉄筋層の積層によって構成されると考え、各層が平面応力状態にあるものとして取り扱う。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³⁾、ここでは減衰の影響を無視した。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。

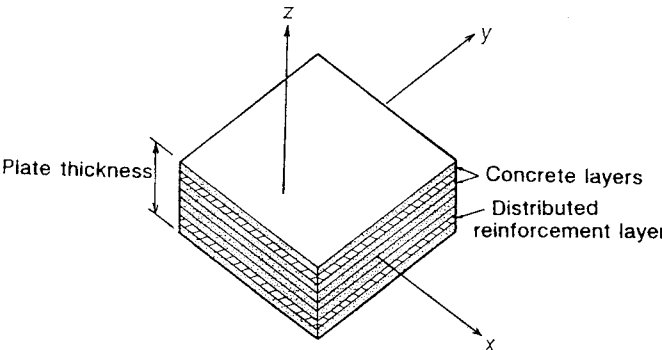


Fig. 1 Layered model and coordinate axes

3.1.2 解析モデルおよび材料特性

解析の対象としたRC高欄の寸法は、高さ107.5cm、幅400cm、厚さ25cmであり、版厚方向にコンクリート層6層、鉄筋層2層の計8層に積層化し、第2層と第7層を鉄筋層として解析した。解析モデルの要素分割1/2部分をFig. 2に示す。衝撃力は、解析モデルの図で示される部分に部分等分布(パッチ)で作用するものとする。

コンクリートの材料特性は、静的一軸特性に基づくものを三軸応力状態における相当応力~相当ひずみ関係に変換して解析に適用し

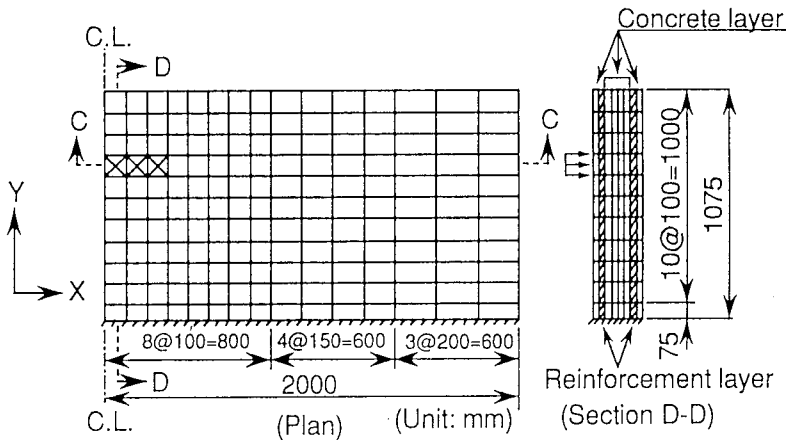


Fig. 2 Layered finite element mesh of RC handrail

た。コンクリートの破壊条件は、Ottosen¹⁸⁾によって提案された多軸応力状態の破壊曲面を用いた。一方、鉄筋の材料特性には、多折線近似した一軸材料特性を用いた。なお、本解析で使用するコンクリートは、本研究室で行われた実験を参考にして、普通強度コンクリート(RC, $f_{ck} \approx 350 \text{ kgf/cm}^2$)、高強度コンクリート(HRC, $f_{ck} \approx 900 \text{ kgf/cm}^2$)、鋼繊維混入コンクリート(SFRC, $f_{ck} \approx 400 \text{ kgf/cm}^2$)の3種類とする。Fig. 3にこれらのコンクリートの静的材料一軸特性を示す。ただし、RCおよびHRCの引張材料特性は、Ottosenの破壊モデルパラメータを決定する際に、引張強度が圧縮強度の12%となるように設定している。また、SFRCの引張材料特性はFig. 3(b)に示すように折線近似して解析に適用する。

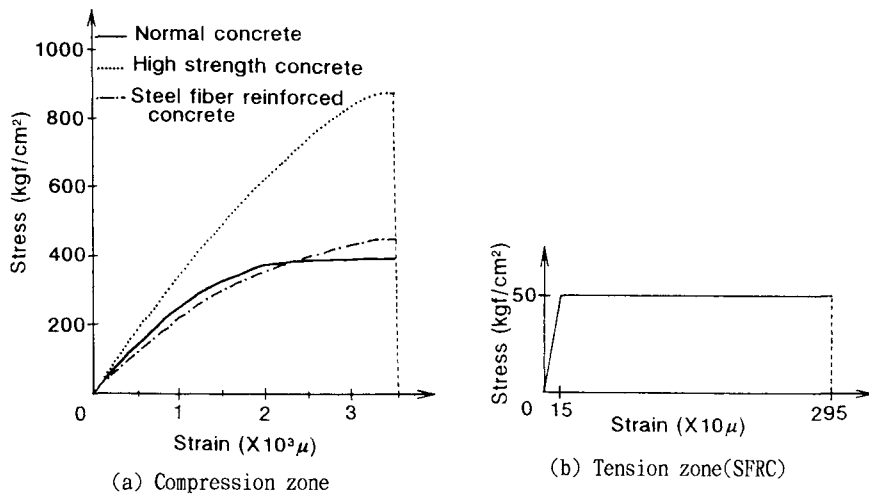


Fig.3 Idealized stress-strain curves of concrete materials

3.1.3 破壊条件および破壊形式の定義¹⁷⁾

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、まず、解析上の破壊条件を定義しておく必要がある。しかし、衝撃荷重下におけるコンクリート部材については、静的荷重下のような明確な破壊基準の定義付けがなされていない。そのため本解析では、コンクリート要素の圧縮破壊あるいは鉄筋層の破断を部材の破壊とみなす。これは、部材がこれらいずれかの状態に至ると、部材剛性が急激に低下しそれ以上の衝撃力に対する耐荷性が期待できないと考えられるためである。

一方、破壊形式については、ソフトな衝撃作用では衝撃体に変形を伴い、衝撃時に発生する応力波の影響は比較的小さく、構造物の破壊機構は静的な荷重を受ける場合に比べてわずかに異なる程度であるため、破壊形式は曲げ (B) あるいは押し抜きせん断 (PS) のいずれかになるものと考えられる。押し抜きせん断破壊の場合、衝撃初期から押し抜きせん断変形性状が支配的となる純押し抜きせん断破壊モードと、衝撃初期には曲げ変形の性状でありながら破壊時には押し抜きせん断となる混合型の破壊モードに分類できる。後者の破壊モードは、曲げ挙動先行の押し抜きせん断破壊 (B→PS) と定義できるが、ここでは、最終の破壊形式のみに着目し、曲げ破壊 (B) あるいは押し抜きせん断破壊 (PS) に分類する。

3.2 衝撃破壊挙動

コンクリートの種類および载荷速度をパラメータに設定し、各種コンクリート製高欄の衝撃破壊挙動解析を行う。ソフトな衝撃作用の場合、载荷速度 (荷重速度; 衝撃力～時間関係の勾配) は一定ではなく時間とともに変化するが、本解析では载荷速度をパラメータとするため、载荷速度を一定として線形増加する衝撃力～時間関係を外力データとして与えた。

RC高欄、HRC高欄およびSFRC高欄の衝撃破壊挙動解析の主な結果を、それぞれTable 1～Table 3に示す。また、Fig. 4～Fig. 6にそれぞれの衝撃力～载荷点変位関係を示す。

まず、Fig. 4～Fig. 6から、どの高欄についても载荷速度が速くなるほど破壊時衝撃力が上昇しており、载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り破壊荷重が増大すると言われている一般的な傾向が現れている。また、载荷速度が小さい領域では曲線の勾配が急激に緩やかになり、破壊の進行に伴う剛性低下が著しいことがわかる。

衝撃破壊モードについては、RC高欄ではTable 1に示すように20tf/msec以上の载荷速度では全て押し抜きせん断破壊モードとなっている。これに対し、HRC高欄の場合には、Table 2より、Table 1のRC高欄と比べて破壊時衝撃力に関しては大きく向上するが、衝撃破壊モードについては著しい改善は認められない。また、同様にTable 3

のSFRC高欄をTable 1のRC高欄と比較すると、耐荷性が向上するだけでなく衝撃破壊モードが40tf/msecの載荷速度まで曲げ破壊モードとなっており、破壊モードの改善にSFRCが有効であることがわかる。

次に、RC高欄、HRC高欄およびSFRC高欄の各種発生荷重について比較する。Fig. 7～Fig. 9は、それぞれ、RC高欄、HRC高欄およびSFRC高欄の、①ひびわれ発生荷重、②コンクリートの圧縮塑性化荷重、③鉄筋降伏荷重、④破壊時衝撃力を比較したものである。Fig. 7に示すRC高欄では、60tf/msec以上の載荷速度ではコンクリートの塑性化荷重は上昇しなくなり、破壊時衝撃力の上昇勾配も鈍化する。Fig. 8のHRC高欄では、載荷速度の上昇とともにHRCの圧縮強度が高いために塑性化荷重も高くなり、HRCの塑性化と同時に鉄筋の降伏が生じている。一方、Fig. 9のSF

Table 1 Main results of dynamic analysis on RC handrails

Loading rate (tf/msec)	Load at failure (tf)	Deflection at failure (mm)	Cracking load (tf)	Concrete plasticity load (tf)*	Reinforcement yielding load (tf)	Index of local deformation** ($\times 10^{-4}/\text{cm}^2$)	Impulse (kgf·sec)	Total energy (kgf·cm)	Deformation energy (kgf·cm)	Volume displaced (cm^3)	Failure mode***
4.14	43.1	1.41	25.7	40.2	40.4	1.26	224.0	5540	1073	1461	PS
8	44.4	1.32	23.6	41.6	42.0	1.27	123.2	4436	1037	1440	B
12	52.2	1.39	28.2	46.8	49.2	2.76	113.5	5519	1299	1472	B
16	60.0	1.55	32.0	52.8	56.0	3.12	112.5	7150	1522	1481	B
20	70.0	2.19	35.0	61.0	63.0	3.42	122.5	12380	1971	1632	PS
25	81.3	2.16	40.0	67.5	71.3	3.24	132.0	13770	2502	1782	PS
30	82.5	1.42	43.5	75.0	78.0	3.89	113.4	8678	2044	1413	PS
35	94.5	1.96	47.3	80.5	82.3	4.01	127.6	14280	2736	1649	PS
40	104.0	2.22	50.0	86.0	92.0	4.22	135.2	18010	3324	1797	PS
50	115.0	1.78	57.5	97.5	105.0	4.29	132.2	15260	3176	1559	PS
60	135.0	2.44	63.0	108.0	117.0	4.08	151.9	25250	4220	1772	PS
70	136.5	1.98	66.5	108.5	126.0	7.10	133.1	20390	3049	1281	PS
80	148.0	1.94	72.0	108.0	140.0	6.12	136.9	21490	3325	1285	PS
90	157.5	1.89	76.5	108.0	144.0	6.37	137.8	22080	3386	1232	PS
100	160.0	1.74	80.0	115.0	145.0	7.03	128.0	20730	2992	1070	PS

* Plasticity in compression
** Longitudinal direction at reinforcement yielding
*** B: Bending, PS: Punching shear

Table 2 Main results of dynamic analysis on HRC handrails

Loading rate (tf/msec)	Load at failure (tf)	Deflection at failure (mm)	Cracking load (tf)	Concrete plasticity load (tf)*	Reinforcement yielding load (tf)	Index of local deformation** ($\times 10^{-4}/\text{cm}^2$)	Impulse (kgf·sec)	Total energy (kgf·cm)	Deformation energy (kgf·cm)	Volume displaced (cm^3)	Failure mode***
4.14	75.4	2.93	60.1	73.1	73.3	1.50	686.0	18750	3395	2580	B
8	88.8	2.42	63.6	84.8	85.2	1.69	492.8	16810	4118	2742	B
12	94.2	2.65	55.8	87.6	88.2	1.91	369.7	19270	3823	2594	B
16	98.4	2.68	55.2	92.0	92.0	1.87	302.6	20230	4322	2769	B
20	110.0	2.85	58.0	98.0	99.0	1.52	302.5	23700	5625	3163	PS
25	120.0	2.97	62.5	106.3	107.5	1.65	288.0	27130	6343	3224	B
30	130.5	3.91	67.5	114.0	115.5	1.59	283.8	40820	7470	3408	PS
35	133.0	2.88	73.5	119.0	120.8	2.73	252.7	29180	6762	2996	B
40	144.0	3.66	78.0	124.0	126.0	3.49	259.2	41630	7628	3112	PS
50	162.5	3.41	85.0	142.5	145.0	4.01	264.1	42520	8507	3073	PS
60	195.0	4.97	93.0	159.0	159.0	3.82	316.9	76060	15070	4386	PS
70	189.0	3.59	101.5	161.0	164.5	3.88	255.1	52750	10210	3080	PS
80	224.0	4.70	108.0	184.0	184.0	4.17	313.6	81990	15620	3980	PS
90	225.0	4.06	117.0	180.0	193.5	4.25	281.2	71040	13280	3346	PS
100	235.0	3.38	120.0	205.0	215.0	4.42	276.1	59470	12580	3051	PS

* Plasticity in compression
** Longitudinal direction at reinforcement yielding
*** B: Bending, PS: Punching shear

Table 3 Main results of dynamic analysis on SFRC handrails

Loading rate (tf/msec)	Load at failure (tf)	Deflection at failure (mm)	Cracking load (tf)	Concrete plasticity load (tf)*	Reinforcement yielding load (tf)	Index of local deformation** ($\times 10^{-4}/\text{cm}^2$)	Impulse (kgf·sec)	Total energy (kgf·cm)	Deformation energy (kgf·cm)	Volume displaced (cm^3)	Failure mode***
4.14	56.5	3.89	26.9	53.4	54.1	5.70	385.9	18330	3400	3531	B
8	70.4	3.62	27.2	64.4	68.4	2.79	309.8	19720	4628	4026	B
12	75.6	2.73	31.8	70.2	75.0	3.69	238.1	15170	4185	3366	B
16	83.2	3.10	36.0	67.2	72.8	2.48	216.3	19730	5116	3568	B
20	98.0	4.55	40.0	79.0	84.0	2.07	240.1	35250	7344	4273	B
25	102.5	3.79	43.8	87.5	93.8	3.50	210.1	30570	5151	2969	B
30	124.5	4.42	48.0	94.5	109.5	3.01	258.3	41850	8281	3883	B
35	127.8	3.65	52.5	105.0	119.0	3.00	233.1	35110	7171	3274	B
40	148.0	4.90	56.0	110.0	136.0	4.03	273.8	55850	9676	3837	B
50	160.0	4.67	62.5	117.5	150.0	3.78	256.0	57450	9462	3427	PS
60	165.0	3.78	69.0	120.0	150.0	5.04	226.9	47330	7437	2641	PS
70	192.5	4.10	73.5	126.0	182.0	3.78	264.7	58100	10980	3290	PS
80	188.0	3.42	80.0	136.0	172.0	5.66	220.9	47930	7369	2299	PS
90	202.5	3.42	85.5	139.5	184.5	5.78	227.8	51240	8000	2313	PS
100	230.0	3.74	85.0	145.0	205.0	4.24	264.5	62620	11300	2847	PS

* Plasticity in compression
 ** Longitudinal direction at reinforcement yielding
 *** B: Bending, PS: Punching shear

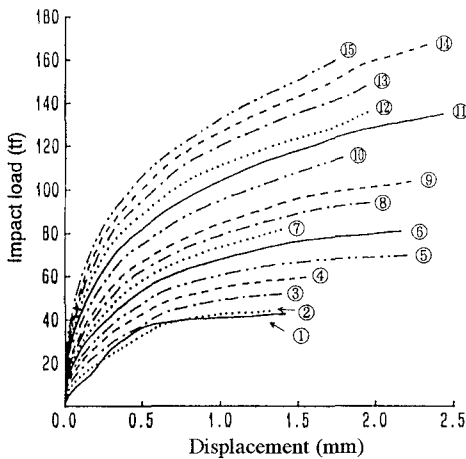


Fig. 4 Impact load-displacement relations of RC handrails

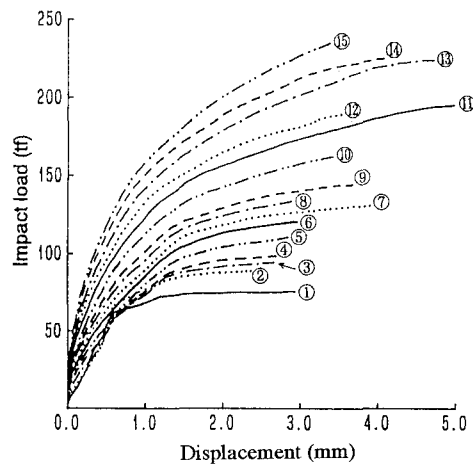


Fig. 5 Impact load-displacement relations of HRC handrails

- ① : $V_L=4.14\text{tf/msec}$, ② : $V_L=8.0\text{tf/msec}$
 ③ : $V_L=12.0\text{tf/msec}$, ④ : $V_L=16.0\text{tf/msec}$
 ⑤ : $V_L=20.0\text{tf/msec}$, ⑥ : $V_L=25.0\text{tf/msec}$
 ⑦ : $V_L=30.0\text{tf/msec}$, ⑧ : $V_L=35.0\text{tf/msec}$
 ⑨ : $V_L=40.0\text{tf/msec}$, ⑩ : $V_L=50.0\text{tf/msec}$
 ⑪ : $V_L=60.0\text{tf/msec}$, ⑫ : $V_L=70.0\text{tf/msec}$
 ⑬ : $V_L=80.0\text{tf/msec}$, ⑭ : $V_L=90.0\text{tf/msec}$
 ⑮ : $V_L=100.0\text{tf/msec}$

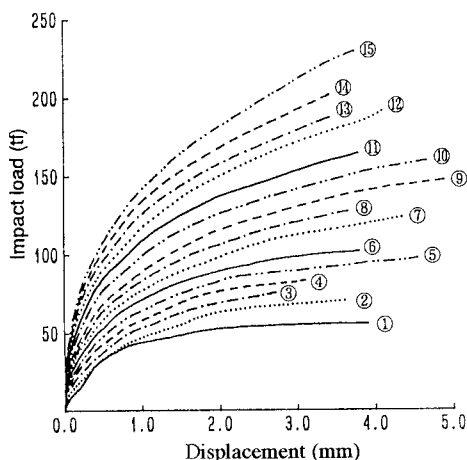


Fig. 6 Impact load-displacement relations of SFRC handrails

- ① : $V_L=4.14\text{tf/msec}$, ② : $V_L=8.0\text{tf/msec}$
 ③ : $V_L=12.0\text{tf/msec}$, ④ : $V_L=16.0\text{tf/msec}$
 ⑤ : $V_L=20.0\text{tf/msec}$, ⑥ : $V_L=25.0\text{tf/msec}$
 ⑦ : $V_L=30.0\text{tf/msec}$, ⑧ : $V_L=35.0\text{tf/msec}$
 ⑨ : $V_L=40.0\text{tf/msec}$, ⑩ : $V_L=50.0\text{tf/msec}$
 ⑪ : $V_L=60.0\text{tf/msec}$, ⑫ : $V_L=70.0\text{tf/msec}$
 ⑬ : $V_L=80.0\text{tf/msec}$, ⑭ : $V_L=90.0\text{tf/msec}$
 ⑮ : $V_L=100.0\text{tf/msec}$

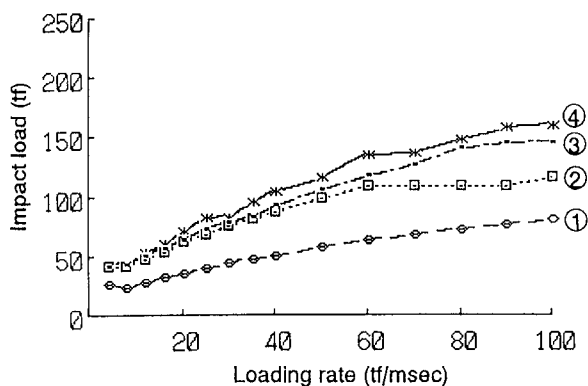


Fig. 7 Effects of loading rate on material states (RC handrail)

- ① Cracking load (tf)
 ② Concrete plasticity load (tf)
 ③ Reinforcement yielding load (tf)
 ④ Impact load at failure (tf)

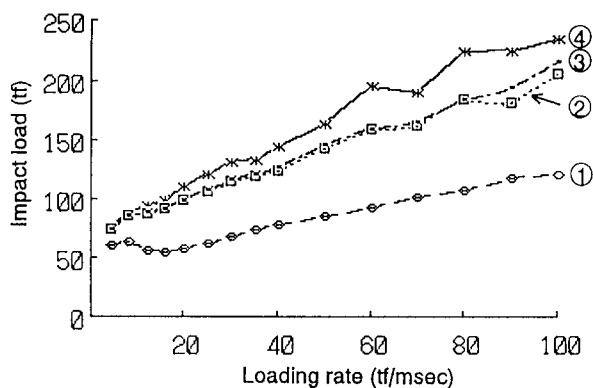


Fig. 8 Effects of loading rate on material states (HRC handrail)

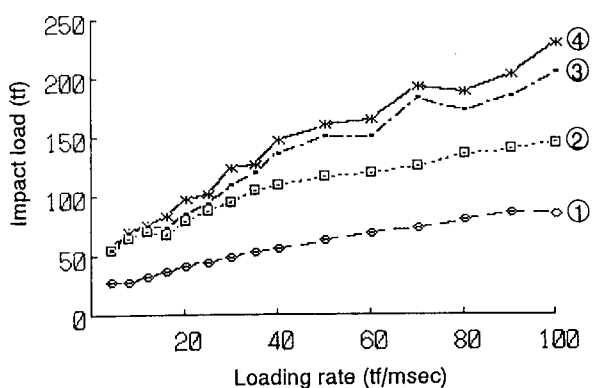


Fig. 9 Effects of loading rate on material states (SFRC handrail)

RC高欄の場合には、コンクリートの塑性化荷重はFig. 7のRC高欄とそれほど大きくは変わらないが、コンクリートの塑性化荷重と鉄筋の降伏荷重との差が大きくなっている。これは、SFRC高欄の鋼繊維による引張応力の負担の効果の現れであると考えられる。

3.3 耐衝撃性評価

3.3.1 耐衝撃性評価指標の設定

衝撃作用下におけるコンクリート構造物の挙動は静的荷重下とは大きく異なり、同一コンクリート構造物でも衝撃体の種類や載荷速度の変化によって破壊モードが異なるため、耐衝撃設計法を確立するには、耐衝撃性を定量的あるいは定性的に評価する指標が必要となる。そこで、耐衝撃性評価指標として、(1)破壊時衝撃力、(2)破壊時変位、(3)ひびわれ発生荷重、(4)全エネルギー、(5)力積、(6)局部変形指数、(7)たわみ体積および(8)衝撃破壊モードを取り上げ、RC高欄、HRC高欄およびSFRC高欄について、それぞれの指標の観点から耐衝撃性の評価を試みる。

3.3.2 耐衝撃性評価の有効性

(1)破壊時衝撃力

Fig. 10は、載荷速度を横軸にとってRC高欄、HRC高欄およびSFRC高欄の破壊時衝撃力をまとめて示したものである。これより、HRC高欄およびSFRC高欄は材料の静的一軸特性は異なるものの、本解析の範囲内においてはほぼ同様の耐荷性を有していることがわかる。また、RC高欄、HRC高欄およびSFRC高欄のいずれの場合でも載荷速度の増加に伴い破壊時衝撃力の上昇傾向がみられ、慣性力の影響が現れているものと考えられる。しかし、SFRC高欄およびRC高欄では載荷速度 $V_L=60\text{tf/msec}$ 付近、HRC高欄では載荷速度 $V_L=80\text{tf/msec}$ 付近からの破壊時衝撃力の増加傾向は小さくなっており、これ以上載荷速度が増加しても大幅な破壊時衝撃力の向上はないことが予想される。

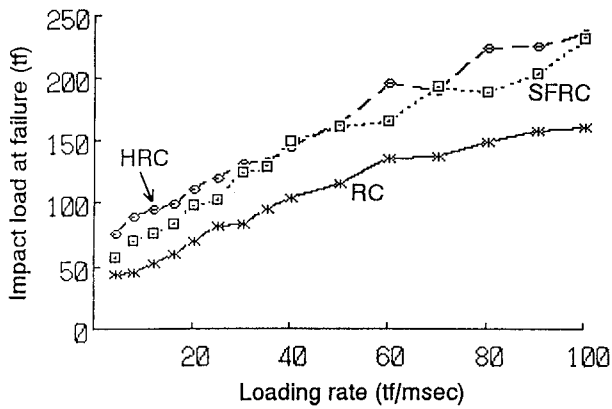


Fig. 10 Effects of loading rate on impact load at failure

(2)破壊時変位

Fig. 11に各種高欄の破壊時変位をまとめて示す。各高欄ごとの破壊時変位のばらつきは大きいですが、今回の解析の範囲内では、HRC高欄およびSFRC高欄はRC高欄よりも全般的に破壊時変位が大きく、両者の変形能が優れていることがわかる。また、載荷速度 $V_L=50\text{tf/msec}$ 以下の場合には、SFRC高欄の破壊時変位が最も大きく、鋼繊維混入による靱性改善効果が優れていることを示している。また、本指標は載荷点変位で評価しているため、局部変形の影響を直接評価することはできないが、例えば、SFRC高欄についてTable 3の破壊モードと対応させてみると、破壊時変位が減少する傾向にある50tf/msec以上の載荷速度では、SFRC高欄の破壊モードは押し抜きせん断である。今回の解析結果では、RC高欄およびHRC高欄

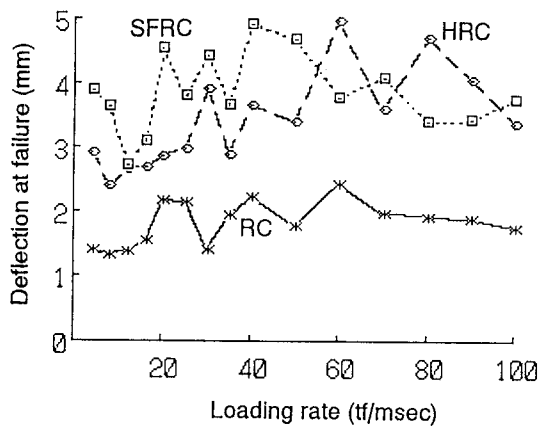


Fig. 11 Effects of loading rate on deflection at failure

の場合には、このような載荷速度の増加にともなう靱性低下の傾向が顕著に現れているとはいえないが、RC高欄の場合には若干この傾向が現れている。このように、破壊時変位が大きくても、載荷速度が増加するにつれて、破壊時変位が減少する領域では押し抜きせん断破壊モードとなることが予想される。

(3) ひびわれ発生荷重

Fig. 12は、各高欄のひびわれ発生荷重を示したものである。これより、ひびわれ発生に関しては、HRC高欄のひびわれ発生荷重が、RC高欄およびSFRC高欄よりも全体的に高く、HRCを適用することによりひびわれの効果的な抑制が可能となることがわかる。このように、HRC高欄のひびわれ発生荷重がRC高欄およびSFRC高欄の場合よりも高くなったのは、解析上のコンクリートの引張強度を圧縮強度の12%と設定したために、圧縮強度の高いHRCの引張破断ひずみがSFRCやRCよりも大きくなったことによるものである。

(4) 全エネルギー

全エネルギーは衝撃力～載荷点変位関係で囲まれる部分の面積で表され、構造物が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、構造物の吸収エネルギーにほぼ等しいと考えられる。Fig. 13は、各種高欄の全エネルギーの変化をまとめて示したものである。この図から、HRC高欄およびSFRC高欄ではRC高欄よりも全エネルギーが大きく、エネルギー吸収能が優れていることがわかる。また、いずれの高欄の場合にも載荷速度がある程度高くなると全エネルギーは顕著な上昇を示さなくなり、各高欄でのエネルギー吸収能の限界を示しているものと思われる。

(5) 力積

力積は、衝撃力～時間関係で囲まれた部分の面積である。Fig. 14は、各種高欄の力積の変化を比較したものである。この図から、載荷速度が小さいほど力積が大きくなることがわかる。また、Fig. 14中の値は高欄を破壊に至らせるのに必要な力積であることを示していることになる。図中の載荷速度の高い部分では、衝撃破壊モードは押し抜きせん断であることから、曲げ破壊に必要な力積は押し抜きせん断破壊に必要な力積よりも大きいことがわかる。

(6) 局部変形指数

衝撃作用下でのコンクリート構造物は、衝撃初期の高次振動モードの卓越による局部変形を生じ易く、衝撃破壊モードが押し抜きせん断破壊となり易い。局部変形を定量的に取り扱う指標としては、破壊時曲率（ $1/R$ ）があり、例えばFig. 15に示すような2辺単純支持版の場合には、次式によって算定される。

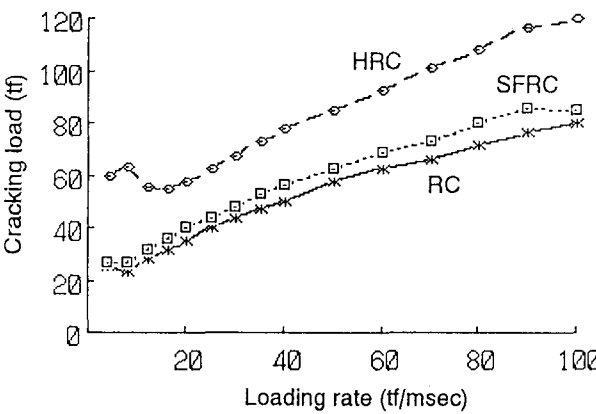


Fig. 12 Effects of loading rate on cracking load

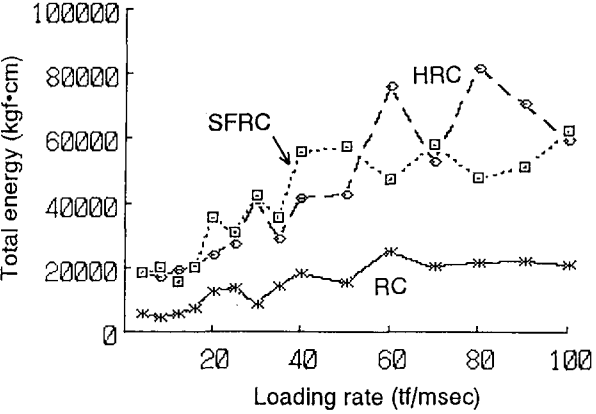


Fig. 13 Effects of loading rate on total energy

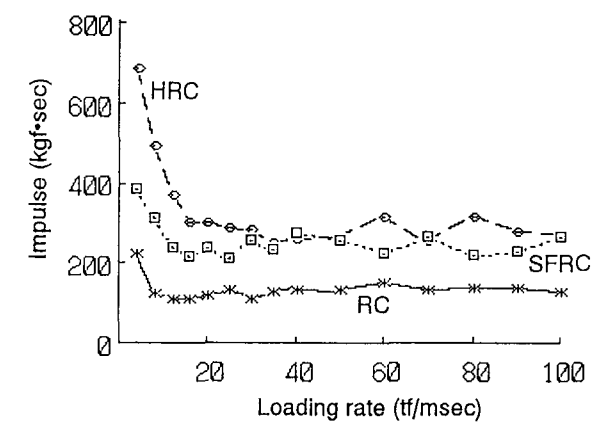


Fig. 14 Relation between impulse and loading rate

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{\Delta x^2} (\delta_1 + \delta_3 - 2\delta_2) \quad (4)$$

しかし、破壊時曲率には破壊時の変位の影響が含まれるために直接的な比較ができない。そこで、破壊時曲率を破壊時変位 (δ_w) で除した値を局部変形指数 (I_L) と定義する。すなわち、

$$\text{局部変形指数}(I_L) = \frac{\text{破壊時曲率}(1/R)}{\text{破壊時変位}(\delta_w)} \quad (5)$$

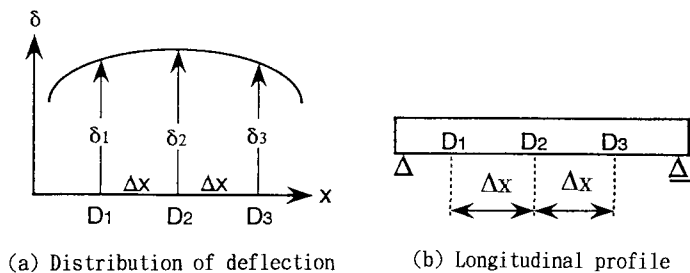


Fig. 15 Curvature at failure of concrete structure

Fig. 16～Fig. 18に、RC高欄、HRC高欄およびSFRC高欄それぞれの鉄筋降伏時の高欄配筋方向の局部変形指数を示す。ここで、各種高欄の局部変形指数算定には $\Delta x = 30\text{cm}$ として計算した。Fig. 16～Fig. 18より、SFRC高欄の一部を除いて載荷速度の増加に伴って局部変形指数が増大する傾向が認められる。つまり、載荷速度の上昇によって局部的な変形を生じ易いことがわかる。例えば、HRC高欄の場合、載荷速度40tf/msec前後で極端に局部変形指数の値の傾向が変化し、Table 2の衝撃破壊モードと比較すると、曲げ破壊から押し抜きせん断破壊に移行していることがわかる。この載荷速度40tf/msecに対応する局部変形指数はTable 2より、 $3.49 (\times 10^{-4} / \text{cm}^2)$ であるが、RC高欄の場合にもFig. 16およびTable 1から、局部変形指数の値が $3.42 (\times 10^{-4} / \text{cm}^2)$ となる20tf/msec以上の載荷速度での破壊モードは押し抜きせん断破壊モードとなる。また、SFRC高欄でもTable 3から、局部変形指数が $3.78 (\times 10^{-4} / \text{cm}^2)$ となる50tf/msec以上の載荷速度で押し抜きせん断破壊モードとなっている。

以上のことから、局部変形指数が $3.5 (\times 10^{-4} / \text{cm}^2)$ 前後となる載荷速度を境として衝撃破壊モードが変化していることがわかり、式(5)で表される局部変形指数は衝撃破壊モードと良い対応を示すことがわかった。

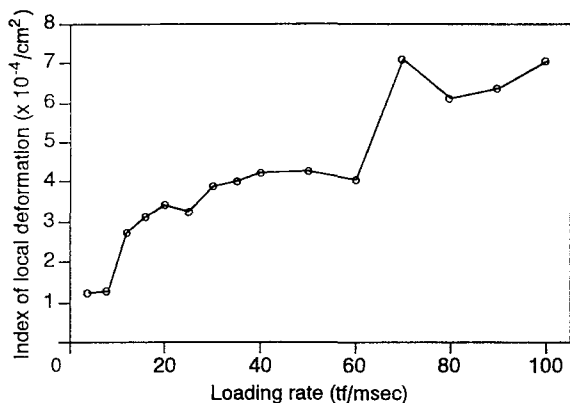


Fig. 16 Effects of loading rate on index of local deformation(RC handrails)

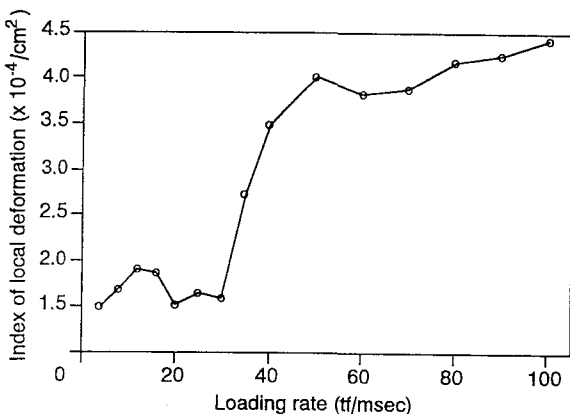


Fig. 17 Effects of loading rate on index of local deformation(HRC handrails)

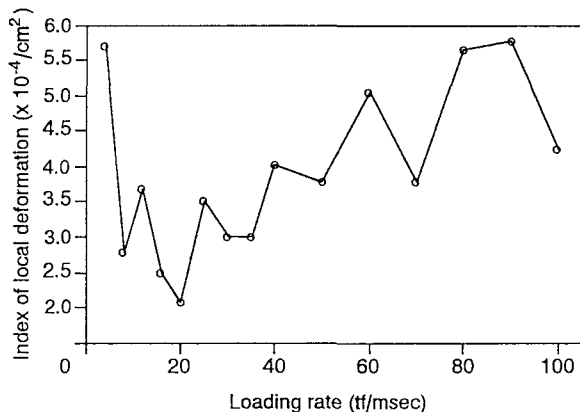


Fig. 18 Effects of loading rate on index of local deformation(SFRC handrails)

(7)たわみ体積

たわみ体積は、無載荷状態でのコンクリート面を基準とし、構造物破壊時の全面にわたるたわみ分布を積分し、その変形状態を体積表示するものである。高欄の破壊形式が曲げ破壊の場合には、破壊時の変形状態は高欄全体が滑らかに大きく変形するために、たわみ体積は大きくなるのに対して、押し抜きせん断破壊に至る場合には、変形が局部的になるためにたわみ体積は小さくなると考えられる。そのため、たわみ体積は構造物の衝撃破壊モードおよび衝撃吸収エネルギーとの相関性が強いと考えられる。

Fig. 19は、各種高欄のたわみ体積をまとめて示したものであるが、RC高欄およびSFRC高欄の場合には載荷速度が60tf/msec以上になるとたわみ体積が減少していく傾向がある。これらの載荷速度では、Table 1およびTable 2より、RC高欄およびHRC高欄の衝撃破壊モードは押し抜きせん断であり、局部変形指数の値も大きく高欄の変形が局部的になっていると考えられる。

(8)衝撃破壊モード

衝撃破壊モードは、RC高欄、HRC高欄およびSFRC高欄に対する、それぞれの解析結果 (Table 1~3) を参照すると、HRCを適用しても大幅な改善は認められないが、SFRC高欄とすると、はじめて押し抜きせん断破壊モードの現れる載荷速度が上昇することがわかる。また、「(6)局部変形指数」で考察したように、衝撃破壊モードは局部変形指数との相関性が強く、局部変形指数が大きいと押し抜きせん断破壊モードとなり易いことがわかる。

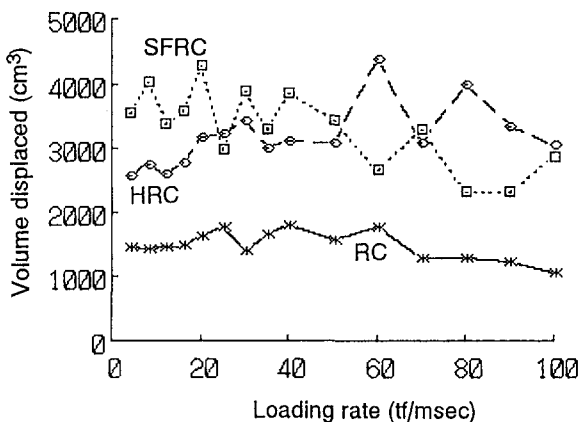


Fig. 19 Effects of loading rate on volume displaced

6. 結論

本研究では、各種コンクリート構造物に対して行われている耐衝撃性手法を概観するとともに、ソフトな衝撃作用下での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、RC高欄を対象としてコンクリートの種類、載荷速度をパラメータとした衝撃破壊挙動解析を行い、各種耐衝撃性評価指標を提案し、その有効性を検討した。以下、本研究で得られた主な結果をまとめる。

① 各種コンクリート構造物が受ける衝撃現象は多様であり、従って耐衝撃性評価も異なり、それぞれ個別のアプローチで研究が進められているが、現状の主要な研究の方向は破壊モードの変化を含んだエネルギー基準による評価に進む傾向にある。

② コンクリート版構造に対する定量的あるいは定性的な耐衝撃性評価において、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、たわみ体積、局部変形指数および衝撃破壊モードの各種指標が有効であることが明かとなった。

③ 局部変形指数と衝撃破壊モードは相関性が高く、局部変形指数がある値以上になると押し抜きせん断破壊モードとなり易い傾向があることがわかった。また、たわみ体積は載荷速度が高くなるにつれて急速に減少していく領域がみられ、このような載荷速度の領域では、構造物のエネルギー吸収性が低く、押し抜きせん断破壊となり易いと考えられる。

最後に、本研究の遂行にあたり多大なご協力をいただいた 元神戸大学自然科学研究科学生 Michael W. KING 博士に紙上を借りて感謝いたします。

参考文献

- 1) 例えば, Kar A. K. : Impact Load for Tornado-Generated Missiles, Nuclear Engineering and Design, Vol. 47, pp. 107-114, 1978
- 2) 例えば, 土木学会構造工学委員会: 落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 1991. 3
- 3) 岡田清編: 最新コンクリート工学, 国民科学社, pp. 147-149, 1986
- 4) Hughes G. and Beeby A. W. : Investigation of the Effect of Impact Loading on Concrete Beams, The Structural Engineer, Vol. 60B, No. 3, pp. 45-52, 1982. 9
- 5) Liemersdorf H. and Wolde-Tinsae Amde M. : Damage Probability of Turbine Missile Impact, J. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 12, pp. 2909-2923, 1984. 12
- 6) Kar Anil K. : Loading Time History for Tornado-Generated Missiles, Nuclear Engineering and Design, Vol. 51, pp. 487-493, 1979
- 7) Attwood G. J. and Kendall K. C. : Methods for the Assessment of Hazards from Free-Flying Missiles, Impact Technology Department, AEA Reactor Services, AEE Winfrith, DT2 8DH, pp. 3-14
- 8) Barr P. : Guidelines for the Design and Assessment of Concrete Structures Subjected to Impact, AEA Technology, RSD R439 Issue 3, pp. 3-9, 1990. 5
- 9) (財) 電力中央研究所: 飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法, 1991. 7
- 10) 日本道路協会: 落石対策便覧, pp. 173-181, 1983. 7
- 11) 本名, 今野, 他: 緩衝砂を有するRC版の耐落下物衝撃性能と落石覆工の動的設計法, 土木学会論文集, 第426号, V-14, pp. 37-44, 1991. 2
- 12) 吉田, 榎谷, 他: 落石覆工の設計の現状と合理的設計へのアプローチ, 土木学会論文集, 第421号, VI-13, pp. 213-222, 1990. 9
- 13) 榎谷 浩: 落石覆工の落石による衝撃力に関する研究, 学位論文, 1989. 4
- 14) 園田, 佐藤, 他: 落石覆工への落石のエネルギー伝達に関する基礎的考察, 土木学会論文集, 第446号, I-19, pp. 147-155, 1992. 4
- 15) 清宮, 安藤, 他: 3次元有限要素法による船舶の鉄筋コンクリート製ケーソンへの衝突解析, 第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp. 45-48, 1993. 6
- 16) Miyamoto A., King M. W. and Fujii M. : Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, J. A. C. I., Vol. 88, No. 4, pp. 411-419, July-Aug., 1991
- 17) Miyamoto A., King M. W. and Fujii M. : Analysis of Failure Modes for Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, Vol. 88, No. 5, pp. 538-545, Sept.-Oct., 1991
- 18) Ottosen N. S. : Failure Criterion for Concrete, J. of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, EM4, pp. 527-535, 1977 (1993年9月16日受付)