

# 鋼板で補強されたRC板の耐衝撃性と 補強鋼板の等価コンクリート厚の推定

IMPACT RESISTANCE OF A REINFORCED CONCRETE SLAB WITH A THIN STEEL PLATE AGAINST  
PROJECTILE IMPACT AND PREDICTION OF EQUIVALENT CONCRETE THICKNESS OF STEEL PLATE

小暮 幹太\* 大野 友則\*\* 河西 良幸\*\*\* 坪田張二\*\*\*\* 内田 孝\*\*\*\*\*

By Kanta KOGURE, Tomonori OHNO, Yoshiyuki KASAI, Haruji TSUBOTA and Takashi UCHIDA

This study is to examine the impact resistance of a reinforced concrete slab with a thin steel plate and to evaluate quantitatively the effect of a steel plate in preventing local damage such as scabbing and perforation. This paper presents results of an experiment on impact loading. A cylindrical steel projectile with a weight of 0.43kgf, a total length of 125mm and a diameter of 39.5mm was shot by an air gun. The projectile velocity at impact was about 170m/sec. A total of 48 specimens with various combinations of RC slabs and steel plate thicknesses were used for the tests.

## 1. はじめに

土木・建築構造物の中には、自然災害や人為的事故によって発生する大規模な衝撃外乱を受ける構造物がある。自然的なものとしては、例えば急崖における落石崩落や土石流があり、これに対応する構造物は落石防護工や砂防ダムである。また人為的なものとしては、車両・船舶・航空機の衝突事故や危険物の爆発事故などがあり、ガードフェンス・港湾施設・原子力発電関連施設がこれらの対象構造物である。これらの構造物が衝撃外乱の作用を受けて破壊すれば、甚大な人的被害が発生することは明らかであり、設計にあたっては耐衝撃性が考慮されなければならない。しかしながら、①衝撃外乱による衝撃荷重は衝突する物体と被衝突体（構造物）の特性（質量、剛性、衝突速度など）によって異なり、設計の基本となる衝撃荷重を特定することが非常に困難である、②衝突体の質量や速度の大きさによって構造物に生じる破壊性状が大きく相違する、ことにより耐衝撃設計法を確立するためには明らかにすべき問題が多く残されている。

- 
- \* 防衛大学校 理工学研究科学生 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
  - \*\* 工博 防衛大学校助教授 土木工学科 ( 同上 )
  - \*\*\* 工博 鹿島建設技術研究所 主管研究員(〒182 東京都調布市飛田給2-19-1)
  - \*\*\*\* 工博 鹿島建設技術研究所 研究室長 ( 同上 )
  - \*\*\*\*\* 工博 防衛大学校教授 土木工学科 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

一般に、衝撃荷重を受けるコンクリート部材の応答は、貫入・貫通および裏面剥離などの局部応答と曲げやせん断による全体応答に大別できる。衝突体の質量や速度または構造物の剛性の相対関係によって部材に生じる衝撃応答が異なり、また構造物の種類・用途あるいは目的によっても考慮すべき破壊条件が異なる。したがって、耐衝撃性は各構造物に応じた別個の指標を用いて検討することが必要である。

構造物の質量に比して衝突体の質量が小さく衝突速度が大きい場合(数10m/secから数100m/sec程度)には、全体よりも局部応答による破壊が重要な問題であり、局部破壊の大きさを推定する評価式が数多く報告されている<sup>4)~5)</sup>。また、局部破壊に対する耐衝撃性の向上を目的としたコンクリート部材の開発に関する研究も、近年盛んに行われている。例えば、繊維補強コンクリートや高強度コンクリートを用いる方法、緩衝材と組み合わせる複合構造とする方法<sup>7)・8)</sup>あるいは鋼ライナーで補強する方法<sup>6)</sup>などがある。これらの方法は、衝突体の貫入や裏面コンクリートの剥離を防止するためにコンクリートのせん断抵抗力や引張強度を向上させるものと、異種の材料を組み合わせることにより衝撃緩衝効果や抵抗力を増加させることをねらったものである。

本研究では、鉄筋コンクリート板(以下、RC板)の裏面を鋼板で補強する方法に着目し、鋼板による裏面剥離や貫通の抑止効果(本研究における耐衝撃性)について検討することを目的とし、高速衝突実験を行った。実験では、コンクリートの板厚および鋼板厚の相違や鋼板の固定方法の相違が耐衝撃性に及ぼす影響を調べた。得られた結果に基づいて、鋼板による局部破壊の抑止効果を等価なコンクリート厚として定量的に評価することを試みた。

## 2. 実験の概要

### 2.1 高速衝突実験装置

衝突実験に用いた装置の概要を、写真-1~4に示す。本装置は、高速変形負荷装置と飛翔体発射装置から構成されている。高速変形負荷装置は、最大荷重容量50tonf、最大変位量150mmで、静的から最大変形速度4m/secの載荷性能を有している。試験は、載荷具を試験体に接触させた状態から瞬間的に所定の変形速度で変形させるので、高速変形下で終局状態に至るまでの部材や材料の動力学特性(耐荷力、変形性能)を調べることができる。本実験では、この装置の負荷能力を利用して増圧ジャッキのピストンを高速で載荷し、空気圧を瞬時に高圧圧縮するために用いている。

飛翔体の発射は、試験開始前にエア・コンプレッサーで7気圧に与圧した増圧ジャッキ内の空気を、高速変形負荷装置を用いて瞬間的に約23気圧に増圧することにより行っている。長さ250cmの発射管(加速管とも呼ぶ)の一端にトルク・リングで固定された飛翔体は、飛翔体の後端部に作用する高圧空気の圧縮力がリングによる拘束力より大きくなった時点で発射する。エア・ガン方式による本装置では、重量約500gfの物体を約200

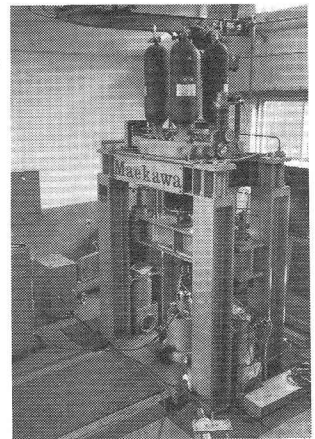


写真-1 高速変形負荷装置

### 2.2 試験体

#### (1) RC試験体

衝突実験に用いた試験体の概要を図-1に示す。寸法は、厚さ:5~14cm、縦×横:60×60cmである。鉄筋の配筋はすべて同一で、D6鉄筋を用いて鉄筋間隔を10cmとした。原子力発電施設の建屋部材の平均的な寸法が7~8mであることを考慮すると、縮尺はほぼ1/12.5に相当する。すなわち、厚さ62.5~175cm、大きさ7.5×7.5mの壁スラブに対応する大きさとみなせる。なお、試験時のコンクリートの静的圧縮強度は平均243kgf/cm<sup>2</sup>



写真-2 増圧ジャッキおよび発射管入口部であった。

## (2)補強鋼板

厚さ0.8,1.2,1.6および2.0mmの4種類(材質:SS41)の薄い鋼板を60×60cmの大きさに加工して、RC試験体の裏面に取り付けた。取り付ける方法として、スタッド(M3ボルト、径3mm、長さ35mmを50mm間隔に電気溶接)で固定する方法とエポキシ系接着剤で鋼板をそのままコンクリート面に接着する方法の2種類である。接着剤による方法では、試験前日に2液性エポキシ接着剤をコンクリート裏全面に塗布した後、鋼板を接着させた。スタッドの配置状態を、図-2に示す。

## (3)試験体の種類と条件

衝突実験では、表-1に示すようにコンクリート厚、鋼板厚および参考のために固定方法を実験パラメータとした48体の試験体を用いた。



写真-3 発射装置全体の概要

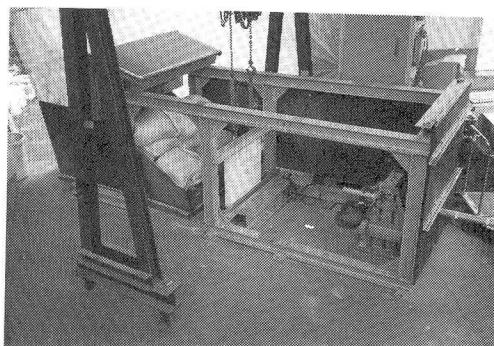


写真-4 発射管出口部および試験体設置状況

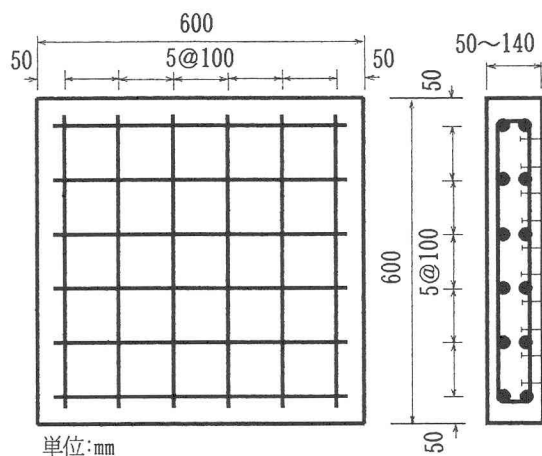


図-1 試験体の概要

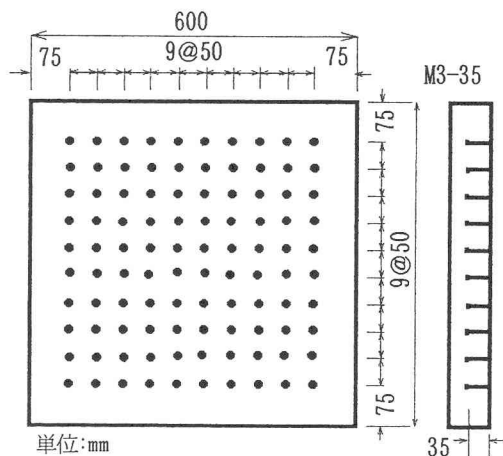


図-2 スタッドの配置

表-1 試験体の種類

| No | 厚さ   |                 | 固定方法 | No | 厚さ   |                 | 固定方法 | No | 厚さ   |                 | 固定方法 | No | 厚さ   |                 | 固定方法    |
|----|------|-----------------|------|----|------|-----------------|------|----|------|-----------------|------|----|------|-----------------|---------|
|    | t    | t <sub>sp</sub> |      |    | t    | t <sub>sp</sub> |      |    | t    | t <sub>sp</sub> |      |    | t    | t <sub>sp</sub> |         |
| 1  | 5.0  | 0               | スタント | 13 | 6.0  | 0.8             | スタント | 25 | 8.0  | 1.2             | スタント | 37 | 10.0 | 1.6             | スタント    |
| 2  | 6.0  | 0               |      | 14 | 7.0  | 0.8             |      | 26 | 9.0  | 1.2             |      | 38 | 12.0 | 1.6             |         |
| 3  | 7.0  | 0               |      | 15 | 8.0  | 0.8             |      | 27 | 9.5  | 1.2             |      | 39 | 5.0  | 2.0             |         |
| 4  | 8.0  | 0               |      | 16 | 9.0  | 0.8             |      | 28 | 10.0 | 1.2             |      | 40 | 9.0  | 2.0             |         |
| 5  | 8.5  | 0               |      | 17 | 10.0 | 0.8             |      | 29 | 12.0 | 1.2             |      | 41 | 5.0  | 0.8             | エポキシ接着剤 |
| 6  | 9.0  | 0               |      | 18 | 10.5 | 0.8             |      | 30 | 5.0  | 1.6             |      | 42 | 7.0  | 0.8             |         |
| 7  | 10.0 | 0               |      | 19 | 12.0 | 0.8             |      | 31 | 5.5  | 1.6             |      | 43 | 8.0  | 0.8             |         |
| 8  | 11.0 | 0               |      | 20 | 14.0 | 0.8             |      | 32 | 6.0  | 1.6             |      | 44 | 6.0  | 1.2             |         |
| 9  | 12.0 | 0               |      | 21 | 5.0  | 1.2             |      | 33 | 7.0  | 1.6             |      | 45 | 7.0  | 1.2             |         |
| 10 | 14.0 | 0               |      | 22 | 6.0  | 1.2             |      | 34 | 8.0  | 1.6             |      | 46 | 7.0  | 1.6             |         |
| 11 | 16.0 | 0               |      | 23 | 6.5  | 1.2             |      | 35 | 9.0  | 1.6             |      | 47 | 9.0  | 1.6             |         |
| 12 | 5.0  | 0.8             |      | 24 | 7.0  | 1.2             |      | 36 | 9.5  | 1.6             |      | 48 | 10.0 | 1.6             |         |

t:コンクリート板厚(cm)、t<sub>sp</sub>:鋼板厚(mm)

#### (4) 飛翔体

飛翔体は、図-3に示すように頭部、胴体部および尾部の3部分で構成されている。頭部は、鋼製で先端形状は平坦である。胴体部は、STK41の構造用鋼管を用いた。その諸元を表-2に示す。同種の飛翔体を用いた過去の実験から、胴体部には変形が無く、剛飛翔体(ハードミサイル)に相当する。尾部はプラスチックで、この部分をトルク・リングで拘束し発射管内に固定するために用いた。

#### (5) 衝撃応答の計測

計測は、試験体に生じる加速度、変位およびひずみについて行った。図-4に示すように、衝突面側には衝突点近傍に加速度計(G1)および衝突点から7.5cm(D2)、10cm(D3)、15cm(D1)および20cm(D4)の位置に渦電流式非接触変位計を配置した。裏面には、試験体中央(T1)および10cm(T2)の位置に光学式変位計用のターゲットを取り付け、中央から5cm(G2)、10cm(G3)、14cm(G6)、15cm(G4)、20cm(G5)、28cm(G7)の位置に加速度計を配置した。また、鋼板のひずみも計測した(S1~S4)。

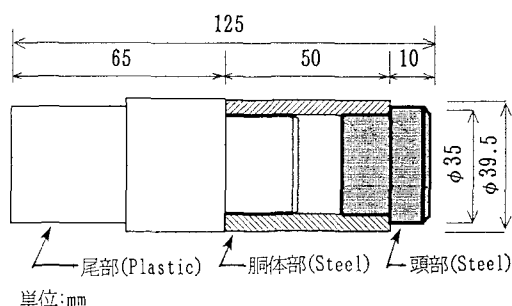


図-3 飛翔体の概要

表-2 飛翔体胴体部の諸元

| 材質 | 長さ   | 肉厚    | 外径     | 座屈耐力     |
|----|------|-------|--------|----------|
| 軟鋼 | 50mm | 4.2mm | 39.5mm | 19.0tonf |

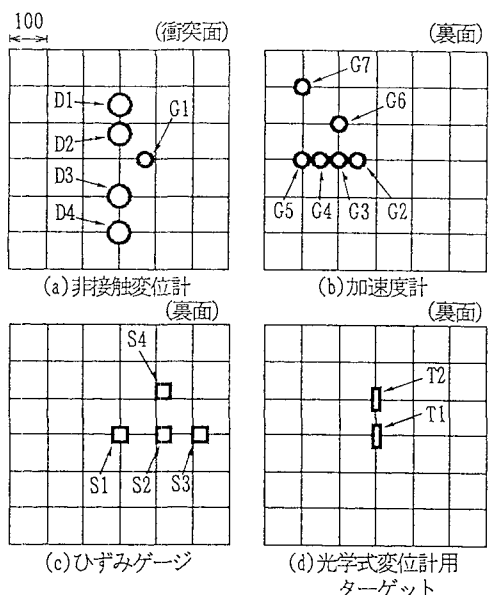


図-4 計測器の配置

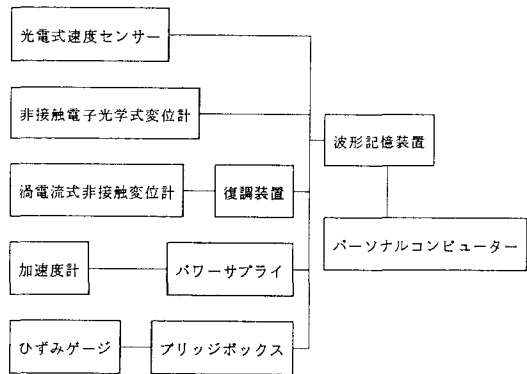


図-5 計測システム

飛翔体の速度は、加速管の出口および出口から100cm手前の位置に配置した光電式速度計測器で測定した。本実験で実測した衝突速度は168m/sec～185m/secの範囲にあり、平均約170m/secであった。計測システムを図-5に、計測器の性能を表-3に示す。データのサンプリング時間間隔は、5μsecとした。

表-3 計測器の性能・諸元

| 種 類  | 型 名          | 計測範囲     | 仕様           | 備 考             |
|------|--------------|----------|--------------|-----------------|
| 加速度計 | 305A         | 100,000G | 固有振動数 60KHz  | 圧電素子型<br>/PCB社製 |
|      | 305A02       | 50,000G  | 60KHz        |                 |
|      | 305A03       | 10,000G  | 60KHz        |                 |
|      | 302A02       | 500G     | 45KHz        |                 |
| 変位計  | KD-2300-12CU | 50.8mm   | 周波数応答 50KHz  | 非接触式/Kaman社製    |
|      | MODEL-7000C  | 50～300mm | 周波数応答 500KHz | 光学式/ヤーマン社製      |

### (6) 試験体の設置

試験体は、写真-4に示すように試験体の上部を2本のスリングで吊り、加速管出口から120cmの位置に設置した。飛翔体の衝突によって試験体は自由に移動可能なので、自由支持条件となる。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 試験体の破壊状況

図-6に、剛飛翔体の衝突によって生じた板厚7cmおよび9cmのRC試験体の局部損傷の比較を示す。鋼板で補強されていない7cmの試験体には、飛翔体の径に等しい貫通孔が生じるとともに、両面には曲げひびわれと裏面剥離も生じている。鋼板を取り付けた試験体には、鋼板の厚さによらず貫通は生じていないが、衝突点近傍の鋼板は膨らんでスタッドの取り付け位置が明瞭に認められる。鋼板の厚さが増すにしたがって膨らみ

|                      |     | 鋼板厚                                 |        |        |        |
|----------------------|-----|-------------------------------------|--------|--------|--------|
|                      |     | 0 mm                                | 0.8 mm | 1.2 mm | 1.6 mm |
| コンクリート板厚=7 cm (スタッド) | 衝突面 |                                     |        |        |        |
|                      | 裏面  |                                     |        |        |        |
| コンクリート板厚=7 cm (エポキシ) | 衝突面 |                                     |        |        |        |
|                      | 裏面  |                                     |        |        |        |
| コンクリート板厚=9 cm (スタッド) | 衝突面 |                                     |        |        |        |
|                      | 裏面  |                                     |        |        |        |
|                      |     | ○: 押し抜けたスタッド      ●: わずかに影響を受けたスタッド |        |        |        |

図-6 局部損傷の比較

の範囲および高さは減少している。また、衝突面には縦に1本のひびわれだけが生じている。鋼板をエポキシ接着剤で固定した試験体の場合も、貫通を抑制している。鋼板の膨らみの範囲や高さは、鋼板をスタッドにより固定した試験体より小さいが、衝突面に生じたひびわれの程度が大きい。これは、鋼板をエポキシ接

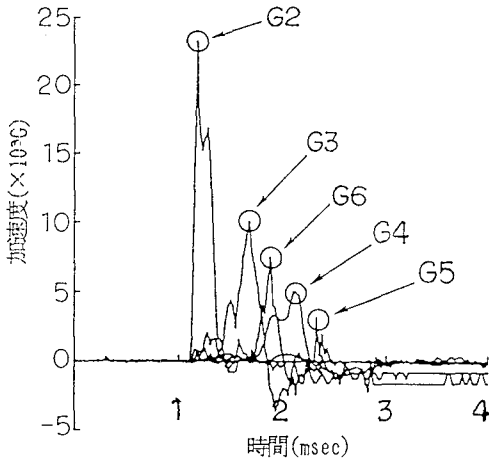


図-7 加速度の時刻歴応答

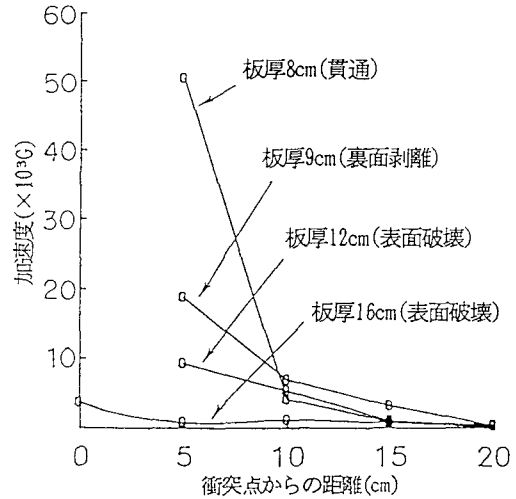


図-8 板厚の相違による最大加速度分布

着剤で固定した場合、鋼板がコンクリート全面にわたって均等に固定されることになり、スタッドで固定するよりも板剛性が向上する。その結果鋼板の無い衝突面側で飛翔体の衝突エネルギーを吸収するためであると考えられる。板厚9cmの場合は、鋼板を有しない試験体には裏面剥離が生じる。鋼板を取り付けることにより、裏面剥離が抑制されていることがわかる。本研究では、裏面鋼板に顕著な膨らみが生じた場合は、コンクリートには裏面剥離が生じているとみなしている。すなわち、RC板の裏面に鋼板を取り付け、さらにその厚さが増すにしたがって貫通→貫通限界→裏面剥離と損傷の程度が小さくなっていく。

### 3.2 衝撃応答

図-7は、0.8mm厚の鋼板で補強した7cm厚のRC試験体裏面の加速度の時刻歴(G2~G6)の一例である。各測定点における加速度の最大値(図中○印)が生じる時刻は、衝突点からの距離が大きくなるにつれて遅れてくる。また測定される最大加速度も、衝突点から10cm(G3)離れた位置までに急激に減少する。図-8は、このような試験体裏面に生じた加速度の最大応答値を衝突点からの距離の関係で示したもので、鋼板を取り付けない試験体の板厚の増加と最大加速度の分布の関係を表している。試験体裏面に生じる加速度は、コンクリート板厚を厚くすることで小さくなり、また分布の勾配も次第に緩やかになる。すなわち、衝撃荷重が加わると、板厚が薄い場合は試験体の裏面に至るまで局所的な応答を示すが、板厚が厚くなるに従って試験体は全体的な応答を示すようになることがわかる。破壊形態もこれに比例して、貫通→裏面剥離→表面破壊と推移し、局部破壊が緩和されている。

図-9は、貫通破壊が生じるコンクリート板厚8cmの試験体の裏面を鋼板で補強した場合の最大加速度の分布を示したものである。鋼板を取り付けて補強することで、衝突点から5cm(G2)での応答値は、補強しない試験体の応答値の60%程度に減少している。鋼板の変形やスタッドの抜けた状況などから、衝突点周辺の鋼板とコンクリートの接合部周辺には、衝撃にともなうせん断力や引張力などの複雑な組み合わせ荷重が作用したことが予想されるが、接合部におけるこのような力の伝達機構の変化によって、裏面加速度の応答値が緩和されたものと考えられる。

図-10は、破壊が表面破壊にとどまったコンクリート板厚12cmの試験体を鋼板で補強した場合の最大加速度の分布を示したものである。先に示したように、コンクリート板厚が十分に厚く、破壊が表面破壊にとどまるような場合は、試験体は全体的な応答を示すため、鋼板による補強が加速度応答に与える影響はほとんど

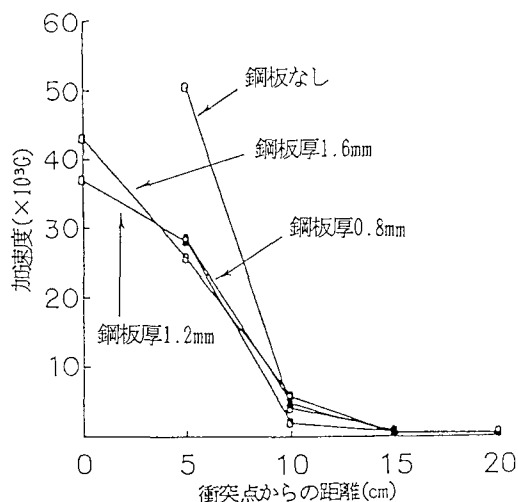


図-9 鋼板厚の相違による最大加速度分布  
(コンクリート板厚:8cm)

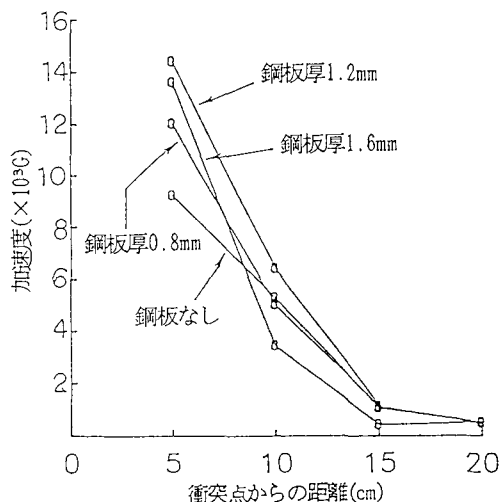


図-10 鋼板厚の相違による最大加速度分布  
(コンクリート板厚:12cm)

認められない。すなわち、鋼板による補強はコンクリート板に貫通、裏面剥離などの局部損傷が生じる場合に有効になるといえる。

### 3.3 鋼板の等価コンクリート厚の推定

図-11に、鋼板付きRC板のコンクリート板厚と鋼板の厚さの相違による局部損傷の程度およびこれらの結果に基づいて推定した貫通限界厚線(図中、実線)と、裏面剥離限界厚線(図中、破線)を示す。本研究では、局部損傷の程度を表-4のように区分している。なお、

表-4 局部損傷の区分

| 記号 | 区分     | 破壊状況                |                    |
|----|--------|---------------------|--------------------|
|    |        | 鋼板を取り付けないRC板        | 鋼板で補強したRC板         |
| ○  | 貫通     | 飛翔体が試験体を通過する        | 飛翔体が鋼板も完全に通過する     |
| ●  | 貫通限界   | 飛翔体が試験体内に止まる        | 鋼板に大きな亀裂が生じる       |
| △  | 裏面剥離   | 裏面剥離しコンクリート片が飛散する   | 鋼板が凸状に変形する         |
| ▲  | 裏面剥離限界 | ひびわれるがコンクリート片は飛散しない | スラットの抜け痕がわずかに確認できる |
| □  | 表面破壊   | 裏面に影響がない            | 鋼板に変形が生じない         |

エポキシ接着剤で固定した場合については、試験体数が少なく明瞭な傾向が把握できないため、本研究で行う等価コンクリート厚の推定における評価の対象としていない。図で、飛翔体がコンクリート板を通過しない(貫通限界)およびコンクリート板の裏面にひびわれが生じるがコンクリートは飛散しないまたは鋼板には膨らみ変形が生じない(裏面剥離限界)という試験結果に対してそれぞれ限界厚線を推定すると、貫通限界および裏面剥離限界に対応するコンクリート厚さは鋼板厚の増加とともに線形的に減少していることが認められる。鋼板厚がゼロ、すなわち鋼板を有しない試験体のコンクリート厚さを基準とすれば、鋼板を取り付けることにより各限界厚に相当する試験体のコンクリート厚さは減少していく。減少したコンクリートの

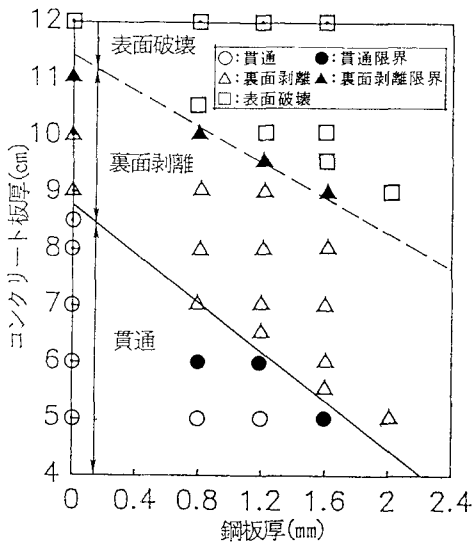


図-11 鋼板付きRC板の貫通限界厚  
および裏面剥離限界厚

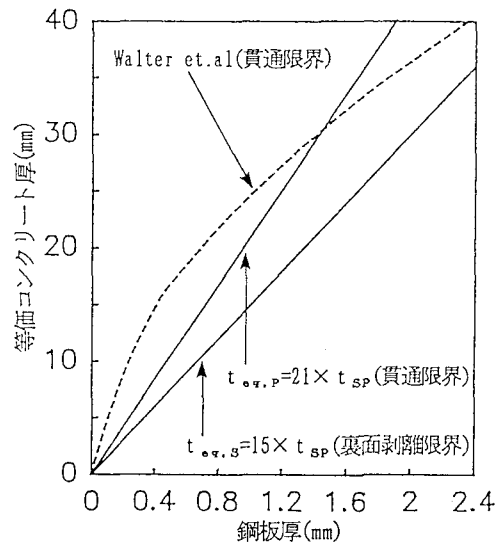


図-12 鋼板厚に対する等価コンクリート厚

厚さが鋼板による効果とみなせば、減少厚は鋼板と同じ効果を与える等価なコンクリート厚とみなすことができる。例えば図から、鋼板を有しない場合、コンクリート板の厚さが8.75cmのとき貫通限界である。鋼板を有する場合は、コンクリート厚が5cmで鋼板厚が1.8mmのとき貫通限界となる。したがって、鋼板1.8mmはコンクリート3.75cm(=8.75-5.0cm)の厚さの効果に相当するとみなせる。

図-12は、図-11に示した各限界厚線から得られた等価コンクリート厚を鋼板厚との関係で示したものである。この2つの直線はそれぞれ次式で与えられる。

$$\text{貫通限界厚: } t_{eq,p} = 21 \times t_{sp} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{裏面剥離限界厚: } t_{eq,s} = 15 \times t_{sp} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $t_{eq,p}$ 、 $t_{eq,s}$ はそれぞれ貫通限界および裏面剥離限界に対する等価コンクリート厚(mm)、 $t_{sp}$ は鋼板の厚さ(mm)である。すなわち鋼板の効果は、貫通限界および裏面剥離限界に対して鋼板厚のそれぞれ21倍および15倍の厚さのコンクリート板に相当することになる。

ところで貫通に対して、Walterらは鋼板付きRCスラブの鋼板厚とコンクリート厚から等価な通常RCスラブの厚さを推定する評価式を次式で与えている。<sup>5)</sup>

$$t_{eq} = t + 6 \times t_{sp}^{0.5625} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $t$ はコンクリート厚(inch)、 $t_{sp}$ は鋼板厚(inch)および $t_{eq}$ は鋼板付きRCスラブと等価なコンクリートスラブ厚(inch)である。上式は、飛翔体が鋼板を貫通するために必要なエネルギーとコンクリート板を貫通するエネルギーを等置することにより得られたものである<sup>9)、10)</sup>。鋼板の等価コンクリート厚を算定する $t_{eq,p} = 6 \times t_{sp}^{0.5625}$ を用いて図-12中に図示すると、破線で示す結果が得られる。本実験から得られた結果とWalterらによる算定値を比較すると、貫通に対して鋼板厚が1.6mm以下ではWalterらによる算定式では等価なコンクリート厚を大きめに評価することがわかる。また、裏面剥離に対する鋼板の効果の評価する式としては、本研究で提示した式(2)以外には見あたらない。

#### 4. 結論

本研究は、薄い鋼板で補強したRC板の耐衝撃性を検討するために行った実験研究である。高速飛翔体による衝突実験では、補強鋼板の有無、コンクリート面への鋼板の固定方法および鋼板厚の相違がRC板の耐衝撃性に及ぼす影響と効果について考察を行った。また、得られた結果に基づいて、貫通限界および裏面剥離限界における鋼板の効果を等価なコンクリート厚に換算する評価式を求めた。本研究で得られた成果を要約すれば、以下のようになる。

(1)飛翔体の高速衝突に対して、補強鋼板を取り付けることによりRC板裏面のコンクリートの飛散(裏面剥離)を防止するだけでなく、貫通に対しても効果があることが認められた。

(2)局部損傷の大きさを減少させるために必要なコンクリート厚は、補強鋼板を取り付けることにより減少させることができる。また、補強鋼板の厚さを増すことにより、同一の損傷が生じるときのコンクリートの厚さは鋼板の厚さと比例的に減少する。

(3)本実験に用いた鋼板の厚さの範囲では、貫通限界および裏面剥離限界となる等価なコンクリート厚は、鋼板の厚さのそれぞれ2.1倍および1.5倍に相当する。

本実験の結果は、ある特定の衝突条件(飛翔体諸元:重量約430gf、衝突速度約170m/sec)と限られた試験体数に対して得られた結果である。鋼板補強によるRC板の耐衝撃性および等価コンクリート厚については、鋼板の固定方法、スタッドの間隔や大きさ・長さ等の影響が考えられ、検討すべき問題点が残されている。今後さらに多くの実験を行い、データの信頼性を向上させる必要があると考えている。

最後に、本実験を行うにあたり、首藤誠志君、山田俊二君(研究当時、防衛大学校理工学研究科学生)および現理工学研究科学生 北川 真君および岡本貢一君の援助を得たことを付記し謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) BAM: Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members; Tests on Reinforced Concrete Slabs Part I, Research Report 119, 1985.
- 2) BAM: Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load; Tests on Reinforced Concrete Slabs Part II, Research Report 131, 1986.
- 3) Barr, P. et.al: Experimental Studies of the Impact Resistance of Steel Faced Concrete Composites, Trans. of Int. Conf. of SMIRT, Vol.7, No.J, pp.395-402, 1983.
- 4) Barr, P.: UKAEA; Guidelines for the Design and Assessment of Concrete Structures Subjected to Impact-1987 Edition, 1987.
- 5) Walter, T.A. et.al: Turbine Missile Perforation of Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, Vol.110, No.10, pp.2439-2455, 1984.
- 6) 小島 功: 衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート板の局所挙動に関する実験的研究、FAPIG、第124号、pp.24-34、1990.
- 7) 岸、中野他: 三層緩衝構造の緩衝効果に関する室内実験、構造工学論文集、Vol.38A、pp.1577-1586、1992.
- 8) 大野、山田、上田他: 緩衝材を有する2層RCはりの耐衝撃性および多質点系モデルによる衝撃応答解析、構造工学論文集、Vol.38A、pp.1565-1575、1992.
- 9) 千葉他: 飛来物体に対する鋼板の耐衝撃性(第1報、鋼板の破損限界の板厚依存性)、日本機械学会論文集(A編)、47巻422号、pp.1101-1109、昭和56.
- 10) 大手他: 飛来物体に対する鋼板の耐衝撃性(第2報、鋼板の破損限界エネルギー評価式)、日本機械学会論文集(A編)、47巻424号、pp.1373-1379、昭和56.

(1992年9月21日受付)