

接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷

Damage of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Contact Detonations

森下政浩*, 田中秀明**, 伊藤 孝***, 山口 弘****

Masahiro Morishita, Hideaki Tanaka, Takashi Ito and Hiroshi Yamaguchi

*工博 防衛庁技術研究本部第4研究所 築城研究室員 (〒229-0006 神奈川県相模原市淵野辺 2-9-54)

** 防衛庁技術研究本部第4研究所 築城研究室長 (〒229-0006 神奈川県相模原市淵野辺 2-9-54)

*** 防衛庁技術研究本部第4研究所 築城研究室員 (〒229-0006 神奈川県相模原市淵野辺 2-9-54)

****工博 防衛庁技術研究本部企画部管理課 第3班長 (〒154-8511 東京都世田谷区池尻 1-2-24)

In this study, the damage of reinforced concrete slabs subjected to contact detonations has been studied. Three different amounts of high explosive Pentolite were detonated at the center of the upper surfaces of two kinds of reinforced concrete slabs, having different concrete strengths and simply supported at the both edges. The test results were analyzed with others' previous data for crater, spall and breach. The main results obtained are as follows: 1) The crater on the detonation surface is created with the concrete broken to pieces, while the spall on the back surface occurs with large scabbed fragments. 2) Some cracks and fragile parts may be created along the spall contour inside the slabs. 3) Effects of concrete strengths on the sizes of crater and spall are slight. 4) Normalized diameter-depth relationships for the crater and spall may be represented by two lines, related to the occurrence of breach. 5) Normalized crater and spall depths correlate with the modified-scaled concrete thickness.

Key Words: contact detonation, damage, crater, spall

1. 緒言

社会的に重要性の高い公共施設の中には、設計時に不慮の爆発事故や爆破テロを考慮すべきものもある。構造物の局所損傷を考えた場合、爆発位置は大きく3つに分類される。すなわち、構造物の極至近距離で爆発する場合、構造物表面で爆発（接触爆発）する場合及び部材内部で爆発する場合である。これらの中で接触爆発は、構造物の損傷評価を行う上で他の場合の基準として用いられるため、特に重要である。

接触爆発を受けるコンクリート版または鉄筋コンクリート版の損傷評価に関連して、これまでに種々の報告^{1) - 13)}がなされている。米陸軍テクニカル・マニュアル TM5-855-1¹⁾には、マスコンクリートに生ずるクレータ寸法、並びに、鉄筋コンクリート版に生ずる貫通孔直径の概略を予測するためのモノグラフが示されている。ただし、このマニュアルでは、鉄筋コンクリート版のクレータ寸法及びスポール寸法を評価することはできない。竹田ら^{2) - 4)}は、主にクレータ深さ及びスポール深さに着目して実験結果の整理を行うとともに、換算コンクリート厚さによりコンクリート版及び鉄筋コンクリート版の貫通限界を表わせることを示した。L. Lonnqvist⁵⁾は、薄い鉄筋コンクリート版を主に用いて爆破実験を行い、次元解析に基づき貫通孔直径の予測のためのパラメータ（以

下、Lonnqvist のパラメータと呼ぶ）を提案した。しかしながら、種々の爆破条件に対する換算コンクリート厚さ及び Lonnqvist のパラメータの一般的有效性は明らかでない。

また、数値シミュレーションによる接触爆発の損傷評価については、筆者ら⁶⁾、J. Eibl ら^{7), 8)}及び D. Kraus ら^{9) - 12)}の研究がある。これらの数値シミュレーションでは衝撃解析コード DYNA2D または AUTODYN-2D が用いられ、破壊の特徴を定性的に良く表現できるものの、現時点で損傷寸法の厳密な予測を行うのは難しい。今後、信頼性の高い数値シミュレーション手法を確立するためには、シミュレーション結果と実験結果との比較を行い、シミュレーション結果の精度の検証を行うとともにモデル化の妥当性を重ねて検討する必要がある。そのためには、損傷状況の詳細な情報が不可欠であるが、基礎的な爆破パラメータであるコンクリート強度及び爆薬量を変化させて、損傷状況を詳細に報告した例は非常に少ない。

そこで本研究では、鉄筋コンクリート構造物の耐爆性評価及び耐爆設計の精度向上に資するため、接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷を実験的に検討した。実験は、コンクリート強度 17.9MPa 及び 47.5MPa の2種の鉄筋コンクリート版を用い、それぞれに対して 25g 及び 51g、51g 及び 102g の高性能爆薬ペントライトを板

表面中央で爆破させて行った。爆破後、試験体に生じたクレータ、スポール、表面及び内部の亀裂発生状況、鉄筋のひずみなどに着目して損傷を詳細に検討した。また、シュミット・ハンマーを用いて表面損傷の評価を試みた。さらに、クレータ寸法、スポール寸法及び貫通孔直径に関しては、より一般的な知見を得るため、本実験結果を他者の既往の実験結果と合わせて検討を行った。特に、板厚方向の損傷程度の指標となるクレータ深さ及びスポール深さを、換算コンクリート厚さ及び Lonnqvist のパラメータを用いて整理し、それらの有効性を検討した。

2. 損傷評価パラメータ

この節では、本研究でクレータ深さ、スポール深さ及び貫通孔直径の整理に用いた、評価パラメータの概要について述べる。

構造物の耐爆性を評価する際、構造部材への貫通孔発生の有無が1つの大きな指標となる。竹田ら^{4), 14)}は、接触爆発を受けるコンクリート版及び鉄筋コンクリート版の貫通限界が次式で表せることを実験的に示した。

$$\frac{T}{W^{1/3}} = 2.78 \quad (1)$$

ここで、 T は板厚 (cm)、 W は爆薬量 (g) であり、 $T/W^{1/3}$ は換算コンクリート厚さと呼ばれる。換算コンクリート厚さは、爆風圧及び爆土圧の評価に有効とされる換算距離 (Sachs のパラメータ)^{15), 16)}をコンクリート版に応用したものと考えることができる。換算コンクリート厚さにより貫通限界を表わせることから、他の損傷寸法の指標としてもこれが有効である可能性がある。本研究では、クレータ深さ及びスポール深さと換算コンクリート厚さとの相関性を検討した。なお、換算コンクリート厚さは、爆薬の種類及びコンクリート強度の影響を考慮していない。本研究では、トリニトロトルエン (TNT) を基準として爆薬の種類の影響を補正するため、修正換算コンクリート厚さ α を次のように定義した。

$$\alpha = \frac{T}{W^{1/3}} \cdot \left(\frac{K_{TNT}}{K} \right)^{1/3} \quad (2)$$

ここで、 K は Chapman-Jouguet 爆轟エネルギー (MJ/kg)、 K_{TNT} は TNT の Chapman-Jouguet 爆轟エネルギー (MJ/kg) である。

また、Lonnqvist⁵⁾は鉄筋コンクリート厚さ及び爆薬量その他、爆薬の種類及びコンクリート強度を考慮できる損傷評価パラメータを提案している。このパラメータは、影響因子と考えられる物理量を組み合わせ次元解析により導いた無次元量であり、無次元化した貫通孔直径と次式で示す相関がある。

$$\frac{H}{T} = 0.919 \ln \left(\frac{WK\rho_c}{T^3 F_c \rho_c} \right) - 1.11 \quad (3)$$

ここで、 H (m) は貫通孔直径、 T は鉄筋コンクリート厚さ (m)、 F_c はコンクリート強度 (Pa)、 ρ_c はコンクリート密度 (kg/m³)、 W は爆薬重量 (kg)、 K は爆轟エネ

ルギー (J/kg)、 ρ_c は爆薬密度 (kg/m³) である。本研究では、換算コンクリート厚さの場合と同様、クレータ深さ及びスポール深さとこの Lonnqvist のパラメータとの相関性を検討した。

3. 爆破試験方法

3.1 鉄筋コンクリート試験体及び爆薬

爆破試験体には、図-1に示すような60cm×60cm×10cmの鉄筋コンクリート版を用い、コンクリート強度により2種類準備した。コンクリートの材料は、普通ポルトランドセメント (住友大阪セメント)、砕砂 (京都府亀岡市産) 及び碎石 (京都府亀岡市産、最大骨材寸法 10mm) であり、混和剤には標準型減水剤を用いた。コンクリートは表-1に示す配合により A、B の2種類とした。それぞれのコンクリートの 28 日圧縮強度は 17.9MPa 及び 47.5MPa である。鉄筋コンクリート試験体は、コンクリート A を用いたものを試験体 A とし、同様にコンクリート B を用いたものを試験体 B とした。上下主筋の鉄筋比

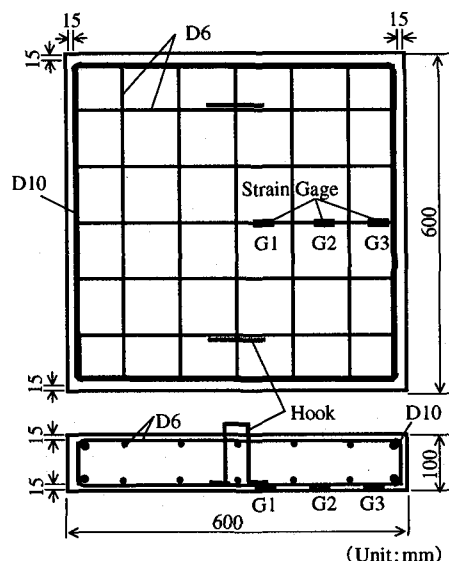


図-1 鉄筋コンクリート試験体

表-1 コンクリートの配合

Type	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit Mass (kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad*
A	8.0	3.5	56.7	50.0	165	291	924	949	2.91
B	8.0	3.5	35.3	45.7	165	467	778	949	4.67

* Water reducing agent

表-2 鉄筋の機械的性質

Nominal Diameter (mm)	Young's Modulus (GPa)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
6	177	333	500	16
10	186	394	538	18

表-3 爆破条件および試験体損傷

Test No.	Concrete	Charge	Crater		Spall		Perforation	Reinforcement		
	Strength	Weight	Diameter	Depth	Diameter	Depth	Diameter	Residual Strain		
	Fc (MPa)	W (g)	C (cm)	Cd (cm)	S (cm)	Sd (cm)	H (cm)	G1 (μ)	G2 (μ)	G3 (μ)
A1	17.9	25	13.2	2.6	2.3	0.6	-	400	-160	160
A5	17.9	25	12.4	2.4	1.6	0.4	-	560	-352	240
A2	17.9	51	16.3	3.6	23.5	4.0	-	992	-704	96
A6	17.9	51	15.1	4.1	20.6	3.3	-	7680	-1120	-32
B3	47.5	51	15.5	3.2	26.5	2.9	-	1472	-464	400
B7	47.5	51	16.0	3.0	25.5	3.7	-	-	-	-
B4	47.5	102	18.7	4.1	30.0	5.9	2.5	32720	3968	320
B8	47.5	102	20.7	4.5	29.8	5.5	1.3	17152	2416	816



Revealed Gage by Spalling

は 0.5% であり、図-1 に示すように配筋した。主筋には D10 を、縦筋及び横筋には D6 を用いた。それぞれの鉄筋の機械的性質を表-2 に示す。中央の下部横鉄筋の下側には、図-1 に示す位置にゲージ長 5mm のひずみゲージ G1-3 を防水を施して貼付した。試験体はコンクリート材令が 28-30 日の時点で実験に供した。なお、試験体表面には、損傷状況の観察が容易なように 5cm 間隔のグリッドが描かれており、上面に運搬用のフックが取り付けられている。

爆薬には、ペンスリット 50% と TNT50% から成る、代表的な高性能爆薬であるペントライトを用いた。爆薬は直径と高さが等しい円柱形で、薬量 25g (直径 $\phi=27\text{mm}$)、51g ($\phi=34\text{mm}$) 及び 102g ($\phi=43\text{mm}$) の 3 種類を用いた。

3.2 爆破方法

爆破試験は、内径 8m の鉄筋コンクリート造爆破試験ドームの中で行った。爆破は、表-3 に示すように、試験体 A については爆薬量 25g 及び 51g で、試験体 B については爆薬量 51g 及び 102g で各条件 2 回ずつ行った。試験体は、図-2 に示すように角材で作製した 2 本の台座の上に設置し、支持点間距離 510mm の両端単純支持とした。台座は、ドーム内の平坦な砂地盤に敷かれた厚さ 10mm のベニヤ板上に置き、試験体裏面から生ずる破片の跳ね返りを避けるのに十分な高さ 145mm とした。爆薬位置は試験体の上部中央とし、6 号電気雷管により発破器を用いて爆破させた。

3.3 計測方法

爆発時に試験体下部の鉄筋に加わるひずみは、ひずみゲージにより測定され、ブリッジボックス及びシグナルコンディショナ (KYOWA CDV-700A) を介して、P C 制御のデータ収集システム (Nicolet MultiPro) に記録される。データのサンプリング時間は 100kHz とし、フィルターは特に用いなかった。また、計測トリガーには発破信号を用い、変圧器を介してデータ収集システムに直接入力した。

爆破終了後、試験体の損傷状況を観察し、損傷寸法の測定を行った。寸法測定は、まず試験体損傷部をエアブラシで吹き、手で容易に取り除ける破片を除いた後、実施した。測定項目は、図-3 に示すようにクレータ及びスポールの直径と深さの他、貫通孔が生ずる場合の直径である。クレータ及びスポールの直径は、損傷が非対称となる可能性を考慮して、図中に示す直線 1-4 に沿って 4 回行った。クレータ及びスポールの深さについては、最も深い位置で測定した。

また、爆発による熱の影響及び微小亀裂発生の影響を評価するため、普通コンクリート用シュミット・ハンマーを用いて試験体表裏両面のグリッド交点位置の反発係数を 10cm 間隔で試験前後に計測し、同一位置での値の変化を調べた。そして最後に、損傷の生じた試験体をコン

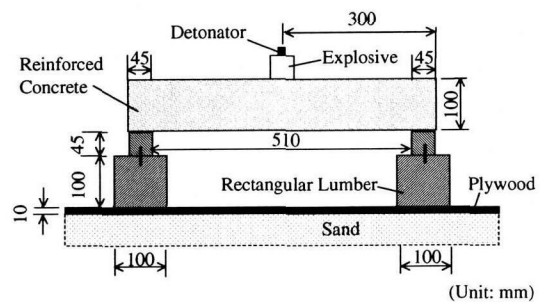


図-2 試験体の設置

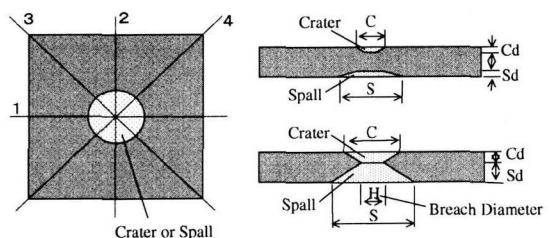
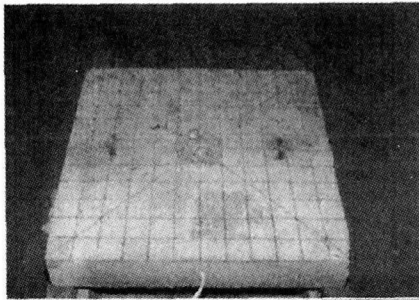
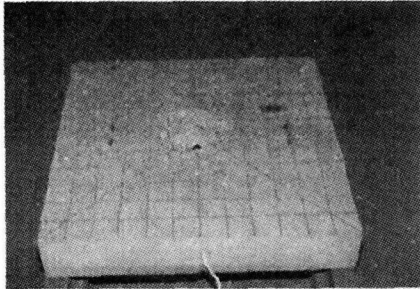


図-3 損傷寸法の測定



(a) 試験体A, 爆薬量 25g



(b) 試験体B, 爆薬量 102g

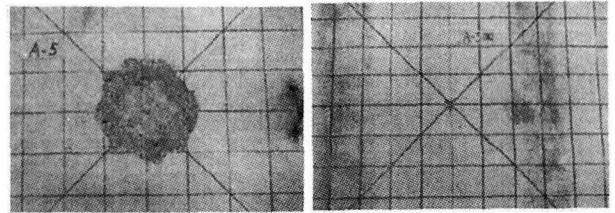
図-4 爆破直後の状況

クリート・カッターにより図-3の直線1に沿って切断し、試験体内部の損傷状況の観察を行った。

4. 爆破試験結果

4.1 試験体表面及び破片の状況

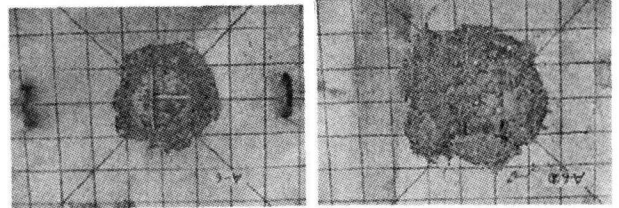
爆発直後の試験体の破損状況例を図-4に示す。試験体A（コンクリート強度 17.9MPa）の爆薬量 25g の場合（図-4(a)）に着目すると、爆発点近傍ではコンクリートが粉々に碎け、クレータが生じている。クレータ内部には破片の一部が堆積しており、見かけ上、クレータを浅くしている。図-5(a)に示すように破片を取り除くとクレータはほぼ楕形で、中央部のコンクリートが若干白色化している。この白色化は、熱によるコンクリートの脱水に起因するものと考えられる³⁾。試験体裏面では爆発点直下にスポールが極小さく生じており、本試験条件がほぼスポール限界となることがわかる。爆発面及び裏面とも、モルタルやコンクリートの接触爆破の場合³⁾に観察されるような、放射状及び同心円状の大きな割れは認められない。次に、爆薬量を 51g に増加させた場合の試験体Aの損傷例を図-5(b)に示す。試験直後の爆発面の状況は薬量 25g の場合と著しい差はなく、クレータ部は粉々に破碎し中央部が若干白色化していた。試験体を台座から取り除いた後、ベニヤ板上の破片を観察すると、図-6(a)に示すように表面付近が比較的薄くスポールしていた。破片は脆く、細かな破片の中には大きな破片がベニヤ板に衝突した際に生じたものも含まれると考えられる。破片を取り除いたクレータ及びスポールはいずれ



クレータ部

スポール部

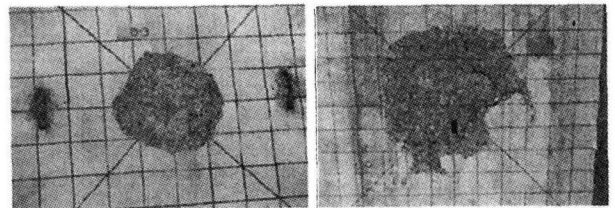
(a) 試験体A, 爆薬量 25g



クレータ部

スポール部

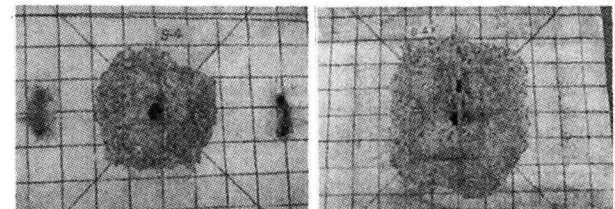
(b) 試験体A, 爆薬量 51g



クレータ部

スポール部

(c) 試験体B, 爆薬量 51g

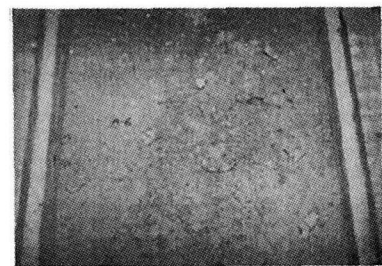


クレータ部

スポール部

(d) 試験体B, 爆薬量 102g

図-5 試験体の損傷状況



(a) 試験体A



(b) 試験体B

図-6 スポールにより生じた破片 (爆薬量 51g)

もほぼ椀形で、底部には緩やかに湾曲した鉄筋が露出している。クレータとスポールの深さは同程度だが、直径はスポールのほうが若干大きい。スポール破壊面及びその周辺には比較的大きな亀裂が認められるが、これは後述するようにスポールが多重に生じたためと考えられる。

次に、試験体B（コンクリート強度47.5MPa）について、爆薬量51gの場合の損傷状況を図-5(c)に示す。爆破試験直後の状況及びクレータ部、スポール部の特徴は、同じ薬量を用いたコンクリート強度の低い試験体Aの場合と大差はない。また、クレータ深さ及びスポール深さは、表-3に示すように試験体Aに比べ若干小さくなる傾向

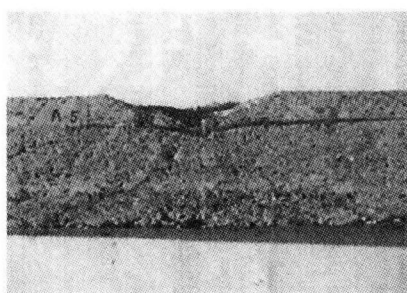
があるものの、コンクリート強度の影響は比較的小さい。しかしながら、スポールにより生じた破片に着目すると、図-6(b)に示すように試験体Aの場合に比べより大きな破片（重さ200-300g程度）が多く観察される。これは、後述するように、コンクリート強度によりスポール破壊機構が若干異なることを示唆している。さらに爆薬量が102gに増えると、図-4(b)及び図-5(d)に示すようにクレータ部とスポール部が連結して小さな貫通孔が生じるが、クレータ部及びスポール部の特徴は薬量が少ない場合とほぼ変わらない。すなわち、クレータ中央部は若干白色化しており、スポール破壊面及びその周辺には比較的大きな亀裂が認められる。また、クレータ部及びスポール部の鉄筋に着目すると、他の条件の場合に比べ大きく湾曲している。

4. 2 試験体内部の破損状況

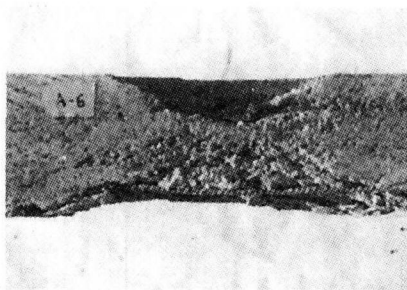
各試験条件における試験体の断面写真を図-7に示す。写真上側が爆発面側である。まず、試験体Aの爆薬量25gの場合に着目すると、図-7(a)に示すように材料内部に明瞭な亀裂は認められないが、スポール部周辺に若干脆弱化した領域が生じていた。この脆弱領域では、目視により粗骨材-モルタル界面及びモルタル部に微小亀裂が認められた。図-7(b)に示す試験体Aの爆薬量51gの場合には、クレータ底からスポール部へ扇形の脆弱領域が認められるとともに、スポール破壊面に沿うように材料内部に複数の亀裂が観察された。次に、コンクリート強度の高い試験体Bについて爆薬量51gの場合を図-7(c)に示す。スポール破壊面に沿うように材料内部に亀裂が観察されるのは、同じ爆薬量を用いた試験体Aの場合と同様だが、脆弱領域はスポール破壊面と内部亀裂の間にほぼ限られていた。このことと前節で述べたスポール破片の状況から、コンクリート強度によりスポール破壊の様相が若干異なることがわかる。つまり、低強度コンクリート試験体ではコンクリート内部が脆弱化すると共に亀裂が発生・伝ぱしスポール破壊に至るが、高強度コンクリート試験体のスポール破壊では亀裂の発生・伝ぱが支配的となる傾向がある。また、貫通孔が生じた試験体Bの場合にも、図-7(d)に示すようにスポール破壊面に沿って内部に亀裂が見られた。このようにスポール破壊面に沿って内部に亀裂が生じることはKrausら¹²⁾も報告しており、スポール破壊面が新たな自由表面となり多重にスポールが生じるためと考えられる¹⁷⁾。

4. 3 シュミット・ハンマーを用いた表面損傷の評価

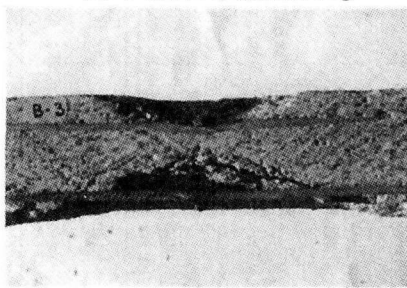
クレータ及びスポールの周辺部では、微小亀裂の発生や高熱の影響により材料特性が変化している可能性がある。ここでは、シュミット・ハンマーを用いて、試験体表面における爆発の影響範囲を評価することを試みた。シュミット・ハンマーの反発度を用いた圧縮強度の推定法は、結果が試験条件の影響を受けやすい¹⁸⁾。そこで本研究では、反発度を基準値としてそのまま用い、同一位置の爆破試験前後の値を比較し±10%以内なら変化なし、



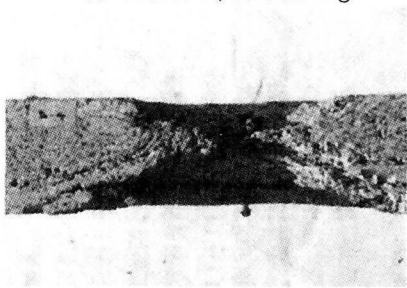
(a) 試験体A, 爆薬量 25g



(b) 試験体A, 爆薬量 51g



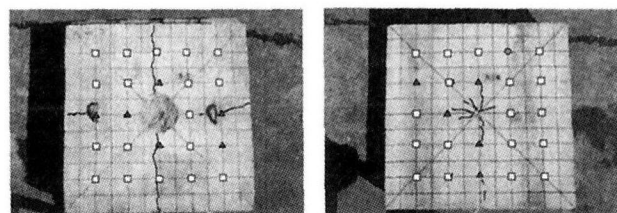
(c) 試験体B, 爆薬量 51g



(d) 試験体B, 爆薬量 102g

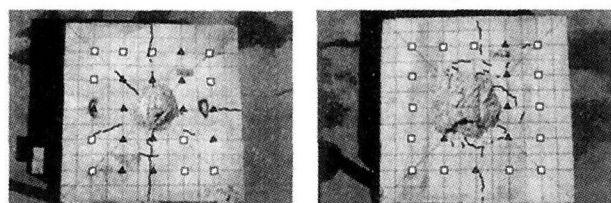
図-7 試験体断面

Change of restitution R: ▲ Down ($R < -10\%$), □ No change ($-10\% \leq R \leq +10\%$), ● Up ($R > +10\%$)



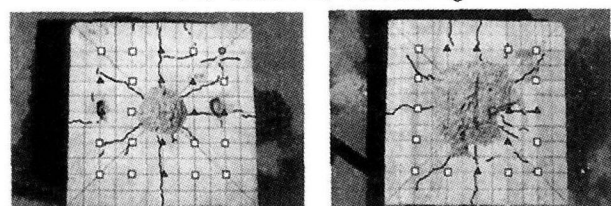
爆発面 裏面

(a) 試験体A, 爆薬量 25g



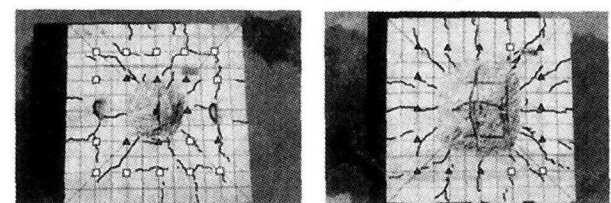
爆発面 裏面

(b) 試験体A, 爆薬量 51g



爆発面 裏面

(c) 試験体B, 爆薬量 51g



爆発面 裏面

(d) 試験体B, 爆薬量 102g

図-8 シュミット・ハンマーにより評価した表面損傷

10%以上減少なら損傷ありとみなした。シュミット・ハンマーによる損傷評価結果を図-8に示す。なお、図中には試験体表面の微細な亀裂が太く強調されている。図-8(a)に示す試験体Aの爆薬量 25g の場合に注目すると、

損傷部はクレータ部、スポール部及び亀裂周辺に分布する傾向がある。図-8(b)~(d)に示すように他の試験条件の場合も同様の傾向であるが例外も多く、シュミット・ハンマーを用いて爆発の影響範囲を定量的に示すことは難しい。なお、シュミット・ハンマーの反発度が10%以上増加した箇所が1部に認められるが、これは計測誤差に起因するものと思われる。

4. 4 鉄筋のひずみ

下部鉄筋の爆発時のひずみ波形の例として、試験体Aの爆薬量 51g の場合を図-9に示す。各測定点でのひずみ波形は類似しており、中心から周辺部へ向かうに従い振幅が減衰する様子がわかる。この傾向は、他の試験条件の場合も同様であった。

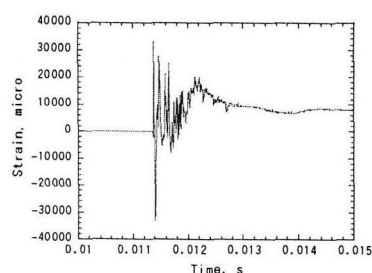
次に、試験後の鉄筋の残留ひずみを表-3に示す。表中のマスキング部は、試験後、スポールによりひずみゲージが露出していたことを示している。露出箇所の残留ひずみはほぼ $1.0 \times 10^3 \mu$ 以上となっている。スポールは生じるが貫通孔発生には至らない試験体については、鉄筋が中央部で局所的に変形するため、その影響によりG2近傍で曲率が反転し圧縮となっていることがわかる。

5. クレータ、スポール及び貫通孔の寸法評価

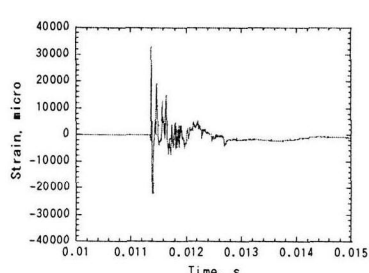
5. 1 評価基準

緒言で述べたように、コンクリート部材及び鉄筋コンクリート部材を用いてこれまでに多くの爆破実験が実施されているが、実験条件が異なるためそれらの結果を単純に比較することはできない。ここでは、接触爆発により生じるクレータ、スポール及び貫通孔の寸法に関して一般的な知見を得る目的で、表-3に示す本実験結果と、これと類似な実験条件の他者の結果^{2), 3), 5), 12), 13)}を合わせて検討する。すなわち、本実験結果を含め検討に用いたデータは、鉄筋コンクリート部材の損傷が種々の要因に影響を受けることを考慮して、試験条件及び結果が以下に示す6条件すべてを満たすものとした。

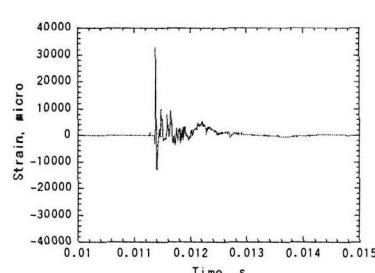
- (1) 試験体は鉄筋コンクリート正方形版であり、板厚に対する横幅の比が3以上であるもの。また、コンクリート強度が示されているもの。
- (2) 試験体の支持条件が両端単純支持またはこれに準



(a) G1 (中心から 50mm)



(b) G2 (中心から 150mm)



(c) G3 (中心から 250mm)

図-9 試験体A, 爆薬量 51g での鉄筋のひずみ波形

表-4 鉄筋コンクリート版の接触爆破に関する従来研究

Reference (Year)	Concrete Strength Fc (MPa)	Specimen Thickness T (m)	Explosive (Shape)	Explosive Weight W (kg)
Present data	17.9, 47.5	0.10	Pentolite (Cylinder)	0.025, 0.051, 0.102
L. Lonnqvist (1993)	38.0 - 50.0	0.04 - 0.08, 0.32	NSP71 (Hemisphere)	0.01 - 1.0, 5.0
FMB Zurich (1979)	36.5 (Ave.)	0.22	TNT (Cylinder)	1.0
D. Krause et al. (1994)	46.0 (Ave.)	0.30	PETN (Cube)	0.5, 1.0
Takeda et al. (1976, 1982)	27.0 (Ave.)	0.45, 0.58	ANFO (Cylinder)	2.0, 5.0, 10.0, 12.0

じるもの。

- (3) 爆薬の種類、重量及び形状が明確であるもの。
- (4) 爆薬は試験体の上部中央に置かれ、爆薬周辺に覆土等がなされていないもの。
- (5) クレータ及びスポールの深さ及び直径、並びに、貫通孔直径が示されているもの。
- (6) クレータ及びスポールの直径が試験体幅の 1/2 以下であるもの。

なお、条件 (1) 及び (6) で示した数値に明確な理論的根拠はないが、試験体寸法が損傷に影響を及ぼすと考えられるため、ここでは一応の基準とした。検討に用いたデータの試験条件を表-4 に示す。表より、コンクリート強度は約 18-50MPa、試験体厚さは 4-58cm、爆薬は 10g-12kg と広範囲に亘っていることがわかる。また、爆薬には、高性能爆薬であるペントライト (Pentolite)、ペンスリット (PETN)、トリニトロトルエン (TNT)、NSP71 (プラスチック爆薬の 1 種) の他、一般に広く用いられている産業火薬であるアンホ (ANFO) も含まれている。表-5 に各爆薬の Chapman - Jouguet 爆轟エネルギーを示す。

表-5 爆薬の爆轟エネルギー

Explosive	Density ρ_0 (kg/m ³)	C-J Explosion Energy K (MJ/kg)
TNT	1630	4.29 ¹⁹⁾
ANFO	820	3.84 ¹⁹⁾
PETN	1500	5.71 ¹⁹⁾
Pentolite	1700	4.76 ¹⁹⁾
NSP71	1770	5.54 ⁵⁾

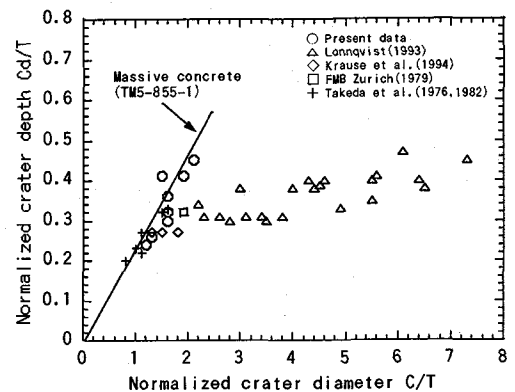


図-10 クレータ深さと直径の関係

5. 2 評価結果

(1) クレータ寸法

試験体の板厚 T で無次元化したクレータの深さ Cd と直径 C の関係を図-10 に示す。図には比較のため、米陸軍テクニカル・マニュアル TM5-855-1¹⁾ による標準的な強度 (14-35MPa) のマスコンクリートに対する予測値も併せて示されている。実験データは、ある比較的狭い範囲内に分布していることがわかる。しかしながら、コンクリート強度や爆薬の種類に対するクレータ形状の依存性は明確でなく、今後さらにデータを蓄積する必要がある。

図-10 を貫通孔発生の有無に着目して再表示した結果を図-11 に示す。データは貫通孔発生の有無により明瞭に 2 つのグループに分かれ、次に示す 2 直線で近似できる。

$$\frac{Cd}{T} = 0.20 \frac{C}{T} \quad (\text{貫通孔の生じない場合}) \quad (4)$$

$$\frac{Cd}{T} = 0.016 \frac{C}{T} + 0.30 \quad (\text{貫通孔の生じる場合, } 1.6 \leq \frac{C}{T}) \quad (5)$$

大部分のデータは近似値の ±25% 以内に納まる。また、

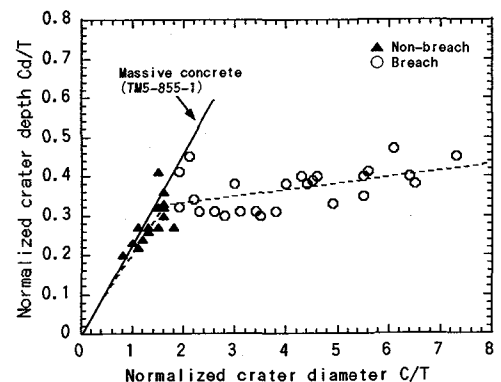


図-11 クレータ寸法と損傷程度の関係

図よりクレータ深さが鉄筋コンクリート厚さの約 1/3 以上となると貫通孔が生じることがわかる。貫通孔の発生していないデータの傾きは、マスコンクリートに対する予測値の傾きとほぼ等しい。これは、貫通孔が生じない範囲では、クレータ生成に鉄筋コンクリート厚さ及び裏面のスポール発生状況がほとんど影響しないことを示している。また、貫通孔の発生したデータの傾きは、発生していないものに比べ著しく小さい。これは、クレータとスポールの連結が生じると、クレータ深さがそれ以上あまり増大しないためである。

(2) スポール寸法

板厚で無次元化したスポールの深さ S_d と直径 S の関係を図-12 に示す。クレータの場合と同様、実験データはある範囲内に分布していることがわかる。

図-12 を貫通孔発生の有無に着目して再表示すると、図-13 に示すようにデータは次に示す 2 直線で近似することができる。

$$\frac{S_d}{T} = 0.15 \frac{S}{T} \quad (\text{貫通孔の生じない場合}) \quad (6)$$

$$\frac{S_d}{T} = -0.017 \frac{S}{T} + 0.71 \quad (\text{貫通孔の生じる場合, } 2.9 \leq \frac{S}{T}) \quad (7)$$

大部分のデータは近似値の±25%以内に納まるものの、貫通孔発生前後のデータのばらつきはクレータの場合に比べて大きく、これら 2 直線は連続的にはならない。これは、前述したように破壊面が複雑になることに加え、研究者間でスポール寸法の測定法が統一されていないためと考えられる。また、貫通孔を生じたデータは、無次元化されたスポール直径の増大とともに緩やかな右下がりとなっており、爆薬量が増え損傷が増大するとともに、スポール深さに対して爆発面側のクレータ深さの割合が漸増することを示している。

(3) クレータ深さ及びスポール深さの評価 (貫通孔発生の有無の判定)

耐爆設計では、構造物板厚方向の損傷程度を評価することが最も重要となる。板厚で無次元化したクレータ深さ及び損傷深さ (クレータ深さ及びスポール深さ) の和を、換算コンクリート厚さで整理した結果を図-14 に示す。無次元化した損傷深さの和が 1.0 となると貫通孔が生じる。この場合も実験データは、コンクリート強度や爆薬の種類によらず比較的狭い範囲内に分布している。これに関連し、薬種の影響については後述するが、高温高圧高ひずみ速度下のコンクリートの強度特性については今後の課題である。クレータ深さ、並びに、スポール発生から貫通孔発生に至る損傷深さの和は、それぞれ次式で表される直線で近似できる。

$$\frac{Cd}{T} = -0.047 \frac{T}{W^{1/3}} + 0.43 \quad (\text{クレータ深さ}) \quad (8)$$

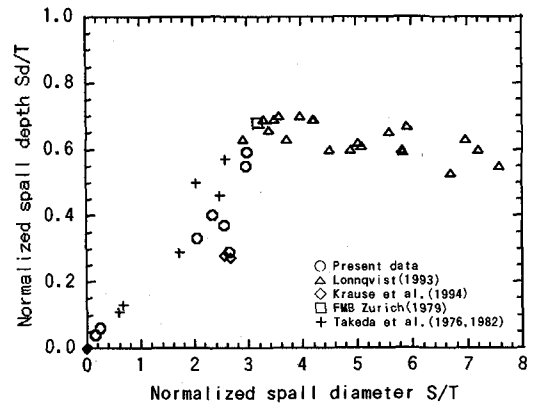


図-12 スポールの深さと直径の関係

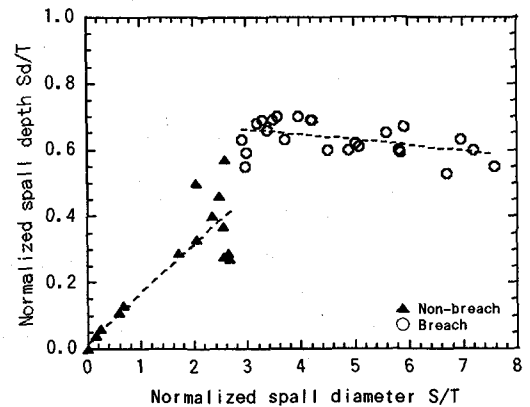


図-13 スポール寸法と損傷程度の関係

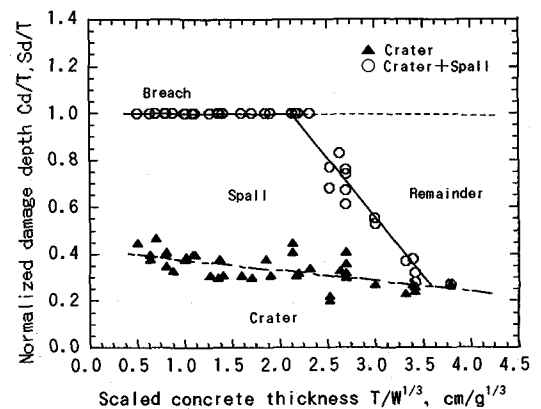


図-14 換算コンクリート厚さで整理したクレータ深さ及びスポール深さと損傷程度の関係

$$\frac{(Cd + Sd)}{T} = -0.51 \frac{T}{W^{1/3}} + 2.1$$

$$(\text{損傷深さの和, } 2.1 \leq \frac{T}{W^{1/3}} \leq 3.6) \quad (9)$$

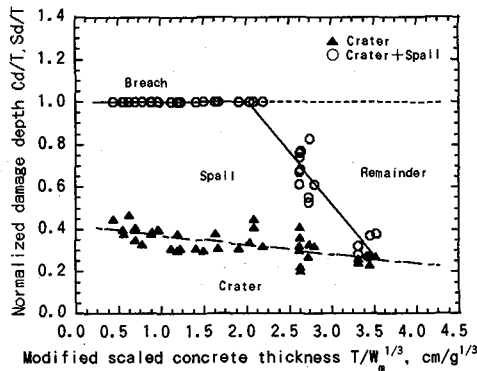


図-15 修正換算コンクリート厚さで整理したクレータ深さ及びスポール深さと損傷程度の関係

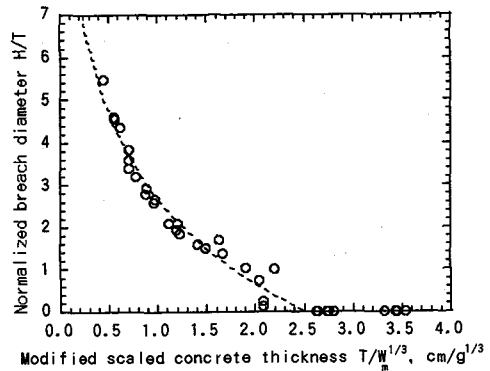


図-17 修正換算コンクリート厚さで整理した貫通孔直径

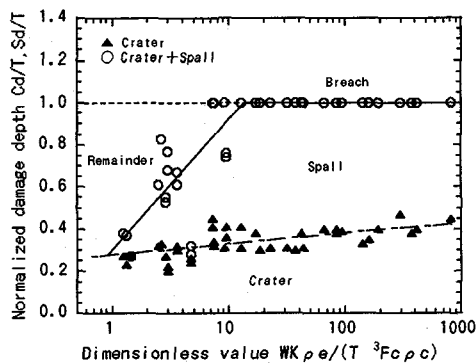


図-16 Lonnqvist のパラメータで整理したクレータ深さ及びスポール深さと損傷程度の関係

図より、換算コンクリート厚さ約 $3.6\text{cm/g}^{1/3}$ でスポールが発生し始め、約 $2.1\text{cm/g}^{1/3}$ でクレータとスポールの連結し貫通孔が生じることがわかる。クレータ深さ及び貫通前のスポール深さのばらつきは、同じ換算コンクリート厚さに対して近似値の $\pm 25\%$ 程度である。また、貫通孔の生ずる場合、板厚の $0.6\sim 0.7$ 程度をスポール部が占めることがわかる。なお、本研究で得られた貫通限界は式(1)に示した値に比べ小さいが、これは主に両者の検討条件の違いに起因しているものと考えられる。

次に、爆薬の種類を考慮した修正換算コンクリート厚さを用いて、板厚で無次元化したクレータ深さ及び損傷深さの和を整理した結果を図-15に示す。クレータ深さ、並びに、スポール発生から貫通孔発生に至る損傷深さの和は、それぞれ次式で表される。

$$\frac{Cd}{T} = -0.046 \frac{T}{W_m^{1/3}} + 0.42 \quad (\text{クレータ深さ}) \quad (10)$$

$$\frac{(Cd + Sd)}{T} = -0.49 \frac{T}{W_m^{1/3}} + 2.0$$

$$(\text{損傷深さの和}, 2.0 \leq \frac{T}{W_m^{1/3}} \leq 3.6) \quad (11)$$

図-15を図-14と比較すると、データの全体的な分布及びばらつきの程度に大きな差異はない。この理由は主に、換算コンクリート厚さが爆薬量の3乗根に逆比例するために補正の影響が小さいためと考えられる。しかしながら、詳細に見ると、TNTとの爆轟エネルギーの差が大きなベンスリット及びNSP71のデータに補正の効果が若干認められるとともに、貫通孔の発生限界値が若干小さくなっていることがわかる。したがって、損傷程度をより精度良く安全側に評価するためには、修正換算コンクリート厚さを用いたほうがよい。なお、式(10)及び式(11)または図-15を用いてクレータ及びスポールの深さを求めれば、式(4)～(7)または図-11及び図-13よりクレータ及びスポールの直径を評価することが可能である。

ここで比較のため、Lonnqvistのパラメータを用いて、クレータ深さ及び損傷深さの和を整理した結果を図-16に示す。図より、修正換算コンクリート厚さで整理した場合と同様、データはコンクリート及び爆薬の諸因子によらずある一定の範囲内に分布していると言える。しかしながら、貫通孔発生前の損傷深さの和(スポール深さ)に関してはデータのばらつきが大きいので、板厚方向の損傷程度を評価するという観点では、Lonnqvistのパラメータは修正換算コンクリート厚さに劣る。

(4) 貫通孔直径の評価

板厚で無次元化した貫通孔直径を修正換算コンクリート厚さで整理した結果を図-17に示す。実験データは修正換算コンクリート厚さと相関が良く、次式で表すことができる。

$$\frac{H}{T} = -6.7 \log \left(\frac{T}{W_m^{1/3}} \right) + 2.7 \quad \left(\frac{T}{W_m^{1/3}} \leq 2.5 \right) \quad (12)$$

ここで注目すべきは、貫通孔発生の限界値が約 $2.5\text{cm/g}^{1/3}$ となっている点である。これは、板厚方向の貫通限界(損傷深さの和)で評価した値より若干大きい。設計への応用を考えた場合、損傷程度を安全側に評価する必要があるため、貫通限界には板厚方向で評価した値を用いるのが

適当と言える。

6. 結 言

本研究では、接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷を実験的に検討した。実験にはコンクリート強度の異なる2種の鉄筋コンクリート版を用い、それぞれについて2種の高性能爆薬ペントライトを板表面で爆破させた。爆破後、クレータ部、スポール部、表面及び内部の損傷状況等に注目して検討を行った。さらに、クレータ、スポール及び貫通孔の寸法評価に関してより一般的な知見を得る目的で、本実験結果と既往の実験結果とを合わせて検討を行った。得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) クレータはコンクリートが粉々に破壊して生じるが、スポールは表面付近が比較的薄く剥離して生じる。
- (2) 試験体の断面観察を行うと、クレータ部周辺には明瞭な損傷は見られないが、スポール部周辺には破壊面に沿うように内部に複数の亀裂が認められるとともに、脆弱部が生じていた。
- (3) シュミット・ハンマーを用いて評価した表面の損傷部は、クレータ、スポール及び亀裂の周辺に分布する傾向があるものの、影響範囲を定量的に示すことは難しい。
- (4) スポール限界に近い条件から貫通孔の生じる条件までいずれの場合も、下部鉄筋の各測定点における爆発時のひずみ波形は類似となり、中心から周辺部へ向かうに従い振幅が減衰する傾向がある。
- (5) クレータ深さが鉄筋コンクリート厚さの約1/3以上となると貫通孔が生じる。
- (6) 板厚で無次元化したクレータの直径と深さの関係は、貫通孔発生の有無により連続した2直線で近似することができる。
- (7) 板厚で無次元化したスポールの直径と深さの関係は、クレータの場合と同様、貫通孔発生の有無により2直線に近似することができるが、貫通孔発生前後のデータのばらつきが大きいいため連続的とはならない。
- (8) 板厚で無次元化したクレータ深さ及び損傷深さの和は、コンクリート強度や爆薬の種類によらず換算コンクリート厚さにより比較的良好に整理することができる。さらに、修正換算コンクリート厚さを用いると、より精度良く安全側に評価することができる。
- (9) スポール及び貫通孔の発生限界を評価するパラメータとしては、Lonnqvistのパラメータよりも修正換算コンクリート厚さのほうが優れている。

耐爆設計を考えた場合、部材の支持条件、覆土、爆薬のスタンドオフ距離等の影響を考慮することも重要であり、今後検討を進める予定である。

参考文献

- 1) Fundamentals of protective design for

conventional weapons, TM5-855-1, Headquarters, Department of the Army, Cha.5, 1986

- 2) 竹田仁一, 立川博之, 藤本一男, 工藤利昭, 出田孝二: 爆発による鉄筋コンクリート板の変形と破壊, 土木技術研究会報 (防衛施設技術研究会報), Vol.16, pp.67-73, 1976
- 3) 岡崎一正, 竹田仁一, 藤本一男, 山上明, 竹下賢: 表面爆破によるコンクリート版の破壊, 工業火薬協会誌, Vol.43-1, pp.156-167, 1982
- 4) 竹田仁一, 河村隆: 爆発による鉄筋コンクリート構造物の変形・破壊の定量的予測, 工業火薬協会誌, Vol.46-4, pp.179-191, 1985
- 5) L.Lonnqvist: The effects of high explosives in contact with reinforced concrete slabs, 6th international symposium on interaction of nonnuclear munitions with structures, pp.262-266, 1993
- 6) 森下政浩, 山口 弘, 安藤智啓: 接触爆発を受けた鉄筋コンクリート構造物の損傷評価, 第28回安全工学シンポジウム講演予稿集, pp.217-220, 1998
- 7) J.Eible and J.Ockert: Response of concrete structures to shock loading, 7th international symposium on interaction of nonnuclear munitions with structures, pp.31-38, 1995
- 8) J.Eible and J.Ockert: Problems concerning constitutive laws for shockwaves in concrete, Specialty symposium on structures response to impact and blast, pp.174-183, 1996
- 9) D.Kraus, J.Roetzer and K.Thoma: Effect of high explosive detonation on concrete structures, Nuclear engineering and design, Vol.150, pp.304-314, 1994
- 10) D.Kraus and J.Roetzer: A computational model for concrete structures subjected to high pressure and high strain-rates, 7th international symposium on interaction of nonnuclear munitions with structures, pp.381-388, 1995
- 11) D.Kraus, J.Roetzer, M.Ruppert and D.Carl: Material behavior of concrete subjected to high pressure and high strain rates, Specialty symposium on structures response to impact and blast, pp.184-195, 1996
- 12) D.Kraus, J.Roetzer and K.Thoma: The interaction of high explosive detonations with concrete structures, Computational Modeling of Concrete Structures EURO-C, 1994
- 13) FMB Zurich, Forschungsinstitut fur militärische Bautechnik Zurich, FMB 79-13, 1979
- 14) 林卓夫, 田中吉之助編: 衝撃工学, 日刊工業新聞

- 社, p310, 1988
- 1 5) 文献1), Cha.3
 - 1 6) 中原正二: 火薬学概論, 産業図書, pp.243-253, 1983
 - 1 7) J. S. Rinehart and J. Pearson: Behavior of Metals under Impulsive Loads, ASM, pp.123-145, 1954
 - 1 8) 田村博, 富士岳, 笠井哲郎: わかりやすいコンクリート構造物の非破壊検査, オーム社, pp.92-95, 1996
 - 1 9) E. L. Lee et al., Lawrence Livermore Laboratory UCRL-50422, 1968

(1999年9月17日受付)