接触爆発を受けるコンクリート版の局部破壊に及ぼす装薬形状の影響

INFLUENCE OF CHARGE SHAPE ON LOCAL FAILURE OF CONCRETE SLABS SUBJECTED TO CONTACT DETONATION

樋口洸太郎 — * 1 山口 信 — * 2
森島慎太郎 — * 3 渋谷颯志郎 — * 4
藤澤礼至 — * 4

Kotaro HIGUCHI — * 1 Makoto YAMAGUCHI — * 2
Shintaro MORISHIMA — * 3 Soshiro SHIBUYA — * 4
Reiji FUJISAWA — * 4

キーワード：
接触爆発, 装薬形状, コンクリート版, 局部破壊

Keywords:
Contact detonation, Charge shape, Concrete slabs, Local failure

Experimental and analytical investigations were conducted to obtain basic knowledge on the influence of the charge shape on the local failure of concrete slabs subjected to contact detonation. The results showed that the damage depth of the slabs varied depending on the charge shape, and the effective amounts of explosives based on Kennedy's knowledge might be a useful parameter for evaluating the damage depth. However, it was considered necessary to develop another parameter to evaluate the flying velocity of the concrete fragments due to the spall failure.

1. はじめに

衝突・爆発等に起因する衝撃荷重を建築物の設計において考慮の対象とし, より高い安全性を確保することの必要性が生じている¹⁾。

特に, 接触・近接爆発を受ける鉄筋コンクリート (以下, RC と略記) 版の設計においては, 裏面側コンクリートが破片化して飛散する裏面剥離 (スポール) が生じる点に特徴がある。この現象は, 爆発に起因する強い圧力を受けた RC 版内部に圧縮応力波 (圧縮波) が発生して裏面へ向けて伝播し, これが自由境界面である裏面で反射した際に逆位相の引張応力波 (膨張波) へと変化し, その際の引張応力がコンクリートの破壊強度を超過することにより生じる。建築物内部の人命や機器を防護するためには, コンクリート片の飛散による2次被害防止の観点から, スポールの発生を予測し, 未然に防止することが設計上の重要課題と位置付けられる。

RC 版の局部破壊を扱った研究事例は幾つか存在するが, 特にスポールに着目した研究としては McVay の研究²⁾がある。この研究では, 爆薬量, スタンドオフ (RC 版表面から装薬までの距離), コンクリート強度等をパラメータとした実験が行われており, 実験結果に基づき爆薬量, スタンドオフおよび RC 版厚をパラメータとする損傷評価式が提案されている。また, 森下ら³⁾は, 自身らの実験データとともに比較可能な他者の実験データを併せて整理し, 接触爆発を受ける RC 版の局部破壊が爆薬量と RC 版厚のみで評価できることを示している。以上のように, 既往の損傷評価式における装薬側のパラメータとしては爆薬量のみが考慮されているが, 装薬形状の影響については現段階で明確な知見が得られていない。

以上の背景の下, 本研究では, 接触爆発を受けるコンクリート版

の局部破壊に及ぼす装薬形状の影響について基礎的な知見を得ることを目的とした。実験では, コンクリート版厚および爆薬量が一定の条件下で, 装薬形状を4水準で変化させて接触爆発試験を行った。損傷評価の対象は, コンクリート版の損傷深さおよびスポール破壊に伴い生じたコンクリート片 (以下, スポール破壊片と略記) の飛翔速度とし, これらを評価可能な装薬側のパラメータについて検討した。さらに, 同パラメータの妥当性を汎用の衝撃解析コード ANSYS AUTODYN を用いた数値シミュレーションにより検証した。

2. 実験的検討

2.1 実験方法

(1) 試験体

表1に使用材料を, 図1に試験体の形状, 寸法および配筋をそれぞれ示す。圧縮強度 37.8MPa のコンクリートを用いて, 500mm 四方, 厚さ 80mm の平板を作製した。配筋が局部破壊に及ぼす影響は小さいことが知られているが⁴⁾, 本実験では試験体側面から 70mm 内側に割れ防止を目的とした異形鉄筋 SD295A D10 を1本ずつ配した。

表1 使用材料

コンクリート	レディーミクストコンクリート (普通-30-18-20-N) 実測スランプ値: 17.0cm, 実測空気量: 4.0%, 気乾単位体積重量*: 23.2kN/m ³ , 圧縮強度*: 37.8MPa, ヤング係数*: 28.5GPa, 圧縮強度時のひずみ*: 2840μ
補強筋	異形鉄筋 SD295A D10 降伏強さ: 370MPa, 引張強さ: 520MPa, 破断伸び: 35.8%

注) *は, φ100×200mm 円柱供試体3体を材齢28日目まで標準養生後, 86日間の気中養生を経て測定した。

¹⁾ 熊本大学工学部学部生 (グローバルリーダーコース)
(〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)

²⁾ 熊本大学大学院先端科学研究部 助教・博士 (工学)

³⁾ 熊本大学大学院自然科学教育部 博士後期課程・修士 (工学)

⁴⁾ 熊本大学大学院自然科学教育部 博士前期課程

¹⁾ Undergrad. (Global Leader Course), Faculty of Engineering, Kumamoto Univ.

²⁾ Assist. Prof., Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto Univ., Dr. Eng.

³⁾ Doctoral Course, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ., M. Eng.

⁴⁾ Master's Course, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ.

図1 試験体の形状、寸法および配筋

以上の試験体は、材齢 28 日目まで標準養生後、86 日間の気中養生を経て接触爆発試験に供した。

(2) 接触爆発試験方法

接触爆発試験は、断面形状が楕円形（最大内径 8m、最小内径 6m）の爆発実験室において実施した。図 2 (a)に示すように、試験体を内法スパンが 410mm となるように 2 本の木製架台上に設置し、試験体上面中央で 6 号電気雷管を用いて SEP 爆薬（ペンスリット：パラフィン系=65：35）を起爆させた。また、図 2 (b)に示す高速度カメラを用い、起爆後のスポール破壊片の飛翔状況を側面から撮影した。

爆薬量は 50g で一定としたが、装薬の形状は表 2 に示す通り、① No.1：円柱形（直径：高さ=1：1）、② No.2：円柱形（直径：高さ=1：2）、③ No.3：円柱形（直径：高さ=2：1）、④ No.4：凸型（上部円柱の高さ：下部円柱の高さ=1：1）の 4 水準で変化させた。

なお、森下ら³⁾は、接触爆発を受ける RC 版のスポール限界および貫通限界が下式で表せることを明らかにしている。

$$\frac{T}{W_m^{1/3}} = \frac{T}{W^{1/3}} \cdot \left(\frac{K_{TNT}}{K} \right)^{1/3} = \begin{cases} 3.6 \text{cm/g}^{1/3}; \text{スポール限界} \\ 2.0 \text{cm/g}^{1/3}; \text{貫通限界} \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 T ：版厚 [cm]、 W_m ：爆薬の TNT 等価質量 [g]、 W ：実際の爆薬量 [g]、 K ：使用した爆薬の Chapman-Jouguet（以下、C-J と略記）爆轟エネルギー [=3.71MJ/kg]、 K_{TNT} ：トリニトロトルエンの C-J 爆轟エネルギー [=4.29MJ/kg] である。本実験条件である $W=50\text{g}$ であれば、換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ は 2.28cm/g^{1/3} であることから、式(1)によれば RC 版の破壊モードはスポールとなる。

2.2 実験結果および考察

(1) 破壊性状

表 3 に試験体の破壊性状を示す。なお、同表中にはクレータ（爆薬直下に生じる碗形の破壊であり、表面破壊ともいう）およびスポール深さの測定値も併記している。4 試験体全てに共通して、以下の傾向が認められる。

- ① いずれも破壊モードはスポールであり、貫通孔の発生は認められない。なお、局部破壊の規模は、クレータよりもスポールの方が大きくなる傾向にある。
- ② 表面および裏面には、局部破壊箇所を中心とする放射状ひび割れの発生が認められるが、その程度は裏面の方で顕著である。
- ③ 切断面には、スポール破壊面に沿うように複数のひび割れが生じている様相が確認される。

但し、それらの程度には装薬形状に応じて無視できない差異が生じていることが確認される。

(2) スポール破壊片の飛翔速度

図 3 に、高速度カメラによる撮影画像から求めたスポール破壊片（裏面中央）の飛翔履歴を示す。いずれの装薬形状においても、起

図2 接触爆発試験方法

表2 装薬の形状・寸法

	No.1	No.2	No.3	No.4
D : H	1 : 1	1 : 2	2 : 1	— (凸型)
形状寸法				

注) D：直径，H：高さ，◆：起爆点，単位は mm である。

表3 試験体の破壊性状および損傷深さの測定値

	No.1	No.2
左：表面 右：裏面		
切断面		
C_d, S_d	$C_d = 28.6\text{mm}, S_d = 32.0\text{mm}$	$C_d = 21.1\text{mm}, S_d = 32.6\text{mm}$
	No.3	No.4
左：表面 右：裏面		
切断面		
C_d, S_d	$C_d = 32.6\text{mm}, S_d = 40.0\text{mm}$	$C_d = 32.9\text{mm}, S_d = 35.1\text{mm}$

注 1) 支持位置は左右両端である。表面および裏面のひび割れは強調している。
注 2) C_d ：クレータ深さ， S_d ：スポール深さ。

図3 スポール破壊片（裏面中央）の飛翔履歴

図4 有効爆薬量算出の考え方（文献5）を基に作成）

爆から時刻 3ms 前後に至るまで、裏面中央のスポール破壊片は概ね等速直線的に飛翔する性状が認められる。しかし、その速度は、最も高いもの (No.3) で約 43m/s であるのに対し、最も低いもの (No.2) では 15m/s 程度である。すなわち、2 次被害発生に直接的に関係す

るスポール破壊片の飛翔速度は、爆薬量が同一であっても装薬形状に応じて著しく異なることが判る。

(3) 装薬形状を考慮した損傷評価パラメータに関する一考察

以上の結果より、爆薬量が同一であっても装薬形状に応じて局部破壊の規模やスポール破壊片の飛翔速度は異なるため、損傷評価に際してはそのことを適切に考慮する必要があると考えられる。そこで、本項では、それらの差異を考慮するための損傷評価パラメータについて考察を試みる。

金属板の爆発圧着に関する Kennedy の知見⁵⁾によれば、金属板に接触させた装薬の側面近傍は金属板の加速に寄与しないとされている。すなわち、図4に示すように、装薬側面と試料との接触箇所を起点として、装薬側面に対して内側に 30°の角度をなす平面よりも外側にある爆薬は、試料に圧力を作用させることなくガス化するものと考えられる。

本研究でも上記知見に倣い、コンクリート版の局部破壊に寄与すると考えられる爆薬の有効質量（以下、これを有効爆薬量と称する）を求めた。その結果を表4に示す。同一爆薬量であっても装薬形状に応じて有効爆薬量は大きく異なり、本実験で採用した装薬形状であれば、実際の爆薬量の14～53%程度が局部破壊に寄与するとの計算結果となった。

図5に、有効爆薬量の3乗根と損傷深さおよびスポール破壊片（裏面中央）飛翔速度との関係を示す。いずれも有効爆薬量の3乗根の増加に伴い増大する傾向を示しており、その傾向は飛翔速度において顕著である。但し、図中の回帰式の妥当性については、まだ実験データ数が少ないため明確なことが言い難く、今後更なる検討が必要である。

3. 解析的検討

本章では、前章で提示した損傷評価パラメータである有効爆薬量の妥当性を数値解析により検証した。

3.1 解析方法

(1) 解析体系

解析は、有限差分コード ANSYS AUTODYN を用いて実施したが、図6に数値解析モデルを示す通り、計算時間短縮のため2次元軸対称系によりモデル化した。また、本解析では、スポール発生に伴うスポール破壊片のコンクリート版からの分離を判りやすくするため、爆薬およびコンクリートを直径 0.5mm の SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 粒子により模擬することとした。なお、試験体外周に配した鉄筋は、局部破壊に影響しないことが予想されたため無視することとした。境界条件としては、コンクリート版の僅かな反跳を考慮するため、支持位置に鉛直下向きの移動を拘束するモデルを適用した。解析ケースは表5に示す通り、No.1 および 3 の装薬形状 (Case-1A および 3A) と、それらから局部破壊に寄与しないと考えられる部分を除いた形状 (Case-1B および 3B) の計4ケースとした。

(2) 爆薬の材料モデル

爆薬には、式(2)に示す JWL (Jones-Wilkins-Lee) の状態方程式⁶⁾を適用した。但し、構成則は無視して流体的であるものと仮定した。

$$p = A \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega \eta \rho_{ref} e \quad (2)$$

ここに、 p : 圧力、 η : ρ/ρ_{ref} 、 ρ : 密度、 ρ_{ref} : 参照密度、 e : 比内部エ

表4 有効爆薬量の算出結果

形状寸法	No.1	No.2	No.3	No.4
W_e [g]	14.9	7.19	26.5	25.1

注) W_e : 有効爆薬量。

図5 有効爆薬量の3乗根と損傷深さおよびスポール破壊片（裏面中央）飛翔速度との関係

図6 数値解析モデル (Case-1A の例)

表5 解析対象とした装薬形状

形状寸法	Case-1A	Case-1B	Case-3A	Case-3B

注) ◆は起爆点、一点鎖線は対称軸、単位は mm である。

表6 SEP 爆薬の物性値

1) 状態方程式: JWL			
参照密度 ρ_{ref} [g/cm ³]	1.3189	第1項係数 A [GPa]	578.4123
第2項係数 B [GPa]	10.1342	第1項指数係数 R_1 [-]	5.711761
第1項指数係数 R_2 [-]	1.425701	第3項係数 ω [-]	0.279831
爆轟速度 V_{det} [m/s]	6278	内部エネルギー E_0 [GJ/m ³]	5.8409
C-J 圧力 P_{CJ} [GPa]	12.774		
2) 構成則: None (Hydro)			
3) 破壊則: None			
4) 数値的エロージョン則: None			

ネルギ、 A, B, R_1, R_2, ω は爆薬に固有の値である。なお、本爆薬の物性値は、爆薬の爆轟特性解析プログラム KHT を用いて求めた。表6に SEP 爆薬の物性値を示す。

(3) コンクリートの材料モデル

コンクリートの状態方程式として、Porous 状態方程式を用いた。本モデルは、図7にその模式図を示すように、コンクリート内部の空隙が潰れることで塑性圧縮状態が生じ、固体中の圧力上昇が緩和されることを仮定するものである。また、森下ら⁷⁾は、コンクリートの Porous 状態方程式が下式で表せることを示している。

$$p = f_c' (a\mu + b\mu^2 + c\mu^3) \quad (3)$$

ここに、 p ：圧力、 f_c' ：静的圧縮強度、 $\mu (= \rho/\rho_0 - 1)$ ：圧縮度、 ρ ：密度、 ρ_0 ：初期密度、 $a = 3.72 \times 10^2$ 、 $b = -1.47 \times 10^4$ 、 $c = 2.48 \times 10^5$ である。本解析では、塑性圧縮および完全圧縮状態の圧力-密度関係を式(3)により求めた。但し、弾性負荷経路は下式を用いて算出した。

$$p = K\mu \quad (4)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (5)$$

ここに、 K ：体積弾性率、 E ：ヤング係数、 ν ：ポアソン比（0.2と仮定）である。

コンクリートの構成則は Drucker-Prager 則に従うものとした。本モデルは、図8にその模式図を示す通り、降伏応力 Y が圧力 p に依存し、比例することを仮定するものであるが、本解析では降伏応力は最大値 $Y_{\max}$ を超えないものとした。すなわち、

$$Y = \min(Y_{\max}, ap + b) \quad (6)$$

Drucker-Prager モデルの破壊曲面が Mohr-Coulomb 則の偏六角形に内接する条件を適用して式を展開すると、式(6)中の傾き a および縦軸切片 b は、下式で表される。

$$a = \frac{3(n-1)}{n+2}, \quad b = -\frac{3}{n+2} f_c^d \quad (7)$$

ここに、 $n = f_c^d / f_t^d$ 、 f_c^d ：動的圧縮強度、 f_t^d ：動的引張強度である。式(7)における f_c^d および f_t^d は、本問題で支配的なひずみ速度を $1.0 \times 10^4/s$ と仮定し、静的強度に下式⁸⁾で求められる動的強度増加率を乗じて求めた。

$$\gamma_c = 1.021 - 0.05076 \log \dot{\epsilon} + 0.02583 (\log \dot{\epsilon})^2 \quad (8)$$

$$\gamma_t = 0.8267 - 0.02987 \log \dot{\epsilon} + 0.04379 (\log \dot{\epsilon})^2 \quad (9)$$

ここに、 γ_c および γ_t ：それぞれ圧縮および引張の動的強度増加率、 $\dot{\epsilon}$ ：ひずみ速度 [単位： $10^{-6}/s$] である。

コンクリートに対して適用した破壊則は、負の限界静水圧力がスポール強度 p_{spall} を超過することにより破壊が生じる、いわゆるスポール破壊であり、この条件を満足した場合、静水圧成分と偏差応力成分をともに 0 にする。 p_{spall} は、土木学会指針⁹⁾に示される下式により求めた。

$$p_{spall} = -\left(\frac{2}{3}\right) \frac{f_c^d f_t^d}{f_c^d - f_t^d} \quad (10)$$

コンクリートに対して用いた物性値を表7に一括して示す。

3.2 解析結果および考察

表8に、時刻 2.0ms 時点における材料状態および速度分布の解析結果を実験結果と対比させて示す。なお、紙数の都合上、爆薬近傍で上方向に飛翔中のコンクリート片の一部を削除して示している。

Case-1A および 3A の解析結果に着目すると、実験結果と比べてスポール深さがそれぞれ 35 および 20%程度大きく評価されており、これは、本解析においてコンクリートの引張軟化特性を考慮していないためであると推察される。その適切な算入は今後の検討課題と位置付けるが、① いずれも貫通が生じておらず、破壊モードがスポールとなっている点、② クレータよりもスポールの規模が大きくなっている点、③ Case-3A において Case-1A よりも甚大なスポールが生じている点においては、概ね良好に実験結果を再現できているものと思われる。

これらを比較対象として Case-1B および 3B について見ると、ク

注) p_{spall} ：スポール強度、 ρ_p ：Porous 密度、 ρ_s ：参照（固体）密度、 C_p ：Porous 音速、 C_s ：固体音速。

図7 Porous 状態方程式の模式図

図8 Drucker-Prager 構成則の模式図

表7 コンクリートの物性値

1) 状態方程式：Porous			
参照密度 [g/cm ³]	2.65752	Porous 音速 [m/s]	2584.711
固体音速 [m/s]	16055.18	密度#1 [g/cm ³]	2.37
密度#2 [g/cm ³]	2.3937	密度#3 [g/cm ³]	2.4411
密度#4 [g/cm ³]	2.4885	密度#5 [g/cm ³]	2.5359
密度#6 [g/cm ³]	2.5833	密度#7 [g/cm ³]	2.64255
密度#8 [g/cm ³]	2.68995	密度#9 [g/cm ³]	2.7255
密度#10 [g/cm ³]	3	圧力#1 [MPa]	20.645
圧力#2 [MPa]	94.4244	圧力#3 [MPa]	174.8628
圧力#4 [MPa]	485.73	圧力#5 [MPa]	1476.997
圧力#6 [MPa]	3598.636	圧力#7 [MPa]	8525.771
圧力#8 [MPa]	14835.95	圧力#9 [MPa]	21245.49
圧力#10 [MPa]	70646		
2) 構成則：Drucker-Prager			
横弾性率 [GPa]	11.875	圧力#1 [MPa]	-16.58307
圧力#2 [MPa]	54.6693	降伏応力#1 [MPa]	0
降伏応力#2 [MPa]	150		
3) 破壊則：スポール破壊			
スポール強度 [MPa]	-11.055382		
4) 数値的エロージョン則：None			

注) 表中の番号は図7および8中のそれらと対応している。

レータおよびスポールの深さについては Case-1A および 3A とそれぞれ良好な一致を示していることが判る。従って、本研究で提案する有効爆薬量は、クレータおよびスポール深さを評価する上で有用な損傷評価パラメータと成り得るものと思われる。

しかし、スポール破壊片の飛翔速度に着目すると、やや大きな乖離が認められる。ここで、図9にスポール破壊片（裏面中央）の飛翔履歴の解析結果を実験結果と対比させて示す。Case-3A については実験結果と良好な一致を示しており、Case-1A では 0.7ms 前後以降で実験結果よりやや飛翔速度が大きくなっているものの、比較的实验結果に近い飛翔履歴を示していることが判る。これに対し、Case-1B および 3B では、いずれも実験結果に比して飛翔速度が低くなる傾向にある。なお、Case-3A において Case-1A よりも実験結果との良好な一致が得られた理由については現段階で明確なことが言い難く、今後更なる検討が必要である。

現段階で、スポール破壊片の飛翔速度を扱った研究事例はほとんどなく、従って、その評価方法も未構築の状態にある。しかし、接触爆発を受ける RC 版の設計上の要件が 2 次被害の防止にあるなら

表 8 時刻 2.0ms 時点における材料状態および速度分布の解析結果

	No.1	No.3
実験結果
解析結果 (材料状態)	<p>< Case-1A > < Case-1B ></p> <p>流体 弾性 塑性 破壊</p>	<p>< Case-3A > < Case-3B ></p> <p>流体 弾性 塑性 破壊</p>
解析結果 (速度分布)	<p>< Case-1A > < Case-1B ></p> <p>0 10 20 30 40 50[m/s]</p>	<p>< Case-3A > < Case-3B ></p> <p>0 10 20 30 40 50[m/s]</p>

ば、スポール破壊片の飛翔速度評価法を構築することは重要な課題であると考えられる。そのための評価パラメータの検討も含めて、本件は今後の検討課題と位置付けたい。

4. まとめ

本研究では、接触爆発を受けるコンクリート版の局部破壊に及ぼす装薬形状の影響について基礎的知見を得ることを目的とした。実験では、爆薬量およびコンクリート版厚が一定の条件下で、装薬形状を4水準で変化させてコンクリート版の接触爆発試験を行い、装薬形状の違いを考慮可能な損傷評価パラメータについて検討した。また、同パラメータの妥当性を数値解析により検証した。本研究の範囲内で得られた知見を要約すると、以下のようになる。

- (1) 爆薬量が同一であっても装薬形状に応じて損傷深さやスポール破壊片の飛翔速度は異なり、特に飛翔速度は装薬形状の影響により著しく変化することが明らかとなった。
- (2) Kennedy の知見に基づく有効爆薬量は、接触爆発を受けるコンクリート版の損傷深さを評価する上で有用な損傷評価パラメータに成り得ると考えられた。
- (3) 有効爆薬量を用いてスポール破壊片の飛翔速度をも評価するのは難しく、新たな評価パラメータの構築が必要であると考えられた。

今後は、実験データを追加し、装薬形状が異なる場合のコンクリート版の損傷評価法およびスポール破壊片の飛翔速度評価法の構築に繋げていく必要がある。

謝辞

本研究は、熊本大学パルスパワー科学研究所（現、産業ナノマテリアル研究所）よりご支援を受け、接触爆発試験は同研究所の爆発実験室にて実施されました。実験にあたり、外本和幸教授、田中茂

図 9 スポール破壊片（裏面中央）の飛翔履歴の解析結果と実験結果との比較

助教、草野健技術補佐員、戸田善統技術専門職員、濱崎ありさ技術職員ならびに熊本大学の当時の学生である才田大矩氏、峯崎寛隆氏より多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物の耐衝撃設計の考え方，丸善，2015
- 2) McVay, M. K.: Spall Damage of Concrete Structures, Technical Report SL88-22, U. S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, 1988
- 3) 森下政浩，田中秀明，伊藤 孝，山口 弘：接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷，構造工学論文集，Vol. 46A, pp. 1787-1797, 2000
- 4) 森下政浩，田中秀明，安藤智啓，萩谷浩之：接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼすコンクリート強度及び鉄筋間隔の影響，コンクリート工学論文集，Vol. 15, No. 2, pp. 89-98, 2004
- 5) Kennedy, J. E.: Behavior and Utilization of Explosives in Engineering Design, 12th Annual Symposium, ASME, UNM, Albuquerque, NM, 1972
- 6) Dobratz, B. M.: LLNL Explosives Handbook: Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants, UCRL-52997, Lawrence Livermore National Laboratory, 1981
- 7) 森下政浩，阿曾沼剛：衝撃 3 軸負荷及び衝撃静水圧負荷を受けるコンクリートの変形・破壊挙動，コンクリート工学論文集，Vol. 16, No. 2, pp. 13-22, 2005

- 8) Yamaguchi, H. and Fujimoto, K.: Strain Rate Effect on Dynamic Response of Reinforced Concrete Slabs under Impact Loading, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 406, pp. 25-35, 1989 (in Japanese)

山口 弘, 藤本一男: 鉄筋コンクリート版の衝撃応答に及ぼすひずみ速度

効果, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 406, pp. 25-35, 1989

- 9) 土木学会: 防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計—基準体系の指針—, 構造工学シリーズ 22, 丸善, 2013

[2020 年 5 月 31 日原稿受理 2020 年 7 月 28 日採用決定]