

(26) 爆発荷重を受けるコンクリート板の破壊と覆土の緩衝効果に関する

数値シミュレーション

A NUMERICAL SIMULATION OF THE LOCAL DAMAGE OF CONCRETE PLATE DUE TO EXPLOSIVE AND MITIGATION EFFECT OF SOIL

大久保一徳*, 別府万寿博**, 片山雅英***, 大野友則****

Kazunori Ohkubo, Masuhiro Beppu, Masahide Katayama and Tomonori Ohno

* 防衛大学校理工学研究科前期課程学生 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

** 博 (工) 防衛大学校講師 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

***博 (工) CRC ソリューションズ技術スペシャリスト 科学システム事業部 (〒136-8581 東京都江東区南砂 2-7-5)

****工博 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード: ペントライト爆薬, 爆発, 乾燥砂, コンクリート板
(Pentolite explosive, explosive, sand, concrete plate)

1. はじめに

社会的に重要な施設や火薬類および危険物等の貯蔵施設を建設する際は、テロや事故による爆発荷重を考慮する必要がある。この場合、爆発荷重に対する地上構造物の耐爆設計では、壁などの鉄筋コンクリート部材をかなり厚くする必要がある。これに対して、土を利用した覆土構造であれば、より安全で経済的な設計が実現する可能性がある。しかしながら、このような研究は、日本国内においては実験施設の制約や安全上の問題から限られた研究機関や一部の大学で行われているにすぎない。国内における最近の研究としては、森下ら¹⁾²⁾が鉄筋コンクリート版を対象とした接触及び近接爆発実験を行っている。この研究の中で、森下らは、ペントライト (TNT とペンスリットの混合物) 爆薬を用い、覆土の有無がコンクリート版の局部破壊に与える影響を検討し、覆土による緩衝効果を確認している。

一方、近年のコンピュータの高性能化および爆発専用の解析ソフトの開発により、爆発荷重を受けるコンクリート構造物の破壊挙動が数値シミュレーションによって予測可能になっている。片山ら³⁾は、実規模のコンクリートアーチ構造内部で TNT 爆薬が爆発した場合について AUTODYN を用いた数値解析を行い、RC 構造物の破壊挙動がシミュレーションによって予測できることを示している。

本研究は、爆発荷重を受けるコンクリートの局部破壊を数値シミュレーションで再現できる解析モデルの検討を行うとともに、森下らが行った覆土による緩衝効果について数値シミュレーションを行ったものである。

2. 覆土の効果に関するコンクリート板の爆発実験

森下らが行った実験¹⁾の概要と結果を紹介する。実験は、ペントライト爆薬による爆発荷重を乾燥砂覆土を介してコンクリート板に与え、損傷・破壊の低減効果について検討したものである。

2.1 実験の概要

実験装置の概要を、図-1 に示す。乾燥砂 (単位体積重量 1.590g/cm^3) をコンクリート板上に厚さ 0, 50, 100, 150mm で覆土している。コンクリート板は、縦 $600 \times$ 横 $600 \times$ 厚 100mm 、ペントライト爆薬は、直径 70mm 、高さ 70mm である。実験におけるコンクリートの強度特性および乾燥砂の特性を、表-1, 2 に示す。一般に、コンクリート

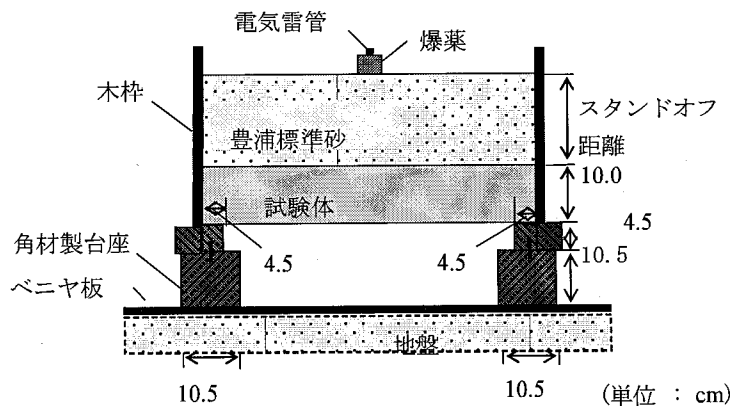


図-1 実験の概要

表-1 コンクリートの強度特性

材令(日)	ヤング係数(GPa)	圧縮強度(MPa)	割裂引張強度(MPa)
14	21.7	48.6	4.1

表-2 乾燥砂の特性

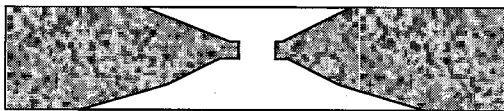
種類	呼び名	含水比(%)	単位体積重量(g/cm ³)	乾燥砂厚(cm)
豊浦標準砂	乾燥砂	0.1	1.492	5.0, 10.0, 15.0



(a) 表面破壊 (クレータ)



(b) 表面破壊と裏面剥離 (スポール)



(c) 貫通

図-2 破壊の種類

板の局部破壊は、図-2 に示すように表面破壊 (クレータ)、裏面剥離 (スポール) および貫通に分類されている。実験結果の整理についても、この分類に従って爆発条件と破壊の関係を調べている。

2. 2 実験結果

図-3 に、覆土厚の相違によるコンクリート板の破壊損傷状況を示す。覆土厚 0cm (乾燥砂がないケース) は、表面に直径約 30cm のクレータ、裏面には約 40cm のスポール破壊をともなう貫通孔が生じている。また、覆土厚が大きくなるに従い、表面裏面ともに破壊が顕著に低減していることがわかる。すなわち、覆土厚 5cm の場合は、貫通孔がなくなり表面には直径約 20cm のクレータ、裏面には直径約 30cm のスポールが生じている。覆土厚 10cm の場合は、表面のクレータもなくなり、裏面は直径 20cm のスポールが生じている。覆土厚 15cm では、ほとんど損傷はなく、裏面にもスポール破壊は見られず、板中心から放射状のひび割れのみが発生している。

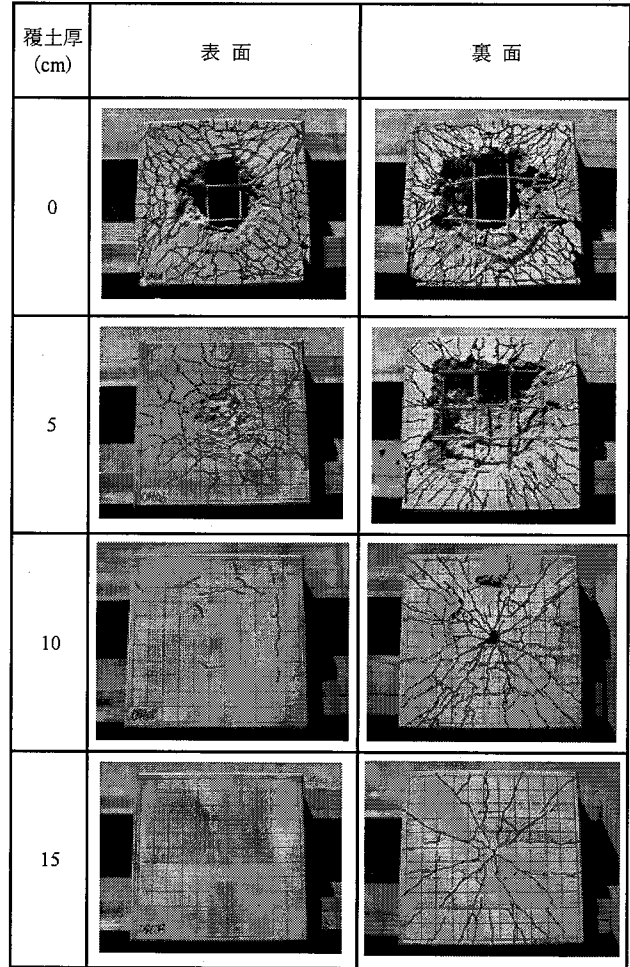


図-3 実験による損傷状況

3. 実験の数値シミュレーション

3.1 解析モデルの概要

(1) 解析モデル

図-4 に、解析モデルを示す。解析は、2次元軸対称系で行った。ここでは、鉄筋はモデル化せず、コンクリート板および乾燥砂覆土をラグランジュ座標系で、ペントライト爆薬及び空気をオイラー座標系でモデル化した。

解析対象のコンクリート板及び乾燥砂のメッシュは、1要素あたり 2mm×2mm の大きさに分割した。また、爆薬及び空気のメッシュは 60,000 要素とした。コンクリート板の境界条件は、実験と同様に、供試体端部の下側を上下方向のみ拘束した。

(2) 爆薬のモデル化

一般に、爆薬の爆轟特性および爆風圧は、圧力・体積・および温度の関係式である状態方程式として記述される。これまでに、BKW 式、KHT 式などいくつかの状態方程式が提案されている⁹⁾が、本研究では、式の形が簡便でコンピュータシミュレーションに適している Jones-Wilkins-Lee

(JWL) 式を用いて、爆轟の数値シミュレーションを行った。JWL 式は次式で表される。

$$P = A\left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1}\right)e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B\left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2}\right)e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega\eta\rho_0 e \quad (1)$$

ここに、 P は爆轟圧力、 A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω は定数、 e は単位質量あたりのエネルギー、 ρ_0 は初期密度、 $\eta = \rho / \rho_0$ である。
ペントライト爆薬に対する JWL 式のパラメータ値は、Lawrence Livermore 研究所が実験により求めた表-3 に示す値を用いた。

(3) コンクリートの降伏基準とひび割れ発生基準

図-5 に、コンクリートの降伏基準モデルを示す。爆発荷重を受けると、コンクリート内部に発生する静水圧が大きくなることが想定されるので、コンクリートの降伏基準としては静水圧に依存して降伏強度が変化する Drucker-Prager モデルを選択した。この際、静水圧に対応してせん断強度が増加する割合は、図に示すように線形および非線形の2種類を用いた。なお、非線形モデルは、一軸引張強度と一軸圧縮強度を通過するようにモデル化したものである。ひび割れの基準については、静水圧が膨張圧になり、コンクリートの一軸引張強度と等しい圧力に達したときにひび割れが発生するものとした。

(4) ひずみ速度効果

コンクリートのひずみ速度効果については、本来は全ての位置で時々刻々変化するが、計算時間短縮のため全ての要素で同じひずみ速度が生じるものと仮定した。具体的には、高速一軸圧縮および一軸引張試験で得られた強度の増加率を、降伏基準モデルの降伏応力の増加として反映させた。ひずみ速度効果によるコンクリートの一軸圧縮および引張強度増加の評価式として、以下に示す藤掛らおよび Ross らの式がある。

動的圧縮強度の増加率：藤掛らの式⁷⁾

$$\frac{f'_{cd}}{f_{cs}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s}\right)^{0.006} \left[\text{Log}\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s}\right) \right]^{1.05} \quad (2)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$: 静的荷重時のひずみ速度 [1.2×10^{-5} (1/s)],
 $\dot{\epsilon}$: 急速荷重時のひずみ速度 (1/s), f_{cs} : 静的荷重時の圧縮強度 (N/mm^2), f'_{cd} : 動的荷重時の圧縮強度 (N/mm^2) である。

動的引張強度の増加率：Ross らの式⁸⁾

$$\eta(\dot{\epsilon}) = \frac{f'_{td}}{f_{ts}} = \exp \left[0.00126 \left(\text{Log}\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{3.373} \right] \quad (3)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$: 静的荷重のひずみ速度 [1.0×10^{-7} (1/s)], $\dot{\epsilon}$: 急速荷重時のひずみ速度 (1/s) である。

表-4 に、本解析で用いたひずみ速度と対応した強度

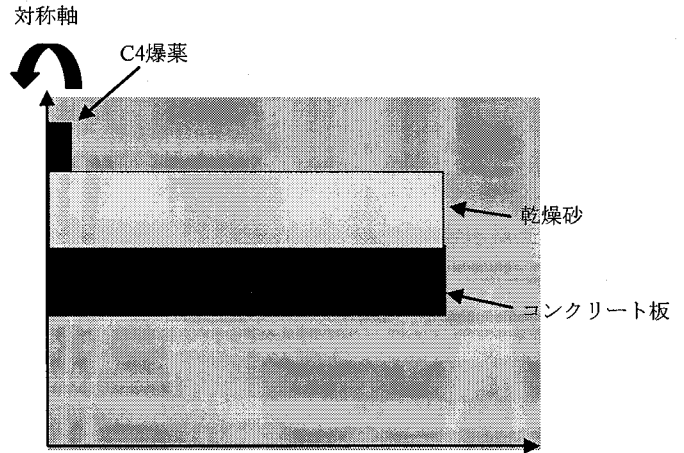


図-4 解析モデル

表-3 ペントライト爆薬の JWL パラメーター

密度 ρ (g/cm^3)	1.70
パラメータ A (kPa)	5.40940×10^8
パラメータ B (kPa)	9.37260×10^6
パラメータ R_1	4.5
パラメータ R_2	1.1
パラメータ ω	0.35
C-J 爆発速度 (m/s)	7530
C-J 圧力 (kPa)	2.55000×10^7
C-J エネルギー (kJ/m^3)	8.10000×10^6

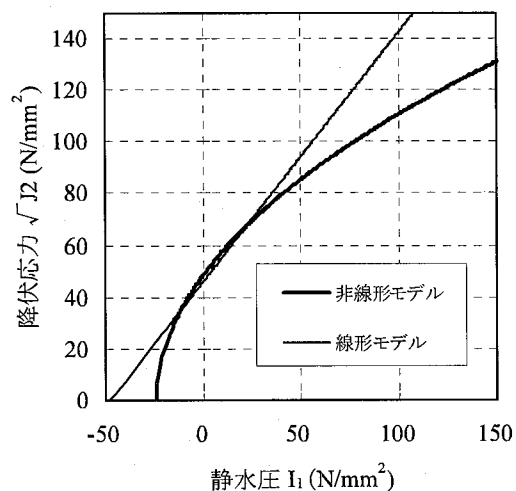


図-5 降伏基準モデル

表-4 ひずみ速度の変化による強度増加

ひずみ速度	ひずみ速度効果(倍率)		強度(N/mm ²)	
	圧縮	引張	圧縮	引張
1.0×10 ⁻⁵	1	1	48.6	4.1
1.0×10 ²	2.073	8.041	100.74	32.97
1.0×10 ³	2.615	19.573	127.09	80.25

表-5 乾燥砂の解析定数

状態方程式	線形
降伏基準	Drucker-Prager
粘着力(kPa)	0
内部摩擦角(°)	28.3
密度(g/cm ³)	1.59
体積弾性係数K(GPa)	5.0
せん断弾性係数G(GPa)	0.375

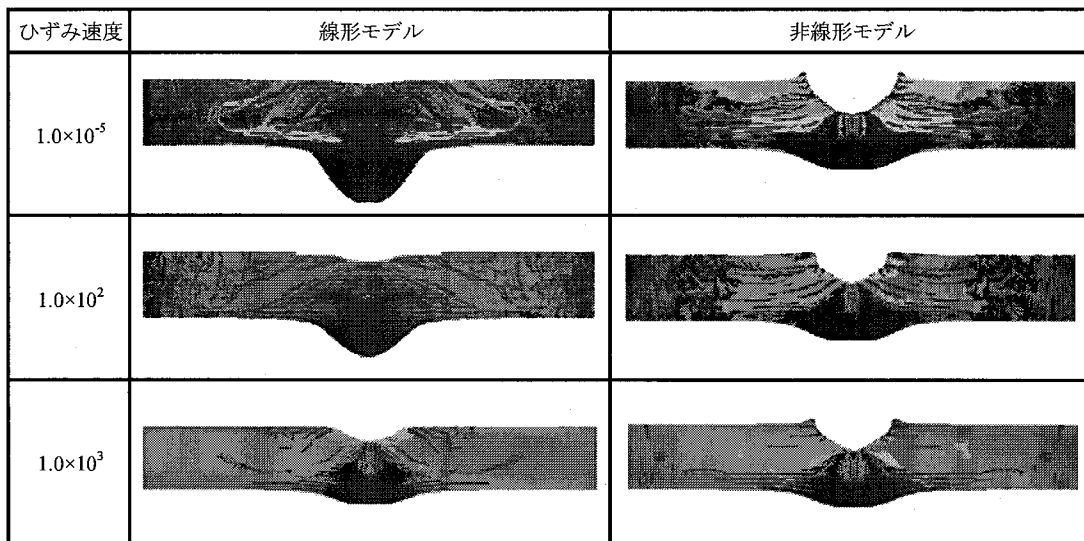


図-6 ひずみ速度およびコンクリートの降伏基準の影響

の増加を示す。

(5) 乾燥砂覆土のモデル化

乾燥砂のモデル化には線形の Drucker-Prager モデルを用いた。乾燥砂であるため粘着力はないものとし、内部摩擦角の値は文献⁹⁾を参照して28.3°としている。解析定数を表-5に示す。

3.2 降伏基準およびひずみ速度効果の影響

降伏基準およびひずみ速度効果の影響を確認するため、覆土がないケースに対してシミュレーション解析を行った。

図-6は、降伏基準モデルとひずみ速度の組み合わせによるコンクリートの損傷状況の変化を示している。ひずみ速度が1.0×10⁻⁵(1/s) (静的) の場合は、降伏基準によらず板全体が極めて大きく破壊されていることがわかる。また、どちらの降伏基準でも、ひずみ速度が大きくなると破壊は小さくなる。とくにひずみ速度が1.0×10³(1/s)まで増大すると、裏面の引張破壊は爆薬直下の位置近傍に集中してくることがわかる。線形の降伏基準を用いた場

合には、表面のクレータが小さく、裏面の破壊が大きくなる傾向がある。逆に、非線形の降伏基準では、表面のクレータが大きくなり裏面でのスポールは抑制されている。線形の降伏基準は、図-5に示したように静水圧に比例した降伏応力となるため、非線形モデルに比べて大きな圧力を負担することになり、表面の変形は小さくなったと考えられる。一方、非線形の降伏基準では相対的に柔らかい性質を示すため、表面での変形が大きく、また裏面へ伝達される応力波の大きさも低減されるものと考えられる。図より、非線形の降伏基準モデルとひずみ速度が1.0×10³(1/s)の組み合わせのとき、実験結果を比較的よく再現している。

3.3. 覆土の効果

非線形の降伏基準モデルに1.0×10³(1/s)のひずみ速度を考慮して、覆土ありのケースについて解析を行った。

図-7に、解析で得られた破壊状況を示す。図-3の実験結果と比較すると、全てのケースにおいて破壊モードは一致していることがわかる。覆土厚が5cm, 10cm, 15cmと厚くなるにしたがって、表面裏面における破壊の程度





種類	解析結果	解析破壊モード	実験破壊モード
乾燥砂なし		貫通	貫通
乾燥砂5cm		表面破壊+裏面剥離	表面破壊+裏面剥離
乾燥砂10cm		裏面剥離限界	裏面剥離限界
乾燥砂15cm		ひび割れ	ひび割れ

図-7 実験のシミュレーション結果

は小さくなり、同時に内部の損傷やスポールも低減されており、覆土による緩衝効果を数値的にも再現できることがわかる。

4. 結言

本研究は、ペントライト爆薬による爆発荷重を受けるコンクリート板の破壊に及ぼす覆土の影響について数値シミュレーションを行ったものである。本研究の成果を要約すると以下ようになる。

- (1)爆発荷重を受けるコンクリート板の局部破壊は、非線形の降伏基準にひずみ速度を考慮することでシミュレートできた。
- (2)覆土(乾燥砂)を Drucker-Prager 降伏基準でモデル化したところ、破壊モードが実験結果と比較的良好に一致し、覆土の緩衝効果を再現できた。

謝 辞

本研究を行うにあたり防衛庁技術研究本部 森下政浩氏には多大なるご協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.1785-1796, 2000.3

- 2) 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, 第15巻第

2号, pp.89-98, 2004.5

- 3) 田中秀明, 森下政浩, 伊藤孝, 山口弘: 爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼす爆破位置の影響, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.297-312, 2001.4
- 4) M.Katayama, M. Itoh, S. Tamura, M. Beppu, T. Ohno; Numerical analysis method for the RC and geological structures subjected to extreme loading by energetic materials, Proc. of Design and Analysis of Protective Structures against Impact/Impulsive/Shock Loads, pp.287-297, 2003.12
- 5) 森下政浩, 阿曾沼剛, 栗木茂幸, 竹本憲介, 齋藤和伸, 松尾啓: 構造部材の破壊モードに関する研究(近接爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷と覆土の緩衝効果), 防衛庁技術研究本部技報, 第6892号, 2005
- 6) 社団法人 火薬学会: エネルギー物質ハンドブック, pp.165-170, 1999.3
- 7) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: ひずみ速度効果を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.109-123, 2001.2

- 8) Ross, C.A, Thompson, P.Y.and Tedesco, J.W. :
Split-hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar
in tension and compression, ACI Material Journal,
V.86,No.5pp.475-481,September October,1989
- 9) 河上房義 : 土質力学第 6 版, 森北出版株式会社,
pp127-129