

I-797

遠心载荷装置による発破実験（その2）

数値シミュレーション

防衛庁第4研究所 正員 安藤 智啓 同 正員 藤本 一男
同 装備局 正員 山口 弘 防衛庁第4研究所 正員 鶴居 正行
同 正員 伊藤 孝

1. まえがき

近年、土木工学の分野においても衝撃問題が広く取り上げられるようになり、多くの実験が行われているが、衝撃分野において発破に関する研究は比較的少ないようである。土木工事等における発破から、既存の構造物を安全に守るためには、発破によって構造物に作用する動的荷重を解明し、構造物の応答特性を把握する必要がある。実験的には、既存の構造物を使用して発破実験を行うことが困難であることから遠心载荷装置による模型実験が有効な手段であると考えられる。一方、実際の現象を推定するための数値シミュレーションも有効な手段であるが、発破現象、土の動的特性あるいは土と構造物の相互作用のモデル化等、種々の複雑な問題を有しているのが実状である。本研究では、衝撃応答解析用汎用コード DYN3D を用いて、発破現象の数値シミュレーションの可能性について検討を行った。

2. 解析方法

本数値解析は、40G の遠心加速度場で行った遠心载荷実験に用いた試験土槽を、相似則に基づき 40 倍に実規模換算したモデルを使用して行った。図-1 に解析モデルを示す。モデル化の範囲は、試験土槽内の火薬、構造物、豊浦標準砂及びポリウレタンまでとし、軸対称性を考慮して 4 半分モデルを取り上げて要素分割を行った。火薬は、ペンスリッド(PETN) とアジ化鉛(Pb(N₃)₂) から成る半径 36cm、重量(360kgf)の球状モデルである。また深さ方向には自重力を考慮し、土圧が平衡状態に達した後火薬を爆発した。

なお、模型を実規模と同じ材料で作成した場合の遠心加速度 NG における相似則は、表-1 のとおりとなる。図-2 には、構造物模型に貼付した土圧計及び歪ゲージの位置を実規模換算(40倍)した長さで示している。

解析に用いた各種材料物性値は、表2～5に示すとおりである。

火薬は、爆轟速度及び CJ 圧力データを与えることにより爆発現象の模擬が可能なモデルを採用した。また要素内に生じる圧力は状態方程式を用いることにより求め、ここでは係数が比較的明確な JWL の状態方程式¹⁾を採用した。以下に方程式を示す。

$$P=A\left(1-\frac{w}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+\left(1-\frac{w}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{wQ}{V} \quad \text{----- (1)}$$

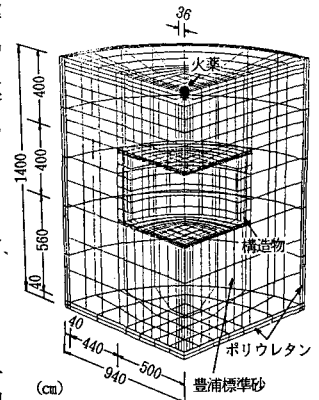


図1 解析モデル

■ 土圧計
□ 歪ゲージ

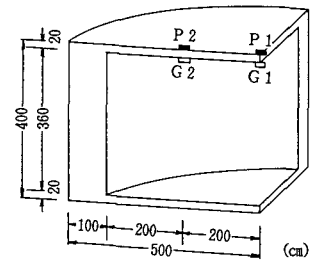


図2 センサー位置

表1 遠心加速度NGにおける相似則

物理量	模型/実規模	物理量	模型/実規模
長さ	1/N	質量	1/N ³
面積	1/N ²	力	1/N ²
体積	1/N ³	工初 [*]	1/N ³
時間	1/N	応力	1
速度	1	ひずみ	1
加速度	N	密度	1

表2 火薬の材料物性値

	密度 (g/cm ³)	CJ圧力 (MPa)	爆轟速度 (cm/s)	爆発工初 [*] MPacm ³ /cm ³	A (MPa)	B (MPa)	R ₁	R ₂	w
PETN	1.77	3.35×10 ⁴	8.30×10 ⁵	3.84×10 ⁻²	6.17×10 ⁵	1.70×10 ⁴	4.40	1.20	0.25
Pb(N ₃) ₂	2.50	7.27×10 ³	3.58×10 ⁵	1.01×10 ⁻¹	6.53×10 ⁵	6.51×10 ³	6.40	1.50	0.20

ここで、 P は圧力、 A, B, R_1, R_2, w は定数、 V は体積比（爆轟後の体積／初期体積）、 Q は爆発エネルギーを表す。構造物は、実験と同様にアルミニウム合金を用い、等方弾塑性モデルを採用した。豊浦標準砂は、降伏の判定に von Mises の条件¹⁾を用いている土質モデルを採用した。降伏判定の計算に使用される偏差応力の第2不変量 J_2 は次式で表される。

$$J_2 = a_0 + a_1 P + a_2 P^2 \quad \text{-----} (2)$$

本数値解析では、 a_0, a_1, a_2 を高速、高圧下のデータを基にして表-3に示すとおり与えた。また、圧縮時の砂の体積歪（ ε_v ）と圧力（ P ）の関係も同様にして以下のような式で与えた。

$$P = 0.2 - 80P + 38000P^2 \quad \text{-----} (3)$$

なお、ポリウレタンは弾性体と仮定した。

3. 数値解析結果と実験結果の比較

図-3 は、 P_1, P_2 における爆土圧の時刻歴波形の数値解析結果と実験結果を示している。図-4 は、 G_1, G_2 におけるひずみの時刻歴波形の両結果を示している。実験結果に関しては、遠心載荷実験で得られた波形を表-1の相似則に基づき、時間を40倍に実規模換算した波形で示している。またここでは、数値解析の入力データのう

ち、砂の除荷時の体積弾性係数をパラメータとし、 P_1 の最大応答値に注目して実験結果との照合を行い、材料定数の同定を試みた。波形は火薬が爆発を開始した時間から100msecまでに関してデータ整理を行った。 P_1 に関しては、応答開始から減衰に至るまで概略解析結果は実験結果を良くシミュレートしていると思われる。 P_2 及び G_1, G_2 に関しては、最大応答値、波形継続時間が実験結果のそれと比べると異なるものの、今後砂の応力-歪関係や砂と構造物の接触面の影響等を検討することにより、十分シミュレートが可能であると考えられる。

4. まとめ

以上の結果から、発破現象の数値シミュレーションは、十分可能である傾向が得られた。今後は土の動的特性あるいは土と構造物の相互作用等の検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) John. O. Hallquist, 'LS-DYNA3D USER'S MANUAL, Livermore Software Technology Corporation, 1990

表 3 豊浦標準砂の材料物性値

	湿潤密度 (g/cm ³)	せん断弾性係数 (MPa)	除荷時の体積弾性係数 (MPa)	降伏関数の係数		
				a_0	a_1	a_2
豊浦標準砂	1.64	1.43×10^4	5×10^4	0.0	2.2	0.3

表 4 構造物の材料物性値

	密度 (g/cm ³)	せん断弾性係数 (MPa)	降伏応力 (MPa)	加工硬化係数 (MPa)	体積弾性係数 (MPa)
A5052	2.70	2.72×10^4	2.06×10^2	3.43×10^2	6.93×10^4

表 5 ポリウレタンの材料物性値

	密度 (g/cm ³)	弾性係数 (MPa)	ν アソソ比
ν リウレタン	1.45×10^{-2}	0.7	0.1

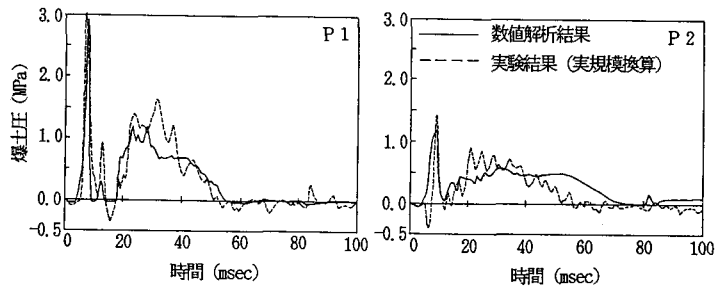


図 3 爆土圧の時刻歴波形

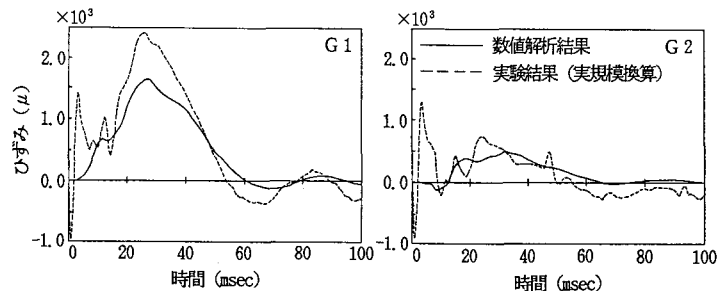


図 4 ひずみの時刻歴波形