

爆土圧を受ける地中埋設構造部材の変形と損傷に関する実験的研究

An experimental study on deformation and damage of buried structural members subjected to ground shock load

市野宏嘉*, 大野友則**, 別府万寿博***, 蓮江和夫****
 Hiroyoshi Ichino, Tomonori Ohno, Masuhiro Beppu and Kazuo Hasue

- * 修(工) 防衛大学校理工学研究科後期課程学生 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
- ** 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
- *** 博(工) 防衛大学校准教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
- **** 工博 防衛大学校教授 応用科学群応用化学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

Structural engineers now have to devise creative designs to deliver innovative solutions that prevent or minimize casualties as well as the damage to infrastructure and critical assets. From this point of view, to develop a protective design of buried structures against subsurface explosion, the damage of buried structures due to ground shock load should be well predicted. The evaluating method of damage of a structural member due to underground explosion has not been investigated. This study is to examine the influence of soil properties on the deformation and/or damage of structural members subjected to ground shock load. Thus, the underground explosion tests to steel plates and reinforced concrete slabs were conducted with the three kinds of soils. From test results, damage of buried structural member due to underground explosion increases with the increase of the degree of saturation regardless of kind of soil.

Key Words: ground shock load, buried structural member, subsurface explosion
 キーワード: 爆土圧, 地中埋設構造部材, 地中爆発

1. 序言

近年, 世界各地で起こっている爆破テロ事件^{1), 2)}や不測の爆発事故^{3), 4)}により構造物が爆発被害を受けると, 構造物の機能が停止・喪失するため社会に与える影響が極めて大きい。したがって, 爆発の発生自体を未然に防ぐ対策を講じるとともに爆発が想定される施設および社会的に重要な構造物に対しては, 爆発が生じた場合にも構造物そのものや内部の人命を防護する方法を検討する必要がある。防護設計の観点からは, 構造物を地下に建設する方法は構造物自体の安全確保が容易になるとともに, 爆発による飛散物の発生抑止などからも, 爆発被害の軽減のために非常に有効であると考えられる^{5), 6)}。しかしながら, 爆発荷重を受ける地下構造物に関する研究は国内外において極めて少ない現状にある。

ここで, 地下構造物の耐爆設計の手順を, 図-1 に示す。地中で爆発が発生すると, 動的な土圧(爆土圧)が地盤内を伝播して構造物に作用する。地下構造物の耐爆設計を進める上では, 爆土圧特性を把握することおよび爆土圧を受けた構造部材の応答を明らかにすることが必要となる。爆土圧～時間関係で表される爆土圧の特性は, 爆土圧の媒質となる地盤材料の土質や爆薬の種類および量, 爆発と構造

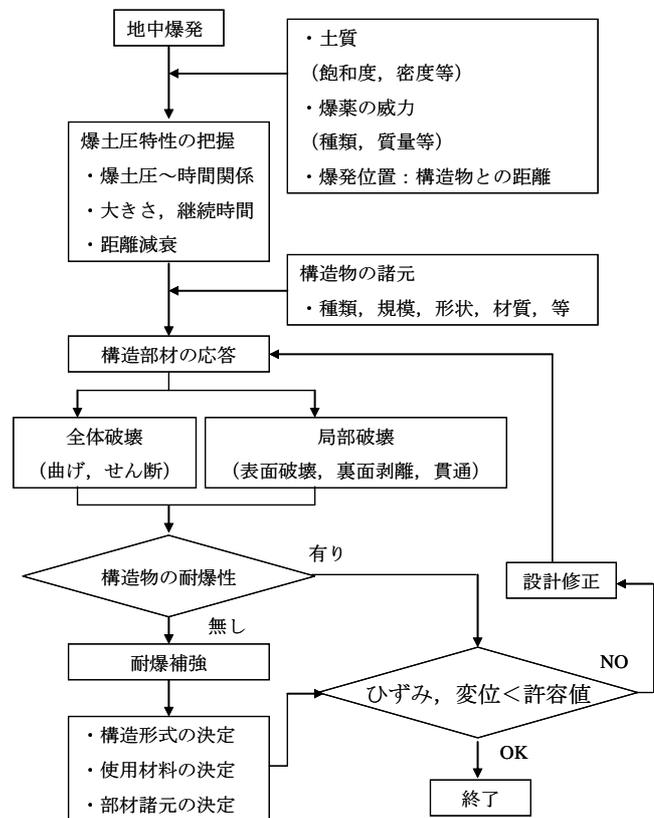


図-1 地中爆発に対する地下構造物の設計の流れ

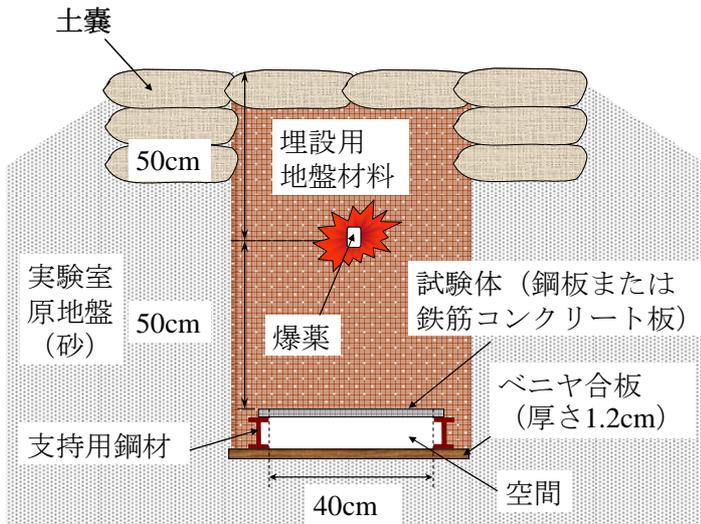


図-2 実験の概要

物との離隔距離によって大きく異なることが知られている⁷⁾。そこで著者ら⁸⁾は、数種の地盤材料を用いた模型地盤で地中爆発実験を行い、地盤材料の飽和度と湿潤密度が最大爆土圧および力積の値に大きく影響することを明らかにした。そして実験結果から土質条件を考慮した爆土圧特性値の評価式を提案した。ただし、この式では地盤材料を介して爆発を受ける構造部材の変形または損傷を評価するには至っていない。一方、爆土圧を受ける構造部材の応答については、森下ら⁹⁾が鉄筋コンクリート板の上面を乾燥砂で覆った場合について爆発実験を行い、爆発荷重に対する地盤材料の緩衝効果に関して検討している。その結果、爆薬と鉄筋コンクリート板の間に乾燥砂がある場合は、乾燥砂が無い場合と比べて鉄筋コンクリート板の損傷が軽減されることを明らかにしており、地盤材料の存在による爆発荷重の緩衝効果を確認している。ただし、この実験は地表面爆発であることや、地盤材料の種別が構造部材の損傷に及ぼす影響については検討されていない。したがって、地中爆発を受ける構造部材の応答およびその変形または損傷を適切に評価する手法は課題として残されている。

本研究では、地中爆発によって爆土圧の作用を受けることが想定される構造物の設計のための基礎的段階として、異なる地盤材料（中目砂、山砂および赤土）中に埋設された鋼板あるいは鉄筋コンクリート板の上方位置で爆薬を地中爆発させる実験を行っている。実験では、爆土圧を受ける鋼板に発生するひずみを計測し、埋設鋼板の変形に及ぼす土質の影響を調べる。また、埋設された鉄筋コンクリート板に対しても同様の実験を行い、爆土圧を受ける鉄筋コンクリート板の損傷の程度について調べている。

2. 地中爆発実験の方法

2.1 実験の概要

実験は、防衛大学の火薬類実験施設内の爆発ピット



(a) 埋設前の鉄筋コンクリート板



(b) 埋設後の状態

写真-1 試験体（鉄筋コンクリート板）の埋設

（以後、爆発ピットと呼ぶ）内で実施した。この爆発ピットは厚さ 60cm の鉄筋コンクリート壁で囲まれており、TNT 爆薬約 1kg までの爆発実験が可能である。実験の概要を、図-2 および写真-1 に示す。地中爆発実験を行うため、爆発ピット内の地盤を約 100cm 掘り下げて底面を水平に整地した。整地した底面に厚さ 1.2cm の合板を敷き、その上に支持用の鋼材 2 本を 40cm の間隔で平行に配置した。実験用の構造部材は、図-3 に示す厚さ 4.5mm の鋼板と図-4 に示す厚さ 5cm の鉄筋コンクリート板である。この部材を支持用鋼材に載せて二辺を単純支持し、スパンが 40cm となるように設置した。次に、地盤材料を投入し、後述する所定の方法で締め固め、鋼板および鉄筋コンクリート板の上面から鉛直上方 50 cm の位置に爆薬を配置した。爆発時のエネルギーが空中に散逸されることを防ぐため、上載荷重を付加するための地盤材料と土嚢を爆薬から 50 cm の高さまで積み上げた。なお、米国陸軍テクニカル・マニュアル¹⁰⁾によると、爆発の深さと爆発によって発生する爆土圧の大きさの関係が示されており、爆発の深さが浅いほど爆土圧は小さくなり、地表での爆発が発生した場合に近づく。米国陸軍テクニカル・マニュアル¹⁰⁾の報告によると、本実験の条件では爆発の深さ 28cm 以上であれば爆土圧は一定となるが、実験条件の差異による誤差も考慮し、極力理想的な地中爆発の条件を実現させるためにさらに深い 50cm とした。爆薬には円柱形（直径/高さ=1）に成型した Composition C-4 爆薬（以後、C-4 爆薬と略記）を用いた。爆薬量は、あらかじめ爆発実験を行い、軽微な損傷が生じる程度の爆薬量を決定した。本実験では、鋼板の場合は 24g、鉄筋コンクリート板の場合は 125 g とした。C-4

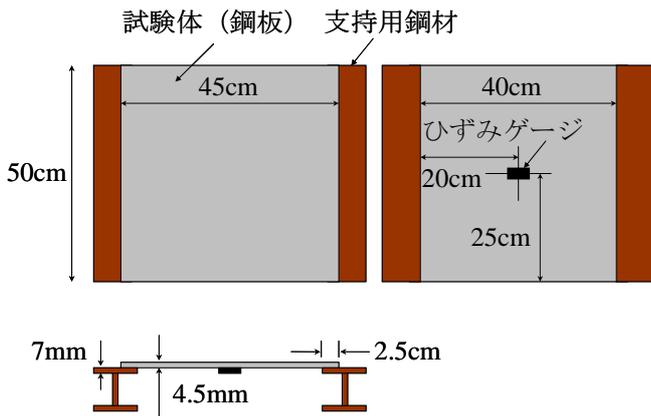


図-3 試験体（鋼板）

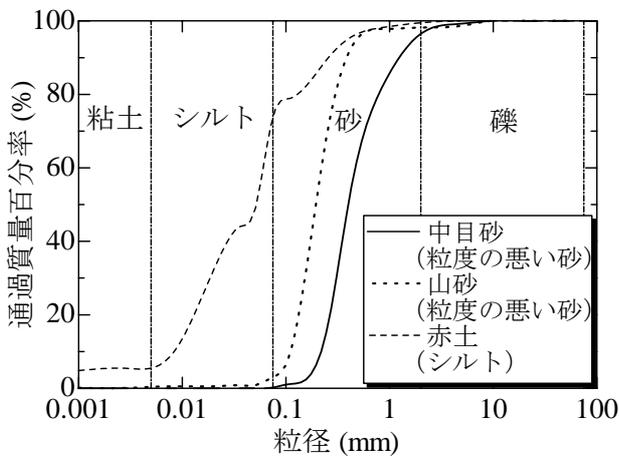


図-5 地盤材料の粒径加積曲線

爆薬は6号電気雷管で起爆した。計測項目は、鋼板裏面のひずみおよび図4に示す鉄筋コンクリート板の支間中央の残留変位である。

2.2 地盤材料および実験ケース

実験用の地盤材料として、粒度組成が異なる中目砂、山砂および赤土の3種類を選定した。いずれも天然の土であり、粒度調整等の加工は施されていない。その粒径加積曲線を図-5に示す。中目砂の平均粒径は0.4mmであり、質量百分率で全体の約96%以上が粒径0.075~2.0mmの砂に分類される。また、0.075mm以下の細粒分はほとんど含まれないため、塑性と保水性に乏しい。中目砂は、日本統一土質分類では粒度の悪い砂(SP)に分類される。山砂の平均粒径は0.2mmであり、質量百分率で全体の約95%以上が粒径0.075~0.850mmの細・中砂である。山砂は、細粒分(シルト分、粘土分)を約3%含むため、中目砂よりも塑性および保水性をやや有する。山砂も日本統一土質分類では粒度の悪い砂(SP)に分類される。赤土は質量百分率で全体の約74%が細粒分であり、日本統一土質分類ではシルト(ML)に分類される。赤土は、3種類の地盤材料の中で最も塑性・保水性が高い。

既往の研究^{7),8)}により、爆土圧の大きさには土質条件、

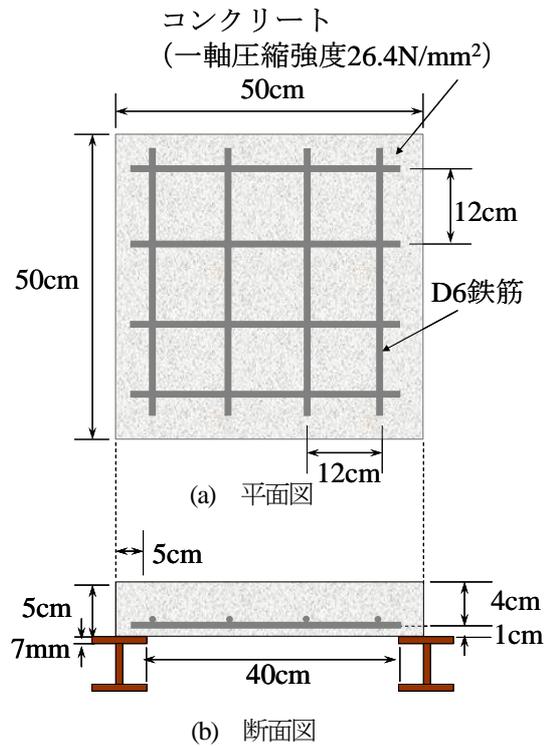


図-4 試験体（鉄筋コンクリート板）

とくに地盤内の水分および空気の量が大きな影響を及ぼすことがわかっている。このような土質条件を表す指標の一つとして飽和度がある。飽和度は、土に含まれる水の体積が、土の間隙の体積に占める割合を百分率表示したものである。すなわち、間隙が全て空気で占められた土は飽和度が0%であり、間隙が全て水で満たされた土は飽和度が100%ということになる。一般に、水中爆発による圧力（以下、爆水圧という）は、空中爆発による圧力（以下、爆風圧という）と比較して極めて大きく、爆発の規模が等しい場合でも爆水圧は爆風圧の100倍以上に達すると報告されている^{11),12)}。したがって、地盤内における水と空気の割合を表す飽和度が、爆土圧にも大きく影響し、爆土圧を受ける鋼板の変形、あるいは鉄筋コンクリート板の損傷に影響するものと考えられる。そこで、本研究でも、地盤の飽和度を実験パラメータとした。

中目砂は、乾燥状態から徐々に加水して飽和度を上昇させて使用した。なお、実験時の飽和度は、10~58%であった。ただし、山砂および赤土は、乾燥させると細粒分によって土が塊状に固結するため、均一な地盤を作製することが困難となる。このため、自然の状態から加水して実験を行った。飽和度の範囲は、山砂が70~87%、赤土が80~97%であった。試験体の埋設にあたっては、地盤材料が極力均一になるように混ぜながら、厚さ25cm毎に踏み固めた。各実験ケースにおける土質条件を示す物理量の一覧を、表-1に示す。また、各地盤材料の土粒子密度、最適含水比および最大乾燥密度について表-2に示す。表-2に示す最適含水比および最大乾燥密度は、JIS A1210に定められている突き固めによる土の締固め試験 A-a 法によって求めた

表-1 各実験ケースにおける土質条件

	鋼板					鉄筋コンクリート板				
	飽和度 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	間隙比	空気間隙率 (%)	飽和度 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	間隙比	空気間隙率 (%)
中目砂	10	1.53	1.48	0.82	41	11	1.60	1.55	0.74	38
	41	1.57	1.35	1.01	30	41	1.55	1.37	0.97	29
	58	1.72	1.45	0.86	19	53	1.66	1.41	0.92	23
山砂	70	1.71	1.36	0.97	15	71	1.74	1.40	0.94	14
	81	1.84	1.48	0.81	9	79	1.82	1.47	0.83	10
	86	1.86	1.47	0.83	6	87	1.86	1.46	0.84	6
赤土	80	1.32	0.76	2.43	14	85	1.35	0.75	2.48	11
	97	1.49	0.82	2.16	2	96	1.48	0.82	2.20	3

表-2 各地盤材料の特性

	平均粒径 (mm)	土粒子の密度 (g/cm ³)	最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (g/cm ³)
中目砂	0.4	2.70	-	-
山砂	0.2	2.68	21	1.62
赤土	0.055	2.60	82	0.82

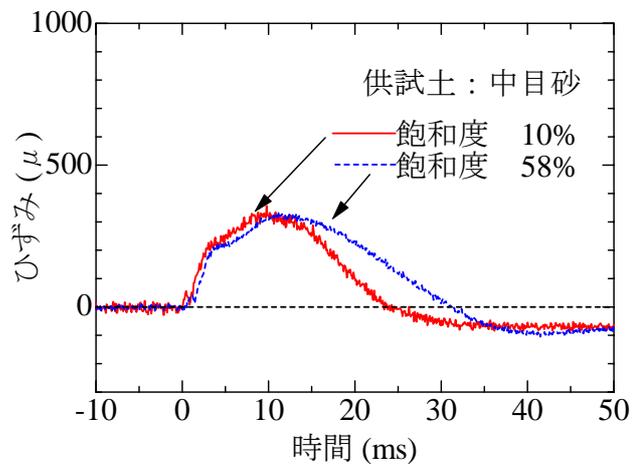


図-6 ひずみ～時間関係 (中目砂)

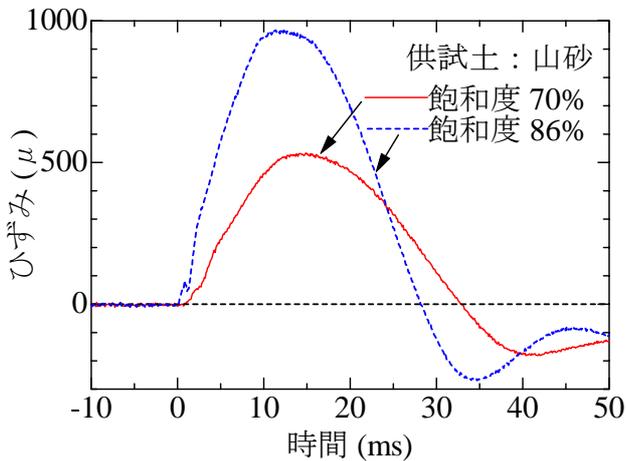


図-7 ひずみ～時間関係 (山砂)

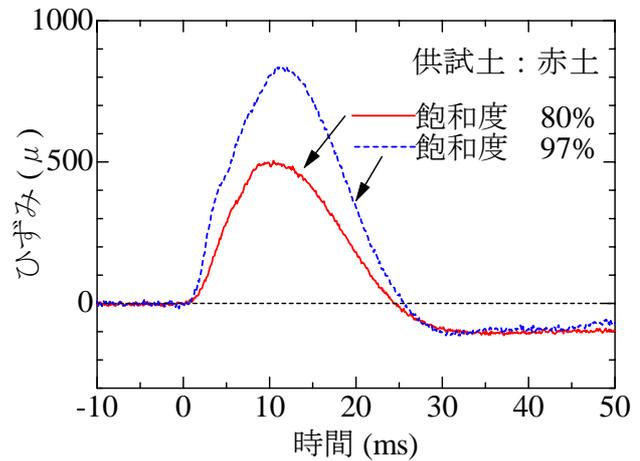


図-8 ひずみ～時間関係 (赤土)

ものであるが、中目砂は粒度配合が極めて悪いことから締め固まり難く、明瞭な最適含水比および最大乾燥密度が現れなかった。山砂は最大乾燥密度が 1.62g/cm³ で、締め固め度(表-1 中の乾燥密度を表-2 中の最大乾燥密度で除した値を百分率表示したもの)は 84%~91% で実験を行った。赤土は最大乾燥密度が 0.82g/cm³ で、締め固め度は 91%~100% で実験を行った。なお、実験はそれぞれのケースにつき 1

回ずつ実施した。

3. 爆土圧を受ける鋼板の変形

鋼板中央の裏面のひずみ～時間関係を、埋設に使用した地盤材料別に図-6~図-8 に示す。ひずみ～時間関係の全般的な傾向としては、立ち上がりから t=9~15 ms で 300~

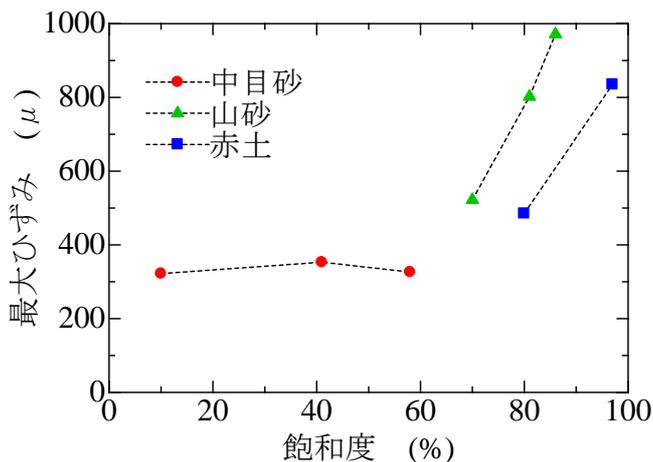


図-9 最大ひずみと飽和度との関係

1000 μ の最大値を示した後、立ち上がりから $t=24\sim 33$ ms 後に 0μ となる。例えば、図-6 に示す飽和度 10% の中目砂の場合では、立ち上がり後 $t=4$ ms 付近において勾配が一時緩やかとなり、 $t=9$ ms で最大ひずみ値 322μ を示し、その後 $t=24$ ms で 0μ となっている。飽和度が 58% の場合も、最大値となるまでは飽和度 10% の場合とほぼ同じ傾向を示し、最大値もほぼ等しい。ただし、ひずみが減少する際の勾配は比較的緩やかである。継続時間は飽和度が 10% の場合より 7 ms 長くなっている。図-7 および図-8 に示す山砂および赤土の場合の結果からも、地盤材料の種類と飽和度の相違によって、ひずみ値やひずみの継続時間が異なることがわかる。

鋼板の最大ひずみと飽和度との関係を、図-9 に示す。また図-10 に、著者ら⁸⁾が行った地中爆発実験において計測された最大爆土圧と飽和度の関係を、ひずみと爆土圧との関係の比較のために示す。なお、この実験においては、本研究と同じ地盤材料を使用している。図-9 から、中目砂の場合は飽和度が 10%~58% の範囲内では、ひずみの最大値は約 $320\mu\sim 350\mu$ で飽和度の違いによる影響は認められない。山砂の場合は、飽和度が 70% で最大ひずみ値は 522μ であるが、飽和度が 86% になると最大ひずみは約 2 倍の 971μ に増加している。赤土の場合は、飽和度 80% で最大ひずみ 485μ 、飽和度 97% では最大ひずみは 835μ に増加している。このように、山砂と赤土は、飽和度が上昇すると最大ひずみ値は増加することがわかる。また、同じ飽和度である 80~81% の場合であっても山砂の最大ひずみは赤土の最大ひずみよりも大きく生じている。図-10 に示す既往の研究での最大爆土圧と飽和度の関係⁸⁾でも、飽和度の上昇に伴い最大爆土圧が大きくなる傾向が示されている。ただし、中目砂は、飽和度が 50% 以下の範囲では飽和度が上昇しても最大爆土圧はほとんど変化しない。本実験における 3 種類の地盤材料内における最大ひずみと飽和度との関係は、最大爆土圧と飽和度との関係に類似している。一般に、ある媒質内で爆発が生じた場合、球面波が広がって面積が拡大していくことにより、単位面積あ

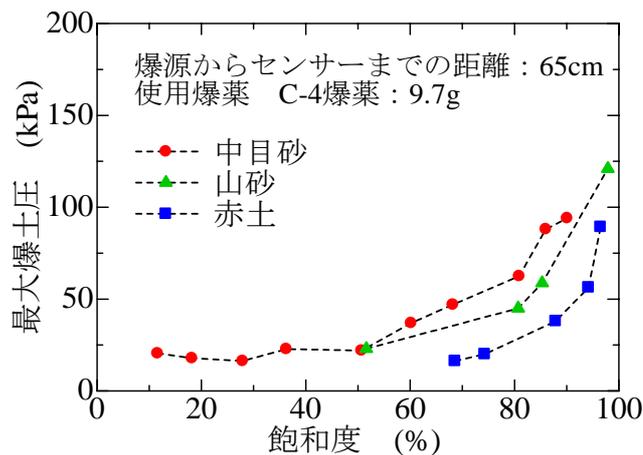


図-10 最大爆土圧と飽和度との関係⁸⁾

たりのエネルギーが減少し、爆発による圧力は伝播距離に応じて減衰してゆく。媒質が地盤材料の場合は、このような幾何的減衰の他にも土粒子相互の摩擦や地盤内の空気存在によって、爆土圧が減衰すると考えられる。土粒子相互の摩擦は飽和度の上昇とともに小さくなり、飽和度の高い地盤材料は爆土圧を減衰させる効果に乏しいと考えられる。一方で地盤材料内の空気間隙が多く存在する(飽和度が低く、空気間隙率が高い)場合は減衰効果がより期待できると考えられる。

ひずみが生じている継続時間と飽和度の関係を、図-11 に示す。また図-12 には、著者ら⁸⁾が行った地中爆発実験において計測された爆土圧の継続時間と飽和度との関係を示す。図-11 から、中目砂の場合は飽和度が 10% から 41% に上昇するとひずみの継続時間が 7ms 長くなり、41% から 58% に上昇するとひずみの継続時間は 2ms 短くなるのがわかる。山砂の場合は飽和度が上昇するとひずみの継続時間が短くなる傾向が認められる。一方、赤土の場合は、飽和度が上昇してもひずみの継続時間はほとんど変化していない。この傾向は、図-12 に示す爆土圧の継続時間と飽和度の関係と同様の傾向である。

4. 爆土圧を受ける鉄筋コンクリート板の損傷

4.1 土質条件が鉄筋コンクリート板の損傷に及ぼす影響

爆発後の鉄筋コンクリート板の損傷状況を、表-3~表-5 に示す。表-3 は、地盤材料が中目砂の場合の鉄筋コンクリート板に生じた損傷である。飽和度が 11% の場合、鉄筋コンクリート板の表面には目視で確認できる損傷は認められず、裏面だけに鉄筋に沿った 2 本のひび割れが生じている。また側面には、鉄筋コンクリート板裏面の中央から、わずかに曲げひび割れが生じている。飽和度が 41% の場合は、鉄筋コンクリート板表面のひび割れは確認できず、爆薬直下の表面にわずかなコンクリート剥離が生じた。また、裏面の中央部分にひび割れが生じている。側面には鉄筋コンクリート板裏面の中央に縦ひび割れが生じている。

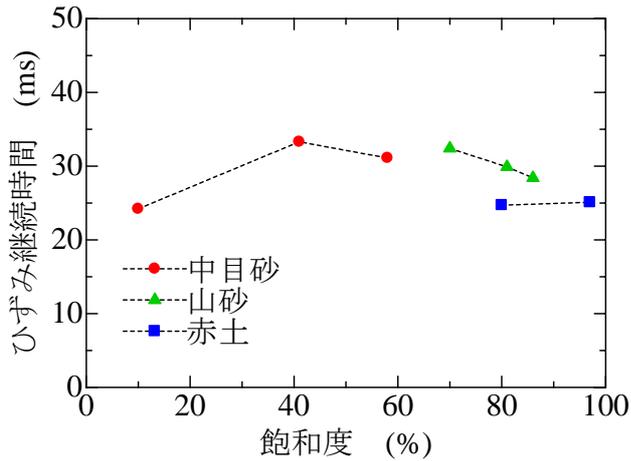


図-11 ひずみ継続時間と飽和度との関係

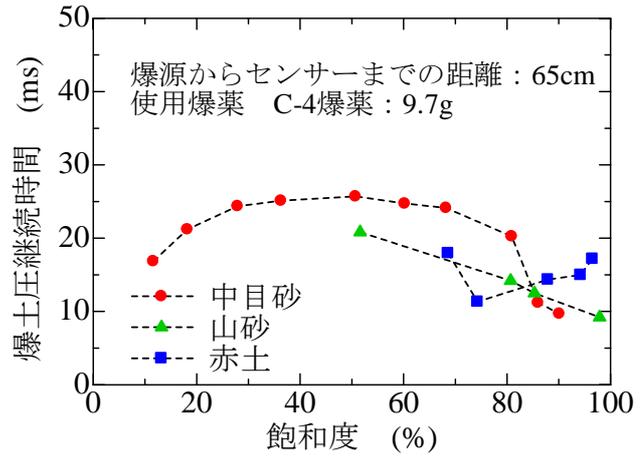


図-12 爆土圧継続時間と飽和度との関係⁸⁾

表-3 爆土圧を受けた鉄筋コンクリート板試験体の損傷 (中目砂)

中目砂 (ひび割れは加筆して強調されている)			
飽和度	表面	裏面	側面
11%			
41%			
53%			

飽和度が 53% の場合は、飽和度 41% の場合と同様に爆薬直下のコンクリートが剥離している。裏面は、中央に 1 本の縦ひび割れおよび板の隅角部に向かうひび割れが生じていた。また、側面には鉄筋コンクリート板裏面の中央に縦ひび割れが生じている。以上の結果より、地盤材料が中目砂の場合の鉄筋コンクリート板に生じる損傷の大きさは、飽和度が 53% に上昇すると、板裏面のひび割れの数が大きくなるとともに、板表面の剥離が生じている。したが

って、飽和度の上昇に応じてコンクリート板に生じる損傷が大きくなるのがわかる。

山砂を地盤材料とした実験における鉄筋コンクリート板の損傷状況を、表-4 に示す。飽和度が 71% の場合、鉄筋コンクリート板の裏面には中央近傍の鉄筋に沿う比較的大きな 2 本のひび割れが生じている。また、側面には 2 本の縦ひび割れが生じており、残留変位が明瞭に認められる。飽和度が 79% に上昇すると、鉄筋コンクリート板表

表4 爆土圧を受けた鉄筋コンクリート板試験体の損傷（山砂）

山砂			
飽和度	表面	裏面	側面
71%			
79%			
87%			

表5 爆土圧を受けた鉄筋コンクリート板試験体の損傷（赤土）

赤土			
飽和度	表面	裏面	側面
85%			
96%			

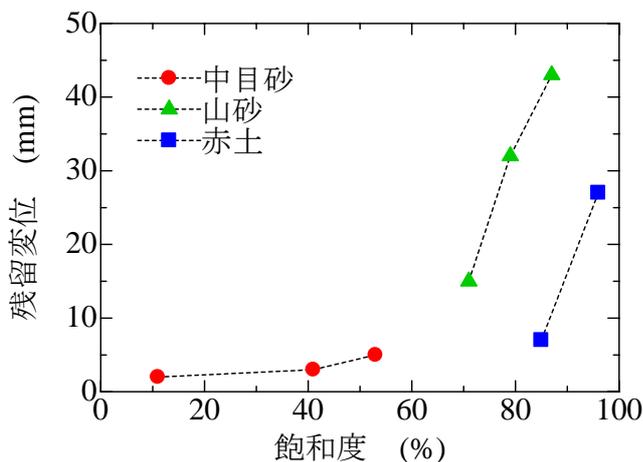


図-13 残留変位と飽和度との関係

面には、鉄筋間隔 12cm より小さい間隔で 2 本のひび割れが生じた。とくに写真の右側のひび割れには、ひび割れに沿ってコンクリートが圧潰している。板裏面には、中央の 2 本の鉄筋に沿って幅が数 mm の大きなひび割れが生じた。その一部ではコンクリートが剥落し、鉄筋が一部露出している。側面から見ると、板の中央付近に幅数 mm の曲げひび割れが複数生じており、鉄筋コンクリート板全体が下側にたわみ変形して、著しい残留変位を生じている。飽和度 87 % の場合は、鉄筋コンクリート板の左側がブロック状に破壊している。裏面は、縦横に配筋した鉄筋に沿ってひび割れが生じ、コンクリートの破壊にもなって鉄筋が露出している。側面には、数本のひび割れが生じ、下側に大きくたわんでいる。板の支持位置では、せん断ひび割れが伸展して鉄筋コンクリート板がせん断破壊している。すなわち、山砂の場合は飽和度の上昇にもなって鉄筋コンクリート板の損傷が顕著に増大することがわかる。

表-5 に、地盤材料が赤土の場合の鉄筋コンクリート板の損傷状況を示す。地盤材料の飽和度は 85 % および 96 % である。飽和度が 85 % のケースでは、裏面の中央位置だけに 1 本のひび割れが生じている。また側面には、板の裏面中央付近位置に、2 本の縦ひび割れが生じている。飽和度が 96 % では、鉄筋コンクリート板表面中央に 1 本のひび割れが生じ、ひび割れに沿ってコンクリートが圧潰している。板裏面の損傷は、鉄筋に沿う 2 本のひび割れおよび顕著な縦割れが中央に生じている。この結果、鉄筋コンクリート板全体は中央位置で折れている。以上より、赤土の場合は、飽和度の上昇とともに鉄筋コンクリート板の損傷が増大する傾向があることがわかる。

このように、C4 爆薬 125 g が鉄筋コンクリート板からの距離 50 cm (換算距離 $Z=D/W^{1/3}=1.0 \text{ m/kg}^{1/3}$) で地中爆発するという条件下では、コンクリート板には曲げあるいはせん断による全体破壊が生じることがわかる。また、埋設に使用した地盤材料の土質の相違によって埋設構造部材に作用する爆土圧の減衰の程度が異なることから、全体破壊による損傷の程度は土質の相違によって大きく異なり、とくに飽和度が高いほど著しくなる。

4.2 土質条件が残留変位に及ぼす影響

鉄筋コンクリート板に生じた残留変位と飽和度との関係を、地盤材料の種類毎に図-13 に示す。中目砂の場合、残留変位は 2 ~ 5 mm である。山砂の場合は、飽和度が 71 % のときの残留変位は 15 mm で、飽和度が 87 % に上昇すると約 3 倍の 43 mm に増加する。赤土の場合は、飽和度 85 % のとき残留変位は 7 mm で、飽和度が 96 % に増加すると 27 mm に増加する。すなわち鉄筋コンクリート板の残留変位は飽和度の上昇に対して増加する。このような傾向を示した理由については、飽和度の上昇、および空気間隙率の減少にともない地盤材料による爆土圧の減衰効果が小さくなったためであると考えられる。ここで、飽和度がほぼ同一 (飽和度 85 % の赤土と飽和度 87 % の山砂) の地盤材料における鉄筋コンクリート板の残留変位を比べると、山砂の方が約 6 倍 (7mm に対して 43mm) の値を示している。このように、同等の飽和度であっても地盤材料の種類によって鉄筋コンクリート板の残留変位 (損傷の程度) は大きく異なることがわかる。表-1 に示したように飽和度 85% の赤土は空気間隙率が 11%、飽和度 87% の山砂は空気間隙率が 6% である。飽和度 85% の赤土では、空気間隙が爆発のエネルギーをより多く吸収していると考えられる。ただし、赤土の飽和度が 96% に増加すると、空気間隙率は 3% まで減少するが、残留変位は 27mm にとどまっており、飽和度や空気間隙率といった地盤材料の間隙の状態の他にも爆土圧の減衰に影響する因子があると考えられる。

5. 結言

本研究では、異なる地盤材料中に埋設された 2 種類の板部材の上方位置で爆薬を地中爆発させる実験を行い、地盤材料の種類および飽和度が、1) 爆土圧を受ける埋設鋼板の変形および 2) 爆土圧を受ける鉄筋コンクリート板の損傷、に及ぼす影響について調べることを目的としている。実験結果から、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 爆土圧の作用によって厚さ 4.5 mm の鋼板に生じたひずみ～時間関係は、立ち上がり後 9 ~ 15 ms で最大値を示し、24 ~ 33 ms の間継続する傾向がある。
- (2) 中目砂 (飽和度 10 ~ 58 %) の場合は、飽和度が上昇しても鋼板の最大ひずみはほぼ一定値であった。山砂 (飽和度 70 ~ 86 %) および赤土 (飽和度 80 ~ 97 %) の場合は、飽和度が上昇すると鋼板の最大ひずみが増大した。本実験における 3 種類の地盤材料内における最大ひずみと飽和度の関係は、既往の研究⁸⁾で報告されている最大爆土圧と飽和度との関係に類似している。
- (3) 爆土圧の作用を受けた鉄筋コンクリート板には、すべてのケースで曲げひび割れが発生し残留変位が生じた。残留変位については、中目砂の実験ケースで 2 ~ 5mm であったが、山砂では 15 ~ 43mm、赤土では 7 ~ 27mm であった。ただし、飽和度 87% の山砂の場合は、

曲げひび割れとせん断ひび割れによって板が破壊した。
(4) 鉄筋コンクリート板の損傷は、一般に土質の飽和度の上昇にともなって損傷が大きくなる。また、同等の飽和度にある山砂と赤土に対して板の残留変位を比較すると、山砂の方が大きい残留変位を生じた。

以上のことから、地下構造物の耐爆設計にあたっては、周辺地盤の飽和度を低く保ち、地盤材料の間隙内に空気を確保する工夫が必要となる。たとえば、地盤が水分を含んでも排水が容易となるように、本研究で使用した中目砂のような粒径が比較的大きく透水性に富む地盤材料を使用すること、あるいは構造物の周囲に乾燥砂を使用し、ゴムや樹脂シートなどの遮水材料で被覆することが有利であると考えられる。また、地中爆発に対する地下構造物の設計にあたり、今後は埋設構造部材に作用する爆土圧と爆土圧を受けた埋設構造部材の変形および変位を評価する手法の確立が必要となる。

参考文献

- 1) 公安調査庁：国際テロリズム要覧，pp.7-10, 2006.
- 2) 同上 1), pp.38-42.
- 3) 上原陽一，小川輝繁 編：新版 防火・防爆対策技術ハンドブック，株式会社テクノシステム，pp.37-43, 2004.
- 4) 同上 3), pp.81-96.
- 5) Headquarters, Department of the Army, Washington DC: Fundamentals of protective design for conventional weapons, TM5-855-1, Cha.3, pp. 7- 8, 1986.
- 6) Leong, E. C., Anand, S., Cheong, H. K., and Lim, C. H. : A revisit to TM-5-855-1: Scaled distances and peak stresses, Design and Analysis of Protective Structures against Impact/Impulsive/Shock Loads, pp. 29-40, 2003.
- 7) 同上 5), Cha.5, pp. 1- 8.
- 8) 市野宏嘉，大野友則，別府万寿博，蓮江和夫：爆薬の地中爆薬において地盤の粒度組成および飽和度が爆土圧特性に及ぼす影響，土木学会論文集 C, Vol64, No.2, pp.353-368, 2008.
- 9) 森下政浩，阿曾沼剛，栗木茂幸，竹本憲介，齋藤和伸，松尾啓：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，土木学会論文集 A, Vol.62, No.4, pp. 865-876, 2006.
- 10) 同上 5), Cha.5, p. 9.
- 11) Smith, P. D., and Hetherington, J. G. : Blast and Ballistic Loading of Structures, Elsevire Science Ltd., pp. 30-35, 1994.
- 12) 同上 10), pp.89-93.

(2008年9月18日 受付)