

(41) 爆発衝撃荷重を受けるコンクリート構造物のひずみ計測

The strain measurement of model reinforced concrete wall under the impact loading

緒方雄二, 佐分利 禎, 久保田士郎
Yuji Ogata, Tei Saburi and Shiro Kubota

博士(工学), (独)産業技術総合研究所 爆発安全研究コア(〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1)

Key Words: (Explosion, Impact load, Reinforced concrete, strain)

キーワード: 爆発、衝撃荷重、コンクリート、ひずみ計測

1. はじめに

近年、煙火火薬製造時の事故が多発し、事故による飛散物の影響が懸念されている。特に、爆発時の爆発影響を低減化するために設置された防爆壁は、鉄筋コンクリート製であり、十分な強度を有していない場合はコンクリート構造物が危険な飛散物となることが懸念されている。このため、現在設置されている防爆壁の爆発影響を検証する必要がある。本研究では、コンクリート製の防爆壁が設置してある火薬庫あるいは火工所で火薬類が着火燃焼(爆発)した場合の爆発影響に関するデータを取得するために、コンクリート防爆壁の模擬供試体を作成して、爆発実験を実施した。実験では、防爆壁の爆発影響を検討するために、試作した模擬防爆壁の内部の鉄筋とコンクリート表面にひずみゲージを貼り付けて、爆発時の各点のひずみ変化を計測した。実験では、実規模スケールの1/8、1/4、1/2 および1/1 スケールモデルの供試体を作成し、各種火薬類による爆発実験を実施したので報告する。

2. 実験方法

煙火火薬庫に設置してある防爆壁の安全性を確認するために、火薬類の爆発時における煙火用防爆壁の応力履歴を計測した。実験では、試作した模擬防爆壁の内部の鉄筋およびコンクリート表面にひずみゲージを貼り付けた供試体を使用した。試作した供試体は、地面の埋めた状態で設置し、所定の位置で火薬類(TNT および煙火原料4種類)を爆発させて模擬防爆壁の動ひずみを計測した。実験実施場所は、小規模な1/8 および1/4 スケールモデルの供試体では、石灰石鉱山の廃石場を利用し

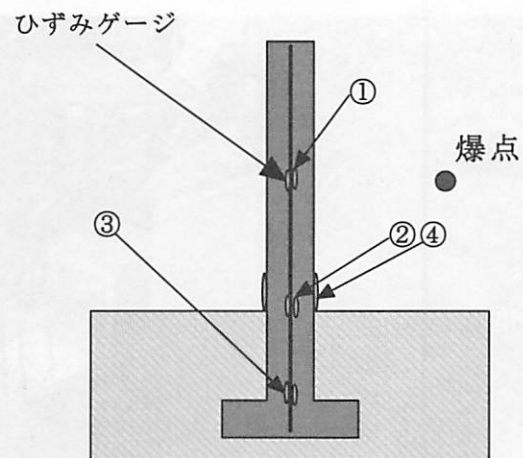


図1 ひずみゲージの設置位置

て実験した。また、1/2 スケールモデル以上の供試体の実験では、陸上自衛隊の演習場をお借りして実施した。

2.1 ひずみゲージ設置場所

試験用供試体の内部鉄筋の表面3カ所と鉄筋コンクリート表面1カ所の爆発前面と後面の2箇所に合計8枚のひずみゲージを設置した。コンクリート供試体内部のひずみゲージは、コンクリート打設前に、鉄筋の表面に貼り付けたものである。ひずみゲージの設置では、従来型モデルの防爆壁では鉄筋が1本であり、同じ部分の前面と後面に設置した。ひずみゲージの設置箇所の概略を図1に示す。①爆発地点と平行部分、②地面レベル、③基礎部上部分、④地面レベル(コンクリート表面)として、設置位置の高さは、模擬防爆壁のスケールにより



図2 鉄筋に設置した状態のひずみゲージ (打設前)

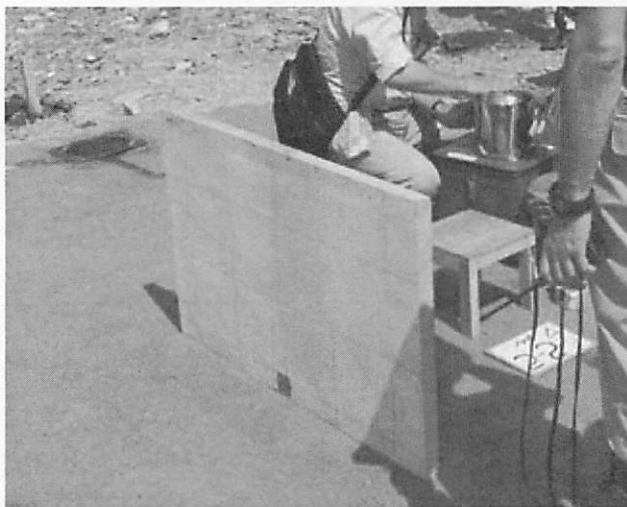


図3 設置した試験供試体(1/4 スケールモデル)

異なり、1/1 スケールモデルで、①が 100cm、②が 0cm、③が -60cm、④が 0cm となる。鉄筋の表面の設置した状態のひずみゲージを図2に示す。爆薬類は、1/1 スケールモデルで爆薬中心部が地上から高さ 100cm、防爆壁から 200cm 離れた位置に、木製の台座を作製し、設置した。

2.2 使用ひずみゲージ

実験では、2種類のゲージを使用した。防爆壁供試体内部の鉄筋には、共和電業製一軸二線、ケージ長 1mm タイプを打設前に鉄筋に設置した。コンクリート打設後にコンクリート表面には、一軸二線、ケージ長 10mm タイプのひずみゲージを貼り付けた。コンクリート内部のひずみゲージは、コンクリート打設前に、鉄筋に設置し、防水等の処置を施してある。断線等を避けるために、同

軸ケーブルを使用した。また、コンクリート表面の設置

表1 実験条件

実験 番号	火薬類	薬量	スケール	防爆壁厚
1	黒色火薬	1.25kg	1/4	38mm
2	滝剤	1.25kg	1/4	38mm
3	割薬	1.25kg	1/4	38mm
4	TNT	1.25kg	1/4	38mm
5	TNT	0.16kg	1/8	19mm
6	TNT	10kg	1/2	75mm
7	滝剤	10kg	1/2	75mm
8	割薬	10kg	1/2	75mm
9	黒色火薬	10kg	1/2	75mm
10	滝剤	10kg	1/1	150mm

したひずみゲージは、コーティング材等を用いて爆発による熱等から保護した。

2.3 計測システム

防爆壁供試体に設置したひずみゲージは、ブリッジボックスを介して、動ひずみアンプ (共和電業 CDV700A : 応答周波数 DC500 kHz、8 台) に接続し、データレコーダー (TEAC、1 台、波形計測装置: Hioki メモリーコーダー-8855 (A/D 変換): 最高サンプル 20MS/s) で計測した。ひずみ用のブリッジボックスは、プラスチック製のボックスに収納し、供試体の近くの地中に埋設して保護した。また、ブリッジボックスと動ひずみアンプ間は、100m のシールドケーブルを連結して使用した。爆点から計測室までの距離は最大でおよそ 300m 近くになった。

2.4 実験供試体

実験では、煙火防爆壁の実規模 1/8 スケール、1/4 スケール、1/2 スケールと 1/1 スケールモデル供試体を作製し実施した。1/8 スケールモデルで壁厚 19mm 高さ 25cm、1/4 スケールモデルで壁厚 38mm 高さ 50cm、1/2 スケールモデルで壁厚 75mm 高さ 100cm、1/1 スケールモデルで壁厚 150mm 高さ 200cm となる。使用する爆薬の薬量は、野外実験場の関係から 1/8 スケールで 0.16kg、1/4 スケールで 1.25kg、1/2 スケールと 1/1 スケールの薬量で 10kg として実施した。図3に 1/2 スケール供試体を実験場に設置した状況を示す。

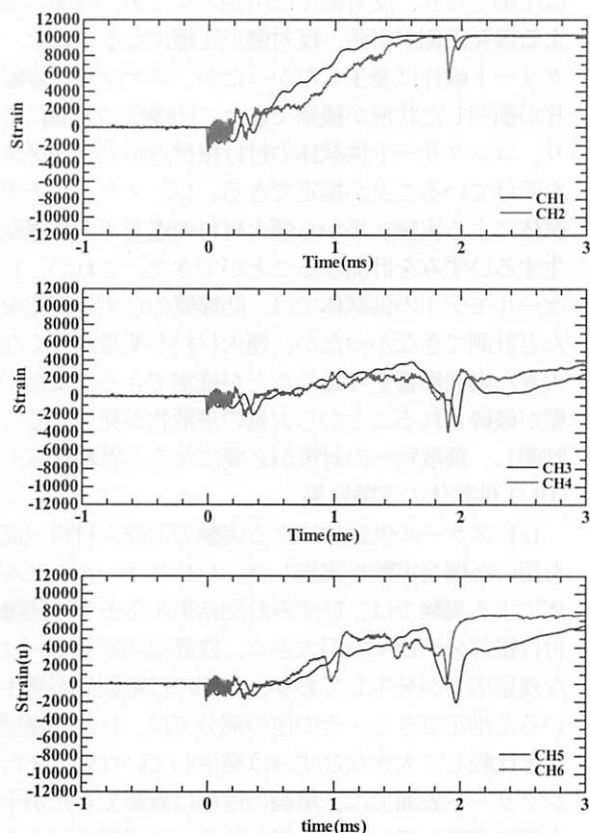


図4 ひずみ計測結果 (1/4 スケール TNT)

2.5 実験条件

実験では、煙火用防爆壁の安全性を評価するためにスケール実験として、1/8 スケールモデル1回 (TNT0.16kg)、1/4 スケールモデル4回 (煙火3種類: 黒色火薬、滝剤、割薬、基準爆薬 TNT1.25kg)、1/2 スケールモデル4回 (煙火3種類: 黒色火薬、滝剤、割薬、基準爆薬 TNT10kg) と1/1 スケールモデル1回 (滝剤 10kg) を実施した。実験条件等の概要を表1に示す。なお、使用爆薬量は、実験場の関係から最大薬量を 10kg として実施した。

3. 実験結果

①1/8 供試体の実験結果

1/8 スケールの供試体を用いた実験では、基準爆薬 TNT を用いた実験を実施した。実験後の供試体は、防爆壁の変形はほとんどなく、表面の黒い煤が付着する程度であった。ひずみ計測では、防爆壁の付け根付近の鉄筋に設置したひずみゲージから大きな引張応力が発生したことが分かる。このひずみが残留ひずみとなっていることから防爆壁内部の付け根付近には亀裂が発生していることが推定できる。また、爆源レベルの鉄筋に設置したひずみゲージでは、引張応力となった。このレベルのコンクリート表面のひずみは、爆源側が引張、反対側が圧縮になる。しかし、地表面レベルでは、大きな応力は発生し



図5 倒壊した防爆壁の状況

なかった。この実験では、TNT 薬量が 0.16g 程度であることから十分に爆轟状態に達していない可能性がある。

②1/4 供試体の実験結果

1/4 スケール供試体による実験では、基準爆薬 TNT と3種類の煙火材料 (滝剤、割薬、黒色火薬) を用いた爆発実験を実施した。

基準爆薬 TNT を用いた実験では、防爆壁の地面から約 200mm の高さで横の破断していた。防爆壁内部の鉄筋に設置したひずみゲージは、大きな引張ひずみを計測した。防爆壁内部まで亀裂が進展していることが想像できる。また、破断面付近に設置したひずみは最大となり、爆風で引き裂かれる様に破断したことが分かる。また、鉄筋の破断状況から大きな引張応力で破断したことが推定できる。防爆壁の内部の鉄筋に設置したひずみゲージの計測結果を図4に示す。

滝剤、割薬、黒色火薬の煙火火薬類による爆発実験では、防爆壁の変化もほとんどなく、防爆壁に設置したひずみゲージの変化を計測できなかった。これは、煙火材料による爆発の影響が小さいためによることが推定できるが、煙火材料の薬量が 1.25kg 程度と少量であることから十分な爆轟状態に達していないことも推定できる。

③1/2 供試体の実験結果

1/2 スケール供試体による実験では、基準爆薬 TNT と3種類の煙火材料 (滝剤、割薬、黒色火薬) を用いた爆発実験を実施した。

基準爆薬 TNT10kg を用いた実験では、爆発地点と平行部分、地面レベル及び基礎部付け根部分のコンクリート内部の鉄筋に設置したすべてのひずみゲージでは、急激な引張ひずみが観察でき、鉄筋またはケーブルが破断されると推定できる。コンクリート表面のひずみゲージでは、爆発面側ではゲージが破断しているが、反対側では圧縮となるが、ひずみゲージを設置した部分は破碎していない。また、実験後の観察から防爆壁表面全体が転倒しており、爆発面レベル付近で防爆壁モデルが破断していることを確認した。また、防爆壁後方には大量の飛散物が発生した。実験後の防爆壁の状況を図5に示す。

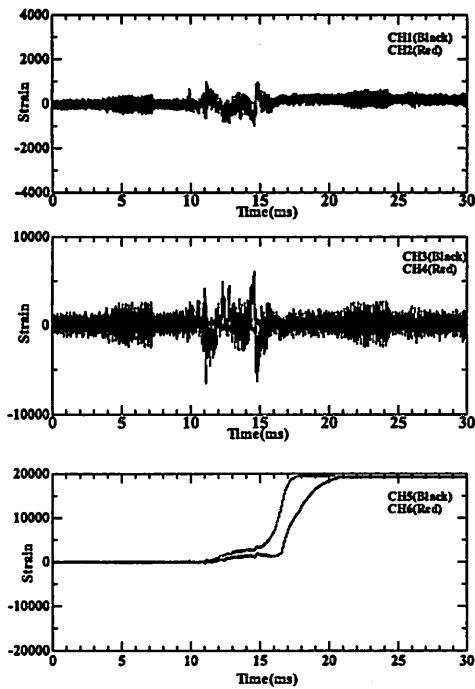


図6 ひずみ計測結果 (1/1 スケールモデル、滝剤)

煙火材料の滝剤 10kg を用いた実験では、爆発地点と平行部分のひずみゲージは、引張となり鉄筋には残留ひずみが発生した。地面レベルのひずみゲージは大きなひずみの変化は計測でなかった。基礎部付け根部分のひずみゲージでは、急激な引張ひずみが発生し、鉄筋が破断されると推定できる。また、コンクリート表面のひずみゲージでは、爆発面側ではゲージが破断しているが、反対側では圧縮となる。実験後の観察から防爆壁表面全体が大きく傾き (約 80 度程度)、表面には亀裂が発達していることを確認した。

煙火材料の割薬 10kg を用いた実験では、爆発地点と平行部分のひずみゲージは、引張となり鉄筋には残留ひずみが発生した。地面レベルのひずみゲージは大きなひずみの変化は計測でなかった。基礎部付け根部分のひずみゲージでは、大きな引張ひずみが発生し、破壊されていることが推定できる。コンクリート表面のひずみゲージでは、最初は、爆発面側では圧縮となり、反対側では引張となるが、時間の経過による爆発面側が引張、反対側が圧縮になる。表面に亀裂あり、コンクリート供試体の付け根付近が大きなダメージを受けていることが推定できる。

煙火材料の黒色火薬 10kg を用いた実験では、爆発地点と平行部分のひずみゲージは、引張となり鉄筋には残留ひずみが発生した。地面レベルのひずみゲージは引張となったが、大きなひずみの変化は計測でなかった。基礎部付け根部分のひずみゲージでは、急激に大きな引張ひずみが発生し、破壊されていることが推定できる。コンクリート表面のひずみゲージでは、最初は、爆発面側で

は圧縮となり、反対側では引張となるが、時間の経過による爆発面側が引張、反対側が圧縮になる。また、コンクリート破片は発生しなかったが、ステンレス容器の破片が衝突した状況が観察できた。防爆壁の表面に亀裂あり、コンクリート供試体の付け根付近が大きなダメージを受けていることが推定できる。1/2 スケールモデル供試体による実験結果から煙火材料の爆発でも防爆壁の発生するひずみを計測することができた。これが、1/4 スケールモデルの供試体では、防爆壁のひずみ変化をほとんど計測できなかったが、煙火材料も薬量が多くなると大きな爆発影響を与えることが推定できる。また、防爆壁が破砕されることから大量の飛散物が発生することが判明し、飛散物への対策が必要になるとと思われる。

④1/1 供試体の実験結果

1/1 スケール供試体による実験では煙火材料 (滝剤) を用いた爆発実験を実施した。1/1 スケールモデル供試体による実験では、ひずみ計測結果からモデル防爆壁の付け根部分のひずみが大きく、鉄筋は切断あるいは大きな残留応力が発生しており、内部には亀裂等が発生していると推定できる。その他の部分では、1/2 防爆壁モデルと比較して大きなひずみは発生していない。また、コンクリート表面では、亀裂の進展は確認できたが十分に内部に進展していないと思われる。防爆壁モデルの破壊はなく、破片の発生も確認できなかった。これは、使用した薬量が少なく 10kg 程度のためと思われる。1/1 スケールモデルでのひずみ計測結果を図6に示す。

4. まとめ

煙火用防爆壁の安全性を検討する実験結果から 1/4 スケールモデル (薬量 1.25kg) では、基準爆薬 TNT と比較して煙火材料ではほとんどひずみを計測できないことが明らかとなった。しかし、基準爆薬 TNT では、ひずみを計測できたが、1/8 スケールモデルでは、1/4 スケールモデルと比較してひずみ変化が少ないことから爆薬量による効果が推定できる。小さなスケールモデルでは、十分な爆発影響を評価することが困難であることを示した。また、1/2 スケールモデル (薬量 10kg) は、基準爆薬 TNT および煙火材料でひずみを計測することができた。これは、装薬量が 10kg と多く、煙火火薬類が十分な爆燃状態に達したためと思われる。煙火材料でも 10kg 程度の薬量があれば十分な反応状態になることが推定できる。

煙火火薬類が十分な反応状態になると防爆壁が破砕されることから、発生する飛散物についても十分に考慮する必要があると思われる。

謝辞

本実験は、経済産業省主催火薬類保安技術実験において実施された。関係機関に謝意を表す。