

(48) 水中線爆装置による高架橋RC橋脚モデルの衝撃破壊実験

INPACT FAILURE TESTS OF BRIDGE RC PIER MODELS
BY AN UNDERWATER WIRE EXPLOSION METHOD

園田恵一郎*, 高田直俊*, 石丸和宏**, 林道廣***, 奥田洋一***

Keiichiro SONODA, Naotoshi TAKADA, Kazuhiro ISHIMARU, Michihiro HAYASHI and Yoichi OKUDA

*工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

**工博 明石工業高等専門学校講師 都市システム工学科 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡679-3)

***大阪市立大学大学院前期博士課程 工学部土木工学科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

キーワード: 地震, 衝撃的破壊, 線爆, RC橋脚

(Earthquake, Impact failure, Wire explosion, RC pier)

1. はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震は震央が大都市近くに位置し、直下型地震として多くの人命及び社会基盤施設を奪う結果となった。この震災による構造物の被害には様々な破壊形態をもつものが見られ、なかでも従来の地震すなわち水平地震動による被害とは異なる衝撃的上下地震動[1]が原因と考えられるものが数多く見られた。そこで本実験では、上下地震動の存在なしに説明できない高架橋RC橋脚の圧縮破壊及び引張破壊に注目し、本研究室で独自に開発した水中線爆装置を用いることで衝撃波を発生させ、モデル実験による破壊現象の再現を行うことを目的として、衝撃的破壊を起こさせる入力条件の究明を行う。

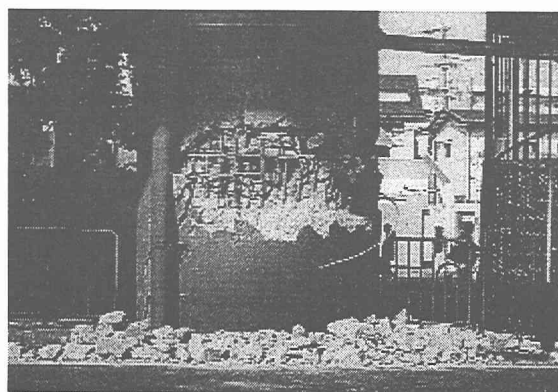


写真-1 高架橋RC橋脚の圧縮破壊

2. 実験装置

充電電圧10kV、静電容量5 μ Fの能力を持つ充電装置に蓄えられた電圧は電極棒を伝わって線爆材に伝えられる。この線爆材で電圧の放電が瞬時に起こり衝撃波が発生する。発生した衝撃波は上方へ放射状に広がり水中を伝播して供試体底面へ伝わる。また、衝撃反射板の表面は放物面に加工してあり、その放物面の焦点に線爆材が設置されているため、反射波は供試体底面へ垂直に伝えられるように設計されている。本実験では静電容量を5 μ Fに固定し、充電電圧と上載質量をパラメーターとしている。

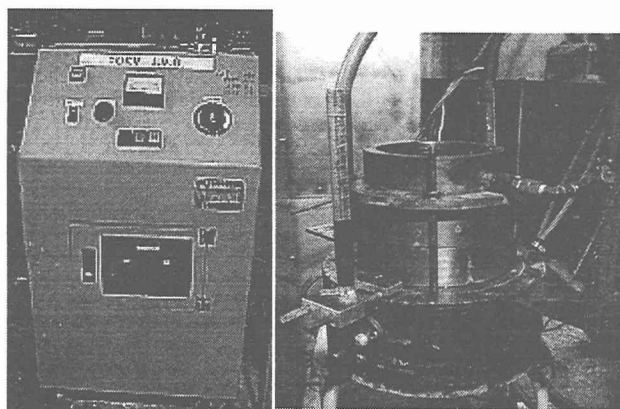


図-1 電源部及び衝撃発生部

次ページの図-2は衝撃発生部の概略図を、図-3には線爆材を示し、表-1に図-2の各構成部分

の用途について示す。

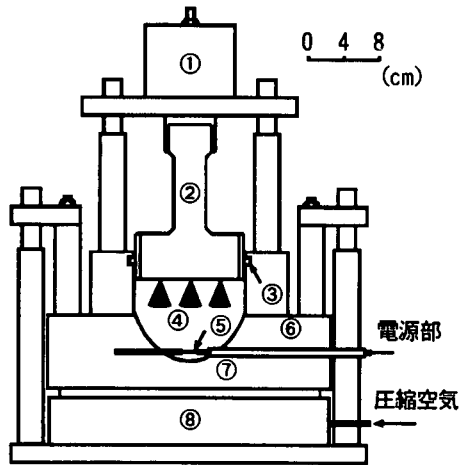


図-2 水中線爆装置詳細図

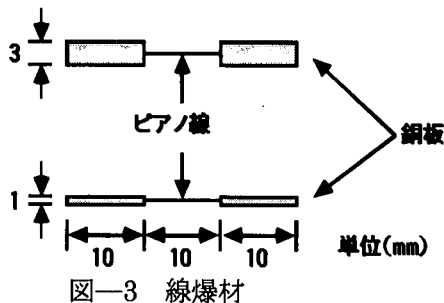


図-3 線爆材

番号	構成要素	用途
①	上載質量	0, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0kg を載荷
②	供試体	後述に記載
③	Oリング	供試体と衝撃反射板間の水を密閉
④	水	媒体として衝撃波を供試体に伝える
⑤	線爆材	直径 0.2mm, 長さ 10mm のピアノ線を使用
⑥	電極棒	電圧を線爆材に伝える
⑦	衝撃反射板	衝撃波及びその反射波も全て供試体に伝えるため放物面に加工
⑧	衝撃吸収シリンダー	衝撃波発生後の装置の跳ね上がりを防ぐ

表-1 各構成要素部分の用途

3. 高架橋RC橋脚弾性モデル実験

3.1 供試体及び測定器詳細

この実験では供試体としてアルミニウム製の高架橋RC橋脚モデルを用いる。供試体の寸法と各測定器の配置は図-4 に示すとおりとする。また、この供試体の材料特性はヤング率 $7.2 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 0.3, 単位体積重量 $2.8 \times 10^{-3} \text{kg/cm}^3$ である。

なお、測定装置の詳細については以下に示す。

①圧力計

フラッシュダイアグラム型圧力計 PWF-500

容量: 500kgf/cm^2

固有振動数: 160kHz

②ひずみゲージ

無誘導ゲージ MFLA-5・350-1LS

ゲージ長さ: 5mm , 幅: 0.5mm

③動ひずみ計

直流型ひずみ測定器 DC-92C

応答周波数: $\text{DC} \sim 100 \text{kHz}$

ローパスフィルタ: 30kHz

以上、東京測器のものを使用

④記録計

デジタルレコーダー DR-F3 (TEAC)

サンプリングタイム: 200kHz

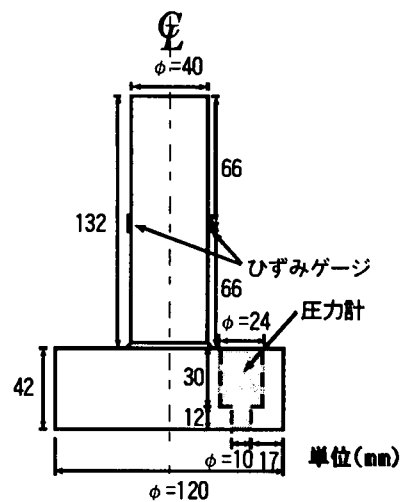


図-4 弾性供試体詳細図

3.2 実験結果及び考察

前節に示した弾性供試体モデルの底面に衝撃波を与え、圧力計により供試体底面での圧力を、ひずみゲージにより衝撃波によって発生する柱部中央の軸方向ひずみを測定した。

充電電圧		上載質量				
		0	1.0	2.5	5.0	10.0
5.0 kV	最大圧力 (kgf/cm^2)	106.1	94.9	99.5	115.4	126.9
	力積* (kgfs/cm^2)	4.3	4.9	5.6	6.1	6.8
	半周期 (sec)	105	165	210	260	245
7.5 kV	最大圧力 (kgf/cm^2)	211.8	187.3	209.5	147.0	201.2
	力積* (kgfs/cm^2)	5.7	6.6	7.9	8.2	9.1
	半周期 (sec)	90	160	205	225	250

*単位面積当たり

表-2 最大圧力, 力積, 圧縮ひずみの半周期

表-2 は測定された圧力、ひずみ波形から圧力波の伝播がほぼ終了する $200\mu\text{sec}$ までの最大圧力、圧力と持続時間の積である単位面積当たりの力積、柱部中央で最初に発生する圧縮ひずみ波形の半周期を示す。

また、測定した波形のうち一例として充電電圧 7.5kV の場合のものを以下の図-5~図-7 に示す。

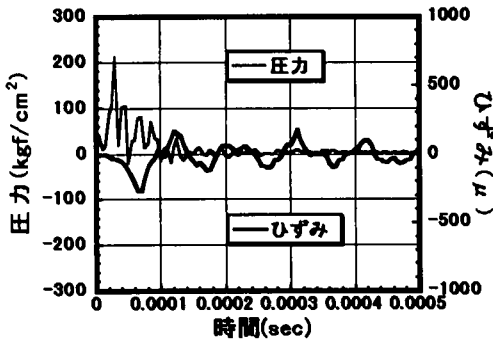


図-5 充電電圧 7.5kV 、上載質量 0kg

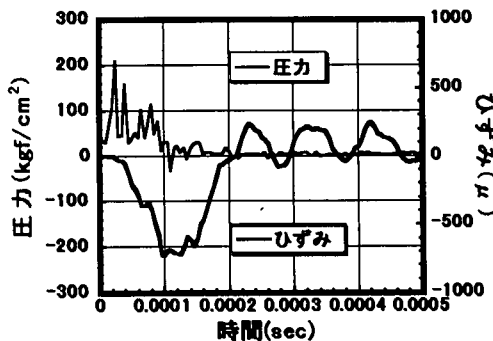


図-6 充電電圧 7.5kV 、上載質量 2.5kg

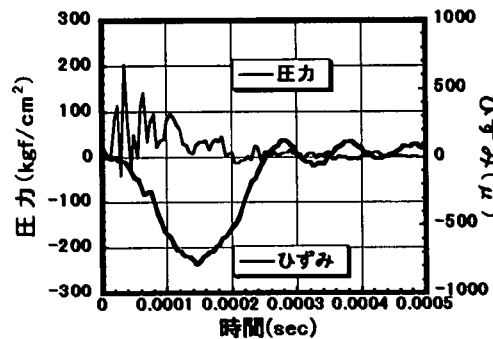


図-7 充電電圧 7.5kV 、上載質量 10kg

以上の結果から充電電圧が同じ値であれば、多少ばらつきはあるものの上載質量に関わらず最大圧力はほぼ一定であったと言える。これより、同じ充電エネルギーで放電させれば上載質量に関わらず同等の衝撃圧が供試体へ与えられると言える。

力積については上載質量に比例して値が増大していくことがわかる。これは上載質量により衝撃力に対する反力（慣性抵抗）が大きくなるためであると考えられる。

また、柱部中央の圧縮ひずみ波形の半周期については上載質量に比例して大きくなることがわかり、上載質量を変化させると供試体と上載質量を含めた系自体の振動特性が変化し、それに伴い系の固有振動数も変化するためと考えられる。さらに、このことは充電電圧が変化しても同じ上載質量の場合では、ほぼ同じ値の半周期をもつ圧縮ひずみ波形が測定できたことから確認できる。

4. 高架橋RC橋脚石膏モデル破壊実験

4.1 供試体及び測定器詳細

この実験で用いる供試体寸法及び測定器の配置については図-8 に示す。この供試体では補強材すなわち通常、RC橋脚に配置される鉄筋に代替できるものとして針金を柱部に配置することとした。また、上載質量と供試体の密着及び一体化をはかるため、図-8 に示した真鍮製キャップを用いた。なお、上載質量がごく小さい状態にするため、真鍮製キャップを取り外した供試体も新たに加えた。

また各測定装置のうち、動ひずみ計と記録計については 3.1 に示したものを用い、ひずみゲージについては以下に示すものを使用した。

①ひずみゲージ

木材・石膏用ゲージ L-20-11 東京測器
ゲージ長さ：20mm、幅：3mm

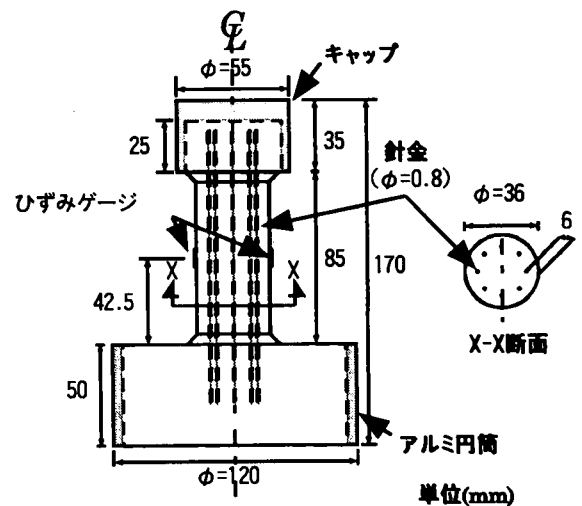


図-8 石膏供試体詳細図

4.2 材料特性

この実験では焼石膏を使用し、石膏と水の配合比及び練り混ぜ時間については数種の組み合わせで試験を行い、実験目的に見合った強度及び作業性など

を考慮した結果、石膏と水の配合比を 1 : 0.7、練り混ぜ時間を 30 秒と設定した。

4×4×16cm の供試体を 3 バッチ、計 13 体作成し、圧縮強度試験を行った結果を図-9 に示す。

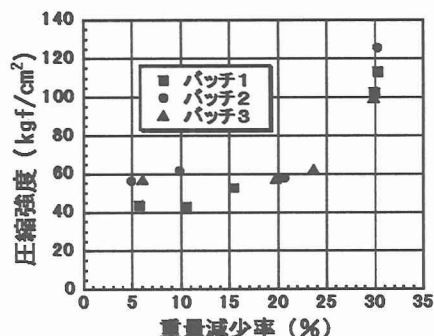


図-9 圧縮強度と重量減少率

ここで重量減少率とは、試験直前の状態において式(1)を用いて算出した値を使用している。

$$\text{重量減少率} \quad R = \frac{M_w}{M_a} \times 100 \quad (1)$$

M_w : 減少した水の質量(g)

M_a : 施工直後の供試体の質量(g)

以上、図-9 の結果から乾燥が終了するまでは水分減少の影響は強度にはほとんど現れず、養生時間の多少の違いは強度に影響しないことがわかった。

本実験では石膏という短期間で硬化する材料で供試体数を数多く作成する必要があるため、複数のバッチでの作成を行わなければならない一方で、破壊形態の再現を目的とするため、すべての供試体を同一の条件にする必要がある。そこで重量減少率が同程度の供試体は同じ材料特性をもつものであると判断することでこの問題を解決した。

図-9 から重量減少率が 6~10%の供試体の圧縮強度は 50kgf/cm²であると判断した。また、引張強度は養生期間によってほとんど変化しないことが実験からわかっており、その強度は 11kgf/cm²であった。

以上の実験結果の検討から今回使用する供試体の材料強度は表-3 に示すものとした。

重量減少率(%)	圧縮強度(kgf/cm ²)	引張強度(kgf/cm ²)	ヤング率(kgf/cm ²)	ポアソン比
6.0~10.0	50.0	11.0	4.3×10 ⁵	0.37

表-3 石膏材料強度

4.3 実験結果及び考察

弾性供試体実験の場合と同様、石膏供試体底面に線爆による衝撃波を与え、高架橋RC橋脚の圧縮破壊と水平輪切りひび割れ破壊の再現を試みた。またこの際、供試体破壊時の柱部中央の軸方向ひずみの測定も行った。

各条件での破壊モードを表-4 に示す。また表-2 に示した単位面積当たりの力積の値も併せて示す。

なお、水平輪切りひび割れ破壊は破壊モードとしては引張破壊として表現した。

充電電圧		上載質量(kg)					
		なし	0	1.0	2.5	5.0	10.0
5.0 kV	破壊モード	変化なし	引張破壊	引張破壊	引張破壊	引張破壊	引張破壊
	最大圧縮ひずみ(μ)	1.0 × 10 ³	2.9 × 10 ³	4.5 × 10 ³	4.2 × 10 ³	5.6 × 10 ³	4.0 × 10 ³
	力積(kgfs/cm ²)	/	4.3 × 10 ⁻³	4.9 × 10 ⁻³	5.6 × 10 ⁻³	6.1 × 10 ⁻³	6.8 × 10 ⁻³
7.5 kV	破壊モード	引張破壊	引張破壊	引張破壊	引張破壊	圧縮破壊	圧縮破壊
	最大圧縮ひずみ(μ)	1.7 × 10 ³	2.7 × 10 ³	4.8 × 10 ³	4.0 × 10 ³	5.9 × 10 ³	6.4 × 10 ³
	力積(kgfs/cm ²)	/	5.7 × 10 ⁻³	6.6 × 10 ⁻³	7.9 × 10 ⁻³	8.2 × 10 ⁻³	9.1 × 10 ⁻³

表-4 破壊モード及び力積

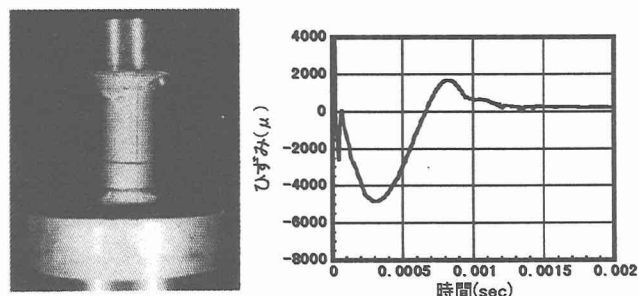


図-10 充電電圧 7.5kV, 上載質量 1.0kg

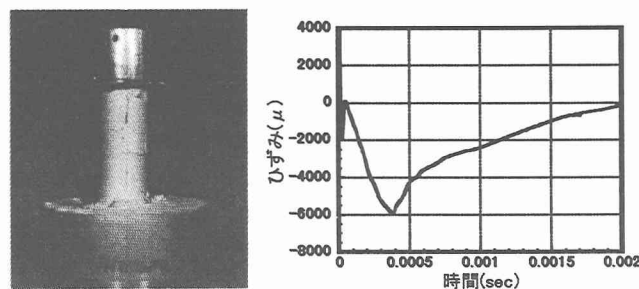


図-11 充電電圧 7.5kV, 上載質量 5kg

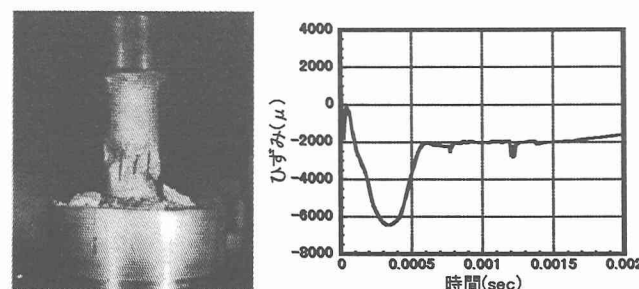


図-12 充電電圧 7.5kV, 上載質量 10kg

また実験終了後の破壊形態として、充電電圧 7.5kV の場合の圧縮破壊及び引張破壊モードの一部とその各々の実験を行った際に測定された柱部中央の軸方向ひずみ波形を併せて図-10～図-12 に示す。

以上実験結果から、引張破壊モードが認められた場合では最大圧縮ひずみが 1700～5600 μ 、最大引張ひずみが 1300～2900 μ に達していた。しかし、最初の大い圧縮波では破壊を起こさずに、次の引張波により破壊を起こす結果となった。

また圧縮破壊モードが認められた場合は最大圧縮ひずみは 5900～6400 μ に達しており、これらのひずみ値は静的弾性応力に換算すると 260～290kgf/cm²に相当する。

以上のことから石膏供試体を衝撃破壊させるためには、静的破壊時と比べて引張破壊ひずみ、ならびに圧縮破壊ひずみともに静的破壊時と比べて約5倍以上のひずみ発生を必要とすることがわかり、ひずみ速度効果が顕著に現れた結果と考えられる。

また、表-4 が示すように力積の値の大小によって破壊モードが説明できる結果となった。

5. 遠心場における高架橋RC橋脚石膏モデル破壊実験

4. に示した実験は重力場における破壊実験であったが、ここでは実橋脚での自重の影響を考慮するため遠心加速度装置を用い、実験の際に供試体に一例として 50G の重力を与えることで実験後の破壊形態の比較を行った。

5.1 実験結果及び考察

遠心場での破壊形態の一部を同条件における重力場での破壊形態と併せて図-13 及び図-14 に示す。

図-13 においては遠心場においても重力場と同形状の水平輪切りひび割れ破壊が得られるという結果となった。また、図-14 においては同じ圧縮破壊を呈したものの、その破壊形状には大きな差が生じる結果となった。これは遠心場における圧縮破壊は重力場の場合と同様に生じたが、その破壊後 50 倍に増大された上載質量を含む供試体の自重応力による影響のためクラックが拡大し、石膏の剥離及び鉄筋の座屈が起こったものと考えられる。

以上から、破壊形態の決定要素として自重応力の影響は含まれず、最終的な破壊形態の違いは供試体と上載質量をあわせた振動系の固有周期の違いによ

るものと考えられる。

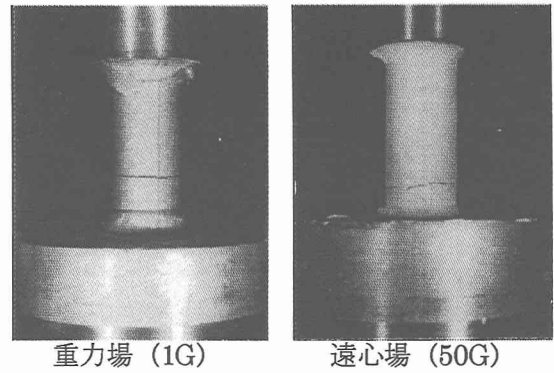


図-13 充電電圧 7.5kV, 上載質量 1kg

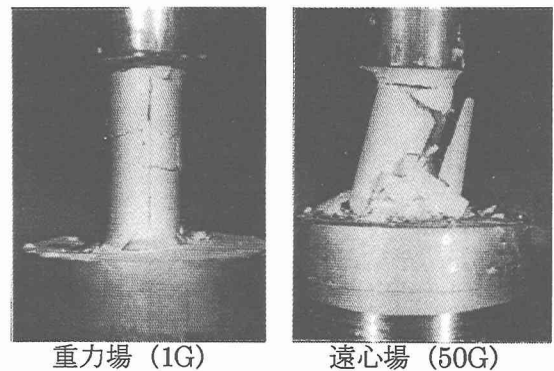


図-14 充電電圧 7.5kV, 上載質量 5kg

6. まとめ

- ①兵庫県南部地震で観察された破壊形態とほぼ同じものを再現できた。
- ②破壊形態と圧力波形データから求めた力積値との関連性が認められた。
- ③石膏供試体を衝撃破壊させるには、引張破壊ひずみ、圧縮破壊ひずみともに静的破壊時と比べて約5倍以上必要となることが判明し、ひずみ速度効果が大きいことが確認できた。
- ④遠心場において供試体に衝撃力を与えるとき、破壊形態の決定要素は供試体と上載質量をあわせた慣性系の固有周期に関するものであり、自重応力による影響は破壊条件より破壊後の規模に関係していると言える。

以上より、上下地震動によって発生する衝撃波は構造物の破壊を引き起こす可能性を多分にもっていることが確認でき、兵庫県南部地震における衝撃的上下動による構造物破壊の可能性を指摘することができた。

参考文献

- [1] 園田恵一郎, 小林治俊他: 兵庫県南部地震—初

期上下動の証言について，大阪市立大学工学部
紀要・震災特別号，pp.187-278，1997.1.

[2] 園田恵一郎，高田直俊他：衝撃電圧発生装置を用いた高架橋橋脚モデルの破壊実験，土木学会構造工学委員会，衝撃問題研究小委員会資料，pp.1-13，1997.11.4.

[3] K Sonoda, N Takada, and H Kobayashi :
Impact Failure Tests of Bridge RC Pier Models
by an Underwater Explosion Method,
Proceeding of the 2nd Asia-Pacific Conference
on Shock & Impact Loads on Structures,
pp.515-522,1997.11.