

「大型灯器等の免震装置の研究」

研究期間 平成11年度～平成12年度（2年計画）
研究機関 海上保安試験研究センター技術第三課
研究者 西本 精一

I 研究の目的

中・大規模地震による振動の影響で、大型レンズの損傷・水銀の溢出に起因する水銀槽式灯器の回転停止・消灯事故等を未然に防止するため、平成10年度「大型灯等の地震対策についての調査」を行い、機器の免震方法としてコサインレール支承による免震装置（以下CRS免震装置という。）が有効であるとの結論を得、実用化の目途をつけた。

これを受け、本研究は

- (1) 四等レンズ用CRS免震装置の製造・性能試験
- (2) 三等（大型）レンズ用CRS免震装置の製造・性能試験
- (3) 水銀槽特性試験
- (4) 一・二等各レンズ用免震装置の有効性の検討を行うものである。

このうち、(2)三等（大型）レンズ用CRS免震装置の製造・性能試験について報告する。

II 研究の内容

1 方法

(1) 三等（大型）レンズ用CRS免震装置の検討

免震装置の効果を検討するにあたり、まず日立灯台のモデル化を行い、地震応答解析により灯室床の応答を求めた。

つぎに、灯室床の応答波を用いた地震応答解析により、免震装置上に水銀槽およびレンズを設置した場合の免震効果を検討することとした。

日立灯台の全景を写真1に、立面形状を図1に示す。



写真1 日立灯台全景

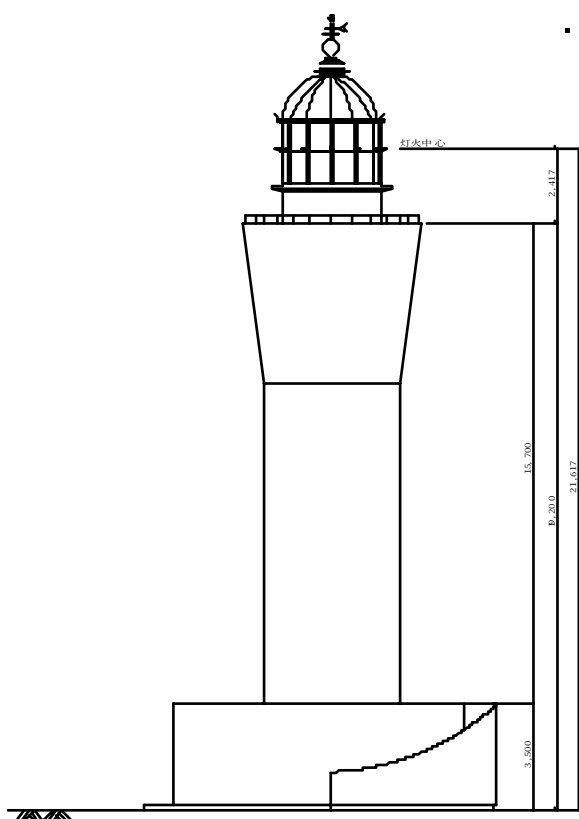


図1 日立灯台立面図

(2) 灯台の解析モデル

地震発生時には、灯台の基礎部分に入力した地震波が、構造体によって増幅され灯室内に作用することになり、免震効果検討には重要となる。

本検討では、灯台の特性をその形状から仮定し、基礎のスエイロッキングを考慮した7質点等価せん断モデルとした。

日立灯台は、下部に電池室、制御室の付属舎を有する円筒形構造物である。現地調査の結果、灯台の形状に断面図との差異は認められなかったことから、この断面図をもとに解析モデルを作成した。モデルの作成にあたり、下部の付属舎については重量および回転慣性モーメントのみを考慮し、水平力の抵抗要素は円筒部分のみとした。構造物の減衰は振動数比例型の内部粘性減衰とし、減衰定数は基礎を固定した場合の一次円固有振動数に対して1%とした。

(3) 地盤の解析モデル

イ 地盤の特性

灯台の周囲には硬質と見られる岩の露出もあるが、その上部には比較的軟質の土が覆っている。灯台の断面図によると、地上から基礎下部までは3.5mあり、灯台はこの軟質土上に立地していると考えられる。

ロ バネ特性

灯台の基礎部分は、3m程度の土かぶりがある。レンズ設置部の地震応答を求めるに際して、この土かぶりについては無視することとした。

地盤のバネ特性ならびに減衰特性の算定にあたり、基礎盤の設置応力は均等に分布すると仮定した。

また、基礎の形状は正方形であるが、等価な円形形状として算定した。

(4) 水銀槽・レンズの解析モデル

図面により水銀槽各部分の体積を求めて、水銀槽・レンズの重量を3,281Kgとした。

水銀槽およびレンズのモデル化では、水銀に浮かぶ部分と、その他の部分とに分けてせん断バネでつなぐ2質点せん断モデルとした。せん断バネのバネ特性および減衰特性は、観音崎灯台での水銀槽の特性測定結果を参考にした。

(5) 免震装置の概要

免震装置の設置位置を図2に、形状を図3に示す。免震装置の平面形状は780mm角、高さは400mmとし、十分な免震効果を得るために変位形可能長さを270mmとした。

免震装置の形状に比べ、免震対象物が高重心であるため、装置に引張力が作用した際にも安全に作動させるため、転倒防止機構を設けた。

本検討では、水銀槽・レンズの重量を図面から計算により求めている。そのため実機とは若干の誤差を生じていることが想定される。良好な免震効果を得るためには、水銀槽・レンズの重量を正確に把握する必要があるが、この装置は復元力が水銀槽・レンズの重量に比例するため、設定した重量の誤差が装置の特性に及ぼす影響はない。

また、減衰装置には、減衰特性が可変タイプの回転型粘性ダンパーを用いることにより、適切な減衰力を設定することが可能である。

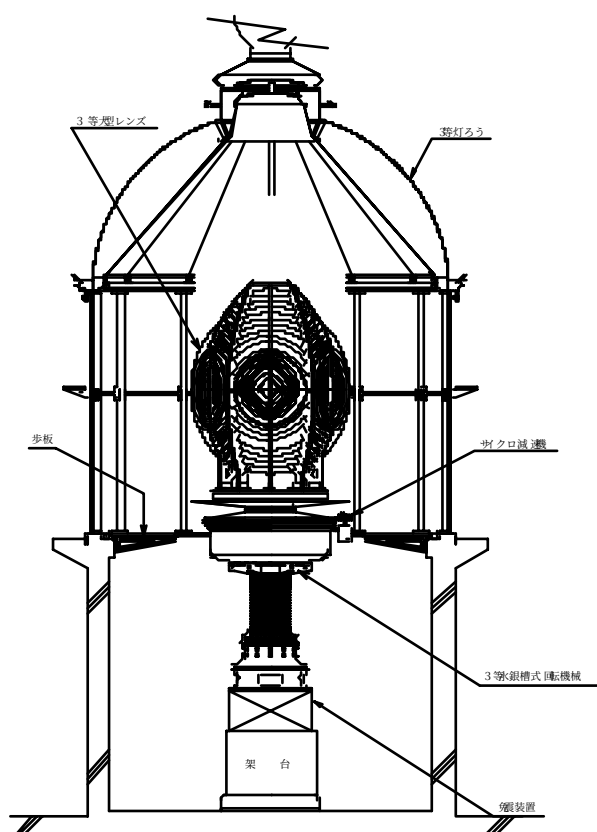


図2 免震装置設置位置

(6) 地震応答解析結果

灯室床位置での応答加速度および応答変位の最大値一覧を表1に示す。

灯室床位置である第6質点での応答加速度の最大値は、入力波の最大値のほぼ2倍となっていた。

(7) 免震効果の検討

免震装置を設置した場合における、応答解析結果の一覧を表2に示す。

免震装置設計にあたり、免震性能を以下のように設定した。

- ・免震装置上での最大応答加速度 90cm/sec²
- ・免震装置の最大応答変位 27cm

いずれの地震動においても、免震装置はその効果を十分に発揮して、装置上部の加速度は装置に入力する加速度の1/10程度にまで減少させ、目標とした応答加速度ならびに応答変位を下回る値となっている。

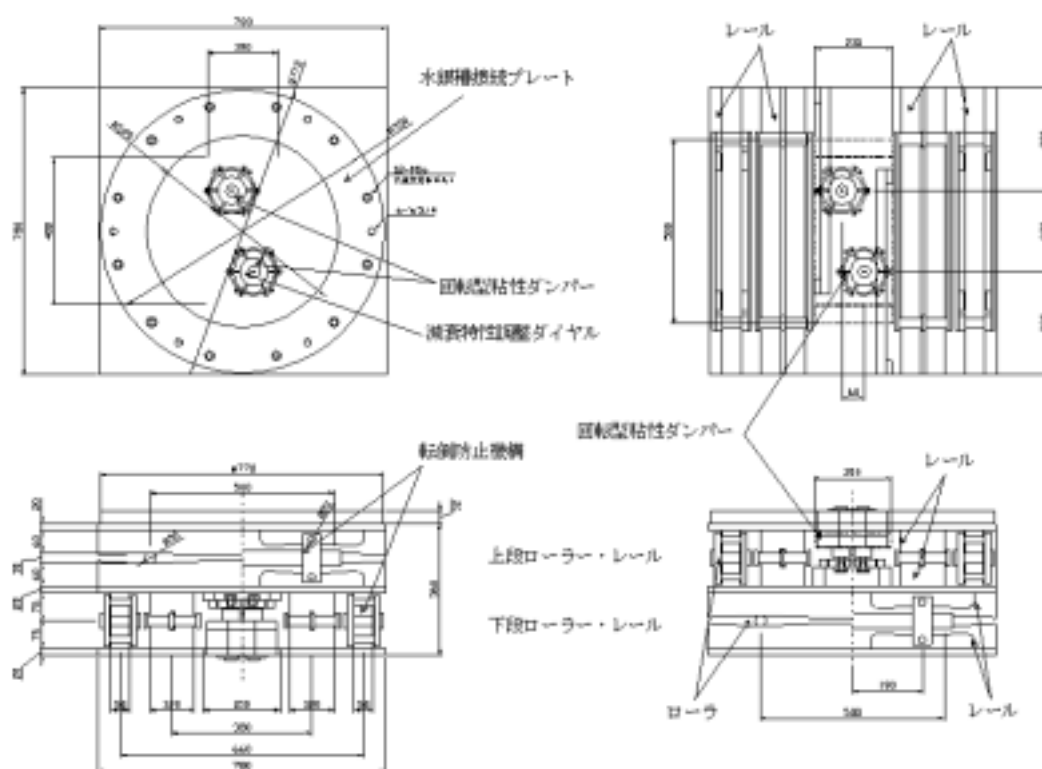


図3 免震装置の形状

表 1 応答加速度および応答変位の最大値一覧

入力波	入力加速度	応答加速度	応答変位
EL CENTRO 1940 NS	510.8cm/sec ²	977.9cm/sec ²	5.67cm

表 2 応答加速度及びおおよび応答変位の最大値一覧

基礎加速度	灯室加速度	応答加速度	応答変位
510.8cm/sec ²	977.9cm/sec ²	84.1cm/sec ²	22.17cm
入力波		応答倍率	免震効率
EL CENTRO 1940 NS		1.9	1/12

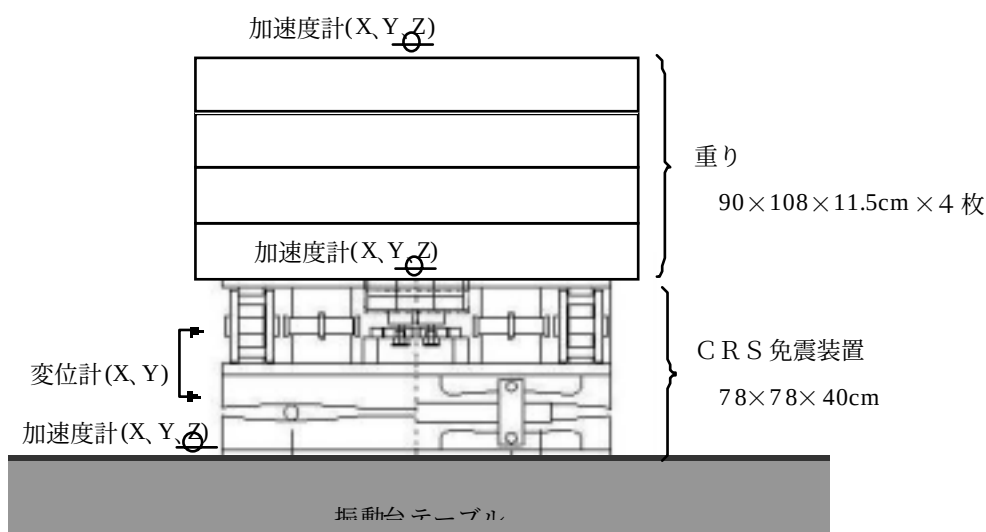


図 4 振動台試験の試験体概要

(8) 製造

基本仕様を表 3 に示す。

表 3 基本仕様

装置形状	800×800×400mm 以下
負荷荷重	3.2tf
免震性能	基礎入力加速度510.8cm/sec ² (EL CEN TR01940 NS)に対し応答加速度1／10以上、最大変位20cm以下
摩擦抵抗力	1／100以下
主要材質	SUS304

(9) 免震装置性能試験

免震装置の上に灯台レンズの重量をほぼ模擬した3.5tfの負荷（剛体）を設置し、回転ダンパーの抵抗力

をpot=8（最大抵抗力pot=10の約70％）に設定した。

計測器としては、加速度計が振動台上、免震装置直上、負荷上に各3成分（X、Y、Z）、変位計は装置上下段それぞれの方向に設置した。

試験体の概要を計測器の配置とあわせて図 4 に示す。

性能試験は、(株)奥村組技術研究所（茨城県つくば市）所有の振動台を使用して行った。

試験は、設計用入力地震動の振幅を設計値の1/3倍、2/3倍、1倍とし、装置の上下段方向（X、Y方向）に同じ地震動を同時に入力した。

振動台試験の実施状況を写真 2 に示す。



写真2 振動台試験実施状況

上下段ともに免震装置上の応答加速度は入力加速度

(灯室床)の1/10以下に低減されており、十分な免震効果を発揮することが確認された。また、装置の最大変位は15cm以下に収まっている。

図5には、加振ケースのシミュレーション解析結果を実験値と比較して示している。

解析に用いた装置特性としては、上下段とも摩擦係数は0.0015一定、回転ダンパーの抵抗力 Q は $\text{pot}=8$ に調整した場合の特性として相対速度 $V(\text{cm/s})$ に対して $Q=22.1V^{0.35}(\text{kgf})$ とした。解析結果は試験結果の応答を十分模擬しており、検討に用いた免震装置の解析モデルと諸特性が妥当であったことが示された。

表4に最大応答値一覧を示す。

表4 性能試験における最大応答値一覧

EL CENTRO 1940 NS	1/3倍(326.0 cm/sec ²)		2/3倍(651.9 cm/sec ²)	
	X(下段)	Y(上段)	X(下段)	Y(上段)
入力地震動	342.3	388.8	653.8	743.2
装置上応答加速度	27.5	31.5	43.4	52.3
免震効率	1/12	1/12	1/15	1/14
装置相対変位	5.2	5.0	10.7	10.9
EL CENTRO 1940 NS	1倍(977.9 cm/sec ²)			
	X(下段)	Y(上段)		
入力地震動	964.0	1,082.4		
装置上応答加速度	57.5	56.3		
免震効率	1/17	1/18		
装置相対変位	14.5	14.6		

※単位：入力地震動と装置上応答加速度はcm/sec²、装置相対変位はcm

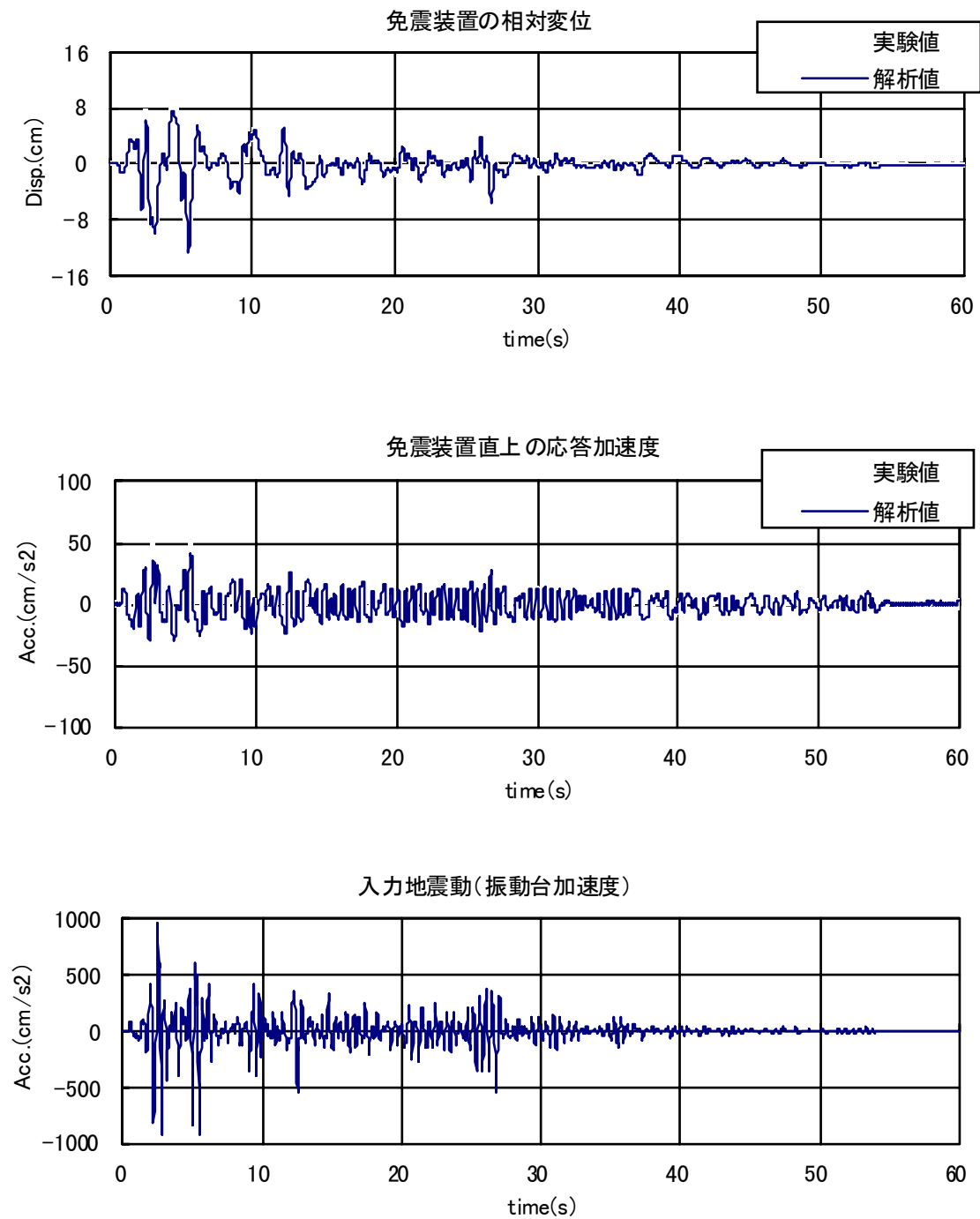


図5 EL CENTRO 1960 NS 床応答波1倍入力の試験結果と解析結果

本試験は、上部を剛体としていること、振動台の加振能力に制約があり地震動が完全には再現されないことから、設計時の地震応答解析で得られた免震性どおりであることを直接確認することはできないが、試験結果として以下のことが明らかとなった。

- ・地震動に対して、免震装置は上下段とも要求性能どおり正常に作動した。
- ・設計で用いた地震応答解析モデルは、実物の地震時挙動を精度良く模擬することができた。

III むすび

(1) 水銀槽の水銀溢出及びレンズの破損防止対策として、航路標識機器用免震装置導入の試みは、「平成10年度大型灯器等の地震対策についての調査」に始まり、本研究へとつながった。

当初、水銀溢出の発生可能震度を、過去の事故歴から震度3と震度4の境界として、これに相当する加速度25cm/sec²の地震動が灯塔基礎部に加わった場合の灯室床応答加速度を観音埼灯台をモデルに90cm/sec²と想定し、これを免震装置の目標性能とした。

振動台による性能試験は、レンズ・水銀槽の疑似負荷を剛体としていること、振動台の加振能力に制約があり地震動が完全には再現されないことから、設計時の地震応答解析で得られた免震性能どおりであることを直接確認することはできないが、試験結果として観音埼灯台をモデルにした四等レンズ用CRS 免震装置、日立灯台に設置を前提とした三等（大型）レンズ用CRS 免震装置は、十分にその機能を果たしていることを立証した。

性能試験結果の一例を示す。

	三等レンズ用	四等レンズ用
入力加速度	1,082.4cm/sec ²	1,468.2cm/sec ²
装置応答加速度	56.3cm/sec ²	65.6cm/sec ²
免震効率	1/18	1/21
装置応答変位	14.6cm	13.3cm

(2) 今回行った四等水銀槽の振動台試験で、明らかな水銀溢出現象が認められたのは入力（灯室床部）加速度450cm/sec²時であったことから、安全率を考慮し水銀槽応答を300cm/sec²程度に押さえれば、水銀の溢出事故を防ぐことが可能である。

灯台の立地している地盤種類、灯塔構造等により灯室床の地震動に対する応答はそれぞれ異なるが、今後免震装置を整備する場合、免震装置の要求性能は、灯塔基礎部入力加速度に対する免震効率1/6、免震装置応答変位10cm程度で十分機能すると思料される。