

本州四国連絡橋橋脚地盤系の耐震実験

本州四国連絡橋公団 正員 吉田 巖

建設省土木研究所 正員 ○ 栗林栄一, 岩崎敏男, 若林 進, 福田富三

まえがき

本州四国連絡橋の下部構造として計画されている規模の多柱基礎とケーソン基礎の模型による耐震実験の結果について報告する。

1. 実験の目的ならびに概要

計画中の本州四国連絡橋のうち、中央径間 1,100m 級の吊橋の主塔・橋脚・地盤系をとりだして、模型を製作し、大型振動台による耐震実験を行ない、固有振動の特性を得ようとした。なお、実験は、次の期間に行なった。

予備実験：昭和46年7月～11月（土木研究所千葉支所）

本実験：昭和46年12月（防災センター耐震実験室）

追加実験：昭和47年1月（土木研究所千葉支所）

2. 対象とした原型

対象とした原型は、Dルートの三ツ子島－沙弥島間に計画されている中央径間 1,100m の南備讃瀬戸大橋（道路・鉄道併用橋）である。この地点は、最大水深約 40m、基礎地盤は風化花崗岩である。この実験で対象とする橋脚の構造としては、ケーソン基礎ならびに多柱基礎の2種を考えた。図-1は、両橋脚の概略寸法、および主塔の概略を示したものである。対象地点の基礎地盤は、ヤング係数：300,000t/m²、層厚 75m の一様な弾性体であると仮定した。

3. 実験

実験は、大別して静的実験と振動実験の2種を実施した。静的実験は、地盤模型として用いたゴム材料の物性試験と各種模型（ゴム地盤、ケーソン基礎、多柱基礎ならびに主塔）に対する載荷試験とからなる。振動実験では、下記の8ケースを対象として、正弦波・ランダム波による振動特性実験ならびに下記のうちケース 3, 7, 8 をのぞく 5 ケースを対象として実地震波による地震応答実験を行なった。

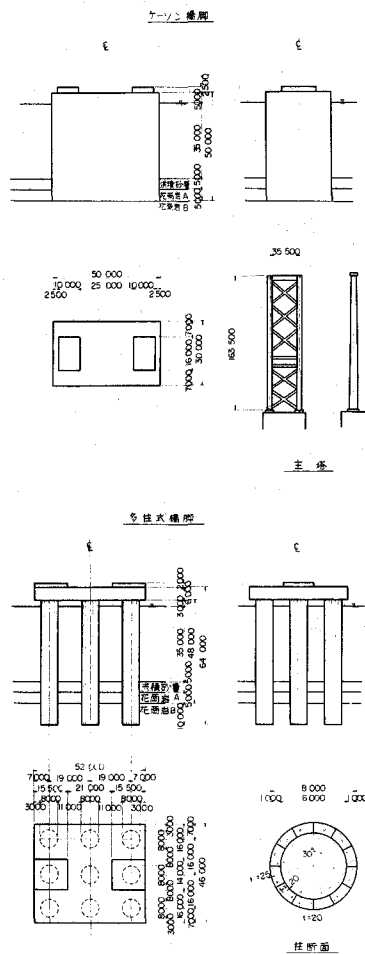


図-1 実験の対象とした原型

- ケース1 地盤
- ケース2 地盤+ケーソン(地盤上に固定) (橋軸方向)
- ケース3 地盤+ケーソン(地盤上に自由設置) (")
- ケース4 地盤+多柱 (")
- ケース5 地盤+ケーソン(固定)+主塔 (")
- ケース6 地盤+多柱+主塔 (")
- ケース7 地盤+ケーソン+主塔 (橋軸直角方向)
- ケース8 地盤+多柱+主塔 (")

振動実験における計測装置としては、抵抗線式加速度計、光学式変位計、16ミリ撮影機等を用いた。振動台は、防災センター大型耐震実験装置(筑波学園都市)を、予備および追加実験では土木研究所電磁式振動台を用いた。

4. 相似律

吊橋の主塔・橋脚・地盤系をとりだして、模型耐震実験を行なったのであるが、原型と模型との間の力学的関係である相似則は、構造各部が弾性体であるとの前提のもとに設定された。相似則の決定に際しては、振動台の規模と性能、用いるべき模型材料の力学的性質、振動計測装置の性能等を総合的に考慮した。基本的な縮少率として、長さを1/100、時間を1/5、密度を1/2に設定した。他の物理量の縮少率はバッキンガムの π 定理から容易に定めることができる。

5. 模型の設計

模型の材料・諸元は、上記の相似則に従い、決定した。まず地盤材料として、各種の材料を検討した結果、硬度50のゴムを用いることとし、厚さ5cm×1m×1mのゴム板135枚を接着することによって、厚さ75cm×3m×3mの模型地盤を製作した。ケーソン基礎は剛体と考え、躯体重量および橋脚基部まわりの回転慣性を考慮して、アルミニウム材を主体として、ケーソン基礎の模型を製作した。このケーソン模型には、回転慣性がある程度調節できるよう、鉛直方向に移動可能な分銅をとりつけた。多柱基礎については、全体としての固有周期が相似則を満足するよう、柱部の重量、曲げ剛性、地盤接地点の柱断面積ならびに頂版の重量等を決定し、鋼材を用いて、模型を製作した。

6. 静的実験の結果

ゴム材料の物性試験

地盤模型として用いたゴム(硬度50度)について、各種の物性試験を実施した。試験項目ならびに試験結果の概要は以下の通りである。

- 比重測定 単位重量 $\gamma = 1.44 \text{ t/m}^3$
- 静的弾性係数測定(アムスラー試験機による圧縮試験、歪の大きさは約2%)
 - 弾性係数 $E = 30.3 \text{ Kg/cm}^2$
 - せん断弾性係数 $G = 10.1 \text{ Kg/cm}^2$ (ポアソン比0.5と仮定)
- 動的弾性係数測定(MT型防振ゴム振動試験機使用)
 - 動的倍率 $\beta = 1.10$ (動弾性係数 $E_d = 33.4 \text{ Kg/cm}^2$)

$f=500\text{ cpm}$, $a=\pm 1\text{ mm}$ のとき

動的倍率 $\beta=1.18$ (動弾性係数 $E_d=35.8\text{ Kg/cm}^2$)

$f=1000\text{ cpm}$, $a=\pm 3\text{ mm}$ のとき

- 定歪速度載荷試験 (インストロンフローア-TT-DM 使用) による弾性係数の測定

この試験の結果から歪の大きさによって弾性係数が、かなり変化すること、小さい歪 (0.1 % 位) では、大きい歪の場合の数倍に弾性係数が大きくなることが判明した。一方、温度変化の影響は 20°C から 0°C に低下させると弾性係数が約 10% 上昇する程度である。

ゴム地盤に対する平板載荷試験

直径 22.5 cm (一部、直径 30 cm を使用) の載荷板を用いて、鉛直載荷試験を行ない、試験結果と Boussinesq の式から弾性係数、地盤反力係数等を算出した。結果の平均値は、

静弾性係数 $E=88.3\text{ Kg/cm}^2$, せん断弾性係数 $G=29.4\text{ Kg/cm}^2$, 地盤反力係数 $k=7.0\text{ Kg/cm}^2$ となった。振動実験時における、ゴム地盤の変形の定数は、上記に近いものであり、これは物性試験において、歪が 0.1% 程度の場合の値に相当している。

ケーソン基礎および多柱基礎に対する載荷試験

ゴム地盤上に固定されたケーソン基礎に対して、水平引張試験を行ない、回転ばね係数とせん断ばね係数とを求めた。これから得られた実験値は計算式によって得られた値と、ほぼ一致した。つぎに多柱基礎に関しては、下部を完全固定した場合と、ゴム地盤上に固定した場合について、水平引張試験を行ない、水平ばね係数を求めた。両者の試験結果を比較すると、ケーソン基礎の剛度が、多柱基礎に比して、かなり高くなっている。

主塔載荷実験

主塔基部を完全固定して、橋軸方向・橋軸直角方向について、水平載荷試験を行ない、主塔の剛性を確認した。

7. 振動実験の結果

振動特性実験

前述の 8 ケースの各々につき、次の 3 種の実験を行なった。

- 正弦波強制実験 共振曲線、固有振動数、減衰、固有振動モード
- 自由振動実験 固有振動数、減衰、固有振動モード
- ランダム波実験 振動特性

これから得られた結果をとりまとめて、表-1 に示す。また固有振動モードの例を、図-2、図-3 に示してある。

地震応答実験

5 ケースについては、El Centro 地震波および十勝沖地震波 (八戸) を入力として、地震応答実験を行なった。このさい、時間軸は相似則に従って、 $1/5$ に縮小し、加速度はその最大値が 50 gal 程度および 100 gal 程度の 2 種について、実験した。

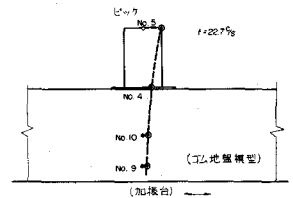


図-2 ケーソン基礎の共振時モード (橋軸方向)

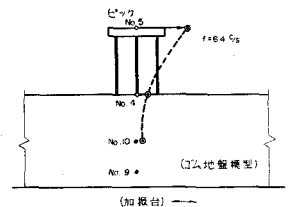


図-3 多柱基礎の共振時モード

表-1 共振曲線からの固有振動数，減衰定数，自由減衰からの対数減衰率

実験対象	種別	供試体名					実験対象	種別	供試体名					
		地盤	ケーソン基礎	多柱基礎	主塔				地盤	ケーソン基礎	多柱基礎	主塔		
					1次	2次						1次	2次	
地盤のみ	固有振動数(c/s)	16.4					地盤+ケーソン+主塔 (橋軸)	固有振動数(c/s)	15.6					
	共振曲線 対数減衰率	0.496						共振曲線 対数減衰率	0.703			0.015	0.014	
	より 減衰定数	0.079						より 減衰定数	0.112				0.023	
	自由減衰 対数減衰率	0.32						自由減衰 対数減衰率	0.273	0.232				
	より 減衰定数	0.05						より 減衰定数						
地盤+ケーソン (橋軸)	固有振動数(c/s)	15.9	25.3				地盤+多柱+主塔 (橋軸)	固有振動数(c/s)	14.4		5.9 (6.3)	0.9	5.85 (7.3)	
	共振曲線 対数減衰率	0.477	0.521					共振曲線 対数減衰率	0.540		0.106			
	より 減衰定数	0.076	0.083					より 減衰定数	0.086		0.017			
	自由減衰 対数減衰率							自由減衰 対数減衰率			0.125			
	より 減衰定数							より 減衰定数			0.020			
地盤+ケーソン (ケーソン底面ブリー) (橋軸)	固有振動数(c/s)	14.3					地盤+ケーソン+主塔 (橋軸直角)	固有振動数(c/s)	15.13			3.85	14.8	
	共振曲線 対数減衰率	0.207	0.496					共振曲線 対数減衰率	0.477	0.521				
	より 減衰定数	0.033	0.079					より 減衰定数	0.076	0.083		0.054 0.015		
	自由減衰 対数減衰率							自由減衰 対数減衰率						
	より 減衰定数							より 減衰定数						
地盤+多柱 (橋軸)	固有振動数(c/s)	16.7		6.4			地盤+多柱+主塔 (橋軸直角)	固有振動数(c/s)	15.6		7.3			
	共振曲線 対数減衰率	0.389		0.188				共振曲線 対数減衰率	0.502		0.307			
	より 減衰定数	0.062		0.030				より 減衰定数	0.080		0.049	0.045 0.020		
	自由減衰 対数減衰率			0.123				自由減衰 対数減衰率						
	より 減衰定数			0.020				より 減衰定数						

8. 考 察

以上，大型耐震実験装置を用いた吊橋下部構造の模型耐震実験について紹介した。地盤をゴム材料で模型化する試みは一応の成果をあげ得たものと考えられる。模型製作においては，地盤材料の選択が重要であり，特に実験時の条件を考慮して，材料の吟味を行なう必要がある。また基礎と地盤との固定方法についても，再考を要する点がある。

今後さらに，この実験結果を詳細に検討すると共に，地震応答計算など，各種の理論計算を行なうことにより，基礎構造の耐震設計法を吟味することができるであろう。

今回の実験では，多柱基礎に比べて，ケーソン基礎の剛度が高い結果を得たが，将来の実験計画として，地盤が比較的軟質の場合の各種下部構造の動的挙動を調査する必要がある。さらに，地盤と構造物の非線型挙動，地盤の質量効果等の問題も，この種の実験によって解決をはかっていくべき重要な課題と考えられる。

参 考 文 献

本州四国連絡橋の設計施工に関する研究報告，土木研究所資料第738号，
昭和47年3月，建設省土木研究所