

米國大橋梁の振動測定報告

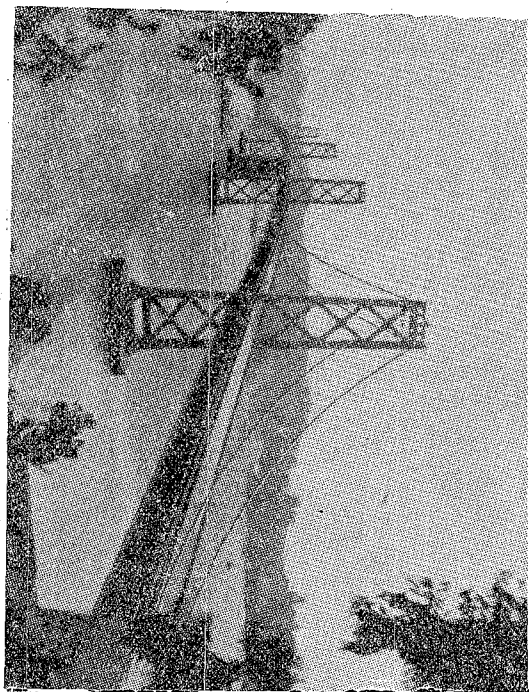
永 富 勘 四 郎 譯

San Francisco に於ける Golden Gate 橋及び San Francisco-Oakland Bay 橋の如き大構造物の自然振動測定作業は甚だ辛勞多きものである。本地方は既往數回の大地震に見舞はれた地方であるが、本作業の目的とする所は地震時地盤と構造物との間に起りうる共鳴に因る橋梁損壞の可能性を確めんとするにある。本文には前記 2 大橋の自然振動に関する諸データ及び詳釋を掲げたが之は凡て工事中及び竣工時の状態に於てとつたものである。尙本測定作業は U. S. Coast & Geodetic Survey の振動測定調査研究プログラムの一部としてなされたものである。

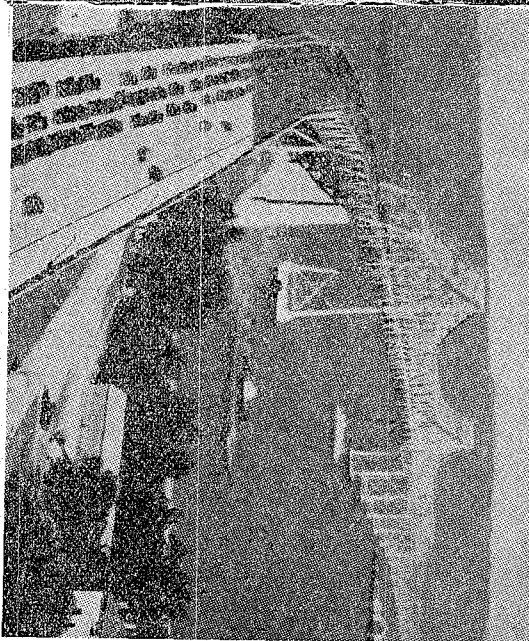
概 説

本 2 大橋の構造及び規模に関するデータは既に多く發表されてゐる所であるが、茲にその概略を述べて見る事とする。

San Francisco-Oakland 灣橋は Yerba Buena 島の西側に在りては中央 (第1, 7圖A) の大地鉄筋コンクリート礎着部 (橋脚 W-4) を以て連結されてゐる2つの吊橋より成り、而して主徑間長は各 2310呎である。Yerba Buena 島の東側のものにありては、接續部として構桁徑間及び鉄桁徑間を有する長 2423呎の突桁構である點が主たる特徴である (第2圖)。主突桁徑間は長 1400呎で、橋は複路式である。上路は輕自動車交通用にあてられ、重交通は下路の半弁を使用し、

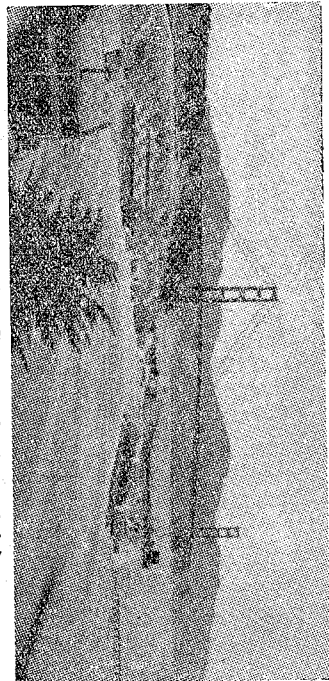


第1圖 San Francisco-Oakland 灣橋、西橋
(複吊桁を示す)



第2圖 San Francisco-Oakland 灣橋、東橋 (剛橋脚 T-1
及び突桁並に吊桁を示す)

残の半分を市内鐵道に使用する筈である。次に Golden-Gate 橋は所要の取付を有つ単一な吊橋で(第3及7圖B)、その主徑間は長 4200 呎である。道路は單一にして自動車及び歩行者の交通に供す。本報告に必要なその他の事項は第1及び2表に述べてゐる。振動器を備へなかつた橋脚のデータは之を省略した。



第3圖 Golden Gate 橋(北東より望む)

第1表 San Francisco-Oakland 灣橋々脚一般データ

橋脚	計畫寸法	m.l.l.w. 上の高(呎)			基礎	土壌或は岩石	負荷度	
		橋脚底	地熱(中心線)	コンクリート頂部			平均 (t/ft ²)	最大
W-1	56×104	-61	12	188	單塊	不純砂岩	6.7	9.4
W-2	52×121.3	-100	-61	40	同塊	不純砂岩	11.4	21.5
W-3	74.5×127	-241	-71	40	細胞組織コンクリート塊	不純砂岩	10.3	41
W-4	197×92	-222	-70	235	同塊	同上	12.2	51.3
W-5	57×127	-114	-68	40	同塊	同上	10.9	22
W-6	74.5×127	-177	-105	45	同塊	同上	9.8	27.2
E-1	78×94.5	+11	+77	174	底擴大基礎	同上	6.6	26.8
E-2	41×120	-57	-20	40	開盤基礎 トレミー封緘	同上	7.6	15.1

E-3	80.8×134.5	-242	-40	40	388	同	上	硬粘土	7.0	26.3
E-4	60.1×90.4	-185	-41	30		同	上	同上	5.6	27.5
E-5	60.1×90.4	-183	-42	30		同	上	同上	5.7	21.8
E-7	68×128	-125**	-25	25		杭	礎	段	37	61.4
E-9	100×100	-122**	-11	25		同	上	同上	35.8	74.7
E-10	44×112	-119**	-11	25		同	上	同上	34.6	74.5
E-17	48×108	-120**	-10	61		同	上	同上	36.1	78.3

註 * 之は塔冠 (Capping) がつけられた後のピロー・コソ・ブラット・フオームの床迄の高である。5月18日或は夫以前の
高を求めるとは 22ft を控除す。

** 杭の平均先端の高、封鎖底は平均高 -45~50 呎あり。

第 2 表 Golden Gate 橋々脚データ一覧

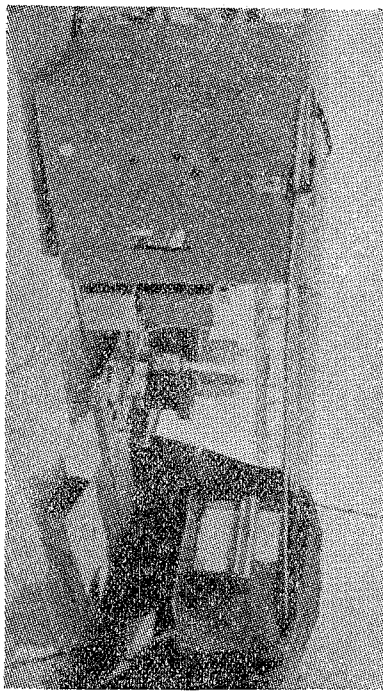
計 畫 寸 法 (呎)	橋 脚 底.....		北 橋 脚		南 橋 脚		橋 塔 S-1	
	橋 脚 頂.....		80×150		155×300*			
	65×135		65×135		65×135			
m. l. w. l. 上 の 高 (呎)	橋 脚 底	平 均	-20			-100*	-10	
		大				-90; -110*		
	岩 盤 線 (中心線)	平 均					-65	
		大					-50; -80*	

橋脚頂	橋脚頂	44	44	187 (1935年1月4日) 212 (竣工時)
	塔頂	746	746	
基礎	礎塊	鉄接塊		單塊
岩石	石	ラヂオクリヤ珪石	蛇紋岩	蛇紋岩
荷重	總噸數	130,000	362,500*	—
	平均負荷度 ($\frac{1}{4}R_0^2$)	10.2	9.6*	—

註 * 鐵銜材は橢圓形にして本ブザー中に包含しあり。

振動測定装置

本研究に使用した器械設備は一般に互ひに直角に取付けた前記測量部の振動計2個及びスプリング・レコーダー1とである。倍率 V は通常 120 或は 200 で器械の週期 T_0 は 1.2~3.0 秒の範圍に變化した。而して大きな倍率を必要とした時には前記の計器の代りに Wood-Anderson 地震計 ($V=1,500$; $T_0=1.5$ 秒) を用ひた。遺憾乍ら垂直振動は常に直接



第 4 圖 振動測定器、Golden Gate 橋西索塔中央徑間に設置
左から時間記録時計 (箱の前); 測量部用振動測定器
(總及横成分); スプリング・レコーダー

には記録されなかつた。又記録した振動は通常風及び流水の如き自然力或は車輛交通又は作業中の人並びに器械に依つて影響を受け多少變つてきた。第4圖には器械の設置状態を示す。試験中は器械に布をかけて之を蓋ひ以て寫眞記録をとらうる状態となした。

振動に関するデータ

第3及び4表には2大橋の夫々の日付の振動データを出してあるが、同表中の週期の數字は觀測者の判断によつて、記録の形跡に基く一定順序の振動の秒平均週期を表してゐる。主要週期は星印(*)で、近似値はca.(約)で表はし、而して察間符は察はしい數値を夫々表はしてゐる。縱成分は橋梁の軸に並行な振動に関するものであり、横成分は夫に垂直の振動に関するものである。

振幅の欄では器械設置個所に於て測定した構造物の静止状態からの、振動せる構造物の最大計算變位を表してゐる。何等特別の符號のない成分に関する振幅は、表示せる週期中の最初のものに對するものであるが、但し星印(*)の附いてゐる振幅及び週期は共に例外で此の最初のものに屬してゐる。振幅の計算は必ずしもさうではないが併し常に單純な調和動を測定したと言ふ前提に基づくものである。従つて出された値は此の誤差の影響を受けてゐる。

風速は試験中2.3分おきに器械的に測定したが、推定せる風速はca.(約)と言ふ印を付して表示した。

振動データに関する之以上詳細な解説は次の第3及び4表に附してあり、或は後述の各個の構造物に関する註釋中に出てゐる。

第 3 表 San Francisco-Oakland Bay 橋の振動データ

測定 期日	測定位置	m.l.l.w. 上の高 (呎)	週 期		振 幅 (1/10,000 吋)		風 速 m/h	備 考
			縦	横	縦	横		
1935— 4—3	橋 脚 頂	151	0.35*; 0.28; 0.10~0.05	0.29; 0.08~0.06	1.0	0.7	25ca SW	a
1937— 5—19	同 上	151	4.5?; 1.1; 0.45; 0.10	0.32*; 0.22	10	1.5	20ca W	k
1934— 9—6	{ 橋 脚 頂	34	3.0*; 0.30	? 3.0 及び之より短	3	? 3	25ca SW	a
1935— 12—14	{ 上部支材の下部, 北	445	6.5ca; 3.0?; 0.6	0.98*; 0.24	70	6	14 NE	c
1936— 4—2	同 上, 南	445	5.1; 3.5?; 0.65; 0.19	0.90; 0.19	40	8	5ca W	g
1936— 5—18	同 上, 北	445	5.15*; 2.8	0.91	440	20	24 W	h
1936— 11—11	南索條上の歩道	460	6.0?; 4.5ca; 1.5; 0.69*; 0.31	1.8; 1.10*; 0.3	10(4.5 秒) 3*	5*	3ca 種々	j

註 右端備考欄の a, k 等は本表の註参照

* 主要週期或はその振幅

2 條の小索條はサン
フランシスコ側塔
部に強く連結す

塔上の試験は可視

		橋		脚		W-3		W-4	
1934-	橋 脚 頂	34	3.5; 0.77; 0.50	1.02; 0.5ca	6	2	24~32		
11-14	{ 上 star の頂部	465	3.56; 1.0ca	3.55; 1.03*	2000; 8000(可視)	250 50*	W 烈風	a	可視振幅は記録をとる前に記録した
1935-	上支材の下部、北	490	6.7*; 0.95; 0.60; 0.35	1.03*	280	15	9	c	
12-14							NE		
1936-	上	490	4.0; 0.92; 0.70; 0.38; 0.25	3.5ca; 1.02*	28	18; 10*	5ca	g	
4-2	上	490	7.0; 5.2*; 3.5	4 p; 1.7; 1.15*; 0.3	800; 700*	70*	24 W	h	
1936-	上	490	6.2; 4.4; 2.7 p; 0.69; 0.33; 0.1	1.5; 1.2; 0.85; 0.50	210	10	11	j	他のレベルと同時に j 試験す
11-10	南索係上の歩道	505					W		
橋 脚 W-4									
1936-	北 索 係	240	5.15*; 0.72; 0.20	15ca; 5.15*; 0.17; 0.6~0.4	280*	1000ca 240*	5ca W	g	
4-2							W		
1936-	上	240	3.5ca; 2.3; 1.8	10.6; 1.25	140	12,000	22	h	
5-18							W		
1937-	下 路、南 側	210	1.10	9.0; 2.7; 1.3; 0.29	15	2000	20	k	
4-8							W		
1935-	橋 脚 頂 隅	235	0.62	2.5~4 p; 0.99*	1	7*	4	a	
2-15							N		
1935-	上 隅	235	2.2Δ; 0.65	1.6 p; 1.03*	1	2*	4.5	c	
12-14							W		
1936-	上	235	1.0ca; 0.58*	3.8Δ; 1.01*	1*	10; 3*	3.5	d	
2-22							S		
1936-	上	235	0.70*; 0.57	3.3Δ; 1.02*	1(0.70秒) 2(0.57秒)	13; 2*	4ca S W	g	
4-2							S W		

測定 期日	測定位置	m.l.l.w. 上の高 (m)	週期		振 幅		風速 m/h	備 考
			縦	横	縦 (1/10,000 時)	横		
1936- 5-18	同 上	235	2.16△; 0.60; 0.4~0.8	1.04; 0.35	4	1	27	h
1936- 11-11	同 上 路側	261	1.0 p; 0.57*	2.8; 1.02*	1*	10; 2*	4ca 種々	j
			橋 脚		w-5			
1934- 10-19	橋 脚 内 側	26	2.6△; 0.44	?	4(2.6 秒) 1(0.44 秒)	?	?	a
1935- 5-18	同 上	26	8 p; 3.6ca; 0.74; 0.4ca	8 p; 0.74; 0.4ca	8	1	26	a
		465	3.65*; 0.73	3.6; 1.00*	1200	200; 40*	SW	a
1936- 2-22	上部支柱の下部, 北	490	6.7*; 0.55; 0.4ca	7ca; 1.05; 0.08	400	50; 17*	19 S	d
1936- 4-2	同 上	490	7.5; 3.5ca; 1.0; 0.65; 0.35	1.00; 0.55; 0.3	135	10	5ca SW	g
1936- 5-18	同 上, 南	490	6.3; 4.0; 0.3~0.9	4.0 p; 1.05*; 0.3	660	60*	29 NW	h
1936- 11-11	南支墩上の歩道	505	6.0 p; 4.5*; 1.5 p 0.65; 0.31	3.0; 1.12*; 0.3	20*	6; 6*	4.5 W	j
			註 ▲橋脚にあたる波の週期は 2~4 秒の間であつた。					
			橋 脚		w-6			
1934- 9-6	橋 脚 頂	34	3.2△; 0.57	3.5ca△	6	1	?	a

1935-5-28	橋脚内側	26	3ca; 0.65	3ca; 1.00*; 0.5	10	5	24	a
		145	3.0; 0.7; 0.25	3.0; 0.95*	130	30*	SW	
1936-2-22	南上部支村の下部	445	6.7*; 0.70	6.7; 0.98*	400	20	15	d
1936-4-2	北上郡支村の底部	445	7.5*(7.0~8.0); 4.2 p; 6.3	2.2; 1.0; 0.8; 0.6; 0.25	180	12	9	g
1936-3-18	同上	445	6.7; 4.0; 0.83; 0.6	1.7; 1.02*; 0.25	600	50*	30ca NW	h
1936-11-11	南支村上の歩道	460	6.3; 4.5; 0.65; 0.30; 0.15	1.7ca; 1.05*; 0.15; 0.08	30	10*	2ca	j

橋脚 W-5 と W-6 間の中央徑間

1936-2-22	南 索 條	240	0.2~7.0	15.2*; 2ca; 0.6~1.0	30ca	10,000	11.5	d	
1936-4-2	同上	240	7.0; 4.3; 0.70; 0.55; 0.25	16.5*; 1.2; 0.6; 0.3	240	3,000	7.5	g	
1937-5-19	南側下路	210	1.00; 0.17; 0.12	9.2*; 0.3; 0.15; 1.3~2.2	10	120	20ca W	k	
橋 脚 E-1									
1935-3-5	南側橋脚頂	180	0.165	p	1	p	p	a	
1936-2-22	中央下路	192	0.9; 0.68*; 0.22	1.2; 0.68; 0.19	4*	1	3.5	d	
1936-7-13	北側上路	220	1.50; 0.52; 0.20; 0.15; 0.08	1.15; 0.7; 0.40; 0.20; 0.08	3	5	9ca W	i	
橋 脚 E-2									
1936-2-22	下路中央部	200	0.9; 0.68*; 0.4; 0.18	2.0; 0.35; 0.13	7*	5	17	d	

測定 期日	測定位置	m.l.w. 上の高 (尺)	週 期		振 幅		風 速 m/h	備 考	
			縦	横	縦	横			
1936— 4—2	下路北側	200	1.63; 1.0; 0.54	1.56; 1.20; 0.55; 0.3	8	15	10ca W	g	
1936— 6—29	上路北側	228	1.50; 0.5ca; 0.24; 0.07	1.5; 1.1; 0.3; 0.07	7	12	9ca W	i 0.07秒週期は壓縮機 の強制による	
橋脚 E—2 及 E—3 間の突桁及び吊桁									
1935— 3—5	橋脚頂	34	3.0△; 0.9; 0.6*; 0.45ca	3~4△; 0.6*; 0.45	1	0.5	p	a	
1936— 3—4	下路中央部	200	2.23; 1.06; 0.23; 0.1	2.60; 0.30	18	10 8(0.3秒)	7 W	e 作業中の人及機械設 備	
1936— 3—22	下路北側	200	2.28; 1.0; 0.55	1.38; 0.83; 0.55; 0.26	45	15	16 W	f	
1936— 4—2	同上	200	1.57; 1.0; 0.5	3.15; 1.50*; 1.3ca; 0.8; 0.3	15	15; 10*	10ca W	g	
1936— 7—13	上路北側	228	1.52; 0.9; 0.15	1.54; 0.5 f; 0.3; 0.1	8	15	9ca W	i	
橋脚 E—2 及 E—3 間の突桁及び吊桁									
1936— 2—22	第4格間、西窓、 下路中央	200+	0.9; 0.67*; 0.2	2.25*; 0.6; 0.25ca	4*	30	10 S	d	
1936— 3—4	第6格間、東、 下路北側	200+	2.25; 1.08	2.60*; 0.07	20	155	11.5 W	e	
1936— 3—22	第11格間、東臂、 下路中央部	208	4.1; 2.25ca; 1.82*; 1.5; 0.23; 0.1	4.1*; 0.5; 0.2; 0.85~1.15	100; 80*	1100	11ca W	f 作業中の捲上機	
1936— 4—2	下路中央部、 北側	208	3.20; 1.62*; 1.0ca 0.25	3.20*; 0.55; 0.3	20; 35*	135	10ca W	g	

羽生 橋脚 第二十卷 第十一号

1936— 中央徑脚 236 1.54; 0.7ca; 0.2 3.44*; 0.98; 0.3 7 50 9ca
 7—13 上路北側
 註 ▲橋脚に當る波の週期は 2~4 秒であつた。

橋 脚 E—4

1934— 橋 脚 頂 25 3.6ca▲; 0.47 3.6ca▲; 0.58 2 2 P
 9—14
 1936— 上路北側 220 2.35; 2.25*; 0.10 2.7ca; 1.5ca; 25* 15 3.5
 3—4
 1936— 下路北側 192 2.24*; 1.0ca; 0.53; 1.50; 1.00*; 0.5; 5(0.1秒) W
 3—22 0.1 0.2 45 15; 40* 11.5
 1936— 上路北側 220 1.57*; 1.3ca; 0.15 1.50*; 1.15; 0.7ca; 12 40 9ca
 7—13

橋 脚 E—5

1935— 橋 脚 頂 25 3~5▲; 0.7ca; 1.0ca; 0.45* 1 0.5 P
 3—5
 1935— 上路南側 213 3.3; 1.99*; 0.79; 1.71*; 0.5; 0.34; 20* 12 8.5
 9—24~26 0.35; 0.14 0.14 W
 1935— 橋 脚 頂 25 2.5~4▲; 0.95; 0.95; 0.40; 0.25 4 1 b
 9—26 0.6; 0.23
 1936— 上路北側 213 2.25*; 0.48; 0.31; 1.68*; 0.30; 0.1 35 110 4.5
 3—4 0.1 W
 1936— 下路北側 185 2.27*; 1.8; 0.6; 1.69*; 0.7; 0.38; 25 20 12.5
 3—22 0.33; 0.25 0.25 W
 1936— 上路北側 213 1.52*; 0.2 1.60*; 0.10 13 40 9ca
 7—13

橋 脚 E—7

9ca
W
i

a
b
b
e
f
i

作業中の人及び設備
 作業中の人及び設備

測定 期日	測定位置	m.l.w. 上の高 (尺)	週期		風速 m/h	備考	
			縦	横			
			(1/10,000時)				
			縦	横			
1934— 12—15	橋 脚 頂	25	2.7▲; 0.35	2.7?▲; 0.65; 0.35; 0.11	3	1	? a
1935— 9—24~26	上 路, 南 側	200	1.93*; 0.10; 0.55	1.43*; 1.1?; 0.6?; 0.12	16	20	12 W b
1935— 9—26	橋 脚 頂	25	2.9*▲; 1.5; 0.6; 0.15	3.1*▲; 1.25ca; 0.6~0.8	10	5	18 W b
			橋	脚	E—9		
1934— 12—15	橋 脚 頂, 北 側	25	3ca▲; 0.5	2.0▲; 0.9?; 0.55	3	2	? a
1934— 9—24~26	上 路, 南 側	172	2.00; 0.5; 0.3	1.39*; 1.18; 0.65; 0.5; 0.12	24	20	16.5 W b
1935— 9—26	橋 脚	10	2.0~3.5▲; 0.9; 0.5	2.0~3.5▲; 1.0; 0.6	10	4	20 W b
			橋	脚	E—10		
1934— 12—15	橋 脚 頂	25	2.3▲; 0.9; 0.4	1.9ca▲; 0.82?	6	1	? a
1935— 9—24	下 路, 南 側	163	3ca▲; 2.00*; 0.50; 0.25ca	0.90*; 0.6; 0.2	16*	14	17.5 W b
			橋	脚	E—17		
1934— 9—14	橋 脚 底 部	61	2.5▲; 0.50; 0.22	3.0ca▲; 0.4?; 0.22	6	4	? a
1935— 9—24	上 路, 南 側	108	2.8▲; 0.60; 0.25ca; 0.14	0.75*; 0.56; 0.25	12	8	13.5 W b

第3表註

- a. 1935年9月24日 以前に行つた試験は鋼材の組立前の橋脚上或は塔の鉋打完了後の塔及び橋脚上で行なれた。
- b. 1935年9月24～26日 東側徑間は Oakland 海岸から E-4 橋脚へ完成されたが、鋪装は橋脚 E-5 及び E-4 との間の中央徑間より先には進んでゐない事は明としてその場合5徑間が之に包含されてゐる。突桁庇着徑間は丁度着工された所であつた。
- c. 1935年12月14日 橋脚 W-1 と W-4 間の主索條は張つてあつたが巻いてなかつた。 Catwalk は取付けられ索條に依つて支持されてゐた。東索條の架設は約 60% 完了。
- d. 1936年2月22日 主索條は凡て張られ、トラスは2區間橋脚 W-5 及び W-6 間の中央徑間に組立てられ、西徑間の補脚構工は一部竣工してゐた。鋼工は Yerba Buena 島から橋脚 E-2 の向ふのカンチレイバーの延長部上の6格間(300呎)へと完成して行つた。工事は吊桁作業繼續中であつた。鋪装は註 b と同様であつた。
- e. 1936年3月4日 鋼材組立は橋脚 E-3 迄鉋打作業とともに完成す。而して東突桁臂は橋脚 E-3 の先の8格間點迄進びた。鋪装の狀態は註 b と同様。
- f. 1936年3月22日 東側突桁及び吊桁は橋脚 E-3 の先の13格間迄進む。突桁徑及吊桁は橋脚 E-2 の先の14格點(700 ft)迄のびた。實測時には東の槽端の揚卸機は西槽の格間14に鋼部材を組立てゐた。殘餘の格間用の最初の鋼材は翌朝組立られ連絡された。南槽の鋼材組立作業は未完了で、而して鋪装は註 b と同様。
- g. 1936年4月2日 西部の吊桁の補助構工は殆んど完成し東側の吊桁は約 40% 完了。W-2 の床鋼の10格間工は竣工。東側徑間に於ては突桁徑間は連絡されてゐたが鋼材組立は未完了、鋪装工の狀態は註 b と同様。
- h. 1936年5月13日 西側吊桁の束構 75% を組立。東側吊桁は 40% 完了。
- i. 1936年6月29日及び1936年7月13日 東灣徑間は鐵道敷設を除き竣工。
- j. 1936年11月10日及び11日 橋梁は鐵道敷設を除き竣工。
- k. 1937年4月8日及び5月19日 橋梁開通す。兩吊桁の中央徑間に於てはデッキは大型トラックの通行によつて擴張を起し縱成分記録は若干失はれた。

San Francisco-Oakland Bay 橋

コンクリート橋脚の振動

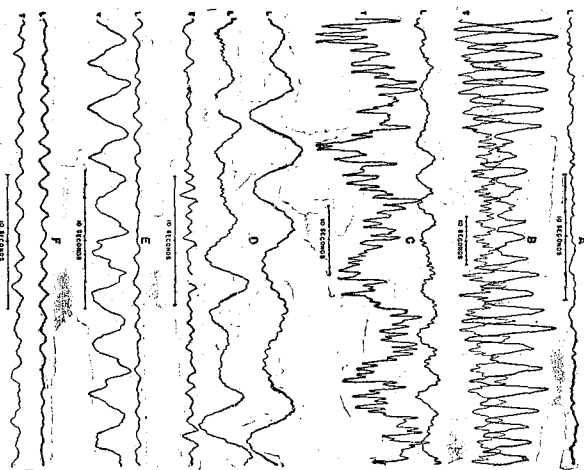
灣内の橋脚は凡て波浪や潮流の力を絶えず受けてゐるが故に、その振動記録圖は複雑となつてゐる(第5圖A)。橋脚に打突かつた波浪は橋梁の上部構の竣工後に於てさへ尙且つ明瞭に記録に反映して表はれてゐる。而して橋脚そのもの、彈性に基く週期を決定する事は不可能ではないが通常困難である。

索條にて支持せぬ時塔の脚は塔の動搖並びに波浪に相應じて之に影響をうけたが、構造物が竣工すると橋脚及び下路に於て同時に行つた試験の結果から見ると、橋脚及び橋梁の主要振動は獨立のもので何等他の影響をうけてゐない(第3表、橋脚 E-5, E-7 及び9)。海水の波浪は橋脚の運動を起す主要因である様に見える。デッキに於ては大部分風や交通がその要因をなし週期は通常橋梁自身のフアンクショナルとなつてゐる。

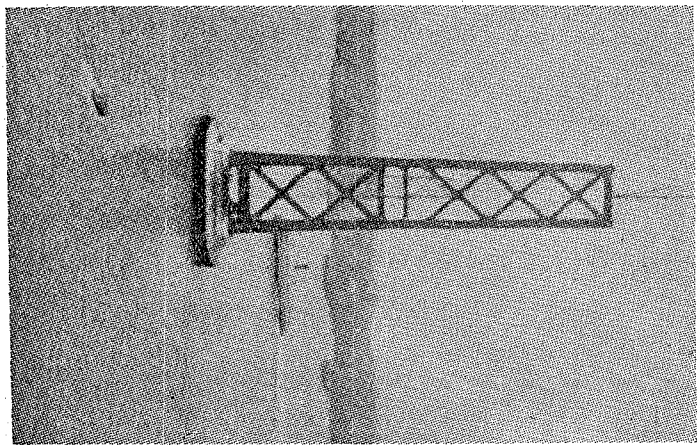
橋脚 W-1 は陸上にあるがそれが上部構から自由であつた間は逆突桁の如き作用をなしてゐた。而して夫は測定容易な週期にて各軸にそつて振動した。此の橋脚の振動は、後上部構が加はつて複雑なものとなつた。

索條にて支持せざる場合索條塔の振動；橋軸に並行の場合

之等の構造物は比較的單純にしてその性質は一端を固定し他端を自由にした耐震針の夫に類似せるものであつた(第10圖参照)。而して塔 W-3 に於て最も完全な記録を得た(第6圖)。記録せる個々の振動(縱成分)は週期 3.35~3.70 秒の範圍である。之等の夫々の週期を有つ2つの振動系統が約36秒間隔で、同律に振動するのである。2つの系統を結合した



第 5 圖 San Francisco-Oakland 灣橋の代表的振動記録圖
 橋脚 E-3 のみのもの；倍率 $V=1500$ 、器械の自己週期 $T_0=1.5$
 A, 索條にて支持されざる塔 W-5 の頂部； $V=125$, $T_0=1.2$
 B, 索條、東吊桁の中央徑間 (工程は圖 7 A に示す)； $V=125$, $T_0=1.2$
 C, 塔 W-5 の塔頂部、竣工時； $V=200$, $T_0=2.0$
 D, 突桁及び吊桁の中央徑間、竣工時； $V=200$, $T_0=2.5$
 E, L 及び T のあるものは夫々橋梁に平行及び直角の振動を示す
 詳細は第 3 表参照、倍率 V は原記録に關するもの
 本圖の縮尺は 3.1:1

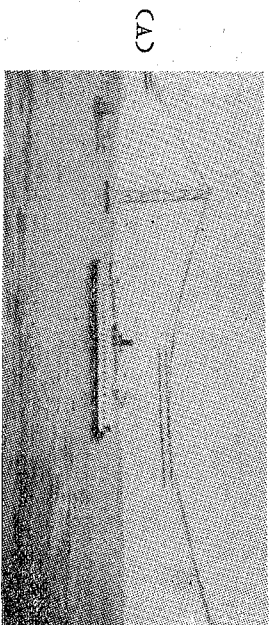


第 6 圖 San Francisco-Oakland 灣橋の塔 W-3
 (西南より望む)

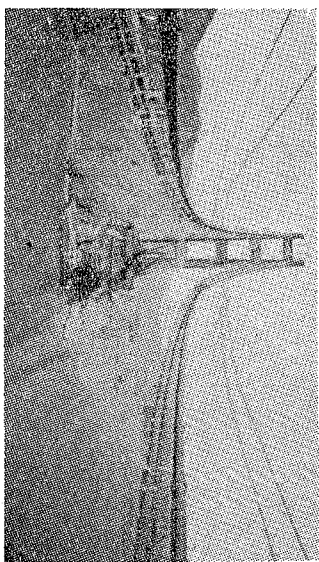
時の平均週期は 3.52 秒となるであらう。記録せる 29 個の完全な振動は平均週期 3.56 秒で 3 つの決定的な最大週期は 36~37 秒間隔で現はれる。

以上と類似の状態は塔 W-5 の振動記録に現はれてゐる。但しこの場合、不定最大週期が約 60 秒間隔で僅か 2 つしか現はれなかつた事は前者の場合と違つてゐる (第 5 圖 B)。更に観測せる極限週期は相互に接近しており 3.55 と 3.77 とである。之等の週期を有する 2 系統が 67 秒間隔で振動するであらう。

橋脚 W-3 と W-5 とは同様であるが、但し橋脚 W-3 の方が橋脚 W-5 の 114 呎に比し甚だ高く 241 呎である。若しも喰り (Bearing) の解釋が正しいとすれば、實測週期及び同様に實測最大週期の分離の度合も高さの函数となるであらうし、従つて岩盤上の高即ち橋脚の高の函数となるであらう。橋脚上に於ける實測週期は正確に定める事は難かしいであらうが塔中に於ける觀測週期の低いものに接近してゐる。



(A)



(B)

第 7 圖 一部完成せる補剛構工を示す。

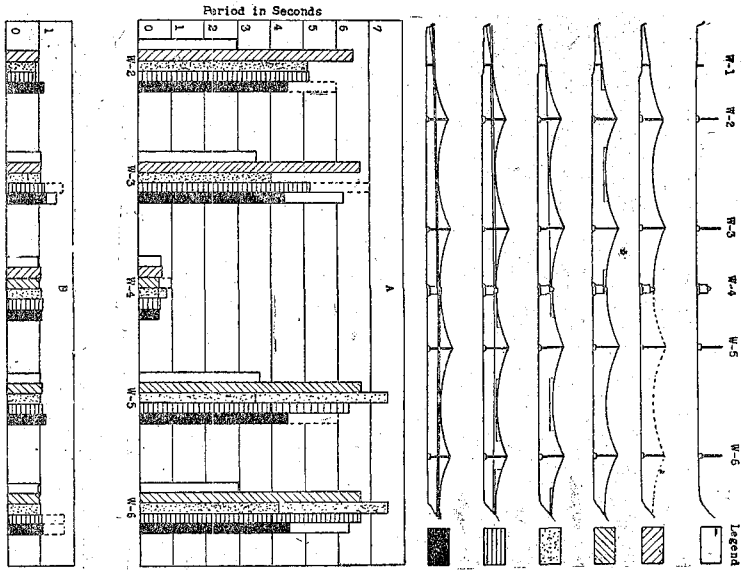
(A) San Francisco-Oakland 灣橋の東側吊塔 (B) Golden Gate 橋 (1936 年 10 月 17 日)

継続的な最大週期は結合せる振動系統の総りであるとする先述の解釋よりして、よし例へ記録せる時間がうなりの現象で全く説明されるにしても、突風が之等の最大週期の大きさ並びに恐らく又時間にも影響を興へると言ふ如き看過する事はできぬ。眼に視うる程の實測最大振幅は確かに記録されたものゝ中の何れよりも大きかつた。

索條にて支持せざる場合の塔の振動：橋軸に垂直の場合

凡ての塔の縦の週期は横成分に反映された。例へば塔 W-5 に於ては 3.6 秒週期の頂點は一共に記録されたが、此の週期に於ける塔頂の實際の運動は橢圓形と言ふよりは寧ろ直線となつてゐる。器械の位置（方向）及び記録せる運動の振幅を考慮に入れると此の線の方向は時計の廻る方向とは反對に橋軸から約 10° の所である。1 秒の横週期は重り重なつて橋頂の實際の軌道に波動を興へたのである（第 11 圖）。

索條塔及び橋脚 W-4：之は最もよく圖示されうるものである。第 8 圖に於てグラフィラフ中の陰影部（Shading）は解説略圖の示す所



第 8 圖 San Francisco-Oakland 灣橋の西灣架橋
工事に伴ふ週期變化 A, 橋梁に平行 B, 横方向

による橋梁工事の工程を表はすものである。同圖の解説中、實線曲線は索條取付け作業の完成を表し、點線曲線はその一部
の完了、單直線は（少し傾いてゐる）完成せる補剛構の位置を、複線は完成補剛構及び床鋼の位置を表し、而して太線は
完成せる鋪裝を表す。本圖に於て了解しをくべき事は一定のシェイプは全體としての橋梁工事の進捗を示すもので、
或一部分の或工程を示すものではないと言ふ事である。従つて之を構造上より言へば塔 W-5 及び W-6 を表す點線に
よる陰影の意味は塔 W-2 及び W-3 を表す同様な陰影の意味とは異つてゐる。

塔頂の振動は工事の進捗と共に益々複雑化した（第5圖D）。どの特殊な値をも構造物の週期と定める事は極めて難しい
所であつたが、記録上の波動は近似調和動の諸グループに通常之を分析する事をえた。若し之等諸グループ中の一が支配
的なものであるとすれば、その週期が通常全體の代表であると見なされ圖の陰影の部分に依つて表示した。他の週期は陰
影中の太線に依つて、或は又週期がよく表示されるか否かに應じて實線或は點線によつて圍まれるグラフの部分として
縦距の延長によつて表はされてゐる。若し2つの週期が同値であるならば高い方の週期の延長の方が淡い陰影となつてゐ
る。

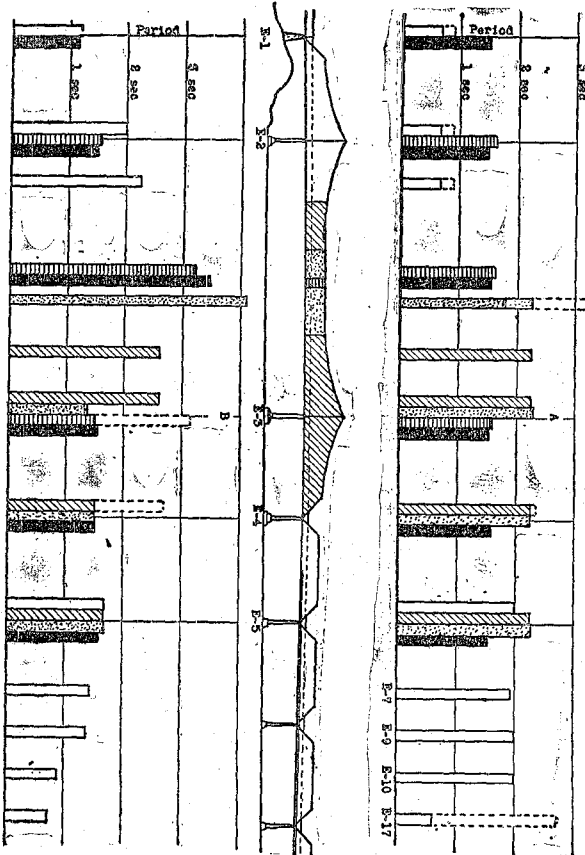
第8圖を見れば次の事が明瞭に表はされてゐる。

- (1) 索條を取付けると塔頂に於ける縦週期は2倍となる。
- (2) 構造物竣工時の塔頂に於ける縦週期（6.5秒は）、索條にて支えざる場合の高塔 W-3 の週期より 25% 高く、低
塔 W-2 及び W-6 のものより 50% 高い。
- (3) 工事中に於ける塔の縦週期は通常工事の最終段階に於ける週期より高かつた。

橋脚 W-4 の同じ側に於ける塔の各組のプラン間の類似性に注意すべし。

(4) 塔の横週期は益々複雑となる以外には工事中その變化は極めて少ない。工事の最後段階に於ける週期は初期段階に比し約 10 或は 15% 高い。

(5) 橋脚 W-4 の中央旋着部の縦或は横週期は全工事故層を通じ殆んど同等である。横週期は他の塔と殆んど同等にして、縦週期は例外とし横週期が幾分小さいが之は橋脚は又同時に橋脚の長軸でもあるが爲である。此の橋脚は大塊にして橋脚自身の弾性に基く週期は容易に認められるものであるが、夫にも不拘灣内の波浪の運動に可成りに應へ、影響されてゐる。(1)、(2) 及び (3) の説明は本章の末尾の“評釋一般”の所でなされてゐる。



第 9 圖 San Francisco-Oakland 灣橋の束縛梁橋工事に伴ふ週期變化
A, 橋梁に平行 B, 直角方向

中央徑間部分の橋梁及び索條：天候或は工事に因る困難の爲、種々の工事段階に於ける一定索條の中央徑間に於ける振動記録をとる事は不可能であつた。

索條の張力は全て同じく、主徑間のものとは全く相似たものであつたから、構造上及び天候上の同一條件下では索條の振動は同一と假定される。ケーブンの横週期の結果は單獨では（2つのトラスセクションを含む）15.2秒、補剛構が40%仕上つた時16.5秒、同竣工の時、但し塔に弛ぐ取付けてある時には約15秒で、その場合の支配的な第2次週期は5.15秒であつた。而して補剛構及び床鋼の組立が完成した時は10.6秒で橋梁の竣工時には9.1秒（第5圖の参照）であつた。索條が若し支鞍を結ぶ線上に振る複振子として取扱はれるならば、垂曲線の計算週期は14.7秒である。此の計算は支付は同水準を有し、徑間長2310呎、徑間の高230呎であるとの假定の下になされたものである。トラスが附加すると振動の中心を低下させる事によつて振子の有効長を増大する傾向があるであらうが、此れは週期の増大するが爲である。然し乍らトラスが塔に取付けられるや否や自由に振れる振子の状態が壊され、トラスの補剛作用が週期を低下せしめるであらう。この推論は觀測に依つて立證されてゐる。橋床構造物に依り増大せる剛性の影響は取付け附加物の影響よりは遙かに大である事は明らかである。

上述せる週期の第3に出てくる第2次の5.15秒週期は兩成分ともに同振幅を示してゐる。運動を合成させると風の方向と直線をなしてゐる一本の西—東直線軌道となつた。此の運動は明らかにかに構の組立が殆んど完成した事に依り此の索條中に起されたもので、條はその凡そ最低點を支點とする振子として風の中に振搖した。此の週期に對する振子の計算長21.6呎は理のある事である。

工事中に於ける橋梁の週期變化：東灣の徑間

第9圖に於て、橋梁略圖に示す陰影部は振動試験時に於ける橋梁工事の進歩を、而して他の圖中の陰影部は之に相應する週期を夫々表はしてゐる。橋脚 E-7 から E-17迄の縦座標は例外として、橋梁のダイヤグラムに關係せるグラフの位置は夫々當該の測定器械設置箇所概略位置を表してゐる。竣工せる構造物の縦座標は眞黒い陰影部分で表してゐる。横線による陰影は突桁徑間の連結後數日内に行つた試験のものである。但しその時には鋼材組立は未完成であつた。太い黒線は試験初に於ける鋪装工の進歩範圍を表す。

第9圖を見ると次の事が分る。

(1) 橋梁の或一定セクションの縦振動週期は一定の工事段階に於ては各橋脚に對し夫々均一である。初の試験に於ては橋脚 E-5上のセクションの縦週期は橋脚 E-11 から E-17迄の伸縮接合を横切つて傳へられなかつた。E-17に於けるより長い不確定な週期は恐らく波の運動に依つて起されたものであらう。此處に注意すべき事は橋脚 E-1 と E-17との週期は略同じであつた事である。

突桁徑間の連結以前では隙間の Yerba Buena 側に於ける縦週期は剛扶壁、橋脚 E-17 (第2圖) の爲 Oakland 側に於けるものゝ約 $1/3$ であつたが、連結後に於ては兩側の週期は略同等であつた。突桁樑の附加物及び高さは最初週期を増大せしめ、連結後は附加物及び高さはほんの僅かな變化をうけたに過ぎなかつたが、橋脚 E-1 の剛性が作いてきて Oakland 側の週期は可成り低下し、之に伴ひ Yerba Buena 側の週期は2倍に増大すると言ふ結果となつた。

徑間連結の前日に於ては縱成分の記録主要週期は長 650 呎突桁臂端が同日付の何處よりも甚だ小であつた。振動記録圖の痕跡は悉らく突桁臂端に於ける垂直振動から起る特異な横振に器械が應へた記録であらう。若しさうだとすれば突桁臂の週期は垂直 1.82 秒、縦 2.25 秒及び横 4.1 秒であつたのである。之等の週期は凡て縱成分に反映された。

(2) 1 橋脚上の横振動週期は他の橋脚上の週期とは殆んど獨立無關係であるが、他の橋脚が隣接してゐない場合には殊にさうである。突桁臂或は徑間の横振動は第 2 近接橋脚迄投對される事が屢々あつたが、然し自由臂の長が最大となつた時にはさうではなかつた。その他の場合では一斷面に於ける弾性は之とは數百呎或は夫れ以上隔てた他の斷面に於ける横振動にほんの僅か影響を與へたに過ぎなかつた。

(3) 橋梁の種々の斷面に於ける横振動の週期變化は獨立の過程をとつた。

或場所に於ては此の變化は輕微なものであつた。而して他の箇所、例へば突桁の中央徑間に於ける箇所の如きでありては些か大であつた。連結迄は東突桁臂の週期變動は徑の長に大體比例してゐた。

Golden Gate 橋

橋脚の振動

前記の灣橋と異り本橋の南橋脚は緩衝材を以て保護し強力な潮流や荒浪から之を護つてゐる。此の爲橋脚は如何なる時でも波の運動に影響されて之に反應する様な事は餘りなかつた。而してその橋脚の運動は陸上にあるものと近似してゐた。主橋脚は 2 つ共支材なき塔の動搖に相呼應したが、南橋脚と塔頂の縱振動の振幅の割合は約 1:1200 であつた。何の障害

も受けない塔門 S-1 は單獨構造物の如く作用しその週期は兩方向共に一定明確であつた。現状の橋梁構造物に關する橋脚の性状は決定されなかつた。

第 4 表 Golden Gate 橋の振動データ一覧

測定 期日	測定位置	In. l. w. 上の高 (99)	週 期		塔 門 S-1	振 幅 (1/10,000 吋)		風 速 (m/h)	備 考	
			縦	横		縦	横			
1935— 1—14	道路路面位 側	187	0.63	0.35	3	1	12	SW	b	
南 橋 脚 及 び 塔										
1935— 1—14	橋 脚 頂	44	0.22~0.30; 0.05		0.25	0.1	0.05	7	SW	b 塔は未だなし
1935— 6—7	上から3番目の 支材, 西側	522	4.54	4.45; 1.85*		13000	350	43	SW	d 風速は地上で測定
1935— 7—25	西 支 鞍 下 部	735	4.73	1.86	3500	150	—	30	SW	e 同時試験
	上から3番目の 支材, 西側	522	4.73	—	1650	—	—	—	—	e 同時試験
	道 路, 西 側	246	4.73; 0.97; 0.70		—	120 ?	—	—	—	e 同時試験
	橋 脚 頂	44	4.73	1.86	3	3	1	30+	SW	e 同時試験

測定 期日	測定位置	m.l.w. 上の高 (m)	週期		振幅 (1/10,000m)		風速 m/h	備考		
			縦	横	縦	横				
1935— 11—27	西側支墩の下部	735	4.6; 1.8; 0.73; 0.6	1.90*; 1.5; 0.55; 0.23	140	100	4 W	f		
1936— 7—29			5.8*(4~8.5); 1.45; 0.58	2.10*(1.65~2.30*); 0.60	420	90	13 W	g		
1936— 10—17			5.8*(5.2~6.2); 1.1; 0.60	1.95*; 0.65	150	20	16 W	h		
1936— 12—14			2.6ca; 5.6*; 1.12; 0.50; 0.37; 0.21	2.00*; 0.55; 0.25; 0.13	200*	70	12.5 E	i		
1936— 5—25			7.0*; 5.1*; 1.0; 0.6; 0.3	1.95*(1.6~2.2)	3000	220	34 W	k		
北 橋 脚 及 ビ 塔										
1934— 9—11	上から4番目の 支材, 西側	392	43	4.0ca; 1.79*; 0.30	350	80*	30 W	a		
1935— 1—15	上から2番目の 支材, 西側	628	44*; 1.8	1.81	350	40	15 W	c		
1936— 7—29	橋脚頂, 西側	44	4.4	4.4ca	1	<1	17 W			
1936— 10—17	東支墩附近	730	5.8*; 1.43; 0.55	1.92*(1.5~2.2); 0.6	100	160	17 W	g		
1936— 12—14	西支墩下部	735	5.5*; 4.7ca; 1.10; 0.55	1.85*; 1.1?; 0.65	180	20	20.5 W	h		
1937— 4—29			東支墩上部	750	7.3ca; 4.9*; 1.20; 0.54; 0.32	2.00*; 0.6	80; 90*	11	25? NNE	i
					7.0(6.5~8.0); 5.0 (4.5~5.5); 0.30	2.00*; 1.7; 0.60	1500	80	23ca W	j

中 央 徑 間

1936— 10—17	西 築 條	276	11.0; 11.10	22ca; 1.8; 11.5*; 0.5	250	1000ca	8 W	h
1936— 12—14	東 築 條	276	8.0; 1.3; 0.93*; 0.40; 0.23	21ca; 2.0* ; 1.0 ; 0.5	150; 15*	1000; 80*	11.5 NNE	i
1937— 4—29	西側歩道近くの デッキ	267	9.5* ; 2.7 ; 1.4	19.0 ; 5.7* ; 2.3ca ; 0.9	3000	15000 ; 1200*	17ca W	j

第4表註

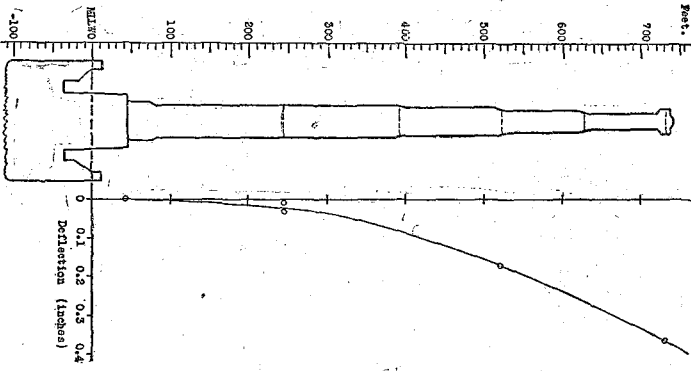
- a. 1934年9月11日 北塔は上部抗壓材及び支墩の取付けなき以外は完工。
- b. 1935年1月14日 塔門 S-1 は單獨に立つてゐてコンクリート工事は未完了、南橋脚は塔架設準備中であつた。
- c. 1935年1月15日 北塔は未完了、上部支材及び支墩を取付ける。
- d. 1935年1月15日 南塔は上部支材及び支墩の取付けなき以外は完工す。
頂部での振幅は観測所での夫に比し約2倍(註e参照)。522呎の水準では複振幅は2.5吋であつた。斯る運動は全く感ぜられ
感知されたが普通より大きい此の振幅の原因は不明である。
- e. 1935年7月25日 南塔は支墩と共に完成す。索條張渡し作業を便ならしむるプラットフォームが上部に架設さる。Catwalk
索條着子は塔頂を San Francisco 旋着部に連ぐ連結す。
- f. 1935年11月27日 が取付けられ一懸子が張られて各支墩に取付けらる。第3懸子の架け渡しが始められてゐた。
- g. 1936年7月29日 完工せる各支墩に設置された。各 Catwalk は設置されたが索條とは無關係であつた。鋼材組立作業は
各塔の道踏面から丁度始められてゐた。
- h. 1936年10月17日 補剛構工の約半ば完了。即ち塔から外側及び中央部へ進められる。
- i. 1936年12月14日 補剛構工完了、床鋼は組立てられた。但し南塔附近は之を除く。
- j. 1937年4月29日 橋梁は細部以外は完工。
- k. 1937年5月25日 橋梁工事を完了す。

南塔の振動

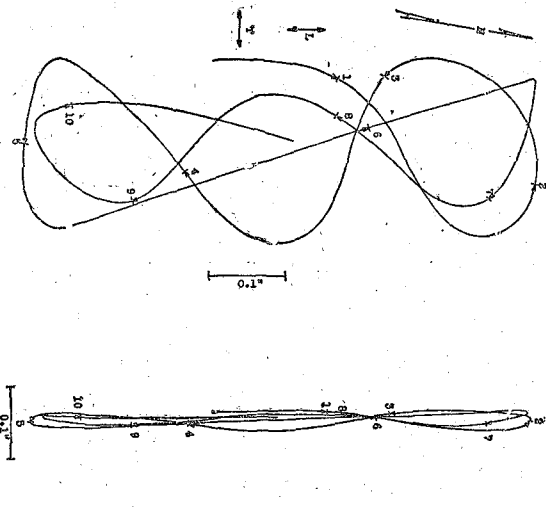
南塔は接近容易な爲最も注意が向けられた。1935年7月25日に行つた同時試験に於ては器械の常數はどの水準でも同一で従つて水準を種々に置換へた時の測定評價は數表の助をかりなくして直接な寸事をえた。第10圖に塔の最大動揺時に於ける位置をそのスケールを擴大して示した。同圖は構造物が耐震釘の作用をなしてゐる事を示してゐる。西支墩の軌跡は實際のスケールで表はされており、横振動は10倍に擴大して各々之を第11圖に示す。

工事中の週期變化

工事進捗中の週期變化は第12圖



第10圖 Golden Gate 橋の南塔の彎曲線 (道路に平行)



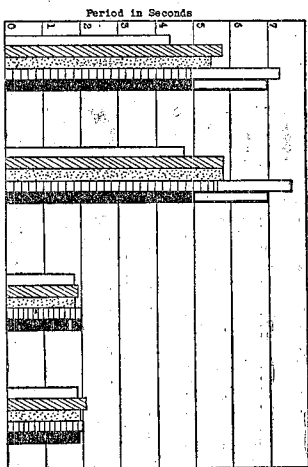
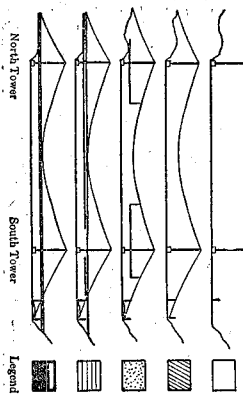
第11圖 Golden Gate 橋南塔西支墩下部の軌跡、

L, 道路に平行； T, 直角、
數字 (1, 2 等) は秒を表す、
矢印はその運動方向を示す、

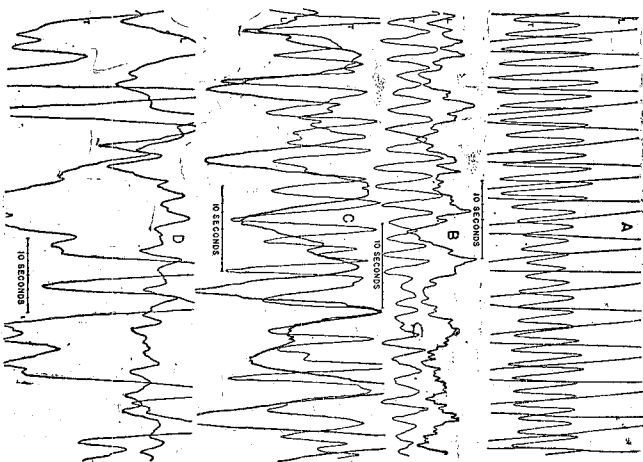
で解説と對照すれば知る事ができる。同解説中、曲線は竣工せる索條を、橋床水準に於ける單直線は完成せる桁剛構の位置を、複線は桁剛構及び床鋼取付けの完成を表はし、而して大線は構造物が竣工又は殆んど之に近き事を表すものである。

支數縦振動の主要週期は索條及び構造部材の附加と共に高まるものであるが、その増大量は前記灣橋の場合に比し遙かに小さい。終結週期の一は塔の始の週期よりほんの僅か許り高い。

横振動の週期變化は灣橋に於けると同じ傾



第 12 圖 Golden Gate 橋工事に伴ふ週期變化



第 13 圖 Golden Gate 橋の代表的振動記錄圖
 A, 南塔々頂(支へなし): $V=125$, $T_0=1.5$
 B, 南塔々頂(索條設置): $V=125$, $T_0=2.5$
 C, 南塔々頂(橋梁竣工): $V=135$, $T_0=2.0$
 D, 中央徑間(橋梁竣工): $V=135$, $T_0=2.5$
 詳細は第 4 表参照 T は縱、T は横振動、倍率 V は原記錄のもの、本圖の縮尺は 3.1:1

向を示し、曲線は殆んど水平であるか又は僅か増大を示してゐるかである。兩塔々頂の振動は塔が索條にて支えらる時にそれは單純であつたが (第 13 圖), *Galvanic* が加はり支鞍に數個の熱子を設置すると複雑となつた。此の複雑な作用は兩方向の塔の振動に入つて行つた。

中央徑間に於ける横週期一開始は索條の、而して終りはデッキの—は 20 秒の近くに止まつてゐたが床構の剛性に依つて (第 13 圖 D) 22 秒から 19 秒へと輕微な低下傾向を示した。徑間長が 4200 呎、高が 470 呎と言ふこの場合振子の作用をなす垂曲線の計算週期は 21 秒である。索條の原の縦週期は横週期のもの 1/2 半分である。若し索條が振動する糸の作用をなし水平及び垂直週期が同じであつたならば、短い方の週期は長い方のもの 1/2 最初の高周波 (Harmonic) であつたと言ふ事がありうる。中央索條は節點なるであらうから高周波は同一週期の北及び南の横振をかへる事に依り明白となり、之は縱成分を測定する器械に依つて記録されるであらう。

評 釋 一 般

工事に伴ふ橋梁の振幅變化

或橋梁部材の夫々異つた工事段階に於ける振幅を正確に比較すると言ふ事は不可能である。之は振幅と言ふものが構造物の弾性の外に非常に多くの様々な要因に支配されるが爲である。之等諸要因中には風速、風向、風の性質、作業、中人及び器械、交通及び波の運動がある。よしんば同一の外的条件下に 2~3 組の觀測をなしたとしても、器械的性質の支障困難は免れえないであらう。その主なるものは風速の現場觀測に伴ふ誤り、記録 (trace) から振幅を數學的に計算す

る時の誤り等である。斯る理由に依り或る一構造物の振幅を他の構造物の夫に比較し、又或構造物の一工事段階の振幅を他の工事段階の夫に比較して、決定的な結論を導く事は振幅の差違が著しくなければ安全な事ではない。

更に既に述べた處は別として本文に於ては1つの塔の2つの側に於ける特異な温度、荷重變化或は風にムラのない場合に於ける塔の偏傾等に依り起りうる長週期の變位を求めんとする試は本文に於ては何等なされてゐない。

前段に擧げた様な困難に就ては、通常の狀態に於ける塔の動搖の振幅程度は何呎や何時とか言ふよりは、一時の何分の一かであるとなす方が安全である。而して徑間中央部の振幅は暴風時は別として何呎と言ふよりは何時となすべきものである。地震時の振幅は恐らく幾分大であらう。

更に、塔に索條を取付くれば、縦振動の振幅は其の以前の値の10~50%に低下し、又灣橋の突桁徑間を連結すると中央徑間に於ける横振幅は自由な徑間に比しその約1/10に低下したが此の外の比較は少し安全ではない。

灣橋の橋脚は波浪の運動に相應じその影響を受けてゐるがその程度は橋脚頂に於けるよりは1/1000以上少ない。

工事に伴ふ塔の週期變化

若し索條及び床構造の大塊物が剛性の増大より大なる程度に塔の振動中に力學的に入つてくるとすれば、塔の週期は此の索條や床構が加はる事により増大するであらう。此の週期の増大は橋梁を横ぎる方向に、恐らく橋梁に平行のものと同じか或は大なる程度で起る事であらう。何となれば恐らく前者の方向の有効剛度は小さいと思はれるからである。然るに實測せる横週期は殆んど一定であるに反し灣橋では縦週期はその大きさが倍加したのであつた。索條の總體的或は部分的縦振動に依り起る鞍上の索條の縱推力及び牽引力を説明する事は可能である。若し此の解釋、説明が妥當であるならば索

條により有効質量が大いに増加したと言ふ事を考へる要はない。更に、橋梁完成時の中央徑間に於ける垂直振動は縱振動として支墩に傳導されるであらうから、従つて支墩に於ける觀測週期の一つは中央徑間に於ける垂直振動週期の反射であらう。

地震時に於ける橋梁性狀の豫測

地震時に於ける構造物の性狀の問題は本測量部の取扱ふ振動に關する作業中最も高級なものではあるが、之に對して現在では決定的な回答はできない。橋梁は今や竣工したがその設計中には地震と言ふ因子が考慮され包含されてゐる。普通狀態に於ける振動のデータをとり而して夫を本文に提示した。破壊作用を伴ふ地震時に於ける之等構造物の性狀を如上のデータに依つて豫言すると言ふ事は單なる空論に過ぎない。何故ならば、吾々は地盤が如何なる作用をなすかを知らず又震動せる地盤に對する構造物の反動に關する明確な知識もまだ乏しいからである。然し乍ら L. S. Jacobsen 及び Arthur C. Ruge の兩氏は振動臺上で事務所の如き建物及び高架水槽の模型の性狀を研究中であるが、將來に於ては強い地震波動に對する構造物の反動を若し之等の波の性質が知られるならば決定する事ができるであらう。要するに大地震が眞の試験を爲すのである。(Bulletin of Seismological Soc of America, Oct, 1937 By D. S. Corder)