

長大吊橋に対する調査研究の概要



昭和 40 年 5 月

建設省 土木研究所

(一) 長大吊橋に対する調査・研究の概要

1. 長大吊橋架設計画の概略

現在わが国で計画されている長大吊橋としては、東京湾環状道路、本州・四国連絡道路、第2関門道路がある。

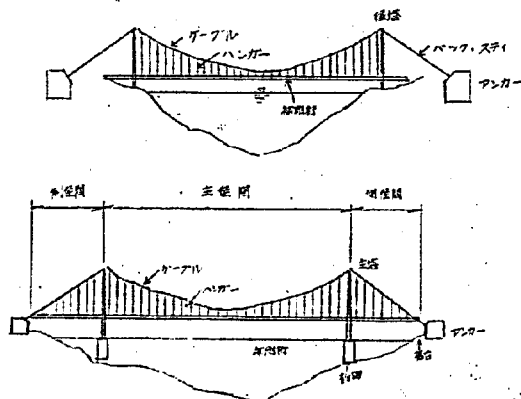
東京湾環状道路については、昭和38年度から予備的調査が開始されており、主径間長1500m程度の吊橋の建設が必要であるとみなされている。

本州・四国連絡道路については、昭和34年度から調査が開始され、Aルート（神戸—岡山線）、Bルート（宇野—高松線）、Cルート（日比—高松線）、Dルート（児島—坂出線）、Eルート（尾道—今治線）の5ルートにつき、地質、基礎工法、測量、海洋気象、設計、試験、経済各調査が行われ、昭和40年度中には、大略の結論を求めることになっている。本計画では海底地形と航路幅から制約を受け、ルートにより異なるが、主径間800mないし1500m程度の吊橋の建設が予定されている。

第2関門道路としては、現在関門国道トンネルがあるが、交通量の増加に伴ない、近い将来交通容量の不足を来すことが予想されるので、第2道路の建設が計画され、トンネルを増設するか吊橋を架設するかについて今年度中に結論を求め、吊橋架設に定まれば、明年度から本格的な調査に移る予定である。吊橋としては主径間900m程度のものが予定されている。

2. 吊橋の説明

道路用吊橋として、最も普通に用いられるものは、単径間吊橋、2ヒンジ3径間吊橋である。吊橋各部の名称を略図により説明する。



現在世界中の吊橋主径間長の大きなものから列挙すると表-1のとおりである。

表-1 世界の吊橋

順位	橋 名	主径間長	竣 工	所 在 国
1	ベラザノ ナラウド橋	1,298 m	1964年	アメリカ合衆国
2	ゴールデンゲート	1,280	1937	"
3	マキナック ストレート	1,158	1957	"
4	ジョージ ワシントン	1,067	1931	"
5	ターガス リバー	1,013	1967予定	ポルトガル
6	フォース ロード	1,006	1963	イギリス
7	セバーン	985	1966予定	"
8	タコマ ナロウス	853	1949	アメリカ合衆国
9	サンフランシスコ オ克蘭ベイ	704	1936	"
10	ブロンクス ホワイトストーン	701	1939	"

吊橋以外の型式の道路橋として最長のものは米国のベイヨン橋（鋼アーチ橋径間長504m）であり、また鉄道橋としてはカナダのケベック橋（カンチレバートラス橋、径間長548m）があるが、径間長500mを超える道路橋型式として、最も経済的かつ合理的なものは吊橋である。

しかしながら、吊橋は他の橋梁型式に較べて剛性が小さく、可撓性に乏しいため、強風・地震等の作用により揺れやすいという欠点を有しており、旧タコマ・ナロウス橋の例にも見る如く、強風により落橋したこともあるのでその設計には慎重な配慮を必要とする。

前節で述べたような主径間1500mに及ぶ大吊橋は、若しそれが実現されれば、現在計画中のメッシナ・ストレート橋（イタリア主径間長1524m）ハンバー橋（イギリス、主径間長1500m）と共に世界最長のものとなるが、台風常襲地帯に位置し、かつ世界有数の地震国である我が国の場合その設計には細心の注意を必要とする。

3. 長大吊橋建設上の問題点

我が国における海峡連絡吊橋建設上の問題点は、a. 海中に基礎を建設しなければならないこと、b. 我が国が台風地震等きびしい自然条件にさらされていること、c. 主径間長が従来に例を見ない程長大なことに由来する。

架橋路線の海中基礎の大部分は、

i. 潮流が速い

- ii 水深が大さい。
- iii 基礎地盤が软弱で水中深く掘削しなければならない。
- IV 海底露岩部の定着が困難である。
- V 諸外国に比べて基礎構造の寸法が大さくなる。

等の諸悪条件の幾つかを兼ね備えている。したがって、橋脚、アンカー・ブロック等を確実に施工する方法を見出すこと、水中掘削の効率よい掘削方法を見出すことは、架橋の成否を左右する重要な問題である。

つぎに我が国の自然条件は諸外国に較べかなり酷しく、台風時の強風により構造物に作用する力、地震時に作用する力は他の諸国の場合の数倍にも達する。このため、強風、地震時にも安定な形状寸法を有する吊橋を設計するためには、電子計算機を用いて行なう解析は勿論のこと、模型実験によりこれらの自然条件下における吊橋の挙動を確かめることが必要である。

また吊橋主径間長の増大に伴って、従来の吊橋には用いられなかった新しい材料を利用しなければならなくなる。小径間吊橋の場合、ケーブルにはワイヤーロープ型式、ロックド・コイル型式のもの、補剛桁、主塔等には一般構造用鋼材が用いられているが、海峡連絡吊橋のように長大なものの場合、ケーブルとしては平行線ケーブル、補剛桁、主塔などには高張力鋼を用いなければならなくなる。また橋床路面には軽量床版を用いることも必要となる。これら新材料の製作方法、施工方法もまた、架橋実施前に解決しなければならない問題である。

4. 海峡連絡吊橋の調査研究組織

海峡連絡橋を実現させる前には

- i 架橋の経済的影響ならびに経済効果の調査
- ii 架橋地点の地形、地質、気象、海象、地震等自然条件の調査
- iii 設計方法・施工方法および新材料を含めての材料調査
- IV 吊橋の耐風性、耐震性の調査
- V 船舶航行の安全性に関する調査
- VI 工事費の調査

等を行なわなければならない。このため建設省の内部においては、

a. 建設技監、道路局長、関係地方建設局長、土木研究所長により構成される幹部会議、

b. 道路局、地方建設局、土木研究所の調査研究担当職員をもって構成される担当省会議、

を置いて調査方針の検討、調査経路の連絡、調査結果の整理等の調整を行なうと共に、

地方建設局にあつては、

A. 調査事務所、工事事務所が、海峡連絡橋の計画・設計工事費概算に直接必要な調査等を行ない

B. 土木研究所にあつては、各担当研究室が、新しい調査方法、設計方法、施工方法構造型式の開発、最適材料の調査、耐風・耐震性の検討等を行っている。

また建設省外部の調査としては、日本国有鉄道（昭和39年度以降は日本鉄道建設公団）と共同して、日本土木学会に、本州・四国連絡橋の技術上の諸問題の調査検討を委託している。この委託にもとづき日本土木学会は昭和39年度以降、本州・四国連絡橋技術調査委員会を組織し、下部組織として基礎に関する専門部会、上部構造に関する専門部会、耐風設計小委員会、耐震設計小委員会を設け、緊要の可能性と技術上の問題点の検討に当たっている。

5. 土木研究所における調査・研究の内容

海峡連絡橋の技術上の諸問題を解決するため、土木研究所で現在行なっている調査研究は次の如きものである。

構造研究室	吊橋の耐風安定性・耐震性の研究
橋梁研究室	高張力鋼、ケーブル系架、懸吊床状の研究
橋梁調査室	吊橋上部構造の設計方法、荷重の研究
基礎調査室	基礎地盤調査方法の開発、現地資料の室内試験、基礎構造の設計方法の研究
機械研究室	水中掘削機架の開発、平行線ケーブル架設方法の研究
地質研究室	現地地質条件の調査
化学研究室	塗料の調査、放射能測定による地質調査方法の開発研究
舗装研究室	路面舗装の調査研究
コンクリート研究室	海中コンクリート施工方法の研究、軽量コンクリートの調査
河川研究室	耐風力に関する研究

(二) 吊橋の耐風安定性・耐震性の調査研究

(二) の 1 橋梁試験用風洞実験及び施設

1. 風洞実験の必要性

本州・四国連絡橋のように長大間を橋梁で連絡しようとする場合、吊橋形式が最も経済的であることは周知の通りである。しかし吊橋はその構造上剛性が他の橋梁に比して小さく、空気力学的障力のために振動を誘起し易く、時としては破壊に至ることがある。(表-1参照)

特に Tacoma Narrows 橋の落橋は当時世界第3位を占めていた長大吊橋であつただけに工學界に大きな衝撃を与えると共に近代吊橋理論及値の機会を提供し、結果による研究が開始された画期的な事件であつた。

爾來、現在に至るまで種々の理論が紹介され、また大規模な実験も実施されたが、未だ甚たる理論率价はなく風洞実験によって空気力学的特性を求めなくてはならないのが現状である。

特に台風常襲地帯に位置した我が国において長大支間の橋梁を計画する場合には耐風特性を無視してかかることは絶対に不可能なことである。

表-1 風による吊橋の被害例

橋 名	所 在 地	支 間	被害年
Dryburgh Abbey	Scotland	88.5m	1818
Union	England	137	1821
Nassau	Germany	74.7	1834
Brighton Chain Pier	England	77.8	1836
Montrose	Scotland	132	1838
Menai Straits	Wales	177	1839
Roche Bernard	France	195.5	1852
Wheeling	U. S. A	308	1854
Niagara Leiviston	U. S. A	318	1864
Niagara-Clifton	U. S. A	334	1889
Tacoma Narrows	U. S. A	855	1940

2. 施設の概要

この施設は昭和39年度に建設されたものでその概要は次の通りである。

(図-1参照)……別添

(連屋関係)

針別建屋：約720m²

1 階：模型製作室，備品庫，暗室，変圧・堅固検査室他

2 階：測定観測室，計測機械室，計器室，解析機械室，解析室，資料室，模型格納室，他

風洞建屋；約 220 m^2

1 階：資材搬入路，資材置場

中2階：風洞室

(風洞関係)

形式；水平単回路回流式風洞（開流・閉鎖併用可能）

寸法；吹出口 $3.000 \times 1.800 \text{ mm}$ （角切辺長 300 mm ）

測定部 2.000 mm

風路 16.000 mm

絞り比； $1 : 6.25$

送風機；直径 $3,300 \text{ mm}$

出力 100 kW

風速；最大 20 m/s （開放時）

最大 21 m/s （閉鎖時）

3. 実験項目

本風洞では吊橋等の橋梁構造体の空気力学的特性が求められるが、当面の実験対象は本州・四国連絡橋の吊橋遊脚及び塔体部である。これらは何れも約 $1/100$ に縮小した模型にして風洞に設置され、主として次の3種の項目について実験が行なわれる。

(1) 作用空気力の3成分測定（抗力，揚力，モーメント）

これより吊橋の基本設計に用いる風荷重を定めるための資料が得られる。

(2) 空気力による振動特性の測定

これより強風を受けた場合の吊橋の動的な特性が求められる。

(3) 非定常空気力の測定

これより振動時の吊橋の特性を解明するための資料が得られる。
なお、自然の風には地形の影響，風の渦動などのための乱れが含まれ，その特性は風洞風とは異なる。従って風洞内において求められた特性が自然風に対してどのようなになるかという問題が残る。この問題はより高度の困難を伴うものであるが，本風洞施設はこの問題の研究を進めるため，風洞風に乱流を発生させるための装置が取り付けられるよう考慮されている。現在計画中の振動特性は次の通りである。

$$V = V_a + v \sin 2\pi f t$$

$$\text{ここに } V_a = 10 \text{ m/s} \quad \begin{cases} v = 0 \sim 2 \text{ m/s}, & f = 0 \sim 3 \text{ s/s} \\ v = 0 \sim 3 \text{ m/s}, & f = 0 \sim 2 \text{ s/s} \end{cases}$$

(二)のえ 本州四国連絡架橋吊橋の模型による耐震実験

1. 実験の目的

まず吊橋の振動特性、すなわち固有周期、振動モード等を実験的に求め、その結果を、力学モデルを想定して計算から求めた振動特性と比較検討して、計算に用いべき力学モデルをより合理的なものに改善する。

次に地震動と等価な任意波形の加振を模型に与え、その振動応答を求める。その結果を実橋に換算して、それと力学モデルを想定して計算から求めた吊橋の地震応答の結果とを比較検討して、適切な吊橋の応答計算法を求める。

え. 実験の概要

図-1に示してある吊橋の模型は構造主系が実橋の $1/100$ の振動実験用の模型である。現在、実験室内に設置されている模型はこれと同じ寸法をもっている。この模型吊橋の四つの支点はそれぞれ四台の加振機に支持されており、ケーブルの端部は実験室の基礎に碇着されている。

模型の規模はつぎの通りである。

中央径間長	15.00	M
側径間長	7.50	M
主塔の高さ	2.10	M
模型の重量	A	220 Kg
	B	1200 Kg
	C	2200 Kg

模型の重量は写真-1に見られる円筒形の重量を模型の各部に装着することによって三通りに換ふことができる。これらは目的に応じて、Aの場合は主として補剛桁・ケーブルを測定の対象とした場合、BとCの場合は主として主塔を対象とした場合に用いられる。

このような模型が四台の加振機によつて励振されたときの模型各部の変位と加速度が、測定される。

3. 実験方法

3-1 加振の方法

振動台は図-2のブロックダイヤグラムに示してあるように、四台ともしつづれも大きく別けてつぎの三つの部分からなっている。

- ・ イコライザー
- ・ 加振制御器
- ・ 加振機

イコライザーは振動台と模型の両者を合わせた周波数特性を加振機の部分で平坦にする機能をもっている。

加振制御器は下記の二通りの発振波形を選択することができる。

- ・ 正弦波形
- ・ 任意波形
 - ホワイト・ノイズ（内部に発生装置をもつ）
 - 地震波形（外部から供給）

正弦波形の加振時には、加振制御器によつて変位・速度・加速度をそれぞれ一定に保ち、 5% — 2000% の振動数範囲で、自動的かつ連続的に振動数を変化させることができる。

加振機は加振制御器の電圧の変化に応じて、内部の可動線輪が電磁氣的な振動を強制され、それが機械的に補助振動台に伝えられる。

各振動台の能力は表一のとうりである。

実験時には目的に応じて正弦波の場合と任意波形の場合が別個に用いられ、また四台の加振機を同時に用いる場合と一部分を用いる場合などがある。

・ 3-2 測定の方法

図-3に示すような系統で、換震器が受感した振動の変位・加速度等がそこで電氣的な置に変換され、最後に磁気銀管テープおよびオシロペーパーに記録される。

3-3 一次解析

オシロペーパーに記録された変位・加速度等はモニター用に用いられるもので成分数もごくわづかである。大部分の振動現象は磁気テープに記録されてしまう。一旦録音されて磁気テープに収められた振動現象のアナログ量は後刻、磁気レコーダーで再生され、同時にA-D変換器にかけられ“さん孔テープ”として得られる。このテープをデジタル電子計算機の入力信号にして振動現象が数値化され、更に必要に応じた一次解析を計算機自身が行ない、所要のデータが得られる。

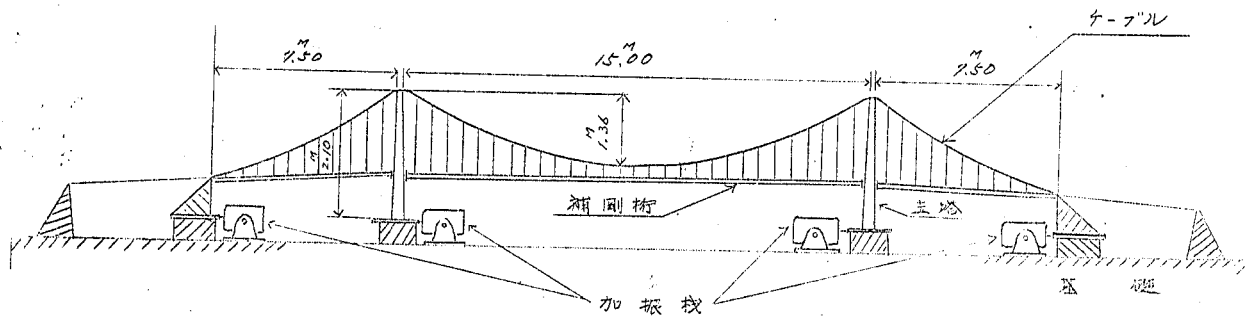
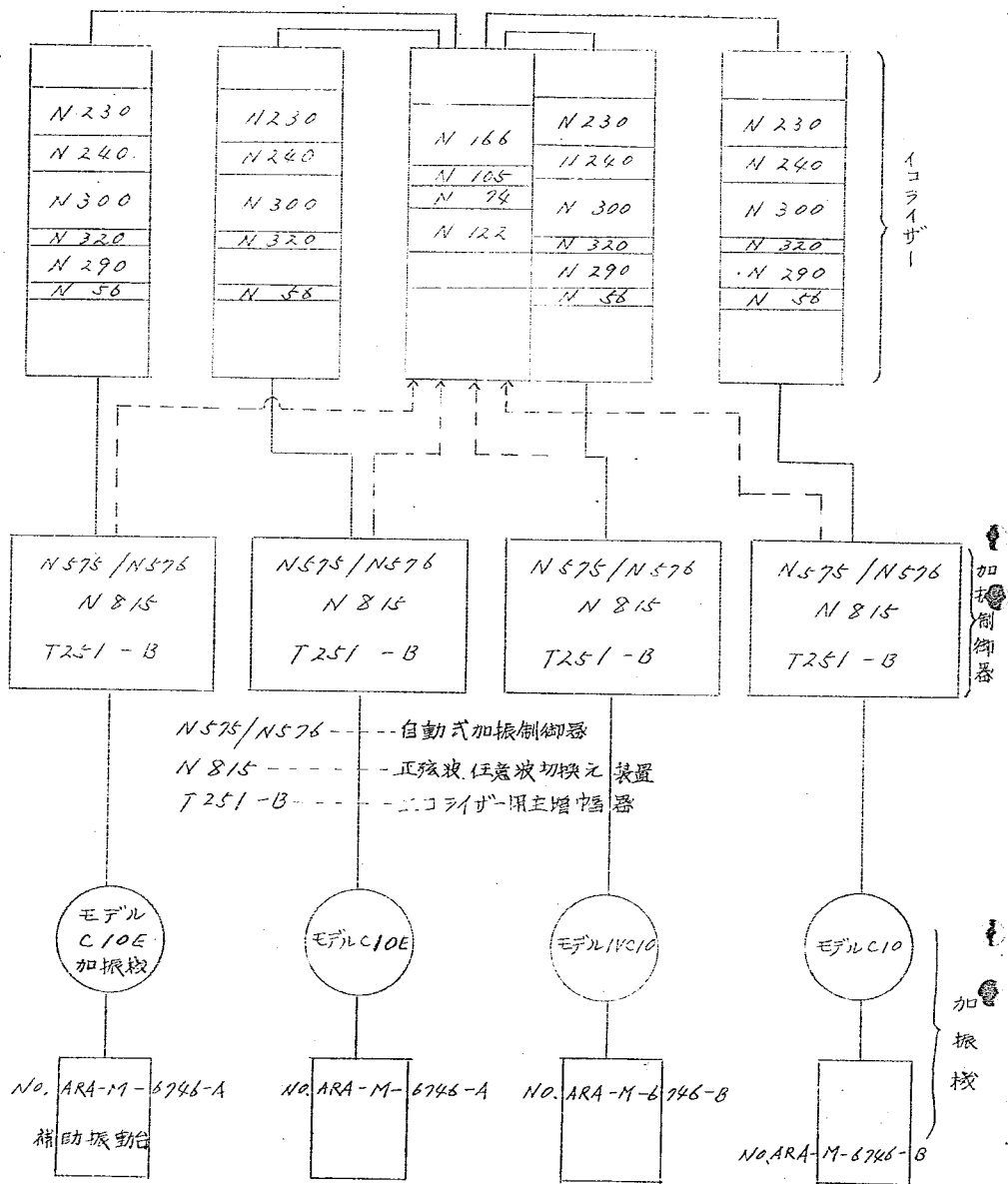


図-7 模型の概略図

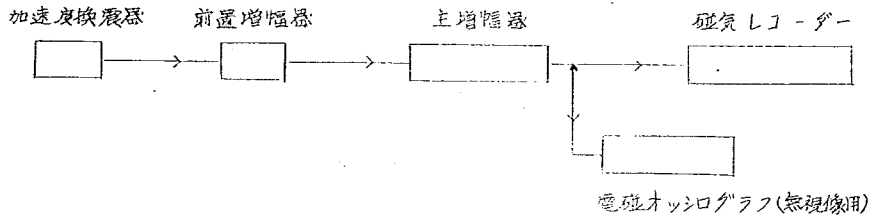


N 56 --- 振幅用プロテクト制御器
 N 74 --- X-Yレコーダー用入力セレクター
 N 80 --- 任意波形発生器
 N 122 --- スペクトル強度計
 N 165 --- 自動対数変換器

N 166 --- X-Yレコーダー
 N 230 --- 入力信号セレクター
 N 240 --- ランダムエコライザー
 N 290 --- エコライザー用主増幅器
 N 320 --- 出力用セレクター
 N 300 --- スペクトル制御ハネル

図-2 振動台のブロック・ダイアグラム
 (10)

(加速度を測定する場合)



(変位を測定する場合)

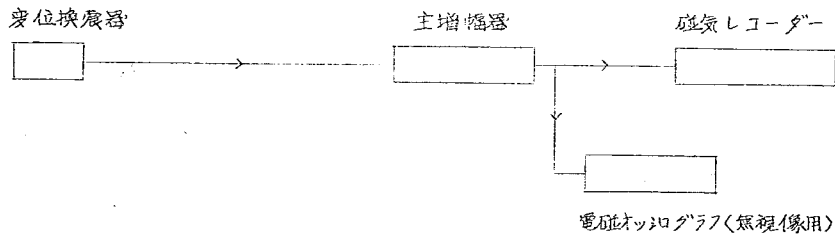


図-3. 振動測定のプロ・ダイアグラム

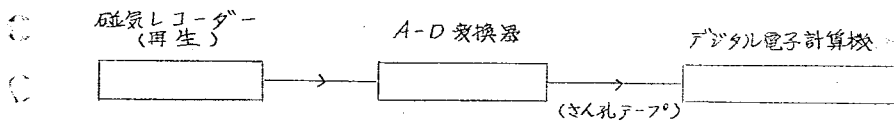
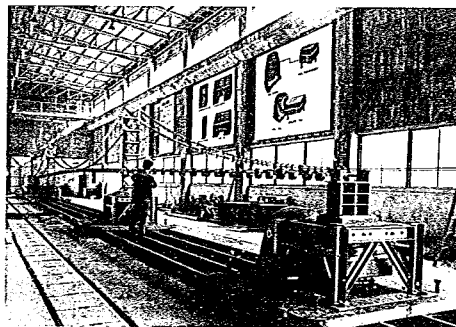
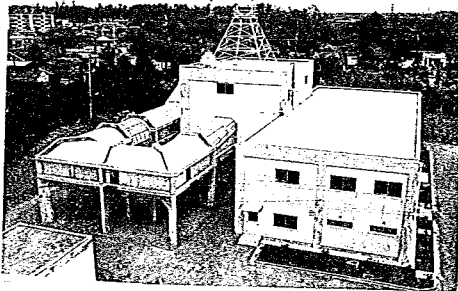
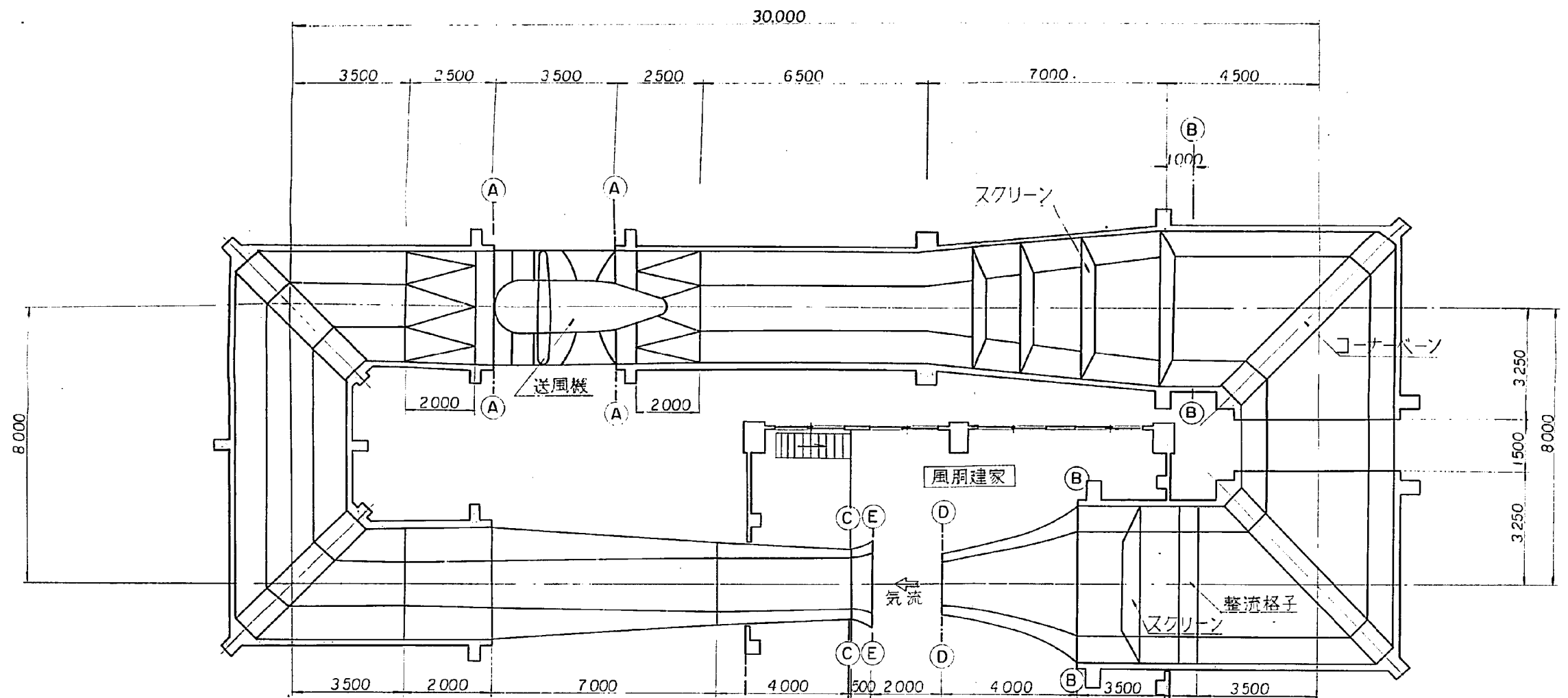


図-4. 一次解析のプロ・ダイアグラム

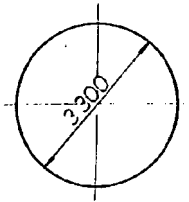
表-1 振動台の性能(一台当り)

性能 \ 波形	正 弦 波	任 意 波
加 振 力	545 KG	386 KG R.M.S. 1159 KG PEAK
加振振動数範囲	5 ~ 3000 CPS	20 ~ 2000 CPS
最 大 振 幅	25.4 MM(±12.7 MM)	25.4 MM(±12.7 MM)
最 大 加 速 度	63.5 G	46 G
最 大 速 度	177.8 MM/SEC	177.8 MM/SEC

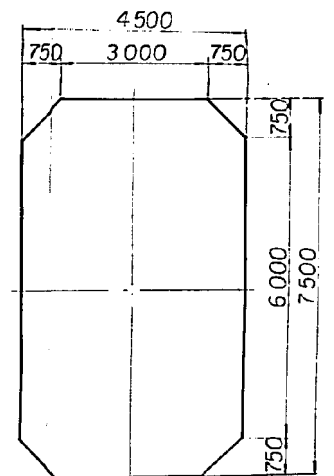




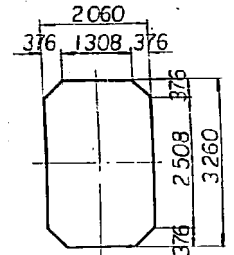
Section A-A



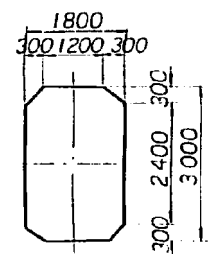
Section B-B



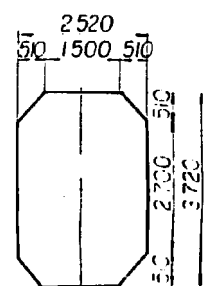
Section C-C



Section D-D



Section E-E



T.M-7 F.T-9 F-683