土木試驗所報告

第三十三號

昭和十一年　第一册

砂利路面工の配合比に關する試驗……山田元雄 船山時男

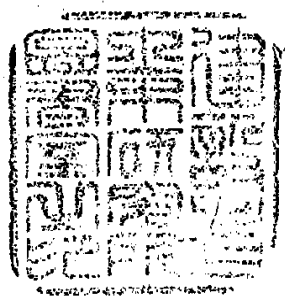
鋼棒鋲接合壓縮試驗……青木楠男 鈴木倫虎

基礎版の基本的研究（第2報）基礎桁……松村孫治

道路鋪裝用アスファルトの力學的特性に就て（其の1）……島田八郎

停止波に就て……横田周平

1936 — III



内務省土木試驗所

正誤表

頁	行	誤	正
76	下より 11行	$0.144\,a_2$	$0.144\,\dot{a}_2$
84	上より 6行	$\frac{bL^4}{E_1 I}\Big\{$	$-\frac{bL^4}{E_1 I}\Big\{$
92	下より 7行	$-\frac{y^2}{12}$	$-\frac{y^3}{12}$
96	上より 11行	$V_q\frac{bL^4}{E_1 I}$	$V_q=\frac{bL^4}{E_1 I}$
98	下より1行及2行	$\left(\frac{dv_p}{dx}\right)_{x=0}$	$\left(\frac{\partial v_p}{\partial x}\right)_{x=0}$
131	下より 8~9行	$1.01\times10^7,\ 3.11\times10^7$	$3.11\times10^7,\ 1.01\times10^7$
139	上より 12行	$+\mathfrak{S}'_{mv}$	$-\mathfrak{S}'_{mv}$

土木試驗所報告

第三十三號

序　　言

本報告は「砂利路面工の配合比に關する試驗」「鋼橋鎔接沓壓縮試驗」「基礎版の基本的研究（第2報）基礎桁」「道路鋪裝用アスファルトの力學的特性に就て（其の 1）「停止波に就て」等を輯錄せるものである.

砂利路面工の配合比に關する試驗　は土，砂及砂利の配合比を異にする 16 種の砂利道を築造し略ゝ實際に近き車輪の作用に據り其耐力を比較實驗し，乾濕兩種に亘り如何なる配合が最も適當なるかを明かにし以て砂利道築造の資に供せむとするものである.

鋼橋鎔接沓壓縮試驗　は內務省橫濱土木出張所の架設にかゝる鎔接鐵道橋瑞穗橋の支承沓に就て行つた强度試驗の結果を報告したるものにして此種鎔接沓が充分所期の强度を發揮し得るものなることを明かならしめたものである.

基礎版の基本的研究（第2報）基礎桁　は彈性地盤上に設置せる基礎桁に作用する應力の近似計算法に就き述べたものである.

道路鋪裝用アスファルトの力學的特性に就て（其の 1）　は靜的動的荷重下に於ける力學的性質を明かにする爲め —5°C 乃至 35°C に於て數種の異る荷重に對する可塑係數（粘性係數）を明かにし，可塑性の大なる物質に對する靜荷重による實驗の意義を論及し，歪力消失現象の有無を吟味し，水硝子の特性と比較し，一般的に此種物質の性狀を闡明にし，更にピエゾ壓力計及びオッシログラフ を使用し壓縮狀態に於ける自己振動中の彈性特性を明かにし，固體粘性係數を推定し以て振動減衰現象に論及し，以上各種の見地よりアスファルトの鋪裝工學及材料工學上の位置を明かにしたものである.

停止波に就て　は時間に獨立に，空間に固定せる停止波の存在を解析的に證明せるものにして，算出せる波長を實際の波長と比較し，以て所論の大過なきことを示したものである.

昭和十一年三月

內務省土木試驗所長　內務技師　物　部　長　穗

目　　次

砂利路面工の配合比に關する試驗 …… 1

內務技師　山　田　　元
內務技手　船　山　晴　雄

鋼橋鎔接眷壓縮試驗 …… 31

內務技師　青　木　楠　男
內務技手　鈴　木　倫　虎

基礎版の基本的研究（第 2 報）基礎桁 …… 69

內務技師　松　村　孫　治

道路鋪裝用アスファルトの力學的特性に就て（其の 1） …… 99

內務技師　島　田　八　郎

停止波に就て …… 157

横　田　周　平

砂利路面工の配合比に關する試驗

內務技師　山　田　　元
內務技手　船　山　晴　雄

目　次

緒　言 …… (1)
I　試驗方法 …… (2)
II　試驗の經過及結果 …… (6)
III　要　約 …… (25)

緒　言

路面を構成する砂利は車輪の複雜な作用を受け，單なる鉛直荷重の支持材ではないから，所謂砂利と稱せらるゝ粗骨材の外に，骨材相互を密着せしめる膠着作用を有する材料を混合する必要があり，通例砂利路面工（所謂砂利道）に於ては此の作用を爲すものは土砂である．然るに路面工は車輪の作用の外に，複雜な氣象作用を受けるが，一般に砂利路面工の膠着材たる土砂は氣象作用に由つて其性質を變化すること甚しく，其影響を路面工全體に及ぼすものである．故に砂利路面工の配合比，即ち粗骨材たる砂利，細粒骨材たる砂及膠着材たる土の比率如何は其路面としての耐力に至大の關係がある．殊に最近の如く其表面に加工して自動車交通に對する耐力を增大せしむる所謂路面處理砂利道の應用盛なるに至つては此比率如何は經濟上一層切實な問題である．然るに從來砂利道と稱せられる路面は單に表土又は在來路面上に川砂利を或る厚に撒布し，別に膠着材を加へず交通に由る輾壓作用と氣象作用とに由つて自然に固結するに委したものに過ぎないから，其配合の如きは深く顧慮する所なく，適々砂利粒度を示方するものに於ても僅に 200 番篩通過材の最大限度を示すに止まるが如き狀態であり，從つて砂利道の許容交通量とか經濟的交通量とか云つても其意義甚だ分明を缺くのである．

砂利道が今日まで斯くの如く非科學的に取扱はれて來たのは一つには本邦に於て砂利が比較的豐富であつて安價に得られるからであるが，其主要構成材であり且締合材である土の性質が從來一般材料工學に於て取扱はれて居る彈性的材料でないが爲である．即ち斯種材料に對しては彈性體の如く單一試驗の結果を綜合して考察するのみでは解決し得ず，從つて實際路面上の現象に就て考察する必要があるからである．幸に本所は實際路面上の現象と殆ど同樣の現象を再現し得る試驗設備を有するを以て該設備を利用し先づ市販の砂利及砂，東京山手赤土各 1 種を採り，各種配合の試驗路面を作り，種々の氣象的條件の下に，

其各種輪帶の車輪に對する耐力を比較測定して其許容交通量を推定し，且從來の如き無造作且緩慢な築造及維持工法が果して將來も尙是認さるべきか否かを檢討せむとするものである．固より土砂の工學的性質及其氣象作用に由る變化は土砂其物の材質に由つて異るもの頗る多く，且之を支配する共通的方則が多く不明である今日，本試驗の結果は一般的通性を有するとは稱し難いが近似せる性質を有する材料に對しては或程度まで之を適用し得るものと信ずる．

I. 試驗方法

〔1〕 試驗概說

試驗は甲種道路試驗機[1] を用ひ，平均徑約 10 m の環狀の試驗路面の一部に，配合又は含水率を異にする各種の砂利路面工を設け，其上に直徑 1 m，重量約 1 瓲の車輪 8 個を，空氣入ゴム，固形ゴム及鐵等の各種の輪帶を混用し約 3 哩/時 の速度を以て各獨自の徑路を回轉走行せしめて路面の破壞に到る經過及結果を觀測し且其許容通過荷重量を測定した．利用し得る試驗路面狹少なりし爲試驗は比較的長時日を要し，昭和 9 年 6 月 14 日第 1 回試驗路面を築造してより昭和 10 年 8 月 9 日第 16 回試驗を終るまで約 1 年 1 ヶ月に亘つた．試驗回數を異にせるものは同一種類のものと雖も其構造嚴密に同樣ならざるを以て嚴密なる比較を明かにし得ないが大略の耐力は之を比較し得る．

〔2〕 使用材料の性質

斯種の試驗は材料の原產地に由つて其結果大に異るべきは想像するに難くないが，本試驗に於ては先づ砂利，土及砂各 1 種に止めた．

砂利　は埼玉縣北足立郡吹上村地先荒川產のものにして其性狀第 1 表に示すが如く

第 1 表　砂利試驗成績表

試驗項目	試驗數値	篩分成績 篩目	百分率	篩目	百分率
比重	2.647	40 mm 通過 30 mm 止	0.5	5 mm 通過 8番 止	7.7
吸水率 %	0.76	30 〃 25 〃	0.5	8番 〃 16 〃	2.5
單位重量 kg/m³ (同上輕詰)	1756. (1654.)	25 〃 20 〃	5.0	16 〃 30 〃	0.6
空隙率 % (同上輕詰)	32.7 (37.4)	20 〃 15 〃	22.7	30 〃 50 〃	0.3
粘土泥土百分率 %	0.2	15 〃 10 〃	30.6	50 〃 100 〃	0.1
		10 〃 5 〃	29.2	100 〃 200 〃	0.1
				200 〃	0.2

1) 土木試驗所報告第 13 號參照．

最大 40 mm 以下なるも主として 20 mm～5 mm のもの多く其量 82.5% に達する.

砂　は東京市王子區地先（東北本線鐵道橋附近）荒川産，其性狀第 2 表に示すが如く比較的細粒にして主として 50 番乃至 100 番のものより成り室内乾燥の程度に於ける吸水率は平均 1.71% である.

第 2 表　砂試驗成績表

試驗項目	試驗數値	篩分成績 篩目	百分率	篩目	百分率
比重	2.65	5 mm 通過 8番止	0.2	50番 通過 100 止	54.6
單位重量 kg/m³	1416.	8番 〃 16 〃	0.2	100 〃 200 〃	12.8
空隙率 %	46.5	16 〃 30 〃	1.3	200 〃	2.2
粘土泥百分率 %	2.2	30 〃 50 〃	29.8		

土　は東京市瀧野川區内産所謂「東京山手赤土」の 1 種[1]にして其性狀概要第 3 表に示すが如く粘土分 61.2% に達し曩に本所に於て試驗報告[1]せるものと略ゝ同質のものである. 其地表面に堆積貯藏中に於ける含水率は 18.4% 乃至 102.0% である.

第 3 表　土試驗成績表

試驗項目	試驗數値	篩分成績（沈澱法） 篩目	百分率	
比重	2.415	5 mm 通過 10番 止	0.4	
收縮限界 %	56.81	10番 〃 20 〃	0.2	
收縮比 %	1.03	20 〃 30 〃	0.3	
液狀限界 %	129.6	30 〃 40 〃	0.6	
可塑性限界 %	92.2	40 〃 50 〃	1.1	
可塑性指數	37.4	50 〃 80 〃	2.7	
遠心力含水當量 %	67.0	80 〃 100 〃	1.9	
野外含水當量 %	81.1	100 〃 200 〃	9.2	以上砂 16.4%
單位重量 kg/m³	672.	200 〃 0.01 mm 〃	22.4	泥
空隙率 %	72.2	0.01 mm 〃	61.2	粘土

〔3〕 路面工の構造，種別及施工

試驗路面は内外 2 列の環狀鐵筋コンクリート側壁内に設けられ幅員 76.2 cm，中心線直徑 10.06 m，延長 31.6 m，面積 24.08 m² の一部，中心線延長約 5.93 m，面積約 4.52 m² で，之を 6 等分し一區間中心線延長約 0.99 m，面積 0.75 m² とし同時に 6 種類を比較し得る. 路面は兩側各約 8 cm を除く中央 60 cm に對し 8 個の試驗車輪が相接して各獨

1) 土木試驗所報告第 20 號 1～26 頁，全第 22 號 116～121 頁，全第 31 號 2 頁

自の路線を反覆走行するものである.

(1) 路床　は單位重量 1.659 kg/m³, 粒度 40～25 mm 18.8%, 25～20 mm 16.4%, 20～5 mm 64.8% の砂利を厚約 1 m 填充して搗固めたるものにして直徑 20 cm の圓形加壓面による平均地床示數 (Modulus of Sabgrade Reaction, Bodenziffer) 12.0 kg/cm³[1] にして本區域中略ゝ均等と看做し得る.

(2) 基礎　は前記路床上に厚さ約 20 cm に築造せる砂利層にして, 前述路床用砂利に砂, 赤土及水を加へて鐵板上にて混合せる後散均し鐵製搗固器 (重量 11 kg, 底面積 110 cm²) を以て充分搗固め下 2 層は 7.5 cm, 上層は 5 cm の厚さに仕上け, 完工直後の平均地床示數 (直徑 20 cm の圓形加壓面に由る) は 8.70 kg/cm³, 表層施行直前の平均地床示數は 13.8 kg/cm³ にして本試驗區域中略ゝ均等と看做し得る. 表層施工直前基礎は表面下 3 cm までは充分乾燥して居た.

第 4 表 表層種別

表層番號	配合 (砂利に對する重量%) 土	砂	乾濕程度	試驗回數	表層番號	配合 (砂利に對する重量%) 土	砂	乾濕程度	試驗回數
(1)	5	0	D W O	1 1 1	(9)	10.0	10.0	D W O	2 3 2
(2)	7.5	0	D W O	1 1 1	(10)	12.5	12.5	D W O	3 4 3
(3)	10.0	0	D W O	5 2 1	(11)	15.0	15.0	D W O	2 2 2
(4)	12.5	0	D W O	5 2 1	(12)	17.5	17.5	D W O	3 3 3
(5)	15.0	0	D W O	7 3 2	(13)	12.5	18.7	D W O	1 1 1
(6)	17.5	0	D W O	7 3 2	(14)	12.5	25.0	D W O	1 1 1
(7)	5.0	5	D W	1 1	(15)	15.0	30.0	D W O	1 1 1
(8)	7.5	7.5	D W	1 1	(16)	17.5	26.2	D W O	1 1 1

1) 土木試驗所報告第 27 號 150 頁參照.

第5表 試験用車輪の性状

P は空氣入ゴムにして（ ）内数字は管氣壓 (kg/cm²), G は固形ゴム, S は鐵輪帶

車輪番號	輪帶種別	輪帶寸法 直徑 (cm)	輪帶寸法 幅 (cm)	荷重 (kg)	路面との接觸面 長 (cm)	路面との接觸面 幅 (cm)	路面との接觸面 面積 (cm²)	變形量 (mm)	壓力度 輪帶幅1cmにつき (kg/cm)	壓力度 單位面積 kg/cm²	標準許容荷重に對する倍率	構造令規程125 kg/cmに對する倍率	摘要
1	P (4.23)	86.84	10.00	1019	28.3	6.7	174.5 (125.4)[1]	37.0	152	5.83 (8.10)[1]	2.64	1.21	標準許容荷重 385 kg
	G	89.85	8.75	1104	16.7	5.8	81.0	10.9	191	13.64	1.87	1.53	1) 純接觸面積 標準許容荷重 590 kg
2	P (4.23)	86.84	10.00	896	29.5	6.7	180 (134)	33.3	134	4.95(6.68)	2.32	1.07	
	G	89.85	8.75	1028	19.0	6.3	98.3	11.0	163	10.45	1.74	1.30	
3	S	98.98～98.43	7.62	1341		7.62			177			1.42	
4	S	98.58～97.39	7.70	1360		7.70			177			1.42	
5	P (4.23)	81.92	10.00	907	26.0	6.8	162 (121)	33.5	133	5.60(7.50)	2.35	1.06	
6	G	78.11	8.75	911	15.0	6.1	78	10.1	149	11.70	1.54	1.19	
7	G	78.11	8.75	957	15.5	5.8	80	10.5	165	11.95	1.62	1.32	
8	P (3.52)	79.38	10.00	781	29.0	6.0	165 (124)	36.0	130	4.73(6.30)	2.02	1.04	
	G	78.11	8.75	949	17.0	6.2	86.0	10.5	153	11.00	1.61	1.29	
計	A			8,304									1P 2G 8P
	B			8,425									1G 2P 8G
	C			8,557									1G 2G 8G

（標準壓力度はゴム輪帶に對しては標準許容荷重に基き空氣入 385 kg, 固形 590 kg とし鐵輪帶に對しては構造令規程 125 kg/cm を採る）

(3) **表層概說**　表層は仕上厚 8 cm, 厚各 4 cm の 2 層に分ち施工するものとし, 豫め鐵板上にて所定の配合の材料 1 回約 130 kg を各材充分均一となるまでショベルにて混合せる後前記基礎面上に散均し, 木蛸 (重量 24.4 kg, 底面直徑 25 cm, 面積 491 cm²) を以て下層 3 通り上層 6 通り搗固め, 周圍は鐵製搗固器 (重量 11 kg, 底面積 110 cm²) を代用した. 配合は砂利 100% に對する土, 砂 (各乾燥重量) の百分率を以て表はし, 土は 5% より初め 2.5% 宛を增加して最大 17.5% に達せしめ砂は 0 より初め, 土との比を重量 (乾燥) 1:1, 1:1.5 又は 1:2 とし第 4 表に示す 16 種とし, 其多くを乾燥 (表中 D を以て示す), 濕潤 (W) 及適濕 (O) の 3 種とし總計 46 種に達した. 表層は同時に築造するを理想とするが必ずしも同日に全部を施工する能はず, 同日に施工しても築造時間によつて其の性質を異にするから孰れも築造後數くとも 1 回は其表面を充分乾燥せしめて後試驗に供し築造の際に於ける水分の相違による影響を數からしむるに努めた.

(4) **表層各說**　表層は其耐力に著しい相違ある爲, 勢ひ試驗の都合上同一種類のものも數回試驗するの已むなき場合あり, 併も試驗回數の異なるに從ひ, 其性狀を異にするものあるを以て, II に試驗結果と併記した.

〔4〕 試驗車輪

試驗に使用せる車輪は其構造上全部彈下荷重 (Unsprung Weight) にして輪帶は 8 個の內, 外側より數へて第 3, 第 4 を常に鐵輪帶, 第 2, 第 6, 第 7 を常に固形ゴム輪帶, 第 5 を常に空氣入ゴム輪帶, 其他の第 1, 第 8 は固形又は空氣入ゴム輪帶を混用した. 運轉には 4 個を動輪 4 個を從輪とした. 各車輪は土木試驗所報告第十三號, 第二十七號に詳細報告せるものにして概要第 5 表に示すが如く, 之を標準許容荷重, 構造令規程荷重等に比較すれば著しく過大にして本試驗結果の實際に比し過酷なるを示して居る. 車輪の速度は各異り平均約 3 哩/時 にして 1 周に要する時間は 25.5 秒である.

II. 試驗の經過及結果

〔1〕 經過及結果の概說

試驗は 1 回に 6 種を採り濕潤狀態略ゝ所定の程度に達し, 且築造當初の諸條件の影響比較的輕微と認めらるゝに到つて前述の車輪を平均 3 哩/時の速度を以て走行せしめ路面破壞の度相當進捗せる時機械の運轉を中止して其路面狀況を比較した. 各種路面共鐵輪帶の影響極めて著しく主として該部分の破壞の爲運轉を中止するに至つた. 他種輪帶の部分は鐵輪に隣接せる部分を除き多くは未だ其耐力を充分測定し得る程度に到らなかつた. 運轉を中止するに至つた破壞の程度にも一定の標準はなく, 且各種路面共或る程度までの破壞は比較的短時間に進捗するが, 種類に由つては其後は極めて長時間の運轉を許容するものも

あるから，試驗時を異にせるものに就き運轉時間の長短に由つて其耐力を比較するは困難である．各試驗の運轉時間及通過荷重を一括すれば第6表の如く，其經過及結果の概要を一括すれば第 7 表の如くである．

〔2〕 各種別の性狀及結果

（1） 表層第1種 (土 5:砂 0:砂利 100)

乾燥路面 (1) D は築造後 9 日，路面充分乾燥せる後 1.8 l/m² の割に撒水し 11 日經過して再び充分乾燥せる後第 1 回試驗を行つたが鐵輪帶路線 3 及 4 より破壞し始め運轉 4 分間最大鐵輪通過荷重 12.8 瓲にして路線 1 乃至 7 に亘る區域甚しく破壞し，特に路線 4 は表層全厚破壞したが路線 8 は大なる變化なく空氣入輪帶に對しては通過荷重 7.3 瓲，相當交通量 310 瓲以上を許容することを示した．

濕潤路面 (1) W は (1) D の材料を全部取出し再使用施工せるものにして，施工後 1 日 3.4 l/m², 2 日 3.9 l/m² 撒水し 4 日後路面乾燥せる時再び 3.4 l/m² 撒水し，其後降雨數回の後乾燥路面に 4.4 l/m² 撒水して路面を充分濕した後第 2 回の試驗を行つたが運轉僅に 2 分間にして全路線に亘り破壞し空氣入ゴム輪帶通過荷重 3.6 瓲，相當交通量 150 瓲に堪へざることを示した．

適濕路面 (1) O は全部新材料を用ひ從來と同樣工法にて施工せしに固結不充分の爲 7.2 l/m² を撒水し 5 日後充分乾燥せる後 9.5 l/m², 其後 3 日を經て 3.0 l/m² 撒水し更に 2 日後路面乾燥し過ぎた爲 4.1 l/m² 撒水し表面適度の濕度に乾燥するを待つて第 3 回試驗を行つたが運轉開始後 4 分間にして全區域に亘り基礎面に達するまで破壞し其耐力空氣入ゴム輪帶に對し 7.3 瓲，相當交通量 310 瓲に過ぎざるを示した．

（2） 表層第2種 (土 7.5:砂 0:砂利 100)

乾燥路面 (2) D 施工及手當 (1) D 同樣とし撒水量稍〻多く 2.3 l/m² とす，第 1 回試驗の結果は (1) に比し稍〻良く破壞路線は 1～5，破壞せる厚は鐵輪下にても基礎上約 2 cm に止まる．固形ゴム輪帶に對し通過荷重 9.1 瓲，相當交通量 392 瓲に堪へ得 (1) D に稍〻勝るも鐵輪帶に對しては通過荷重 12.8 瓲，相當交通量 416 瓲を出でない．

濕潤路面 (2) W は 9 年 7 月 5 日前回の材料に不足を補つて再使用施工し，6 日午前 1.6 l/m²，午後 1.9 l/m²，7 日午前 1.9 l/m²，午後 2.0 l/m²，及 9 日午前 3.1 l/m² 撒水し其後氣象による乾燥及濕潤作用を受け 7 月 30 日 4.3 l/m² 撒水して濕潤狀態とし第 2 回試驗を行つたが運轉僅かに 2 分にして路線 1 乃至 5 破壞し，路線 6, 7 少しく沈下し唯路線 8 のみ殆ど異狀なく，鐵輪帶に對しては通過荷重 6.4 瓲，相當交通量 208 瓲に堪へざるも空氣入ゴム輪帶通過荷重 3.6 瓲，相當交通量 150 瓲には堪へ得る．

適濕路面 (2) O 9 年 8 月 2 日第 2 回試驗後降雨の爲濕潤となれる路面を鍬を以て

第6表 試驗荷重及主

試驗番號	働輪 從輪	Wh. 1					Wh. 2			Wh. 3
		試驗荷重			相當交通量		試驗荷重			試驗荷重
		P	G	計	P	G	P	G	計	S
No. 1	働	9.6			358			9.7		12.6
	從									
	計									
No. 2	働	4.8			179			4.8		6.3
	從									
	計									
No. 3	働	9.6			358			9.7		12.6
	從									
	計									
No. 4	働	9.6			358			9.7		12.6
	從									
	計									
No. 5	働	16.8			628			17.0		22.0
	從									
	計									
No. 6	働	32.6			1,216			33.9		44.1
	從									
	計									
No. 7	働	28.8			1,075			29.0		37.8
	從									
	計									
No. 8	働	31.2			1,165			31.5		41.0
	從									
	計									
No. 9	働	26.4						26.6		91.3
	從	43.2			2,600			43.6		
	計	69.6						70.2		
No. 10	働	43.2			1,612			43.6		56.7
	從									
	計									
No. 11	働	16.8						17.0		321.3
	從	228.0			9,120			230.0		
	計	244.8						247.0		
No. 12	働	19.2	98.8	118.0			12.6	97.0	109.6	598.5
	從	144.0	218.4	362.4	6,090	13,600	113.4	218.0	331.4	
	計	163.2	317.2	480.4			126.0	315.0	441.0	
No. 13	働		52.0			2,105		48.4		63.0
	從									
	計									
No. 14	働		28.6			1,235		25.6		34.6
	從									
	計									
No. 15	働		127.4					118.6		504.0
	從		288.6			17,900		268.6		
	計		416.0					387.2		
No. 16	働		41.6					38.7		182.7
	從		109.2			6,500		101.8		
	計		150.8					140.5		

要車輪の相當交通量（廻）

Wh. 4		Wh. 5	Wh. 6	Wh. 7		Wh. 8				廻轉時間(分)
試驗荷重	相當交通量	試驗荷重	試驗荷重	試驗荷重	相當交通量	試驗荷重		相當交通量		
S	S	P	G	G	G	P	G	P	G	
12.8	416	8.5	8.6	9.1	392	7.3		310		4
6.4	208	4.2	4.3	4.5	194	3.6		150		2
12.8	416	8.5	8.6	9.1	392	7.3		310		4
12.8	416	8.5	8.6	9.1	392	7.3		310		4
22.4	728	14.9	15.0	15.9	685	12.8		532		7
44.8	1,456	29.8	30.0	31.8	1,370	25.7		1,070		14
38.4	1,248	25.6	25.7	27.2	1,172	22.2		925		12
41.6	1,352	27.7	27.8	29.5	1,272		29.0		1,170	13
92.8	3,015	61.8	62.1	40.9 25.0 65.9	2,840		40.2 24.5 64.7		2,610	29
57.6	1,872	38.4	38.5	40.9	1,763		40.2		1,620	29
326.4	10,608	217.2	218.3	215.6 15.9 231.5	9,975		212.0 15.6 227.6		9,150	102
608.0	19,760	404.7	406.6	326.9 104.4 431.3	18,650		321.1 102.6 423.7		17,050	190
64.0	2,080	42.6	42.8	45.4	1,955		44.6		1,800	20
35.2	1,144	23.4	23.5	24.9	1,075		23.5		947	11
512.0	16,640	340.8	342.4	252.0 111.2 363.2	15,650		247.6 109.2 356.8		14,400	160
185.6	6,025	123.5	124.1	95.3 36.3 131.6	5,680		93.6 35.7 129.3		5,215	58

第7表 試験結果

試験番號	表層番號	配合(砂利重量の%) 土	砂	乾燥程度	含水率(乾燥重量に對する%) 施工時 全	施工時 土	試験時 全	試験時 土	地床示数(kg/cm³) 築造直後	中間	試験直前	施工及其後の手當大要	破壊の順位 損程度
No. 1	(1)	5.0	0	D	6.6	133.2	2.7	52.7	29.4[1]	45.5[2]		18, 21, 22日の3日續製場圍器にて合計15通り場固 23日撒水 1.76l/m²	1
	(2)	7.5	0	D	8.3	101.6	3.5	47.4	30.8	30.4		場固同上 撒水量 5.28 〃	2
	(3)	10.0	0	D	11.2	110.1			55.5	32.8		場固 16, 18, 19 及 22 日計15通 撒水量 1.85 〃	3
	(4)	12.5	0	D	10.3	82.7			36.4	54.0		場固略ゝ同上 撒水量 1.92 〃	3
	(5)	15.0	0	D	12.8	83.2			41.7	47.8		場固略ゝ同上 撒水量 2.00 〃	3
	(6)	17.5	0	D	13.1	86.5			31.3	33.9		場固略ゝ同上 撒 量 1.91 水	3
No. 2	(1)	5.0	0	W			6.0	106.0	14.3[1]	32.3[3]	46.5[3] 30.8[4]	前試験材料に水を加へ再使用 6, 7 日撒水	1
	(2)	7.5	0	W			5.7	68.2	15.5[1]	32.3	50.0[3] 45.5[4]	同上	2
	(3)	10.0	0	D					27.4[2]	38 5	47.7	以下4種共前試験に破壊せる部分を撒水場固めて再使用	
	(4)	12.5	0	D					51.3	30.3	43.5		
	(5)	15.0	0	D					46.5	37.8	51.3		
	(6)	17.5	0	D					57.1	33.9	47.7		
No. 3	(1)	5.0	0	O	7.7	141.7	3.8	69.8	30.2	55.5[2]	31.8[3]	3, 8, 11, 14 日撒水	1
	(2)	7.5	0	O			4.9	63.4	36.1[1]	62.5	37.8[3]	破壊せる部分を鍬を以て均し締にて場固める 3, 8, 11, 14 日撒水	2
	(3)	10.0	0	D			5.4	57.4		41.6	58.8	(1) の施行直後以下全區に撒水平均	3
	(4)	12.5	0	D			5.9	51.5		50.0	37.7	2.4 l/m²	4
	(5)	15.0	0	D			6.0	44.9		41.5	37.7		5
	(6)	17.5	0	D			4.8	31.0		57.5	66.6		6
No. 4	(7)	5.0	5	D	6.3	108.6	2.3	44.6	25.4	30.3[1]	44.5	8月23日より11月13日まで83日間自然の氣象作用を受く以下同樣	1
	(8)	7.5	7.5	D	8.1	100.6	2.6	35.1	33.9	20.9	76.9		
	(3)	10.0	0	D			3.0	31.0		35.8	57.1	前試験後撒水場固めて修理以下同樣	
	(4)	12.5	0	D			3.3	28.1		50.0	46.4		
	(5)	15.0	0	D						45.5	42.5		
	(6)	17.5	0	D						30.3	44.5		
No. 5	(7)	5.0	5	W			5.2	84.4			34.5	前試験後の路面を修理試験前撒水濕潤さす6種共同樣	1
	(8)	7.5	7.5	W			6.0	68.5			48.4		3
	(3)	10.0	0	W			7.6	73.6			49.5		3
	(4)	12.5	0	W			7.8	62.2			62.5		3
	(5)	15.0	0	W			9.2	64.1			33.2		3
	(6)	17.5	0	W			12.2	76.0			39.2		2

の試驗別比較

試驗結果 路面概況	試驗要項（通過荷重及相當交通量は鐵輪の最大値を用ふ）	摘要
鐵輪下より破壞し始め漸次兩側に及び全路線破壞し鐵輪下では基礎上面に及ぶ 鐵輪下では下層の半まで破壞路線 6, 7, 8 は尙耐力を保す 鐵輪下のみ表面破壞す程度以下四種甲乙なし 同上 同上 同上	施工 (1)～(3) 9年6月14日 (4)～(6) 〃 15日 試驗 9年7月4日 運轉時間 4分 通過荷重 12.8 瓲 相當交通量 416 〃	1) 6月23日測定築造後9日經過以下之に準ず 2) 6月25日測定 23 日撒水乾燥後以下同樣
全然破壞 路線 2～4 破壞甚し 以下四種破壞せず	施工 9年7月5日 試驗 〃 30日 運轉時間 2分 通過荷重 6.4 瓲 相當交通量 208 〃	1) 7月7日測定撒水の爲濕潤 2) 7日測定表面乾燥以下同樣 3) 19 日降雨の爲濕潤となりたる時測定以下同樣 4) 7月30日試驗直前撒水後測定上段は撒水直前乾燥時
基礎上面に達するまで全面に亙り破壞 鐵輪下のみ深さ 6 cm まで破壞 鐵輪下のみ深さ 5.5 cm まで破壞 〃 4.5 〃 〃 4.2 〃 〃 4.0 〃	施工 (1) 9年8月3日 修理 (2) 〃 2日 試驗 〃 13日 運轉時間 4分 通過荷重 12.8 瓲 相當交通量 416 〃	(1) は新材料にて新に築造 1) 8月3日測定撒水後濕潤時 2) 8月8日表面乾燥せる時測定以下同じ 3) 撒水後適度に乾燥せる時測定
鐵輪下のみ破壞し他路線は尙耐力あり 鐵輪部も未だ耐力あり以下同樣	施工 9年8月23日 試驗 11月13日 運轉時間 4分 通過荷重 12.8 瓲 相當交通量 416 〃	1) 10月13日濕潤狀態にて測定
路線1～7の表面破壞路線 3,4 は破壞大 鐵輪の部沈下せるのみ以下同樣 鐵輪部の沈下上記4種に比し稍〻大	修理 9年11月14日 試驗 〃 29日 運轉時間 7分 通過荷重 22.4 瓲 相當交通量 728 〃	

試験番號	表層番號	配合(砂利重量の%) 土	砂	乾燥程度	含水率(乾燥重量に對する%) 施工時 全	土	試験時 全	土	地床示數(kg/cm³) 築造直後	中間	試験直前	施工及其後の手當大要	破の損傷程度
No. 6	(9)	10.0	10.0	D	12.7	132.4	5.9[1]	66.8			80.0	新築水量過多なりし爲施工中拗固不充分に付 12 月 10 日拗固追加	3
	(10)	12.5	12.5	D	15.1	133.0	6.4	60.4			60.0	新築 12 月 8 日及 10 日に亙り(9) と同程度に拗固む	4
	(3)	10.0	0	D			5.8	61.8			42.5	前試驗後修理	1
	(4)	12.5	0	D			7.7	67.7			58.0	〃	2
	(5)	15.0	0	D			8.2	61.8			70.0	〃	5
	(6)	17.5	0	D			11.4	75.2			49.5	〃	6
No. 7	(9)	10.0	10.0	O							47.0	前試驗後撒水手直し拗固各區共同樣	3
	(10)	12.5	12.5	O							27.8	凍害を避ける爲試驗Ⅱまで復間は被覆す	4
	(3)	10.0	0	O			4.0	39.0			51.3	一部降雨の爲濡れた部分は焚火にて乾かし後各區一樣に自然乾燥せしめたる後 2 月 8 日撒水其後乾燥して適當の濕度とす	1
	(4)	12.5	0	O							38.5		2
	(5)	15.0	0	O							43.5		4
	(6)	17.5	0	O							44.1		5
No. 8	(9)	10.0	10.0	W			7.9	74.8			41.3	撒水拗固めて修理す 15, 16 日撒水	4
	(10)	12.5	12.5	W			6.4	46.0			44.5	以下同樣	3
	(3)	10.0	0	W			7.5	72.5			38.1		1
	(4)	12.5	0	W			8.4	67.6			61.5		2
	(5)	15.0	0	W			6.1	40.3			46.0		4
	(6)	17.5	0	W			6.9	40.5			43.5		4
No. 9	(12)	17.5	17.5	O	18.1	123.7	10.3	71.5			28.9	築造直後軟弱 20, 21 日及 23 日拗固及撒水 3 月 9 日撒水	1
	(11)	15.0	15.0	O	14.4	108.6	9.5	74.3			27.8	同上 (12) より稍〻固し	2
	(11)	15.0	15.0	D	20.0	157.3					69.0	(12) O. と同樣但し3月9日撒水せず	6
	(12)	17.5	17.5	D	17.9	122.1					54.0	同 上	5
	(5)	15.0	0	D							74.0	2 月 20 日撒水拗固修理	3
	(6)	17.5	0	D							80.0	同 上	4
No.10	(9)	10.0	10.0	W	11.6	119.2	7.35	67.6	19.5	64.5[1]	47.2[2]	(10) と同樣加工	4
	(10)	12.5	12.5	W	14.8	130.0	9.93	81.0	5.8	26.4	38.5	軟弱の爲上層拗固め 5 遍りにて中止せし故 16日再拗固め後撒水 3回	3
	(11)	15.0	15.0	W			10.8	77.3		26.3	21.0	撒水拗固修理 13, 14日尙 3 回撒水	1
	(12)	17.5	17.5	W			11.7	74.4		26.0	35.5	同 上	2
	(5)	15.0	0	W			7.38	50.3		80.0	40.8	同上表面比較的乾燥す	6
	(6)	17.5	0	W			9.00	54.6		58.8	42.5	〃	5

試験結果 路面概況	試験要項（通過荷重及相當交通量は鐵輪の最大値を用ふ）	摘要
路線3,4沈下路線2表面弛緩路線1, 5, 8は略ゝ原狀の儘 同上，稍ゝ(9)に優る ｛路線1～7破壊特に3, 4大，路線8は原狀に近し 同　上 (9), (10)と略ゝ同様少しく(9),(10)に優る 同　上	施工(9)(10)　9年12月7日 試　驗　〃　26日 運轉時間　14分 通過荷重　44.8 瓲 相當交通量　1,456〃	1) 附近に並設せる同配合の試料より測定以下同様試驗路面より稍ゝ濕氣多き觀あり
｛鐵輪部少しく沈下し路線2の表面少しく弛緩せる程度尙充分耐力あり 同上稍ゝ良好 ｛他に比し乾燥の度大，最も早く破壊し始め破壊の程度も大 破壊の程度(3)に次ぐ (10)と略ゝ同様 同　上	修理　10年1月7, 8, 9日 試驗　〃　2月13日 運轉時間　12分 通過荷重　38.4 瓲 相當交通量　1,248〃	
鐵輪部沈下，路線1の外側少しく弛緩略ゝ上記同様なれど稍ゝ悪し 破壊の度最甚しく路線1～5破壊し外側に盛上る (10)と略ゝ同様稍ゝ之より悪し 鐵輪部沈下(9)と略ゝ同様 同　上	修　理　10年2月14日 試　驗　〃　16日 運轉時間　13分 通過荷重　41.6 瓲 相當交通量　1,352〃	
｛破壊最も甚しく外側に高く盛上り最早耐力なし本區域中乾燥の度大なるものは成績比較的良好各路線下の材料は移動せるも弛緩するに至らず 破壊狀況同上 路面弛緩せる程度 同　上 (12) Dより稍ゝ悪し 同　上	施工(11)(12)　10年2月19日 修理(5)(6)　〃　20日 試驗　〃　3月12日 運轉時間　29分 通過荷重　92.8 瓲 相當交通量　3,016〃	
｛外側に盛上る，路線6, 7は以下各區とも殆ど變化なく略ゝ原狀の通り ｛(11)に接する部分のみ兩側他は外側のみ盛上る ｛(11), (12)は初めは比較的良好なりしも中途より急に悪化兩側に盛上る 兩側少し盛上る 外側少し盛上る	修理(11)(12)(5)(6)　10年3月13, 14日 施工(9)(10)　〃　15日 試　驗　〃 4月2日 運轉時間　18分 通過荷重　57.6 瓲 相當交通量　1,872〃	1) 3月27日測定3月24日の降雨にて濕れし後表面乾燥以下同様 2) 試驗の爲特に撒水せし後測定 本試驗は濕潤狀態の試驗なるも(5), (6)に對しては水分稍ゝ過少の感あり

試験番號	表層番號	配合(砂利重量の%) 土	砂	乾燥程度	含水率(乾燥重量に對する%) 施工時 含	土	試験時 含	土	地床示數(kg/cm³) 築造直後	中間	試験直前	施工及其後の手當大要	破の損傷順位度
No.11	(9)	10.0	10.0	O	11.6	119.2	4.9	48.8		38.9[1]	56.5	4月23日4周24日1周撒水以下同様	3
	(10)	12.5	12.5	O	12.3	105.0	4.9	40.0		77.0	47.2		5
	(11)	15.0	15.0	O	14.8	112.1	5.7	41.2		44.1	48.7		4
	(12)	17.5	17.5	O	15.3	102.1	6.1	39.1		37.1	27.8		6
	(5)	15.0	0	O	14.0	101.1	6.3	45.2		51.3	37.1		1
	(6)	17.5	0	O	15.4	97.6	7.8	49.4		38.5	31.3		2
No.12	(6)	17.5	0	D	11.3	70.0	6.4	41.7		42.6[1]	28.2	5月4日乾燥6日撒水8日再び乾燥	2
	(5)	15.0	0	D	10.9	77.2	5.2	38.7		38.5	52.0	以下同様	3
	(12)	17.5	17.5	D	13.8	90.6	5.5	39.2		51.2	59.7		6
	(11)	15.0	15.0	D	12.2	89.4	4.7	37.6		47.5	40.0		5
	(10)	12.5	12.5	D	12.7	109.0	3.8	34.4		61.5	48.8		4
	(9)	10.0	10.0	D	8.7	84.4	4.3	47.6		50.0	33.1		1
No.13	(6)	17.5	0	W			8.9~8.2	51.2		36.0[1]	31.5	充分撒水して締固 23 日乾燥後撒水	2
	(5)	15.0	0	W			7.0~7.7	49.5		59.7	27.6	2 周以下同様	4
	(12)	17.5	17.5	W			7.7~7.2	41.3		70.2	37.7		6
	(11)	15.0	15.0	W			6.7~6.9	42.5		66.7	53.3		3
	(10)	12.5	12.5	W			5.9~7.7	45.0		87.0	31.3		5
	(9)	10.0	10.0	W			5.7	48.4		50.6	39.2		1
No.14	(16)	17.5	26.2	W	11.1	70.4	9.6	58.0	4.2	68.0[1]	46.5	6月13日路面乾燥後撒水以下同様	3[2]
	(14)	12.5	25.0	W	11.3	96.3	9.2	73.2	7.5	43.5	40.0		6
	(12)	17.5	17.5	W	12.4	79.8	8.8	52.1	9.7	70.8	33.6		1
	(15)	15.0	30.0	W	10.8	78.1	8.0	50.9	8.6	43.5	38.1		5
	(10)	12.5	12.5	W	10.1	83.0	7.2	54.0	8.0	59.7	25.5		2
	(13)	12.5	18.7	W	10.9	91.4	7.8	58.9	5.2	58.8	21.3		4
No.15	(16)	17.5	26.2	O	11.8	76.1	5.9	38.1	4.4	91.0[1]	60.7	18日乾燥19日午前撒水以下同様	5
	(14)	12.5	25.0	O	11.6	99.6	4.7	37.9	7.1	105.0	83.5		6
	(12)	17.5	17.5	O	11.9	75.9	5.6	35.3	12.4	74.2	50.0		4
	(15)	15.0	30.0	O	10.7	77.1	4.6	31.3	9.2	64.5	37.8		2
	(10)	12.5	12.5	O	10.1	83.0	4.3	34.0	6.5	52.7	61.5		1
	(13)	12.5	18.7	O	9.5	76.8	4.5	35.7	6.6	57.2	52.0		3

試驗結果 路面概況	試驗要項 (通過荷重及相當交通量は鐵輪の最大値を用ふ)	摘要
尙耐力あり (9)～(12) は甚しき差違なし外側少しく盛上る路線 1～5 弛緩 6, 7, 8は一部のみ弛緩 水分多き一小部分を除き路線 6, 7, 8 は略〻原狀, 水分特に多き部分を除き外側盛上らず 同上稍〻劣る外側少しく盛上る 水分特に多き部分を除き外側は盛上らず 外側全部盛上る鐵輪に對して支持力不充分 外側一部盛上る　同上	施工 (6) (5)　9年4月 9日 (12) (11)　〃　13日 (10) (9)　〃　16日 試驗　9年4月24, 25, 26日 運轉時間　102分 通過荷重　326.4 瓲 相當交通量　10,608 〃	1) 4月23日乾燥時測定
兩側全部盛上る (9) と略〻同じ 同　上 外側は全部內側は一部盛上る 同　上 同　上 兩側全部盛上る	施工 (6) (5)　9年4月27日 (12)(11)(10)　〃　5月 1日 (9)　〃　2日 試　驗　〃　9, 10日 運轉時間　190分 通過荷重　608 瓲 相當交通量　19,760 〃	1) 5月6日乾燥時測定 試驗開始後20分間は各種殆ど差違なく 40 分頃より差違を示し始め (12)最良好 (11) (10)之に次ぎ (9)最惡以後順位同樣
路線 1, 2 の間及 7, 8 の間隆起す 路線1, 2及7, 8間隆起すれど比較的低し 路線 7, 8間は隆起せず路線 1, 2間は隆起低し 路線 1, 2 間の隆起他種に比し最高 路線 7, 8 間は約半分隆起 路線 1, 2間 7, 8間隆起すれども前者は比較的低く後者は各種中最高	修理全區　9年5月11日 試　驗　〃　28日 運轉時間　20分 通過荷重　64瓲 相當交通量　2,080 〃	1) 5月28日乾燥時測定 各種の差違著しからず尙耐力あり
外側盛上る以下同樣 (13)と大差なし (15) と殆ど區別なし 試驗初めより鐵輪に對して支持力不充分 (10)と略〻同樣	施工 (16)　9年6月 6日 (14)(12)(15)(10)(13)　〃　7日 試　驗　〃　13日 運轉時間　11分 通過荷重　35.2 瓲 相當交通量　1,144 〃	1) 6月13日路面乾燥時測定 2) 外側盛上りの高さに據る
路線1, 7, 8は弛緩せず 6 は少し他は弛緩 7, 8 間陸一小部隆起 外側には殆ど盛出さず 弛緩の度同上 7, 8 間陸隆起せず 路線1は半分7, 8は兩端其他は全部弛緩 約 100 分位まで結果良好なりしも其後急に惡化路線1の一部 7, 8 を除き弛緩す 路線 7, 8 間陸中央半分及兩端隆起す路面弛緩の度 (15)と同樣 路線7, 8 間陸の一小部隆起路線 7, 8及1の半分のみ弛緩せず	施工 (16)(14)(12)9年6月14日 (15)(10)(13)　〃　15日 試驗　9年6月19日午後より 20, 21日 運轉時間　160分 通過荷重　512 瓲 相當交通量　16,640 〃	1) 6月18日路面乾燥時測定 試驗當初20分頃は(16) (14) 比較的不良 100 分頃は却つて (14) 最良 (16) 之に次ぐ以後同樣但し大差なく尙尙餘力あり

試験番號	表層番號	配合(砂利重量の%) 土	砂	乾燥程度	含水率(乾燥重量に對する%) 施工時 全	施工時 土	試験時 全	試験時 土	地床示數(kg/cm²) 築造直後	中間	試験直前	施工及其後の手當大要	破の損順位度
No.16	(16)	17.5	26.2	D	10.6	66.2	3.6	25.4	5.9	57.1[1]	63.5	7月16日全區域に撒水其後充分乾燥せる後試驗す以下同樣	2
	(14)	12.5	25.0	D	10.5	87.5	2.6	23.0	9.2	62.5	87.0		2
	(12)	17.5	17.5	D	12.6	81.3	2.5	16.1	4.7	40.4	55.6		3
	(15)	15.0	30.0	D	10.4	74.2	3.0	23.8	6.6	66.7	93.0		3
	(10)	12.5	12.5	D	8.7	69.0	2.6	22.4	10.4	39.7	100.0		1
	(13)	12.5	18.7	D	10.2	84.1	2.7	23.8	4.8	39.6	74.0		4

均し鐵製搗固器を以て搗固め修理し，翌 3 日午後 7.2 l/m^2, 8 日午前表面乾燥せる時 4.7 l/m^2, 午後 2.5 l/m^2, 11 日 3.0 l/m^2, 13 日 4.1 l/m^2 撒水し表面幾分乾燥して適度の含水率と認めらるゝに至り第 3 回試驗を行つたが運轉 4 分間にして路線 2～4 の部分は深さ 6 cm まで破壞し他路線は尙餘力あるを示した．固形ゴム輪帶通過荷重 9.1 瓲，相當交通量 392 瓲には堪へ得る．

(3) 表層第3種 (土 10:砂 0:砂利 100)

乾燥路面 (3) D　9 年 6 月 14 日午後築造，路面乾燥せる 23 日 1.9 l/m^2 撒水，7 月 4 日再び乾燥後第 1 回試驗を行つたが 4 分間運轉の後鐵輪帶部の表面のみ破壞し鐵輪帶に對する許容通過荷重 12.8 瓲，相當交通量 416 瓲と看做され其耐力 (1) 又は (2) に比し遙に勝るを示した．7 月 5 日撒水搗固めて破壞部分を修理し其後撒水搗固乾燥を繰返し乾燥狀態にて第 3 回試驗として 4 分間運轉し 2, 3 兩回試驗を通じ運轉時間 6 分間に達したるに鐵輪部深さ 5.5 cm まで破壞し他路線は破壞せず空氣入ゴム輪帶に對しては通過荷重 14.4 瓲，相當交通量 537 瓲，固形ゴム輪帶に對しては通過荷重 13.6 瓲，相當交通量 624 瓲以上の耐力あるを示した．第 3 回試驗の破損を修理し氣象作用により乾濕を反復して11 月 13 日第 4 回試驗 4 分間運轉の結果は鐵輪帶部に於て少しく破損せるも尙耐力あることを示し 12 月 26 日第 6 回試驗に於ては運轉 14 分の後路線 1～7 破壞し路線 8 のみ略〻原狀のまゝにて尙耐力を存することを示した．卽ち空氣入ゴム輪帶に對しては通過荷重 25.7 瓲以上，相當交通量 1,070 瓲以上なるも固形ゴム輪帶に對しては通過荷重 31.8 瓲，相當交通量 1,370 瓲以下なることを示して居る．

濕潤路面 (3) W　前回試驗にて破損せる部分を修理し乾燥後再び濕潤ならしめ 11 月 29 日第 5 回試驗に 7 分間運轉せしに鐵輪帶部は沈下したが尙破壞するに至らず他路線は殆ど異狀を示さず (7) W, (8) W 及び (6) W に勝り，鐵輪通過荷重 22.4 瓲，相當交通量 728 瓲以上の耐力あるを示して居る．第 7 回試驗後 2 月 14, 15 兩日路面を撒水搗

試験結果 路面概況	試験要項（通過荷重及相當交通量は鐵輪の最大値を用ふ）	摘要
(10) を除き著しき差違なく尚充分耐力あり	施工　94年6月25日 試験　〃 8月9日 運轉時間　58分 通過荷重　185.6瓲 相當交通量　6,025〃	1) 7月16日全區域に4回撒水せる後測定
尚耐力あり		

固めて修理し 16 日撒水濕潤ならしめ第 8 回試驗を行ひ 13 分間運轉したるに 6 種中破壞の度最も甚しく路線 1～5 の部分破壞し材料路線 1 の外側に排出されて隆起するに至つた. (4) W, (6) W, (9) W 等に比して著しく劣る.

適濕路面 (3) O　10 年 1 月 7 日～9 日撒水搗固めて前試驗の破損を修理し凍結を防ぎ 2 月 8 日充分乾燥せる時 5.2 l/m^2 撒水し 2 月 13 日適當の濕度となつた時第 7 回試驗を行つたが他種に先ち破壞し始め其程度最も甚しく運轉 12 分にして止めた. 路線 1～5 は其耐力を超過し路線 7, 8 は略〻其極度を示した.

(4) 表層第 4 種 (土 12.5:砂 0:砂利 100)

乾燥路面 (4) D　第 1 回乃至第 4 回試驗に於ては略〻 (3) D と等しくして稍〻之に勝れるもの〻如く第 3 回累計 10 分後の鐵輪下の破壞深さ 4.5 cm に止り (3) D に比し約 1 cm 淺し. 第 4 回試驗は運轉時間僅かに 4 分間に過ぎなかつた爲破壞するに至らず尚充分餘力あるを示した. 第 6 回試驗は 12 月 7 日前試驗後の路面を修理し充分乾燥せしめた後 14 分間運轉したが路線 1～7 破壞し唯路線 8 のみ略〻原狀のまゝにて尚耐力を存するを示した. (3) D と略〻同樣にして稍〻勝り (9) D には甚しく劣るが如し.

濕潤路面 (4) W　第 5 回試驗に於て 7 分間運轉したるも (3), (5), (8) 等と略〻同じく僅かに鐵輪路線部が少しく沈下せるのみにして未だ其耐力を明にするに至らなかつた. 第 8 回試驗は第 7 回試驗後の破損を 2 月 14, 15 兩日撒水搗固めて修理し更に 16 日撒水して充分濕潤なる時行ひ 13 分間運轉したるに鐵輪路線部沈下し路線 1, 2, 5 の表面弛緩し路線 1 の外側一部盛出した. (3) W に勝るが (6) W には明に劣る.

適濕路面 (4) O　(3) O と略〻同樣に扱ひ充分乾燥後 2 月 8 日 4.6 l/m^2 撒水し 2 月 13 日適當なる濕度となりし時第 7 回試驗を行ひ運轉 12 分間にして路線 1, 2, 5 表面弛緩し 3, 4 は破壞す. (3) O に勝るも (5) O 以下に劣る.

(5) 表層第 5 種 (土 15:砂 0:砂利 100)

乾燥路面 (5) D　第 1 回より第 4 回までの試驗に於ては (3) D, (4) D と餘り異らず第 3 回累計 10 分後鐵輪下破壞の深さ約 4.2 cm にして前二者に稍〻勝つた. 第 4 回試驗に於ては僅かに 4 分間なる爲破壞せず, 唯 (6) D, (8) D と大差なく (7) D に勝るを示し, 第 6 回試驗に於ては 14 分運轉後路線 2～4 は表面弛緩したが路線 1, 5～8 は殆ど原狀と異らず, 第 9 回試驗は 2 月 20 日前回破損部を修理し充分乾燥せる後 3 月 12 日 29 分間運轉して尙餘力あり, 却つて (11) O, (12) O より勝れるを示した, 第 12 回試驗は 10 年 4 月 27 日前第 11 回試驗材料を再使用し新に築造し 5 月 6 日充分乾燥せる時 4.7 l/m² 撒水し再び乾燥せる後 5 月 9 日より 11 日に亘り續行し合計 3 時間 10 分に及んだ. 結果は (9) D に勝り, (6) D に略〻等しくして稍〻劣り (10) D に劣る. 材料兩側に排出盛上り原狀に近き路線なく全路線破壞す.

濕潤路面 (5) W　第 4 回試驗終了後一部破損部を修理し充分乾燥せしめた後再び濕潤となし 11 月 29 日第 5 回試驗を行ひ 7 分間運轉せるに鐵輪帶の部分も沈下せるのみにて他路線同樣破壞するに至らず, 從つて耐力不明なるも (8) W より勝り且 (6) W より結果良好である, 第 8 回試驗は (4) W 同樣 2 月 13 日の前回試驗後修理し充分なる乾燥を待たず 2 月 16 日施工し 13 分間運轉したが破損の程度輕微にして充分の餘力を示し (9) W, (6) W に劣るが (4) W には遙に勝る. 第 13 回試驗は前回新築せるもの〻試驗による破壞を 5 月 11 日修理し充分乾燥せる後 5 月 28 日 3 回に分ち 5.4 l/m² 撒水して 20 分間運轉した. 結果は未だ破損尠く充分餘力あるを示して居る. (9) W に勝り (10) W に劣るが如きも孰れも大差はない.

適濕路面 (5) O　第 7 回 試驗に於て (3) O, (4) O 同樣 1 月 7～9 日修理し充分乾燥せるを待ち 2 月 8 日 2 回に 4.6 l/m² 撒水し濕度適當と認められ〻に至り 2 月 13日 12 分間運轉せるに尙充分の餘力を示し (3) O, (4) O に遙に勝り (9) O, (10) O と略〻似て稍〻勝る. 第 11 回試驗は 4 月 9 日新材料を用ひ 14.0% の全含水率を以て築造し乾燥後 4 月 23 日 2 回に分ち 7.5 l/m² 撒水し翌 24 日乾燥し過ぎた爲 1.7 l/m² 撒水し濕度適當となるを待ち運轉を開始し同日 17 分, 25 日 42 分, 26 日 38 分計 1 時間 42 分に達せしめたが他種に比して破壞の程度最も大きく材料外側に排出盛上るに至つた.

(6) 表層第 6 種 (土 17.5:砂 0:砂利 100)

乾燥路面 (6) D　第 1 回乃至第 4 回までの結果は (5) D と略〻同樣にして常に稍〻之に勝り第 3 回最大鐵輪通過荷重 12.8 瓲, 相當交通量 416 瓲に於て鐵輪部の破壞厚 4 cm にして (5) D より約 0.2 cm 尠い. 第 6 回, 第 9 回試驗に於ては (5) D と共に撒水, 乾燥捣固及通過荷重による固結の爲其耐力增加せるが如く鐵輪帶部及其影響著しき 2, 5 等の路線に於て少しく破壞せるに止る. 第 12 回試驗に於ては前回までの影響を抹殺する爲

新に全含水率 11.3% にて築造し充分乾燥せる後 4.9 l/m² 撒水し再び乾燥せる後 3 時間 10 分運轉せるに兩側全長に亘り材料排出され破壞の程度 (9), (5) に次で大きく路線 6, 7 及 8 皆弛緩した.

濕潤路面 (6) W 施工及其後の手當は (5) W と略〻同樣とせしに第 5 回試驗に於ては (7) W に勝り (8) W に劣り (5) W にも少しく劣つたが第 8 回試驗に於ては (9) W 及 (5) W に勝り (10) W に劣る. 第 13 回試驗に於ては第 12 回に於て新築せしものを (5) W 同樣修理撒水し 20 分間運轉せしに他種に比し著しき相違なきも一部外側に排出盛上り, 路線 7, 8 の間際隆起し他路線皆弛緩し (9) W に勝り (5) W 及 (10) W に劣つた.

適濕路面 (6) O 常に (5) O と同樣に加工し第 7 回試驗に於ては (5) O, (10) O に勝り結果最良にして尙充分餘力を示し, 第 11 回試驗に於ては 4 月 23 日 7.1 l/m², 24 日 1.6 l/m² 撒水後 1 時間 42 分運轉したるに結果略〻 (5) O と同樣にして稍〻勝り, (9) O, (10) に劣る, 路線 6, 7, 8 は大體其耐力を示して居る.

(7) 表層第7種 (土 5:砂 5:砂利 100)

乾燥路面 (7) D 8 月 23 日全含水率 6.3% を以て築造し數回乾燥を繰返したる後 11 月 13 日第 4 回試驗として 4 分間運轉せるに鐵輪帶の路線 3, 4 のみ破壞し他路線は未だ餘力あるが (3) 及 (8) に劣る.

濕潤路面 (7) W 11 月 14 日前回の破損部分を修理し 29 日第 5 回試驗に 7 分間運轉し路線 1~7 の表面破壞し特に鐵輪路線下甚しく (3) W~(6) W 及 (8) W に劣る.

(8) 表層第8種 (土 7.5:砂 7.5:砂利 100)

乾燥路面 (8) D 施工, 手當及試驗共に (7) D と略〻同樣にしたるに試驗結果は常に之に勝り第 4 回に於ては運轉 4 分後鐵輪帶に對しても尙充分の耐力を示した.

濕潤路面 (8) W (7) W と略〻同樣に取扱ひ第 5 回試驗 7 分間運轉せるに鐵輪路線 3, 4 沈下を示せるのみにて尙充分の耐力あり遙に (7) W に勝り, 稍〻(6) W にも勝り (3)~(5) W と略〻等し.

(9) 表層第9種 (土 10:砂 10:砂利 100)

乾燥路面 (9) D 9 年 12 月 7 日全含水率 12.7% にて築造, 水量稍〻過多にて上層搗固め 4 通にして止め 10 日稍〻乾燥せる後正規の搗固めを了し, 充分乾燥せる 12 月 26 日第 6 回試驗にて 14 分間運轉せるに路線 3, 4 沈下し路線 2 の表面弛緩したが尙餘力充分あり路線 1, 5 乃至 8 は殆ど原狀の儘の如く, (3) D, (4) D には勝るも (5) D, (6) D 及 (10) D 等とは未だ優劣判然せず. 第 12 回試驗に於ては 5 月 2 日全含水率 8.7% にて築造し, 6 日路面充分乾燥するを待ち 5.1 l/m² 撒水し再び充分乾燥せしめた後 9, 10 兩日に亘り 3 時間 10 分運轉した. 成績は運轉開始後 40 分頃までは各種大差なかつたが終

了後は最も惡く (5) D, (6) D に劣り兩側路線外に排出盛上り各路線破壞し原狀に近き路線なく通過荷重は明かに耐力を超過して居る.

濕潤路面 (9) W 2 月 13 日前試驗終了後 14, 15 兩日撒水修理し 16 日再び撒水して濕潤路面とし第 8 回試驗を行び 13 分間運轉せしに (5) W, (6) W と略〻同樣にして尙餘力あるを示し, 第 10 回試驗に於ては 3 月 15 日全含水率 11.6% にて新に築造し, 竣工後同日 0.2 l/m², 翌 16 日 1.4 l/m², 27 日 4.9 l/m², 4 月 2 日 4.8 l/m² 撒水し 18 分間運轉せしに (10) W, (11) W, (12) W 等に優り (5) W, (6) W と略〻同樣にして材料外側に排出盛上つた. 第 13 回試驗は 5 月 11 日撒水修理し, 乾燥後 28 日再び 5.4 l/m² 撒水して濕潤とし 20 分間運轉したるに, 各表層共著しき優劣なきも本試驗の種別中最も劣れるものゝ如く路線 7, 8 間は全長隆起し路線 1 の外側弛緩した.

適濕路面 (9) O 9 年 1 月 7～9 日前回試驗の破損を修理し乾燥後 2 月 8 日 7.5 l/m² 撒水し 13 日適當濕度となれる時第 7 回試驗 12 分間運轉せしに鐵輪路線部沈下せるのみにて他路線は支障なく (5) O, (10) O に稍〻劣り (3) O, (4) O には遙に勝る. 第 11 回試驗は新材料を用ひ 4 月 16 日全含水率 11.6% にて築造し 4 月 23 日充分乾燥後 7.1 l/m² 撒水し再び乾燥し 24 日 1.3 l/m² 撒水して適當の濕度となして 24～26 日に亘り 1 時間 42 分運轉せしに (5) O, (6) O に優り (10) O, (11) O に劣る. 路線 6, 7 及 8 の內比較的良く乾燥せる部分は未だ弛緩しないが他路線は表面弛緩し鐵輪路線部に沈下を生じた.

(10) 表層第 10 種 (土 12.5:砂 12.5:砂利 100)

乾燥路面 (10) D 第 6 回試驗に於て全含水率 15.1% 施工に適當なる軟稠度にて正規の如く築造し略〻 (9) D と同樣の經過の後 12 月 26 日 14 分間運轉したるに (9) D と略〻同樣の結果にして稍〻優り路線 3, 4 沈下し路線 2 表面弛緩せる程度にして他路線は未だ支障なく尙餘力あるを示した. 第 12 回試驗に於ては全含水率 12.7% として 5 月 1 日施工し 6 日撒水量 4.6 l/m² とせる外略〻同樣に取扱ひ 3 時間 10 分運轉せしに (9) D には遙に優り (5) D, (6) D に稍〻優り (11) D, (12) D に劣れるが如く外側全長に亘り材料排出盛上つたが路線 7, 8 の一部乾燥充分なる所は表面未だ弛緩せず尙固結して居る. 第 16 回試驗は 6 月 25 日築造, 7 月 16 日 7.2 l/m² 撒水 8 月 9 日 58 分間運轉せるに尙餘力を有して居るが (12) D に比し稍〻劣れるが如く本試驗中破損の程度最大である.

濕潤路面 (10) W (9) W と同樣に取扱ひ第 8 回試驗に於て 13 分間運轉せしに鐵輪帶の部沈下したるも其他は支障なく (3) W, (4) W に比し優るも (9) W に比しては稍〻劣れるが如く, 第 10 回試驗に於ては 3 月 15 日全含水率 14.8% にて施工, 水量稍〻過多の爲上層搗固 5 通りにして止め其後 (9) W と同樣乾燥に伴ひ搗固め 3 月 16 日 1.4 l/m² 撒水, 24 日降雨, 27 日 5.5 l/m², 4 月 2 日 4.0 l/m² 撒水同日 18 分間運轉せしに材料兩

側に排出盛上り (11) W, (12) W に優るも (5) W 又は (9) W に劣る，第 13 回試驗に於ては (9) 又は (11) と同樣に取扱ひ充分乾燥後濕潤ならしめて 20 分間運轉せしに破損の程度殆ど大差なく路線 7, 8 に至るまで表面弛緩せるも兩路線の間際は一部隆起せしのみにして (12) W に次で結果良好である．第 14 回試驗に於ては 6 月 7 日新に全含水率 10.1% にて築造し，充分乾燥するを待ち 13 日 10 回に分ち 12.3 l/m² 撒水し 11 分間運轉したるに各種大差なく材料外側に排出盛上る，其の程度 (12) W に次で最も大である．

適濕路面 (10) O　第 7 回試驗に於ては略 (9) O と同樣に取扱ひ 2 月 8 日 6.9 l/m² 撒水し 13 日適當なる濕潤狀態となつた時 12 分間運轉せしに路線 3, 4 沈下せるのみにて他路線は支障なく (3) O, (4) O 及 (9) O に勝り (5) O, (6) O と略同樣である．第 11 回試驗に於ては 4 月 13 日全含水率 12.3% にて築造し充分乾燥後 5.8 l/m² 撒水し 24 日再び乾燥後 1.4 l/m² 撒水し適當の濕度となしたる上 26 日に至る 3 日間に 1 時間 42 分運轉せしに (12) O と共に成績最も良く尙餘力あるもの>如く (9) O, (5) O, (6) O, (11) O に勝る．第 15 回試驗に於ては 6 月 15 日午前 (12) O に約半日遲れて全含水率 10.1% にて築造し 19 日他種同樣 2.6 l/m² 撒水し適濕となしたる上 21 日に至る 3 日間 2 時間 40 分運轉せるに路線 7, 8 の大部分尙略原狀を呈し兩路線間際は兩端及中央の半に亘り隆起したが未だ餘力を有して居り (12) O に稍劣るが如きも大差はない．

(11) 表層第 11 種 (土 15:砂 15:砂利 100)

乾燥路面 (11) D　第 9 回試驗は 2 月 19 日新材料を用ひ全含水率 20.0% に達する稍過多の水量を用ひ搗固を上下各 3 通りに減じて築造し乾燥に伴ひ搗固めて正規の工法に近からしめ尙撒水乾燥搗固めを行ひ 3 月 12 日充分乾燥せる後 29 分間運轉せしに各路線共尙耐力を有し (11) O, (12) O に遙に勝り且 (5) D, (6) D にも勝り (12) D と殆ど區別なし．第 12 回試驗に於ては全含水率 12.2% にて 5 月 1 日 (10) D, (11) D と同日に築造し充分乾燥せる後 5 月 6 日 4.3 l/m² 撒水し再び乾燥せる後 9, 10 兩日に亘り 3 時間 10 分運轉せるに外側は全長に亘り，內側は一部材料排出盛上り其程度 (10) D, (12) D 等と大差なくして之等の中間に位し恰も配合比と同樣の傾向を示し路線 8 の一部は未だ表面弛緩せざる部分がある．

濕潤路面 (11) W　第 10 回試驗に於て 3 月 13, 14 兩日撒水搗固めて前回試驗の後を修理し乾燥後 27 日 5.9 l/m², 4 月 2 日 3.1 l/m² 撒水し 18 分間運轉したるに初は狀態最も良好なりしも終に近づき急に惡化し材料兩側に排出盛上つて破壞したが路線 6, 7 等は尙耐力あるを示し (9) W, (10) W, (12) W 等に比し明に劣る．第 13 回試驗に於ては 5 月 11 日前回の破損を修理し 28 日 5.4 l/m² 撒水せる後 20 分間運轉せしに路線 1, 2

及 7, 8 の間隙隆起し路線 6, 7 の外全部表面弛緩したが結果は (12) W に次で良好にして (10) W に勝る.

適濕路面 (11) O 第 9 回試験に於て 2 月 19 日全含水率 14.4% にて築造, 水量稍〻過多の爲下層 3 通り, 上層 4 通り搗固めたのみで其後乾燥と共に搗固め充分燥乾せる後 3 月 19 日 6.5 l/m², 11 日 5.0 l/m², 12 日 1.1 l/m² 撒水して適當の濕度となるを待ち 29 分間運轉せしに破壞最も甚しく (5) D に著しく劣る, 第 11 回試驗に於ては 4 月 13 日新に全含水率 14.8% にて築造し 23 日乾燥後 6.4 l/m², 4 月 24 日 1.4 l/m² 撒水せる後 26 日に至る 3 日間に亘り 1 時間 42 分運轉せしに路線 6, 7, 8 等は表面殆ど弛緩せず (6) O, (5) O に勝るも (9) O, (10) O 等と大差なきも稍〻劣る.

(12) 表層第12種 (土 17.5:砂 17.5:砂利 100)

乾燥路面 (12) D 第 9 回試驗は 2 月 19 日全含水率 17.9% 水分稍〻過多にて下層 3 通り, 上層 4 通り搗固めて築造し 21 日 2.5 l/m² 撒水, 26 日降雨, 其後充分乾燥せる後 3 月 12 日 29 分間時運轉せしに結果最も良く各路線共尙充分餘力がある. 第 12 回試驗に於ては全含水率 13.8%, 5 月 6 日撒水量 4.2 l/m² の外 (11) D と同樣に取扱ひ 3 時間 10 分運轉せる結果外側は全長に亘り材料排出盛上つたが內側は其現象なく路線 8 の大部分のみ表面原狀に近く成績他の 5 種に比し最良である. 第 16 回試驗に於ては全含水率 12.6 % とし稍過多の水量にて築造し (10) D と同樣乾燥後 7 月 16 日 7.2 l/m² 撒水, 8 月 9 日 58 分間運轉せしに (10) D に勝るが其他には少しく劣れるが如きも尙充分餘力がある.

濕潤路面 (12) W 第 10 回試驗に於ては撒水量 3 月 27 日 4.2 l/m², 4 月 2 日 4.0 l/m² とせし外 (11) W と同樣に取扱ひ 18 分間運轉せしに材料兩側に排出隆起し破損の程度 (11) W に次で甚しく (5) W, (6) W 又は (9) W に劣る. 第 13 回試驗に於ては (11) W と同樣に取扱ひ 20 分間運轉の結果路線 7, 8 は表面少しも弛緩せず兩路線間隙は全長の半分のみ隆起せしに止まり本試驗の種類中成績最良好であるが其差は輕微である. 第 14 回試驗に於ては全含水率 12.4% とせし外 (10) W と同樣に取扱ひ 11 分間運轉せしに各種の差違は僅少ではあるが, 外側に排出された材料の量により比較すれば (10) W と共に成績最も不良である.

適濕路面 (12) O 第 9 回試驗に於て全含水率 18.1% とし水量過多の爲下層 3 通り上層 4 通り搗固めて築造し其後は (11) O と同樣に扱ひ 29 分間運轉せる結果材料兩側に排出隆起し破壞の度 (10) O と略〻同樣にして最早耐力なし. 第 11 回試驗に於ては全含水率を 15.3% とし 4 月 23 日の撒水を 6.5 l/m² とせる外 (11) O と同樣とし 1 時間 42 分運轉せるに路線 1~5 は破壞せるも路線 6, 7 及 8 の表面中比較的水分多き部分を除き他は弛緩せず略〻原狀を呈し (10) O と共に他種に比し優良である. 第 15 回試驗に於ては全

含水率 11.9% とせし外 (10) O と同様に扱ひ 2 時間 40 分運轉せるに路線 7, 8 の大部分は表面弛緩せず兩者間隙も兩端の一部を除く外隆起せず (10) O, (15) O には稍〻劣る.

(13) 表層第13種 (土 12.5:砂 18.7:砂利 100)

乾燥路面 (13) D　第 16 回試驗に於て 10 年 6 月 25 日午前全含水率 10.2% にて築造し充分乾燥せしめ 7 月 16 日 7.2 l/m² 撒水し 8 月 9 日再び充分乾燥せる後 58 分間運轉せしに (10) D の結果最惡なるに對し成績最も良く尙充分餘力がある.

濕潤路面 (13) W　第 14 回試驗に於て 10 年 6 月 7 日全含水率 10.9% にて築造し充分乾燥せる 6 月 13 日 12.3 l/m² 撒水せる後 11 分間運轉せしに各路線皆沈下し材料外側に排出盛上る. 結果 (10) W, (12) W に比し大に勝り, (16) W に略〻等しくして少しく勝り, (14) W, (15) W 等には明に劣る.

適濕路面 (13) O　第 15 回試驗は 6 月 15 日午前全含水率 9.5% にて新に築造し乾燥せる後 19 日 2.6 l/m² 撒水し表面乾燥し始める頃運轉を開始し 21 日までに 2 時間 40 分運轉せるに尙耐力を有し路線 1～6 は破壞弛緩せるも 7, 8 は表面弛緩するに至らず兩線間隙は兩端及中央一小部のみ隆起し他は支障なく (16) O, (14) O には稍〻劣るも其他に比しては少しく勝るが如し.

(14) 表層第14種 (土 12.5:砂 25:砂利 100)

乾燥路面 (14) D　第 16 回試驗は 6 月 25 日全含水率を 10.6% とし築造し充分乾燥せる後 (13) D 同樣 7.2 l/m² 撒水し再び乾燥せる後 8 月 9 日 58 分間運轉せしに (12) D, (15) D, (16) D 等と大差なく尙充分餘力あり (10) D に勝り, (13) D に稍〻劣る.

濕潤路面 (14) W　第 14 回試驗は 10 年 6 月 7 日全含水率 11.3% にて築造し充分乾燥せる後 6 月 13 日 12.3 l/m² 撒水し 11 分間運轉せしに外側に於て材料少しく排出隆起の徵候を示す程度に止り (15) W と略〻同樣にして成績最良である.

適濕路面 (14) O　第 15 回試驗は 6 月 14 日午後全含水率 11.6% を以て築造し充分乾燥せしめ 19 日午前 2.6 l/m² 撒水同日午後適當なる濕潤狀態となつた時より 21 日に至るまでに 2 時間 40 分運轉せしに路線 1, 6, 7, 8 の大部分は未だ表面弛緩するに至らず, 路線 7, 8 間及外側は殆ど隆起せず尙充分餘力あるを示し他種に比し最も優良である.

(15) 表層第15種 (土 15:砂 30:砂利 100)

乾燥路面 (15) D　第 16 回試驗に於て全含水率 10.4% とし (13) D, (14) D 等と同樣試驗せる結果は (13) D には稍〻劣るも他種に比しては勝り尙充分の餘力を示して居る.

濕潤路面 (15) W　第 14 回試驗に於て全含水率 10.8% とし (13) W, (14) W 等と同樣に試驗せるに外側の材料排出隆起せるは一部分にして結果は (14) W と略〻同程度にして他種に比し大に勝る.

第 8 表 配合種別と輪帶別耐力

(1) ＜印は該數量にて破壞し；＞印は該數量以上の耐力あるを示す.

(2) 空氣入ゴムの部分は鐵輪帶の影響により破壞す；以下空欄は同意義を示す.

表層番號	配合 土	配合 砂	乾燥程度	運轉時間(分)	通過荷重(噸) 空氣入ゴム	通過荷重(噸) 固形ゴム	通過荷重(噸) 鐵輪帶	相當交通量(噸) 空氣入ゴム	相當交通量(噸) 固形ゴム	相當交通量(噸) 鐵輪帶	試驗番號
(1)	5	0	D	4	> 7.3	< 9.1	< 12.8	> 310	< 392	< 416	No. 1
			W	2	< 3.6	< 4.5	< 6.4	< 150	< 194	< 208	No. 2
			O	4	< 7.3	< 9.1	< 12.8	310	< 392	< 416	No. 3
(2)	7.5	0	D	4	> 7.3	> 9.1	< 12.8	> 310	> 392	< 416	No. 1
			W	2	> 3.6	4.5	< 6.4	> 150	194	< 208	No. 2
			O	4	> 9.6	> 9.1	< 12.8	> 358	> 392	< 416	No. 3
(3)	10.0	0	D	14	> 25.7	31.8	< 44.8	> 1,070	1,370	< 1,456	No. 6
			W	13	< 31.2	29.5	41.6	< 1,165	1,272	1,352	No. 8
			O	12	> 22.2	27.2	< 38.4	> 925	1,172	< 1,248	No. 7
(4)	12.5	0	D	14	> 25.7	31.8	< 44.8	> 1,070	1,370	< 1,456	No. 6
			W	13	31.2	> 29.5	41.6	1,165	> 1,272	1,352	No. 8
			O	12	> 22.2	> 27.2	38.4	> 925	> 1,172	1,248	No. 7
(5)	15.0	0	D	29	> 69.6	> 65.9	92.8	> 2,600	> 2,840	3,016	No. 9
			W	20		> 45.4	> 64.0		> 1,955	> 2,080	No. 13
			O	102		218.3	326.4		9,975	10,608	No. 11
(6)	17.5	0	D	190		431.3	608.0		18,650	19,760	No. 12
			W	20		45.4	64.0		2,080	1,955	No. 13
			O	102		231.5	< 326.4		9,975	< 10,608	No. 11
(7)	5	5	D	4	> 9.6	> 9.7	12.8	> 358	> 392	416	No. 4
			W	7	> 12.8	15.9	< 22.4	> 628	685	728	No. 5
(8)	7.5	7.5	D	4	> 9.6	> 9.7	> 12.8	> 358	> 392	> 416	No. 4
			W	7	> 12.8	> 15.9	> 22.4	> 628	> 685	> 728	No. 5
(9)	10.0	10.0	D	190		< 431.3	< 608.0		< 18,650	> 19,760	No. 12
			W	20		45.4	64.0		2,080	1,955	No. 13
			O	102		231.5	< 326.4		9,975	< 10,608	No. 11
(10)	12.5	12.5	D	190		423.7	< 608.0		17,050	< 19,760	No. 12
			W	20		> 45.4	64.0		> 2,080	1,955	No. 13
			O	160		363.2	< 512.0		15,650	< 16,630	No. 15
(11)	15.0	15.0	D	190		423.7	< 608.0		17,050	19,760	No. 12
			W	20		45.4	64.0		1,955	2,080	No. 13
			O	102		231.5	< 326.4		9,975	< 10,608	No. 11
(12)	17.5	17.5	D	190		423.7	< 608.0		17,050	< 19,760	No. 12
			W	20		45.4	< 64.0		2,080	< 1,955	No. 13
			O	160		363.2	< 512.0		15,650	< 16,630	No. 15
(13)	12.5	18.7	D	58		> 131.6	> 185.6		> 5,680	> 6,025	No. 16
			W	11		24.9	35.2		1,075	1,144	No. 14
			O	160		363.2	< 512.0		15,650	< 16,630	No. 15
(14)	12.5	25.0	D	58		> 131.6	> 185.6		> 5,680	> 6,025	No. 16
			W	11		> 24.9	35.2		> 1,075	1,144	No. 14
			O	160		> 416.0	512.0		> 17,900	16,630	No. 15
(15)	15.0	30.0	D	58		> 131.6	> 185.6		> 5,680	> 6,025	No. 16
			W	11		> 24.9	> 35.2		> 1,075	> 1,144	No. 14
			O	160		363.2	< 512.0		15,650	< 16,630	No. 15
(16)	17.5	26.2	D	58		> 131.6	> 185.6		> 5,680	> 6,025	No. 16
			W	11		> 24.9	35.2		> 1,075	1,144	No. 14
			O	160		> 416.0	512.0		> 17,900	16,630	No. 15

適濕路面 (15) O　第 15 回試驗に於て全含水率 10.7% とし (13) O, (14) O と同樣に試驗せるに試驗の始めは路面狀態比較的良好にして (14), (16) に次で第3位なりしが終に至つて路線 7, 8 の一部分に表面原狀を維持する部分ある外破損の程度最も大きく路線 7, 8 間の間隙も兩端及中央半分隆起した.

(16) 表層第16種 (土 17.5:砂 26.2:砂利 100)

乾燥路面 (16) D　第 16 回試驗に於て全含水率 10.6% とし (12) D, (15) D 等と同樣に試驗せる結果は (10) D に勝り (13) D に劣るも其他に對しては大差なく尙充分餘力を存して居る.

濕潤路面 (16) W　第 14 回試驗に於て全含水率 11.1% とし (12) W, (15) W 等と同樣に試驗せる結果は各種大差なきも外側に排出盛上つた材料の量より見るに (14) W, (15) W に劣り其他に比しては勝る.

適濕路面 (16) O　第 15 回試驗に於て全含水率 11.8% とし (12) O, (15) O と同樣に試驗せしに (14) O に次ぎて路線 1, 6, 7, 8 等は表面未だ弛緩するに至らず路線 7, 8 間の間隙も殆ど隆起せず尙充分耐力を有し (10) O, (12) O 等には遙に勝り, (13) O, (15) O 等にも稍〻勝る.

以上の結果より各種表層の各種輪帶に對する許容通過荷重量及相當交通量を一括すれば第8表の如くであるが全部を常に同一の破壞程度の標準に合致せしめることの不可能であり且此種の路面は或る程度破壞後に於ても尙荷重を許容し併も其許容量が破壞に至るまでの耐力に比して甚しく大なる場合がある等の爲表中の數字を以て直に全部を比較することは不可能である.

III. 要　約

上述試驗結果より東京山手赤土若しくは之と同性質の土を膠着材とする砂利路面工の築造及維持に對し參考に資し得る點を要約すれば次の如くである. 而して本試驗に於ては通常考慮し得らるゝ砂利路面工の配合の全範圍を網羅したとは云へないが相當廣範圍に亘つたから略〻全般を推し得ると信ずる.

1) 東京若しくは之に似た氣象の地方に於ては鐵輪帶に對する砂利路面工の耐力は乾燥と共に增大し, 通常起り得る最大乾燥時の含水率より甚しく大なる含水率に於て最大耐力を有することはない. 換言すれば所謂最適含水率 (Optimum Moisture Content) なるものは尠くとも鐵輪帶に對しては存在しない.

2) 乾燥狀態に於て最大耐力を有する配合が濕潤狀態に於ても常に耐力最大なりとは限らぬ.

3) 砂を混用しない場合，乾燥狀態に於ては土量（砂利乾燥重量に對する土の乾燥重量の%）17.5% までは土量を增すと共に耐力を增すが濕潤狀態に於ては 15% まで增大し 17.5% では 15% と略〻同樣にして寧ろ少しく劣るが如くである．

4) 土量 17.5% までの範圍內に於ては砂を混用する方乾，濕軟れの場合に於ても耐力遙に大である．而して最適當の土砂の比率は土量及乾，濕に由つて異るが土 1 に對し砂 1.5～2.0 の間にあり土量 12.5～17.5% に於ては乾燥には 1:1.5，濕潤には 1:2 を適當と認める．

5) 砂利 100 に對し土 10，砂 10 若しくは之以下の土砂量の配合では假令乾燥充分なりとも充分なる耐力を得難い．

6) 砂利の空隙率に比し土砂モルタルの量が充分ならざる程度の配合でも土 12.5%，砂 12.5% に達すれば施工適當にして乾燥充分ならば鐵輪帶相當交通量 19,760 廻に及び他のより適當なる配合のもの〻不適當なる施工又は乾燥不充分なるものに比し耐力大である．

7) 砂利 100 に對し土 17.5 を使用しても必ずしも土量過多ではなく工法適當にして乾燥充分ならば鐵輪帶相當交通量 19,760 廻に及び若し之に適當量の砂を混用すれば其耐力更に增大し本試驗の範圍內に於ける最大の耐力に近からしめ得る．

8) 本試驗の結果土量 17.5% 以下の場合に於て適當と看做し得る配合は乾燥重量に於て下記程度の範圍である．

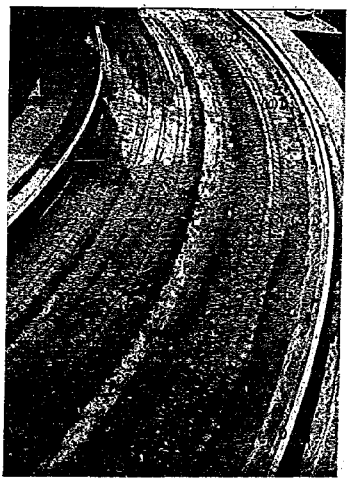
土		砂		砂利
12.5	:	18.7～25	:	100
15	:	30	:	100
17.5	:	26.2	:	100

9) 上記配合の內軟れが最も優れるかは未だ明確ではないが其差輕微であり地況に據つて最も經濟的な配合を採り之に應ずる施工法を用ふべきである．

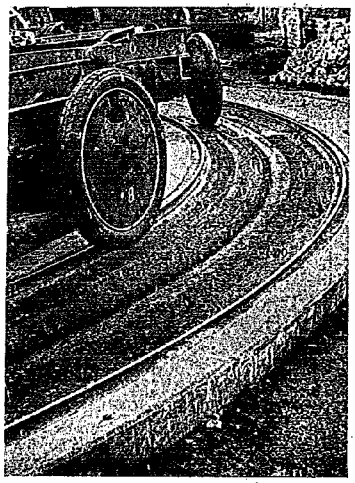
10) 上揭の配合の範圍內に於ける配合の相違の耐力に及ぼす影響に比すれば含水率の差施工の差の遙に大なる影響あることは之等の試驗中同一種類の區域內の路面狀況の差の配合の異る他區との差よりも著しきものあるに見て明である．

11) 本試驗の範圍內では土の分量の 2.5% 程度の配合の差は施工法又は含水率の差に比し寧ろ輕微である．

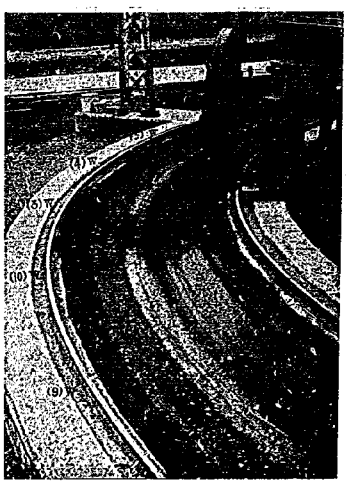
試驗 No. 6 乾燥路面
運轉時間 14 分　最大鐵輪通過荷重 44.8 瓲
同相當交通量　1,456 瓲



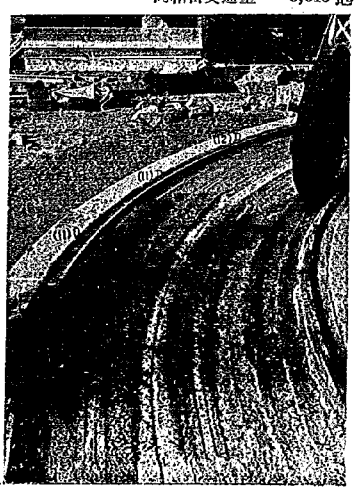
試驗 No. 7 適濕路面
運轉時間 12 分　最大鐵輪通過荷重 38.4 瓲
同相當交通量　1,248 瓲



試驗 No. 8 濕潤路面
運轉時間 13 分　最大鐵輪通過荷重 41.6 瓲
同相當交通量　1,352 瓲

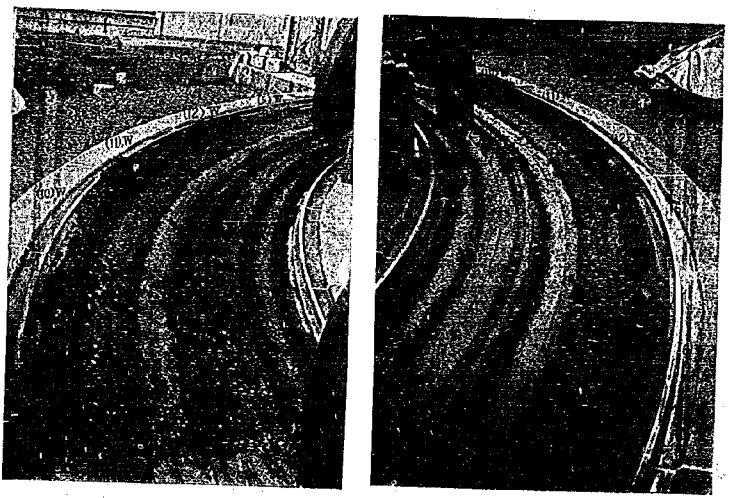


試驗 No. 9 適濕及乾燥路面
運轉時間 29 分　最大鐵輪通過荷重 92.8 瓲
同相當交通量　3,016 瓲



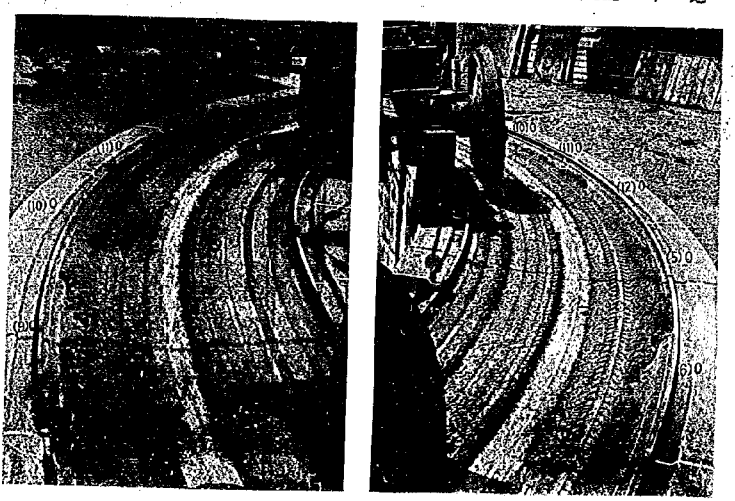
試驗 No. 10 濕潤路面

運轉時間 18 分　　最大鐵輪通過荷重 57.6 瓲　　同相當交通量 1,872 瓲



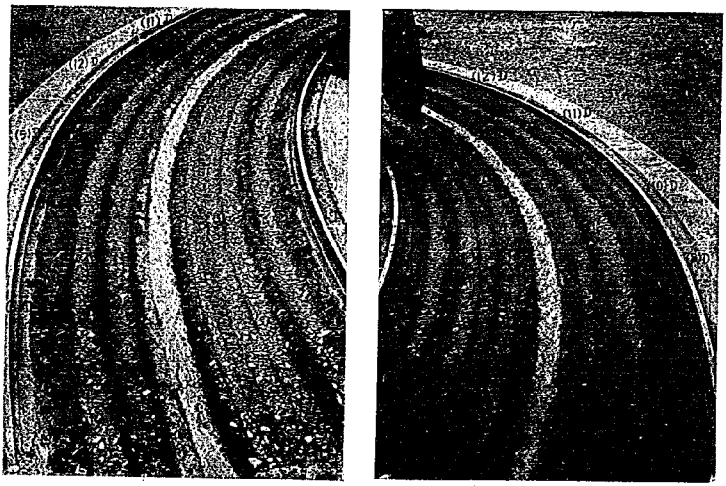
試驗 No. 11 適濕路面

運轉時間 1時間 42 分　　最大鐵輪通過荷重 326.4 瓲　　同相當交通量 10,608 瓲



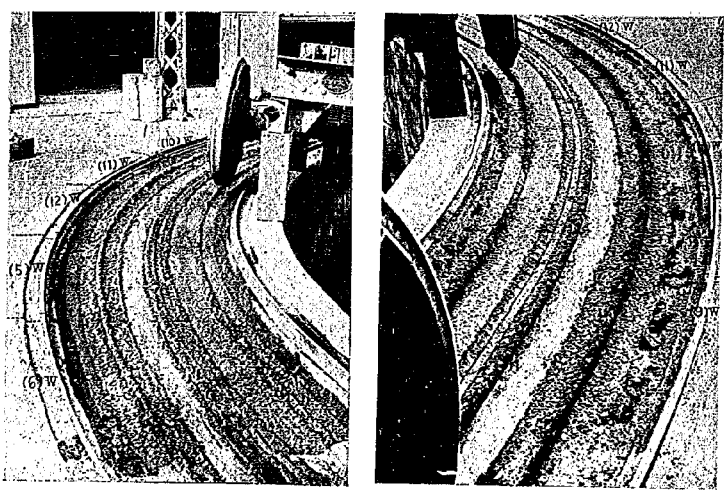
試驗 No. 12　乾燥路面

運轉時間　3時間 10分　　最大鐵輪通過荷重　608.0 瓲　　同相當交通量　19,760 瓲



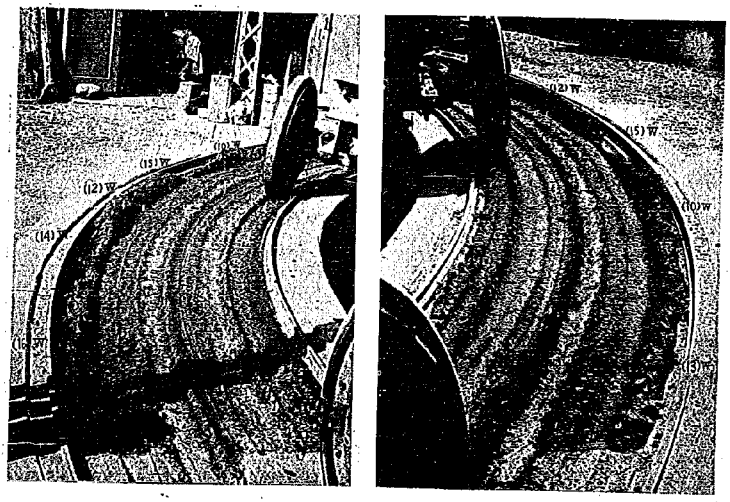
試驗 No. 13　濕潤路面

運轉時間　20分　　最大鐵輪通過荷重　64.0 瓲　　同相當交通量　2,080 瓲



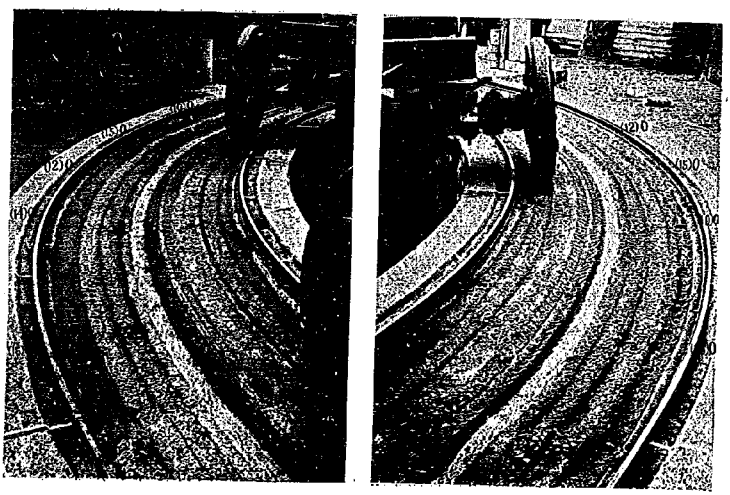
試驗 No. 14 濕潤路面

運轉時間 11分 最大鐵輪通過荷重 35.2瓲 同相當交通量 1,144瓲



試驗 No. 15 適濕路面

運轉時間 2時間40分 最大鐵輪通過荷重 512.0瓲 同相當交通量 16,640瓲



鋼橋鎔接沓壓縮試驗[1]

内務技師　青　木　楠　男
内務技手　鈴　木　倫　虎

目　次

I 總　論 …… (1)
〔1〕 鋼橋鎔接沓 …… (1)
〔2〕 米國 Bureau of Standard に於ける鎔接沓試驗 …… (3)
II 試驗豎並に試驗方法 …… (5)
〔3〕 試驗體 …… (5)
〔4〕 試驗方法 …… (7)
〔5〕 壓力の測定法 …… (7)
III 橋橋用鎔接沓試驗成績 …… (8)
〔6〕 載荷の方針 …… (8)
〔7〕 第1次試驗 …… (9)
(1) 下部支承 …… (9)
(A) 主肋鈑 …… (9)
(B) 隔鈑 …… (17)
(C) 補剛鈑 …… (17)
(D) 底鈑 …… (18)
(2) 上部支承 …… (20)
〔8〕 第2次試驗 …… (25)
IV 鈑桁橋用鎔接沓試驗成績 …… (26)
〔9〕 試驗の順序 …… (26)
〔10〕 第1次試驗 …… (26)
(A) 主肋鈑 …… (27)
(B) 隔鈑 …… (33)
(C) 補剛鈑 …… (33)
(D) 底鈑 …… (34)
〔11〕 第2次並に第3次試驗 …… (35)
V 要　約 …… (37)

I. 總　論

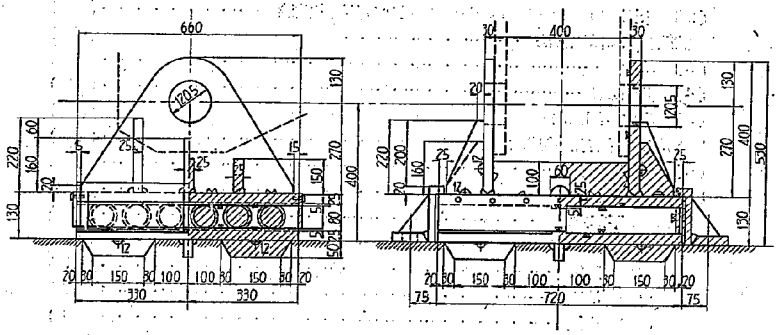
〔1〕 鋼橋鎔接沓

電弧鎔接法の普及に伴つて，各種構造物の支承として從來使用せられた鑄鐵又は鑄鋼製の沓は漸次軟鋼板の鎔結よりなる支承沓に代らんとする傾向が見え，最近築造せらるゝ鎔結又は鋲結の内外諸建築物の柱支承，鋼橋の支承等に鎔接沓の使用せられた例は頗る多い．

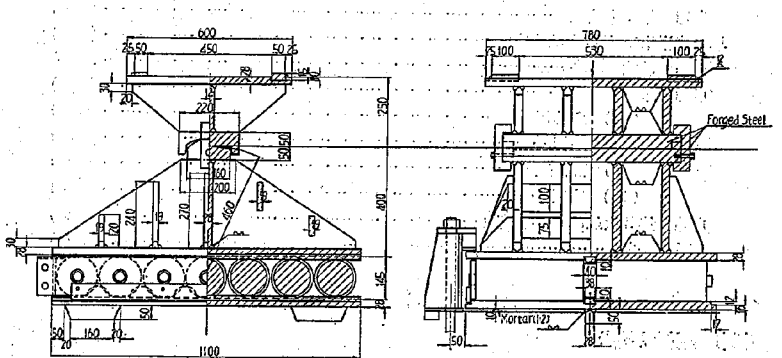
1) 本試驗は内務省横濱土木出張所の依頼によつて行つたものである．試驗に際しては當所，富澤，豊田，石川，佐藤の諸氏を煩した點が尠くない，こゝに諸氏の勞に對し謝意を表する次第である．

これによる製作日數の短縮と工費の節約とが見逃すべからざる額に達するためであると考へられる.

今鋼橋鎔接沓の實例として, 筆者の關係したもの 1, 2 を掲ぐれば, 內務省東京土木出張所に於て昭和9年度に架設したる八號國道梁川橋, 內務省橫濱土木出張所の架設にかゝる橫濱港瑞穗橋等がある. 前者は上路鈑桁構橋にて其支承にのみ鎔接を使用した例であり, 後者は本邦最初の鎔接鐵道橋として橫濱港外國貿易施設用埋立地と同市神奈川區千若町との間の水路に架設せられたもので, 其構橋部, 鈑桁橋部共に鎔接沓を使用してをる.



第 1 圖 梁川橋鎔接沓



第 2 圖 瑞穗橋鎔接沓

第1圖は梁川橋に用ひた可動端鎔接沓の構造を示したもので主構と沓との連結にはピンを使用してをる. 又第2圖は瑞穗橋構橋の可動端鎔接沓を示したもので主構との連結にはロッカーを使用してをる. これ等の鎔接沓の設計に當つて常に論議せらるゝ點は沓を形成

する各材片を鎔結するに隅肉鎔接を使用すべきか，片及又は兩及鎔接となすべきかの問題である．前者に於ては各材片の接觸端部を削成することにより應力を直接材片間の接觸にて傳達しうること，鎔接施工の容易なること等の利點を擧げうるも，米國 Bureau of Standard にて行はれた鎔接眷强度試驗によると，この接觸による應力傳達は必しも信賴し得ず，隅肉鎔接による眷の應力分布狀態は，其施工幾分困難なる片及又は兩及接ぎによる鎔接眷の應力分布狀態に比して遙かに劣る結果を示してをる．これ等の理由により前記梁川橋竝に瑞穗橋に於ける鎔接眷は其鎔結に片及及兩及接ぎを採用した．

而してこれ等鎔接眷の强度竝に應力分布に關する試驗として今日まで發表せられたる文獻は其數甚だ尠く，僅かに前記 Bureau of Standard に於ける J. H. Edwards, H. L. Whittemore, A. H. Stang 3 氏の實驗[1]を見るのみである．しかもこの實驗に供された鎔接眷は A 字形に組合された 2 枚の肋鈑を使用した特殊形のもので，今日本邦にて橋梁用支承眷として使用してをるものとは幾分趣きを異にしたものである．從つて內務省横濱土木出張所にて瑞穗橋を架設するに際し，其最初の試みたる鎔接眷の强度に就いては多少の懸念を抱くに至り，これが實物强度試驗を施行することに決定した．

本報告は同出張所の依賴によつて筆者が當土木試驗所に於て行つた壓縮試驗の結果を纒めたもので，實驗に供した試片は鎔接眷中，構橋及鈑桁橋の固定端用のもの各1個である．構橋用のものは實際架設に使用する鋼材の一部であつて，壓縮試驗は彈性限度以內にとゞめた．鈑桁橋用のものは架設すべきものと同一の製品を別に作製したもので壓縮は試驗機の許し得る最大限度まで行つた．

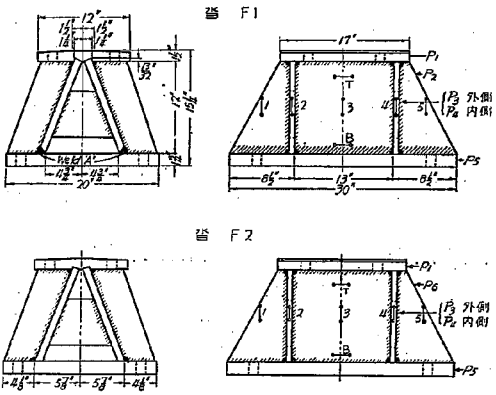
これ等の試驗方法竝に其結果に關しては第II章以下に記載したが，これに先つて本鎔接眷の設計に際して其試驗結果を參照した前記米國 Bureau of Standard の鎔接眷試驗の大要を記述することゝする．

〔2〕 米國 Bureau of Standard に於ける鎔接眷試驗

實驗に供された試驗體は第3圖に示す F_1 及 F_2 2 種の鎔接眷で，兩者共に A 字形に組合したる主肋鈑とこれの補剛鈑とよりなり，前者は底鈑と主肋鈑との取付けに片及接ぎを用ひ，後者は鈑の端部を削成して底鈑との接觸を充分ならしめたる後，隅肉鎔接をもつて接合してをる．兩者とも 350,000＃ の荷重に對して設計せられたものである．

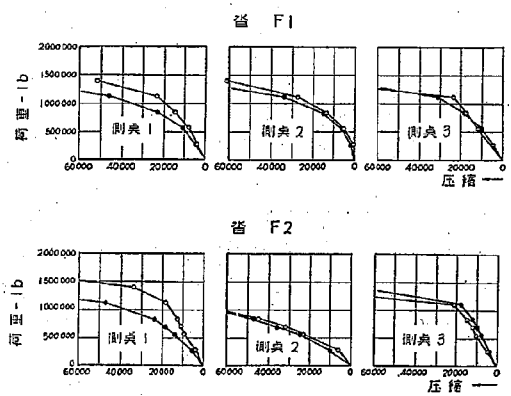
壓縮試驗は Bureau of Standard 備付けの 10,000,000＃ 壓縮試驗機を使用してをり，供試體は 3′−6″×2′−8″×18″ のコンクリート版上に据えられ，中心線上においた長 17″ 幅 3″ の鋼板によつて荷重が加へられてをる．

1) Bureau of Standards Journal of Research Oct. 1930, "Stress Distribution in Welded Steel Pedestals" By James H. Edwards, H. L. Witteimore, and A. H. Stang.



第 3 圖　米國 Bureau of Standard に於ける壓縮試驗用鎔接脊

試驗に當つては第 3 圖に示した如く 1, 2, 3, 4, 5, T, B の片側 7 箇所に Wittemore fulcrum plate 應力計を取りつけ，目盛 1/10,000 吋の dial gauge を用ひて變形を測定してをる．測點 1～5 は脊の $\frac{1}{2}$ 高の點に位し，1, 3, 5 は主肋鈑，2, 4 は補剛鈑に取りつけられてをる．實測された鉛直應力は，第 4 圖に示すが如く F_1 に於ては各測點とも殆ど近似の値を示してをり，荷重は脊の $\frac{1}{2}$ 高の水平斷面に於ては主肋鈑，補剛鈑ともほゞ均等に分布せることを示せるに對し，F_2 に於ては補剛鈑にて測定せる應力（測點 2）は主肋鈑に於ける夫れの約 2 倍に達し，F_1 に比して應力分布の不均等なることを示してをる．



第 4 圖　鎔接脊 F_1 及 F_2 に於ける應力（測點 1, 2, 3）

又測定應力より算出した $\frac{1}{2}$ 高斷面の壓縮應力は計算値とほゞ一致してをる．

又兩供試體とも其破壞は上鈑の彎曲と，主肋鈑竝に補剛鈑の彎折によつてをり，極限强度は設計荷重の 6 倍以上殆ど 7 倍に近い値を示してをる．

この實驗に於ては應力の測定が僅かに脊の $\frac{1}{2}$ 高の部分についてのみ行はれ，この部分に對しては實測値と計算値との比較が記述されてをるが，實測點以外に生ずべき最大應力の發生點についての調査が全く見逃されてをる，從つて極限强度が設計荷重の 6 倍以上に達

すると結論されてをるが，局部的の屈伏が最大應力の發生部にて遙かに低い荷重で起つて居らないとは斷言出來ない筈である．併しこの實驗に於ける最大の收獲は脊を構成する材片の集成に片及又は兩及接ぎを用ひ，鋼材自身の接觸に信賴すべきでないと云ふことを明かならしめた點であらう．

II. 試驗體竝に試驗方法

〔3〕試 驗 體

瑞穗橋の上部構造は橫河橋梁製作所の製作にかゝるものであるが，これに使用した鎔接脊は淺野造船所の製作である．

これ等鎔接脊中壓縮試驗に供した固定端のもの>形狀竝に寸法は第5圖の如くである．

鎔接脊の製作に當つて使用した鎔接機は，多人數型直流鎔接機で，電源には明電舍製85馬力，50 サイクルの電動機とベルト連結されたアレン・アンド・サン社製發電機 75 kW，80 V のものを使用してをる．使用電極棒はアーコスのノルメンド徑 4 mm，長 460 mm のもので，鎔接脊總鋼材重量 10.125 t (構橋用 5.977 t，鈑桁橋用 4.148 t) に對して使用電極棒 8,974 本，作業延時間 774 時間を要してをる．從つて鋼材 1 t 當りの電極棒使用量は約 40 kg に當つてをる．

尙使用電極棒ノルメンドの鋼心分析の結果は

C	S	Mn	SiO	P
0.08	0.025	0.47	—	0.018

で，これを用ひて作つた鎔着鋼の引張竝に曲げ試驗成績は第1表の如くである (試驗方法竝に試驗片形狀は鎔接研究會 "電弧鎔接鋼構造物示方書" による)．

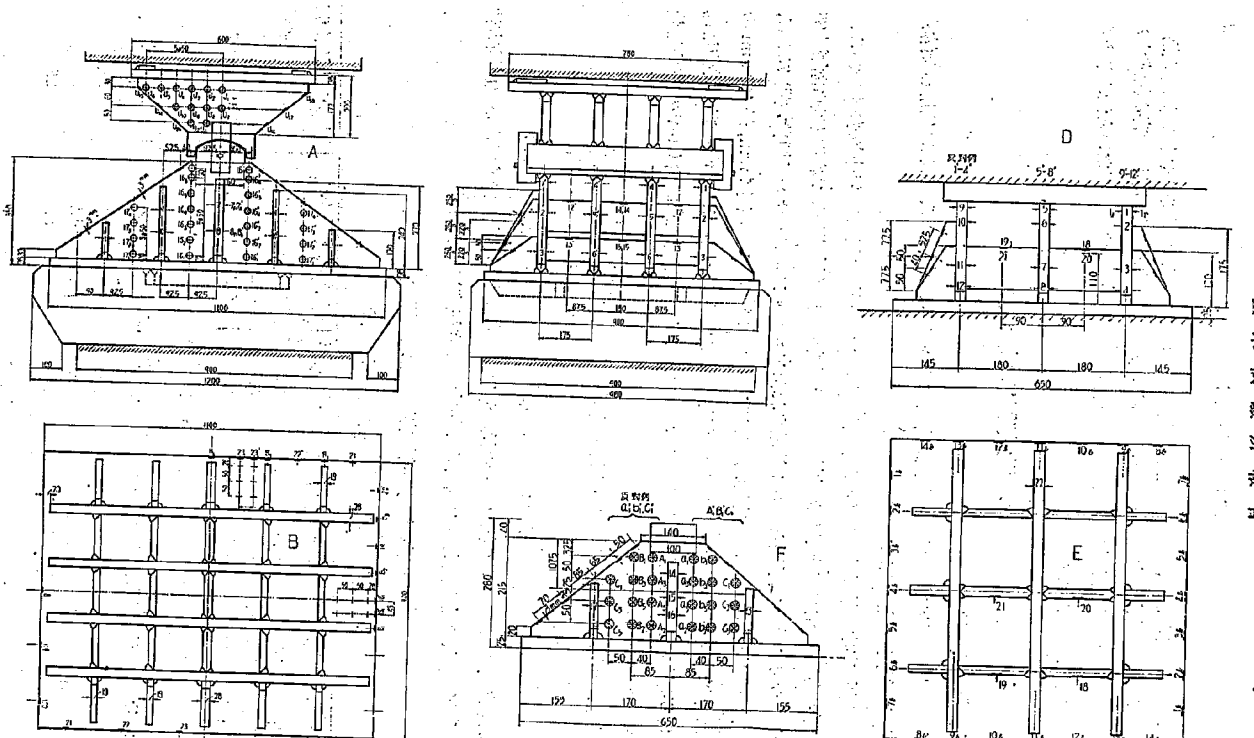
第 1 表　鎔接脊製作用電極棒試驗成績

1. 引 張 試 驗

試片番號	直徑 (mm)	斷面積 (mm^2)	標點距離 (mm)	破壞荷重 (kg)	極限强度 (kg/mm^2)	伸 (mm)	伸率 (%)	破斷箇所
G_1	14.05	155.0	50	6,520	42.1	9.5	19.0	中央
G_2	14.04	154.7	50	6,330	40.9	9.3	18.6	〃
G_3	14.09	156.0	50	6,370	40.8	9.5	19.0	〃

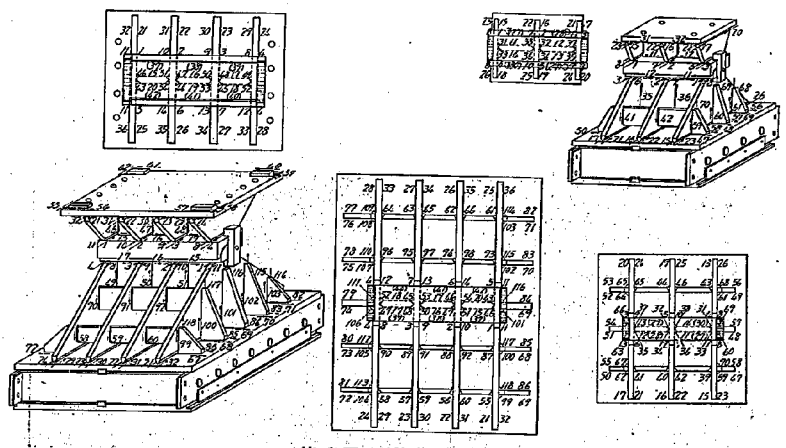
2. 曲 げ 試 驗

試片番號	標點番號	標點距離 (mm)	伸 (mm)	伸率 (%)
G_1	1—1	20.0	6.5	32.5
	2—2	20.0	4.5	22.5
	3—3	20.0	5.0	25.0



第 5 圖　壓縮試驗用鉚接杏と共應力測定點

鎔接杏の鎔接作業は各鋼片の集成に當つて出來うる限り歪及び殘留應力の發生を避くることにつとめ，其各部鎔接順もこの點に充分なる注意を拂つた．第6圖は構橋用竝に鈑桁橋用の可動端鎔接杏鎔接順序を示したものである．



第6圖　鎔接杏鎔接順

〔4〕 試驗方法

鎔接杏の壓縮試驗に使用した試驗機は當所備付 M.A.N 製 1,000 t 耐壓試驗機である．載荷は油壓式にて荷重の計測は振子動力計によつてをる．

試驗體の載荷に當りて，試驗機附屬の試片支持臺の大さ 90×90 cm なるに對し，構橋用鎔接杏は 90×110 cm なるため，支持用として 98×120×25 cm の鐵筋コンクリート版を製作し，杏をこの版上に置き，支持臺と版，版と杏との間隙にはセメント・モルタルを塡充して載荷の均等分布を得るにつとめた．鈑桁橋用の鎔接杏は其大さ 90×90 cm なる故に鐵筋コンクリート版の使用を必要としない．

〔5〕 應力の測定法

鎔接杏各部の應力測定には Huggenberger Tensometer を使用した．gauge length 20 mm のもの 4 個，10 mm のもの 2 個，各目盛は 1/1000 mm である．試片への取付は取付金物竝に magnet を使用した．第7圖及び第8圖は構橋用竝に鈑桁橋用鎔接杏の試驗狀況を示したものである．

Tensometer の讀數 (Z) と歪 (ε) 竝に發生應力 (σ) との間に次の關係あるものと見做す．

$$\varepsilon=\frac{Z}{1000}\times\frac{1}{20}=50Z\times10^{-6}\cdots\cdots\text{20 mm gauge に對し}$$

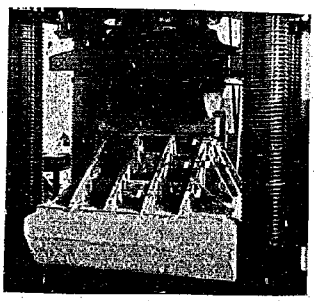
$$=\frac{Z}{1000}\times\frac{1}{10}=100Z\times10^{-6}\cdots\cdots\text{10 mm gauge に對し}$$

$$\sigma=E\cdot\varepsilon$$

今 $E=2.1\times10^6\ \text{kg/cm}^2$ と假定すれば

$$\sigma=2.1\times10^6\times50Z\times10^{-6}=105Z\ (\text{kg/cm}^2)\cdots\cdots\text{20 mm gauge に對し}$$

$$=2.1\times10^6\times100Z\times10^{-6}=210Z\ (\text{kg/cm}^2)\cdots\cdots\text{10 mm gauge に對し}$$



第 7 圖 瑞穗橋構橋用鎔接沓の壓縮試驗

第 8 圖 同上鈑桁橋用鎔接沓壓縮試驗

各試驗體に於ける應力測定點は第 5 圖に示す如くにして，構橋用鎔接沓に於て 185 箇所，鈑桁橋用鎔接沓に於て 301 箇所である．

III. 構橋用鎔接沓試驗成績

〔6〕 載荷の方針

本試驗に使用した鎔接沓は，試驗終了を俟つて，直ちに現場に運搬，架設を要するものであつたのと，工期切迫の折柄とて短期間に試驗を了らねばならなかつた關係上，應力の測定點の選定にあたつては，試驗體の中心軸に對稱なる位置に於ては大體同樣の應力が發生するものと假定し，試片の片側にのみこれを選んだ(この假定の照査のために特に 1，2 箇所の測定點を設けた)．測點數 185 箇所，これによつて鎔接沓の最大應力發生箇所を求むると共に，沓の各部に於ける應力分布狀況を知ることにつとめた．

試驗は第 1 次試驗と第 2 次試驗とに分ち，第 1 次試驗に於ては各部の應力發生狀況を驗べることを目的とし，載荷を 0 より始めて 500 t に至らしめ，この間約 50 t 置きに應力

の測定を行つた．各測點に對しこの操作を3回反覆し，3回測定値の平均をもつて觀測値と定めた．

第2次試驗は第1次試驗によつて求められた最大應力發生點8箇所（1_l, 1_r, $4'_l$, $4'_r$, $1'_l$ $U_{11-45°}$, $U_{12-45°}$, U_{15}）に就き，鋲接合の設計荷重の2倍に相當する640t迄の荷重を加へて，發生應力の觀測をしたものである．この場合も3回反覆試驗し，測定値の平均をもつて觀測値とした．

この試驗に於て特に注意を要する點は本試驗體は各材片の鋲結後，燒鈍を行つてをらぬことである．從つて鋲接作業の結果として試驗體内に殘留した元應力は，觀測値にかなりの影響を與へてをるものと考へねばならぬ．

以下第1次試驗竝に第2次試驗に於て觀測せられたる應力發生狀況について記述することゝする．

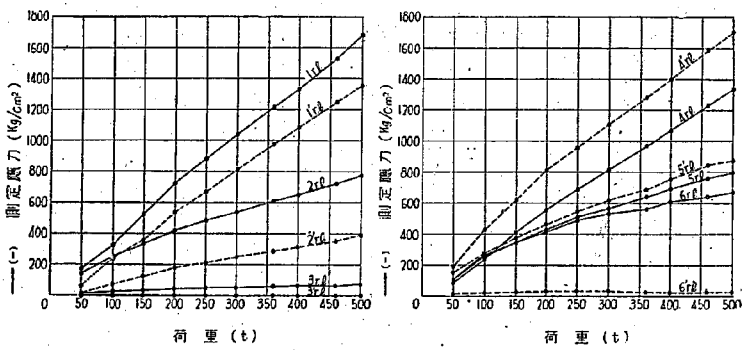
〔7〕 第1次試驗

試驗に供したる橋梁用鋲接合は上部桁承と下部支承との間に揺承（ロッカー）が用ひられてをる．上部桁承は厚28mmの主肋鈑4枚よりなり，其中央にこれ等をつなぐ厚さ28mmの隔鈑を有す．下部支承は上部と同樣厚さ28mmの主肋鈑4枚が中央厚さ28mmの主隔鈑にて連結せらる．外にこれが左右に各2個の副隔鈑を有し，更に外側の2主肋鈑は其側面に夫々5個の補剛鈑を有してをる（第2圖參照）．

これ等主肋鈑，隔鈑，補剛鈑竝に底鈑について行つた試驗の結果は次の如くである．

（1） 下部支承

（A） 主肋鈑　先づ主肋鈑の緣應力を求むるために，これの傾斜緣部に各3箇所

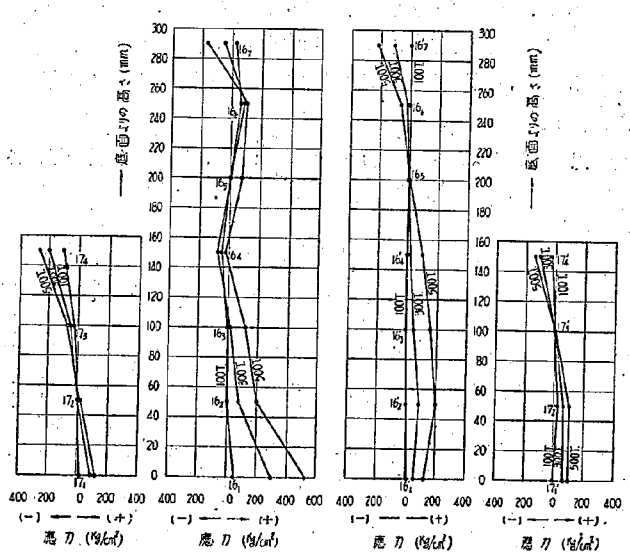


第9圖　主肋鈑緣應力

(1, 2, 3; 1′, 2′, 3′; 4, 5, 6; 4′, 5′, 6′) の測點を設けた．各測點は第5圖に從ひ正確に罫線し，其位置に誤りなからんことを期した．測點は肋鈑の兩面に應力計を取付くる關係上，緣邊より 3 mm 內部に設置してをる．第 9 圖はこれ等の點に於ける應力測定の結果と，試驗體に加へた荷重との關係を示したものである．圖中 1_{rt} 等とあるは當該測點にて求めたる主肋鈑兩表面應力の平均を示すものである．

第9圖によると4主肋鈑各々の測定應力間には相當著しい差が認められ，各主肋鈑が均等なる荷重分擔をしてをらないことが知られるが，孰れの主肋鈑に於ても頂部に於て最大應力を發生し，下方に至る程減少してをる．

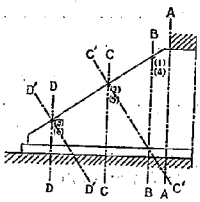
更に主肋鈑の作きは其側腹に於て測定した水平方向の應力からも判斷出來る．第 10 圖は側腹に設けた，4 列，22 箇所 (16_1～16_7; $16_1'$～$16_7'$; 17_1～17_4; $17_1'$～$17_4'$) に於ける測定應力中，荷重 100 t, 300 t, 及 500 t の場合のものを示したもので，16 群に於ける分布は幾分不規則なるも其他のものに於ては孰れも高さ $\frac{1}{2}$～$\frac{1}{3}$ の點に中立軸を有し，これより上部にて壓縮，下部にて引張應力の發生せることを示してをる．これによつて見るに主肋鈑端部が大體突桁として作用してをることが窺れるが，これが分擔する荷重は一般に假定するが如く總荷重を底面に等布せるものとは可成の相違があるのではないかと思考せ



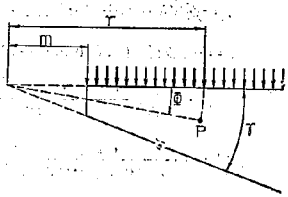
第 10 圖　主肋鈑側腹に於ける水平方向の應力

られる.

今主肋鈑傾斜緣部について求めたる，實測緣應力と，慣用設計法による計算應力とを比較して見ることゝする．一般にこの種楔形主肋鈑の設計に際しては第 11 圖に示す A−A 斷面を考へ，荷重は等布せらるゝものと假定し，この斷面より外側を突桁と見做し，この斷面に於ける緣應力を許容應力內に止まらしむる樣，主肋鈑數竝に鈑厚を決定するのが常法である．又傾斜緣部の應力の算出を行ふ場合には，鉛直斷面 (例へば B−B, C−C 等)



第　11　圖



第　12　圖

を考へこれに對して緣應力を求むる場合多きも，かくの如くにして求められたる應力は傾斜緣部の緣應力を與ふるものにあらずして，過少なる近似値を示すことゝなる．又傾斜緣部に垂直なる斷面 (例へば C′−C′, D′−D′ 等) を假想して，これについて緣應力を算出する場合あるも，過大なる近似値を與ふるに過ぎない.

今これ等兩近似計算法により，第 11 圖指示の 6 斷面について求めたる傾斜緣部の緣應力を示せば第 2 表の如くである.

第 2 表　近似計算による主肋鈑緣應力

測點		(1)(1′)(4)(4′)	(2) (2′) (5) (5′)		(3) (6) (3′) (6′)	
斷面	A−A	B−B	C−C	C′−C′	D−D	D′−D′
曲げモーメント (kg cm)	5,025,000	3,966,000	1,690,000	4,171,000	184,300	594,000
斷面二次モーメント (cm^4)	82,000	68,840	23,470	44,500	2,400	4,280
緣距離 (cm)	23.9	22.6	16.1	20.0	7.8	9.4
緣應力 (kg/cm^2)	−1,470	−1,300	−1,160	−1,870	−600	−1,310

以上は被頭楔形桁の慣用計算法による數値と實測値との比較をしたものであるが，この種の桁を理論的に取り扱つたものに次の如き解法[1] がある．これによれば第 12 圖の被頭

1) "Spannungskurven in rechteckigen und keilformigen Trägern" von Akira Miura.

楔形桁が圓の如き等布荷重をうくる場合，任意の1點Pの3應力 σ_r，σ_t，τ は次式にて與へられる．

$$\sigma_r=p[(S_K-1)-C_K\sin 2\phi+S_K\cos 2\phi-2C_K\phi]$$
$$-\frac{2pm}{r}\left\{-\frac{\sin\frac{\gamma}{2}\cos\left(\frac{\gamma}{2}-\phi\right)}{C'}+\frac{\cos\frac{\gamma}{2}\sin\left(\frac{\gamma}{2}-\phi\right)}{S'}\right\}$$
$$-\frac{pm^2}{r^2}\frac{\sin(\gamma-2\phi)}{K} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\sigma_t=p[(S_K-1)+C_K\sin 2\phi-S_K\cos 2\phi-2C_K\phi] \quad \cdots\cdots(2)$$

$$\tau=-2p\sin\phi(S_K\cos\phi-C_K\sin\phi)$$
$$-\frac{pm^2}{2K}\frac{\{\cos(\gamma-2\phi)-\cos\gamma\}}{r^2} \quad \cdots\cdots(3)$$

茲に　$C_K=-\dfrac{\cos\gamma}{2(\gamma\cos\gamma-\sin\gamma)}$，　$S_K=-\dfrac{\sin\gamma}{2(\gamma\cos\gamma-\sin\gamma)}$

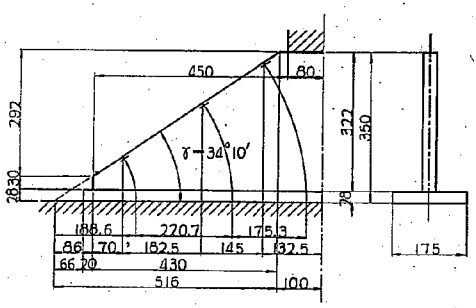
$C'=\gamma+\sin\gamma$，　$S'=\gamma-\sin\gamma$，　$K=\cos\gamma\cdot\gamma-\sin\gamma$

下部傾斜線に於ては $\phi=\gamma$，$\sigma_t=0$，$\tau=0$ にして，其線應力は

$$\sigma_r=p[(S_K-1)-C_K\sin 2\gamma+S_K\cos 2\gamma-2C_K\gamma]$$
$$+p\frac{m}{r}\sin\gamma\left\{\frac{1}{S'}+\frac{1}{C'}\right\}+p\frac{m^2}{r^2}\frac{\sin\gamma}{K} \quad \cdots\cdots(4)$$

となる．

上式によつて鎔接沓主肋鈑の線應力を求むるに，第 13 圖に示す寸法により



第　13　圖

$\tan\gamma=\dfrac{292}{430}=0.679$

$\gamma=34°\,10'=0.5963$ rad.

$\sin\gamma=0.562$，　$\cos\gamma=0.827$

$\sin 2\gamma=0.9293$，

$\cos 2\gamma=0.3692$

從つて

$C_K=5.99$，　$S_K=4.07$，

$C'=1.158$，　$S'=0.034$，

$K=-0.069$

$$\sigma_r=p\left(-8.13+17.0\frac{m}{r}-8.14\frac{m^2}{r^2}\right)$$

測點 3 及 6 に對し　　$r_1=188.6$ mm

測點 2 及 5 に對し　　$r_2=409.3$ mm

測點 1 及 4 に對し　　$r_3=584.6$ mm

$m=86$ mm なるが故に

$$\frac{m}{r_1}=0.456,\quad \frac{m}{r_2}=0.210,\quad \frac{m}{r_3}=0.147,$$

$$\left(\frac{m}{r_1}\right)^2=0.208,\quad \left(\frac{m}{r_2}\right)^2=0.0441,\quad \left(\frac{m}{r_3}\right)^2=0.0216$$

從つて測點 3 及 6 に對し

$$\sigma_r=p(-8.13+17.0\cdot 0.456-8.14\cdot 0.208)=-2.07p$$

測點 2 及 5 に對し

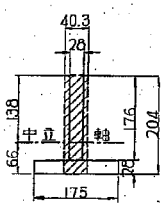
$$\sigma_r=p(-8.13+17.0\cdot 0.210-8.14\cdot 0.0441)=-4.92p.$$

測點 1 及 4 に對し

$$\sigma_r=p(-8.13+17.0\cdot 0.147-8.14\cdot 0.0216)=-5.81p$$

となる.

p の値は桁の單位幅に對する等布荷重を意味するものなるも，この場合桁の斷面は楕形にして，單位幅當りの荷重の決定困難である，今 4 本の主肋鈑が均一に荷重を負擔するものとすれば，總荷重 500 t の場合 1 主肋鈑のうくる荷重は 125t となる．1 主肋鈑の平均斷面は突緣幅 175 mm を有する丁形斷面にて長 1,100 mm，高さは漸變してをる．よつて今傾斜部の平均斷面，突緣幅 175 mm，高 204 mm の丁形斷面形 (第 14 圖) を採り，これと同一の斷面係數を有する，同高の矩形斷面を求め，これが幅員を p の算出に使用することゝする.



第 14 圖

第 14 圖丁形斷面に於ては

斷面積　　$A=9{,}828$ mm^2

中立軸の位置　　$\eta_1=66$ mm，　$\eta_2=138$ mm

斷面二次モーメント　　$I=38{,}610{,}000$ mm^4

斷面係數　　$W=279{,}800$ mm^3

にして，これと同高にして同斷面係數をもつ矩形斷面の幅員は

$$\frac{bh^2}{6}=279{,}800\text{ mm}^3,\qquad h=204\text{ mm}$$

幅員　　$b=40.3$ mm

となる.

從つて換算等布荷重は

$$p=\frac{125{,}000}{1{,}100\times 40.3}=2.82\text{ kg/mm}^2$$

よつて測點 3 及 6 に對し，緣應力は

$$\sigma_r = -2.07p = -5.84\ \mathrm{kg/mm^2} \fallingdotseq -580\ \mathrm{kg/cm^2}$$

測點 2 及 5 に對し，緣應力は

$$\sigma_r = -4.92p = -13.87\ \mathrm{kg/mm^2} \fallingdotseq -1{,}390\ \mathrm{kg/cm^2}$$

測點 1 及 4 に對し，緣應力は

$$\sigma_r = -5.81p = -16.38\ \mathrm{kg/mm^2} \fallingdotseq -1{,}640\ \mathrm{kg/cm^2}$$

となる．

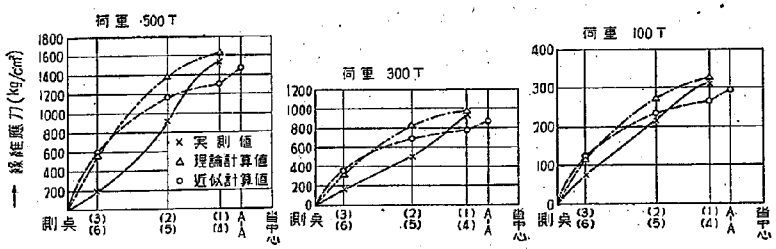
前記 2 近似計算竝に (4) 式を用ひこの理論計算による載荷 500 t の場合の主肋鈑緣應力と，實測値とを比較すれば第 3 表の如くである．

第 3 表　各種計算法による主肋鈑緣應力と實測値との比較

測　　點	斷面 A—A	平均 (1) (1′) (4) (4′)	平均 (2) (2′) (5) (5′)	平均 (3) (3′) (6) (6′)
實測緣應力 (kg/cm²)		−1,520 −1,520	−580 −840	− 40 −350
鉛直斷面によるもの (〃)	−1,470	−1,300	−1,160	−600
傾斜斷面 〃 (〃)	—	—	−1,870	−1,310
理論式 〃 (〃)	—	−1,640	−1,390	−580

これによれば實測應力と理論式による計算値とは測點 (1) (4) に於ては比較的近き値を示せるも，其他の測點にては其差が著しい．これに反して理論計算値と，鉛直斷面による近似計算値とは測點 (3) (6) に於てよく一致するも脊の中央に向ふにつれて其差異は大となり，測點 (1) (4) にては 25% に達する相違を示してをる．第 15 圖はこれ等の關係を明かならしむるため第 3 表の結果竝に同樣の方法にて求めたる荷重 300 t 及 100 t の場合の應力分布を圖表としたものである．

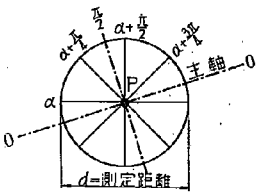
理論計算値と實測値との差は理論式の適用に際して，脊の梯形斷面形を矩形斷面形に改めて，平均幅員を求めたることによる影響も見逃し難いものであるが，このほかに理論式の誘導にあたつて假定された荷重の等布が，鉚接脊の場合に滿足されてをらないことが大



第 15 圖　主肋鈑緣應力の分布

なる原因をなすものではないかと考へられる．第 15 圖にて實測應力の値が端部に於て低く，中央部にて急激に增加してをることからも，荷重分布が端部に淺く中央部に厚いのではないかと想像される．

又一般慣用の設計法にて等布荷重を用ひ，鉛直斷面を用ひて計算することは，端部にては過大の應力を與へ，中央部にては過小の應力を與ふる可能性のあることがわかる．傾斜斷面を使用しての應力計算は甚しく過大の應力を與ふることが多く，適當なる計算法とは稱し難い．



第 16 圖

主肋鈑については更に 16′ 群及び 17′ 群の一部について觀測したる水平，垂直及び左右 45° の方向の變形，卽ち ε_α，$\varepsilon_{\alpha+\frac{\pi}{2}}$，$\varepsilon_{\alpha+\frac{\pi}{4}}$，$\varepsilon_{\alpha+(\frac{3}{4})\pi}$ (第 16 圖參照) に基いて，次の諸式より其主應力 σ_1 及び σ_2 の大さ竝に作用方向 $\tan 2\alpha$ を求めた．

$$\tan 2\alpha = -\frac{\varepsilon_{\alpha+\frac{\pi}{4}} - \varepsilon_{\alpha+(\frac{3}{4})\pi}}{\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\alpha+\frac{\pi}{2}}} = -\frac{D_{\alpha+\frac{\pi}{4}}}{D_\alpha} \quad \cdots\cdots(5)$$

$$\left.\begin{matrix}\sigma_1 \\ \sigma_2\end{matrix}\right\} = \frac{m\cdot E}{2}\left(\frac{S_\alpha}{m-1} \pm \frac{\sqrt{D_\alpha^2 + D_{\alpha+\frac{\pi}{4}}^2}}{m+1}\right) \quad \cdots\cdots(6)$$

竝に　$S_\alpha = \varepsilon_\alpha + \varepsilon_{\alpha+\frac{\pi}{2}} = \varepsilon_{\alpha+\frac{\pi}{4}} + \varepsilon_{\alpha+(\frac{3}{4})\pi} =$ 定數

$D_\alpha = \varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\alpha+\frac{\pi}{2}}$，　$D_{\alpha+\frac{\pi}{4}} = \varepsilon_{\alpha+\frac{\pi}{4}} - \varepsilon_{\alpha+(\frac{3}{4})\pi}$

$E =$ 彈性係數 $\fallingdotseq 2{,}100{,}000\ \mathrm{kg/cm^2}$

$m =$ Poison 比 $\fallingdotseq \frac{10}{3} \fallingdotseq 3.33$

(5) 及び (6) 式による主應力の計算に於ては，觀測上の誤差により $S_\alpha =$ 定數　なる關係は滿足しないことが多い，よつて應力の算出にあたつては，附近の觀測點の測定結果より，同一方向の應力の變化狀況を確め，これを基として測定値の更正を行ひ，$S_\alpha =$ 定數の成立する樣補正したる觀測値を用ひて計算を行つた．

第 4 表はこれ等 16′ 群及 17′ 群の測點 6 箇所について求めた 2 主應力の大さ及び其方向を示すものである．

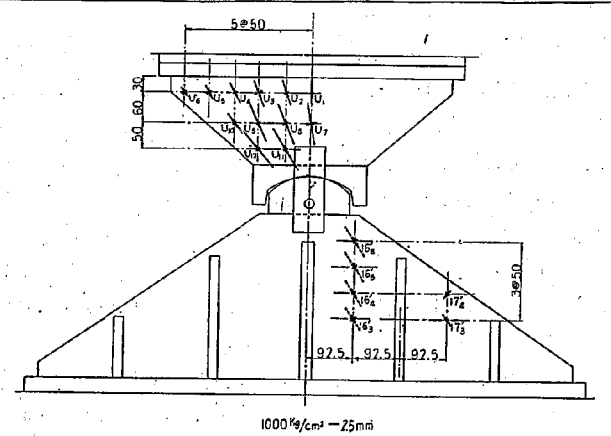
計算の結果から求めた各測點の主應力の方向は載荷の大さに從つて幾分の變化を示してをるが著しい量ではない．第 17 圖下半は主應力の方向としては各載荷の平均値をとり，載荷 500 t の場合の主應力の大さを示したものである．

今第 4 表に示した結果と第 17 圖とにより，16′ 群の主應力の方向について考ふるに，σ_2 が支承鈑の上下面に於てこれと鉛直ならざる可からざること，竝に第 28 圖に示せる光彈性實驗の結果とに徵して，測定 $16_0'$ より $16_3'$ にむかつて垂直よりの傾きは漸次減少すべ

き管である．第4表計算の結果を見るに各測點の平均傾斜角は孰れも 31°～33° にして，

第 4 表 橋脚下部支承主肋鈑に於ける主應力

測點	主應力	荷重 (t) 100	200	300	400	500	平均
$16_3'$	σ_1(kg/cm²)	+ 38.50	+ 92.75	+157.50	+192.50	+255.50	
	σ_2(〃)	−175.00	−393.75	−549.50	−735.00	−885.50	
	α	−38°58′	−34°18′	−32°53′	−30°25′	−29°33′	−33°15′
$16_4'$	σ_1	+ 10.50	+ 26.25	+101.50	+ 98.00	+141.80	
	σ_2	−175.00	−387.00	−626.50	−790.00	−1014.00	
	α	−33°26′	−34°44′	−32°10′	−29°9′	−27°59′	−31°30′
$16_5'$	σ_1	+ 29.75	+ 64.75	+ 85.80	+105.00	+ 112.00	
	σ_2	−180.30	−439.10	−702.00	−962.50	−1225.00	
	α	−33°42′	−33°10′	−33°10′	−32°13′	31°45′	−32°50′
$16_6'$	σ_1	+ 40.25	+ 66.50	+ 54.25	+ 17.50	− 26.50	
	σ_2	−176.70	−399.00	−684.00	−962.50	−1224.00	
	α	−35°7′	−34°51′	−33°28′	−32°6′	−31°10′	−33°20′
$17_3'$	σ_1	+ 36.75	+ 33.25	+ 54.25	+ 61.25	+ 68.25	
	σ_2	−129.50	−229.25	−309.75	−393.75	−442.75	
	α	−37°2′	−36°55′	−36°37′	−36°46′	−37°14′	−36°55′
$17_4'$	σ_1	+ 24.50	+ 14.00	+ 12.25	+ 10.50	+ 7.00	
	σ_2	− 98.00	−210.00	−281.75	−325.50	−381.50	
	α	+39°14′	+39°40′	+40°12′	+40°5′	+39°29′	+39°45′

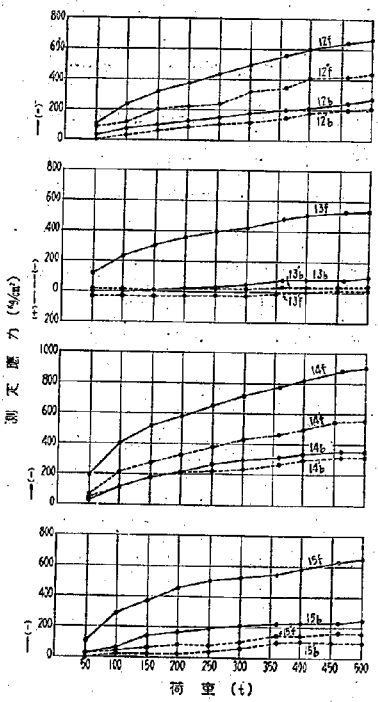


第 17 圖 主肋鈑に於ける主應力

これ等の間に著しき差違なく，上記の關係を充分明かならしむること困難なるも，測點 $16_3'$～$16_4'$ の間にては垂直よりの傾きが漸次減減してをることが認められる．

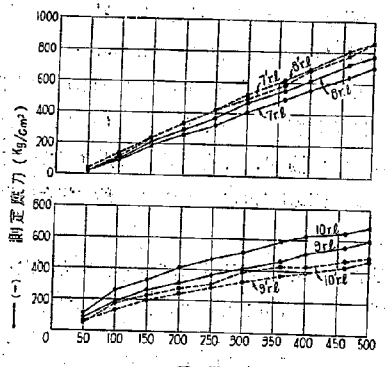
又 σ_2 の大さが $16_6'$ より $16_3'$ へと減少してゆく傾向は應力線が牏承より底鈑へと漸次擴散してゆくことを示すものであり，σ_1 の値が大體引張であり，荷重 500 t に至つて $16_6'$ にて壓縮を示すに至つた．この點にて σ_1 σ_2 共に壓縮となり，牏承直下に近き部分にて著しい應力の集中があるわけであるが，局部的の變形の妨げらるゝために一般の場合に比して遙かに大なる應力を支持し得る筈である．

（B）隔鈑　中央主隔鈑の應力は構造上，應力計の取付困難なるため，應力測定を行つてをらぬ．但副隔鈑に對しては，各其中央部に於て測定を行つた（測點番號 12, 13, 14, 15, $12'$, $13'$, $14'$, $15'$）．元來副隔鈑については顯著なる應力の發生を豫期せざりしに拘らず，實測の結果にては荷重 500 t にて 600 kg/cm² 以上の壓縮應力の發生せるものが少くない．第 18 圖は測定應力と荷重との關係を示したものである．圖中，f 及 b とあるは副隔鈑觀測點の前面及後面の測定應力を示すもので，兩者の間に幾分の相違ありて常に前面に大なる應力の發生を見てをることは，副隔鈑にかゝる壓縮が，多少の偏心を有することを示すもので，この原因は副隔鈑の取付けが片刃鎔接によれるが故に，補强盛のために取付部の斷面中心軸は前面に偏せることにありと信ずる．



第 18 圖　副隔鈑に於ける應力

（C）補剛鈑　外側主肋鈑は其側面に各 5 個の補剛鈑を有する．これ等は主肋鈑の剛性を增加する意味に取りつけられたもので，各の設計にあたつては主應力材と認められない場合が多いが，實際問題としては肋鈑よりの應力を傳達するに相當役立つてをるものと考へねばならぬ．今この點を確むるために 5 個の補剛鈑中，中央の 3 個に各 2 個，兩側補剛鈑に各 1 個



第 19 圖 補剛鈑に於ける應力

の測點（測點番號 7～11, 及び 7′～11′）を設け，其緣應力を求めた．第 19 圖は實測應力を圖示したものである．測點 11 及 11′ に於ては最大荷重にて僅かに 20 kg/cm² 程度の應力が發生したのみなるが故に第 19 圖にはこれが記入は省略した．中央補剛鈑に於ける測點 7 及 8 は，各其位置が補剛鈑高の兩 $\frac{1}{8}$ 點に位し，相當の隔りを有するが故にこれが發生應力には多少の變化あるものと豫想せるも，實測の結果は兩點共殆ど同樣にして，下部に位する測點 8 及 8′ の應力が上部の測點 7 及 7′ のものより幾分大なる傾向を示した．發生應力の大さは主肋鈑側面の測點 $16_3'$, $16_4'$ にて求めたる垂直應力と一致してをる．

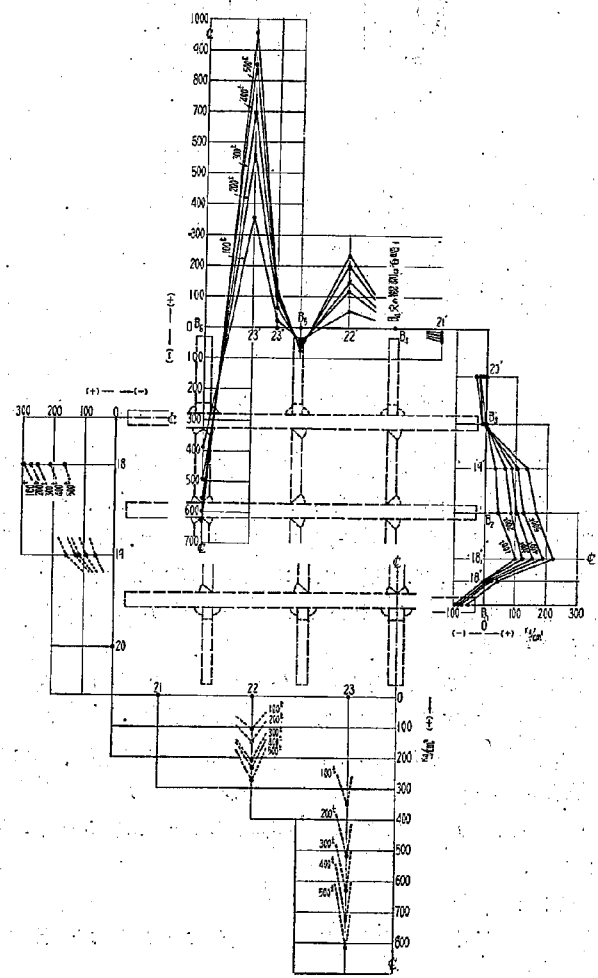
兩側補剛鈑に設けたる測點 9, 10, 及 9′, 10′ の發生應力は中央補剛鈑に於けると同樣，兩者の間に殆ど變化なく，下部のものが幾分大なる應力を示してをる．發生應力の大さは大體主肋鈑側面の測點 $16_3'$ $17_3'$ 及 $16_4'$, $17_4'$ にて求められた垂直應力の平均値に對應してをり，補剛鈑の應力が主肋鈑からの應力に支配されてをることが窺はれる．

（D）底鈑　底鈑に就いては先づ其緣邊に沿つての應力を求めた．測點は第 5 圖に示す 20 箇所（18～23, 18′～23′ B_1～B_6）にて，これ等の位置は主肋鈑又は補剛鈑の中心線上にありて壓縮が直接傳達せらるゝものと考へらるゝ點と，これ等の中間に位する點とに區別することが出來る．第 20 圖に示した應力測定の結果にも兩者の差異は明かに認めることが出來，前者に於ては主として壓縮應力，後者に於ては引張應力が發生してをる．而して其最大應力は引張，壓縮共に中央補剛鈑附近の 23, 23′, 及 B_6 に起り，この部分の應力は他の部分の測定値の數倍に達してをる．この結果より見て通例設計に當つて輕視せらるゝ主桁鈑並に中央補剛鈑にて傳へらるゝ荷重が見逃すべからざる大さであることが認められる．

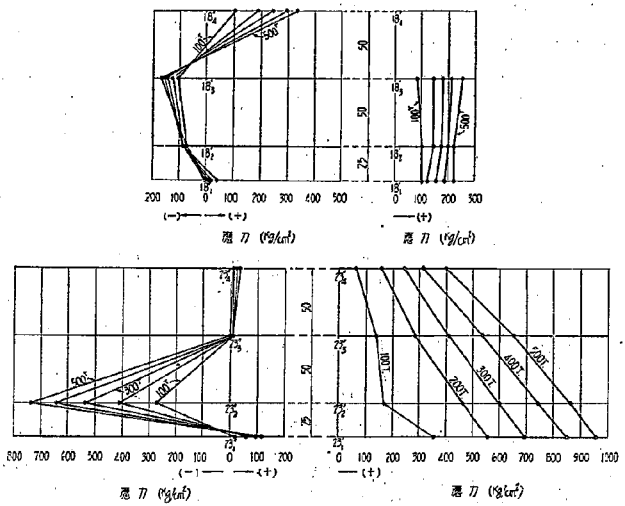
底鈑については上記のほかに $18_1'$, $18_1''$ 及び $23_1'$, $23_1''$ より內部に向つて 28 乃至 50 mm 間隔の諸點（$18_1'$～$18_4'$. $18_1''$～$18_4''$, $23_1'$～$23_4'$, $23_1''$～$23_4''$）について應力の測定を行つた．これ等の點は 2 主肋鈑又は 2 補剛鈑にて挾まれたる間隙の中央並に $\frac{1}{4}$ 線上にありて，18_1 群は兩側に主肋鈑を有し，中央隔鈑に至るまで類似の狀況にあるが故に，測點附近は 2 邊固定の平鈑と認め得べく，23_1 群は 2 補剛鈑と主肋鈑とに圍まれたる 3 邊固定

の平鈑上に在るものと認めることが出來る.

應力測定の結果は第 21 圖に示すが如く，18_1 桿中，中央線上にある $18_1'$～$18_4'$ の諸點は殆ど近似の引張應力が發生してをり，500 t' 荷重にても 250 kg/cm² に達するもの



第 20 圖　底鈑縱邊に於ける應力



第 21 圖 底鈑內部に於ける應力

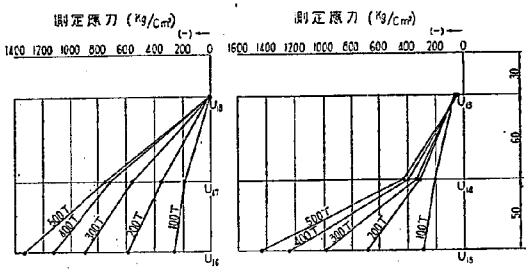
は少い，これに對し $\frac{1}{4}$ 線上にある $18_1''$～$18_4''$ の諸點は最緣部の $18_1''$ が僅少の引張應力を發生せるに對し內部に進むにつれ壓縮應力を增し $18_3''$ にては 500 t 荷重にて 170 kg/cm² に達し，$18_4''$ に至つては再び同一荷重にて 300 kg/cm² を超ゆる引張應力を示すに至つた．斯の如き應力分布の不規則が如何なる原因によるかを詳かにするを得ざるも，燒鈍を行はざる鎔接試片についての實驗結果としては殘留應力の影響によるものと認むるを最も妥當なりと信ずる．

23_1 群に於ける應力を見るに中央線上の $23_1'$～$23_4'$ にては引張應力の發生を見其大さは最緣部より內方に向つて漸次減少してをる，最緣部に於ける引張應力が 500 t 荷重にて 950 kg/cm² に達し，他の底版應力測定點に於ける實測値に比して格段に大なることは既述の如くである．$\frac{1}{4}$ 線上の $23_1''$～$23_4''$ にては最緣部の引張應力が內部に進むにつれ壓縮應力となり，再び引張應力に變ずることは 18_1 群に於けると類似してをるが，其大さには可成の相違がある．

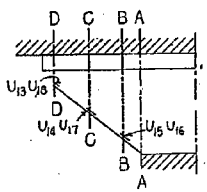
(2) 上部支承

上部支承に對しては最外側の 1 主肋鈑について其緣應力と內部應力とを測定せるにとどまる．

緣應力の測定には第 5 圖指示の 6 測點 (U_{13}～U_{18}) を緣邊より 5 mm 內側に設け，外



第 22 圖　上部支承主肋鈑緣應力



第 23 圖

側面の應力を求めた，第 22 圖は各測點の實測値を比較したもので，肋鈑頂部に於て最大壓縮應力を發生し，底部の U_{18} 及び U_{13} に於ては殆ど認むべき應力が起つてをらない．

今下部支承に於けると同樣これ等實測應力と，慣用計算法竝に理論計算法とによる計算値とを比較して，上部支持面の荷重分布狀態と，下部支承底面に於ける荷重分布狀態とを對照して見たいと思ふ．

今慣用計算法により，第 23 圖に示す測點 U_{15}, U_{16}; U_{14}, U_{17}; U_{13}, U_{18}; を通ずる鉛直斷面 B−B; C−C; D−D 及び A−A 斷面につきて應力計算を行つた結果は第 5 表の如くである．

第 5 表　慣用近似計算による主肋鈑緣應力

測　點	斷　面 (A−A)	$U_{16}, U_{16}, U_{15}', U_{16}'$ (B−B)	$U_{14}, U_{17}, U_{14}', U_{17}'$ (C−C)	$U_{13}, U_{18}, U_{13}', U_{18}'$ (D−D)
曲げモーメント (kg cm)	1,504,000	958,100	351,400	—
斷面二次モーメント (cm^4)	15,160	9,150	32,100	—
緣　距　離 (cm)	13.92	11.9	8.54	—
緣　應　力 (kg/cm^2)	1,380	1,250	940	—

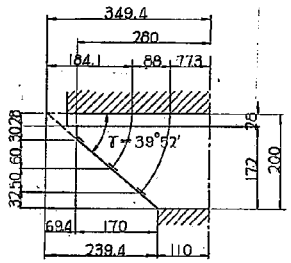
又〔7〕. (1). (A) に示せる (4) 式

$$\sigma_\gamma = p[(S_K-1) - C_K \sin 2\gamma + S_K \cos 2\gamma - 2C_K\gamma] + p\frac{m}{r}\sin\gamma\left\{\frac{1}{S'}+\frac{1}{C'}\right\} + p\frac{m^2}{r^2}\frac{\sin\gamma}{K}$$

によつて緣應力を求むるに，第 24 圖により上部支承に對しては

$$\tan\gamma = \frac{142}{170} = 0.835\,, \qquad \gamma = 39^\circ\,52' = 0.6958\ \text{rad.}$$

$$\sin\gamma = 0.641\,, \qquad \cos\gamma = 0.7675\,, \qquad \sin 2\gamma = 0.984\,, \qquad \cos 2\gamma = 0.178$$



第　24　圖

従つて　　$C_K=3.586$,　　$S_K=2.995$

$C'=1.337$,　　$S'=0.0548$

$K=-0.107$

$$\sigma_r=p\left(-5.99+12.18\frac{m}{r}-5.98\frac{m^2}{r^2}\right)$$

然るに測點 U_{13} 及 U_{18} に對しては　　$r_1=69.4$

測點 U_{14} 及 U_{17} に對しては　　$r_2=184.1$

測點 U_{15} 及 U_{16} に對しては　　$r_3=262.1$

又 $m=69.4$ なるが故に

$$\frac{m}{r_1}\fallingdotseq 1$$

$$\frac{m}{r_2}=0.377,\quad \left(\frac{m}{r_2}\right)^2=0.1421,\quad \frac{m}{r_3}=0.265,\quad \left(\frac{m}{r_3}\right)^2=0.0701$$

測點 U_{13} 及 U_{18} に對しては　　$\sigma_r\fallingdotseq 0$

測點 U_{14} 及 U_{17} に對しては

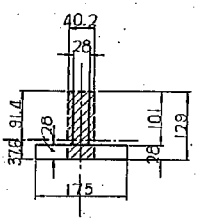
$$\sigma_r=p\{-5.99+12.18\cdot 0.377-5.98\cdot 0.142\}=-2.25p$$

測點 U_{15} 及 U_{16} に對しては

$$\sigma_r=p\{-5.99+12.18\cdot 0.265-5.98\cdot 0.0701\}=-3.185p$$

となる.

今總荷重 500 t の場合1主肋鈑の分擔する荷重を 125 t とし, 其平均斷面が第 25 圖の如く突緣幅 175mm, 高 129 mm, 鈑厚 28 mm の丁形斷面形を有するものとすれば



第　25　圖

斷面積　　$A=7{,}728\ \text{mm}^2$

中立軸の位置　　$\eta_1=37.6\ \text{mm}$,　　$\eta_2=91.4\ \text{mm}$

斷面二次モーメント　　$I=10{,}183{,}900\ \text{mm}^4$

斷面係數$=\dfrac{I}{\eta_2}=111{,}400\ \text{mm}^3$

にして, これと同一の斷面係數を有し, 同高の矩形桁を求むれば, これの幅員は

$$\frac{bh^2}{6}=111{,}400,\qquad h=129$$

幅員　　$b=40.2\ \text{mm}$

となる.

從つて梯形主肋鈑を矩形斷面なりと假定しての荷重單位强度 p は

$$p=-\frac{125{,}000}{560\times 40.2}=5.556\ \mathrm{kg/mm^2}$$

よつて測點 U_{13} 及 U_{18} に對し，緣應力は

$$\sigma_r \fallingdotseq 0$$

測點 U_{14} 及 U_{17} に對し，緣應力は

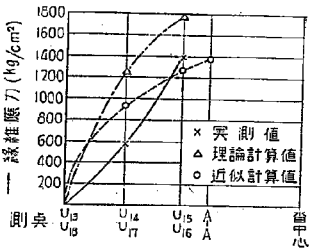
$$\sigma_r=-2.25p=-2.25\cdot 5.556=-1{,}250\ \mathrm{kg/cm^2}$$

測點 U_{15} 及 U_{16} に對し，緣應力は

$$\sigma_r=-5.81p=-5.81\cdot 5.556=1{,}770\ \mathrm{kg/cm^2}$$

となる．

上記慣用計算法竝に理論式による荷重 500 t の場合の緣應力と實測緣應力との比較をすれば第6表に示す如くなる．

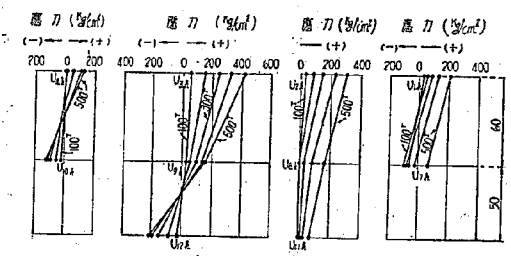


第 26 圖　主肋鈑緣應力の分布

第 6 表　主肋鈑緣應力の計算値と實測値との比較

測　　點	斷　面 (A－A)	U_{15} U_{16} (平　均)	U_{14} U_{17} (平　均)	U_{13} U_{18} (平　均)
實　測　緣　應　力 (kg/cm²)	—	−1,390	−590	−21
慣用計算法によるもの (〃)	−1,380	−1,250	−940	0
理　論　式　によるもの (〃)	—	−1,770	−1,250	0

上記の結果を見るにこれ等3種の應力の關係は下部支承の場合と全く類似し，測點 U_{14}, U_{17} に於ては實測値は兩計算値に比して遙かに靜く，測點 U_{15} U_{16} に於ては實測値が近似計算法による値を僅かに凌駕するも，理論式によるものに比しては遙かに靜い．第 26 圖はこれ等の關係を示したものである．實測値と理論計算値との間の差異は，其主なる原因を荷重の分布狀態に歸すべきであると信ずる．而して其差異が下部支承の場合に比して稍著しいことも，揷承部の幅員と底面の幅員との比が下部支承に比して大であつて，桁として作用する突出部の短小なることから，桁の部分の分擔する荷重が一層僅少なるべきことを考ふるとき當然なる結果と認められる．



第 27 圖　主肋鈑側面の水平應力の分布

主肋鈑內部應力を求むるために第 5 圖指示の測點 12 箇所 (U_1～U_{12}) を主肋鈑側面上に設定し，これらの點につきて各水平，垂直，+45°，−45° の 4 方向の變形 (第 16 圖參照) を求め (5) 式及 (6) 式によつて應力分布狀態を確めた.

先づ水平應力について見るに，主肋鈑側面に設けたる 6 列の測點の各列とも，上部に於

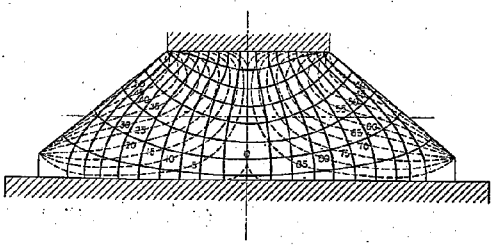
第 7 表　上部支承主肋鈑に於ける主應力

測點	主應力	荷重 (t)					
		100	200	300	400	500	平均
U_1	σ_1(kg/cm²) σ_2(〃) α	+ 3.5 −94.5 0°0′	+ 10.50 −206.5 −1°05′	+ 3.5 −336.0 1°20′	+ 15.85 −481.3 −1°25′	+ 33.3 −652.8 −1°00′	−0°58′
U_2	σ_1 σ_2 α	− 3.5 +175.8 +16°55′	+ 7.0 −339.5 +18°50′	+ 40.3 −477.8 +18°50′	+108.5 −651.0 +18°50′	+145.3 −834.8 +18°50′	+18°28′
U_3	σ_1 σ_2 α	+ 5.3 −260.9 +20°00′	+ 77.0 −392.0 +21°10′	+175.0 −521.5 +21°38′	+252.0 −731.5 +22°30′	+308.0 −892.0 +21°10′	+21°17′
U_4	σ_1 σ_2 α	− 26.3 −243.3 +24°00′	+ 35.0 −336.0 +30°38′	+105.0 −420.0 +30°45′	+141.8 −593.3 +28°20′	+178.5 −735.0 +28°41′	+28°30′
U_5	σ_1 σ_2 α	− 19.3 −190.8 +24°26′	− 10.5 −290.5 +27°14′	+ 3.5 −350.0 +29°05′	− 8.8 −428.8 +27°58′	−10.5 −500.5 +27°53′	+27°20′
U_6	σ_1 σ_2 α	−250.3 −351.8 +35°45′	−227.5 −374.5 +38°40′	−218.8 −383.3 +39°20′	−218.8 −383.3 +39°20′	−218.8 −383.3 +39°20′	+38°30′
U_7	σ_1 σ_2 α	−103.3 −138.3 +9°15′	−217.0 −485.5 +8°35′	−290.5 −791.0 +8°20′	− 311.5 −1,097.3 +7°00′	− 358.8 −1,356.3 +8°35′	+8°21′
U_8	σ_1 σ_2 α	− 24.5 −185.5 +22°30′	− 68.3 −502.3 +22°30′	−131.3 −813.8 +21°30′	− 105.0 −1,172.5 +20°45′	− 87.5 −1,487.5 +19°30′	+21°30′
U_9	σ_1 σ_2 α	+ 12.3 −239.8 +23°50′	+ 56.0 −521.5 +26°30′	+ 71.8 −792.8 +25°55′	+ 105.0 −1,081.5 +25°45′	+ 120.8 −1352.8 +25°40′	+25°15′
U_{10}	σ_1 σ_2 α	+ 36.8 −260.8 +36°15′	+ 47.3 −407.8 +36°45′	+ 45.5 −511.0 +38°40′	+ 22.8 −642.3 +37°35′	+ 3.5 −756.0 +38°40′	+37°15′
U_{11}	σ_1 σ_2 α	+ 38.5 −129.5 +36°40′	+ 78.8 −453.3 +33°52′	+159.3 −925.8 +31°10′	+ 45.5 −1,277.5 +28°45′	+ 29.8 −1,650.3 +27°05′	+31°05′
U_{12}	σ_1 σ_2 α	+ 80.5 −154.0 43°2′	+119.0 −493.5 41°35′	+131.3 −883.8 40°27′	+ 143.5 −1,246.0 38°55′	+ 38.5 −1,575.0 37°38′	+40°20′

て引張應力，下部に於て壓縮應力を示し，孰れにも中立軸の存すること第 27 圖に於けるが如くである．測點 U_5 及び U_6 にては測定値極めて低きが故に圖示を省略した．

次にこれら 12 測點の觀測結果より (5) 及 (6) 式を用ひて求めたる主應力の大さ竝に方向を見るに第 7 表に示す如くである．

第 7 表の結果を圖示したものが第 17 圖上半である，先づ主應力線の方向の變化を見るに，揺承部より鉛直方向に出でたる應力線は上部支承鈑に向ふにつれて其傾斜を增し，應力線は擴散し上部支承鈑附近に至つて再び鉛直方向を保つに至ることは下部支承の場合と同樣であり，又フエノライト板試片を用ひて行ひたる，第 28 圖に示す光彈性實驗にて求めたる主應力線の方向とほゞ類似してをる　次に主應力の種類を見るに揺承部に接近せる部分にて中央部のものは兩主應力 (σ_1 σ_2) とも壓縮か又は，1 主應力 (σ_1) の引張を示せるものありとするも其量は極めて小さい．これ等の部分より遠ざかるにつれて，σ_2 の壓縮應力は漸次減少し，σ_1 の引張應力が增加してをる．但し楔形桁の端部にて應力の比較的小なる部分にては，觀測上の誤差の影響大なるためかこれ等の關係は明瞭でない．



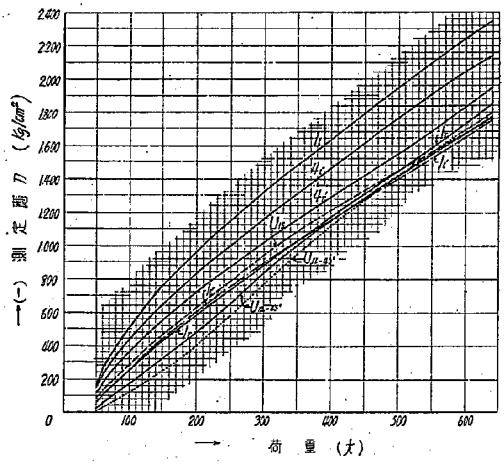
第 28 圖　フエノライト試片による等傾曲線竝に主應力線

〔8〕 第 2 次試驗

第 2 次試驗は實驗に供したる鎔接桁の設計荷重 320 t に對する安全率を決定せんとして行つたものである．試驗體が工事に使用せらるべき實物なる關係上破壞試驗を行ふことは許されざるため，これに加ふる最大荷重は設計荷重の 2 倍 640 t とし，3 回の反覆試驗による測定應力によつて，其安全率を判定せんと試みた．

發生應力の測定は鎔接桁各部中最も危險なりと認めらるゝ點を選定すべきである．これがためには第 1 次試驗の測定應力を基とし 1_l，1_r，$4_l'$，$4_r'$，$1_l'$，$U_{11-45°}$，$U_{12-45°}$ の 7 箇所を選んだ．これ等の點は第 1 次試驗の測點中にて最大應力を示した諸點であつて，これ等の點の附近にて更に大なる應力を發生すべしと考へらるゝ位置あるも，使用測定器取附の關係上，測點をより以上これに接近せしむること困難なるため，これ等の點に於ける觀測によつて發生最大應力を判斷することゝした．

これ等 7 測點に於ける觀測値は第 29 圖に示せるが如く，最大應力を示せる 1_l に於ては 640 t の最大荷重に於て 2,352 kg/cm² で一般軟鋼に對する許容强度 1,200 kg/cm² の約 2 倍



第 29 圖 最大應力發生點の應力圖

である．この値は一般軟鋼の降伏點强度，2,500～3,000 kg/cm² 以下であり，この點の附近にて一層大なる應力の發生點ありとするも，著しく降伏點强度を超過するものはないと斷定して過りないと信ずる．これ等の諸點より見て，本鎔接沓の有する安全率は橋梁本體に對して考へられてをるものと大差ないものであることが確言出來る．

IV. 鈑桁橋用鎔接沓試驗成績

〔9〕 試驗の順序

試驗に用ひた鎔接沓は端徑橋鈑桁固定端用沓の下部支承部のみを別に製作せしめたもので，構橋用のものと同樣試驗前に燒鈍を行つてをらぬ．

應力の測定箇所は第 5 圖に示した 301 箇所で，これ等の選定は構橋用鎔接沓に於ける實驗を參考とし，最大應力の發生點の決定と，應力分布狀態の決定に必要なる點を採つた．

試驗は第 1 次，第 2 次，第 3 次の 3 回に分ちて施行した．第 1 次試驗は最大荷重を 500 t とし，最大應力發生箇所にても其應力を降伏點以內に止まらしめ，試驗體各部の發生應力の觀測に主眼を置いた．第 2 次試驗は試驗體の破壞を目的として行つたものである．第 1 次試驗に於ける試測點中最も大なる應力の發生を見たる 6 測點を選び，降伏點を幾分超過するまで變形の測定を行つた．試驗は載荷 860 t に至りて試驗機械に故障を生じたるため一時中止の止むなきに至り，機械の修理後第 3 次試驗を行つた．この試驗に於ても試驗機械の最大荷重 1,000 t まで載荷したるも遂に試驗體の破壞を見るに至らず，第 2 次試驗に於てすでに幾分認められたる主肋鈑の彎折が一層顯著となりたるに止まる．

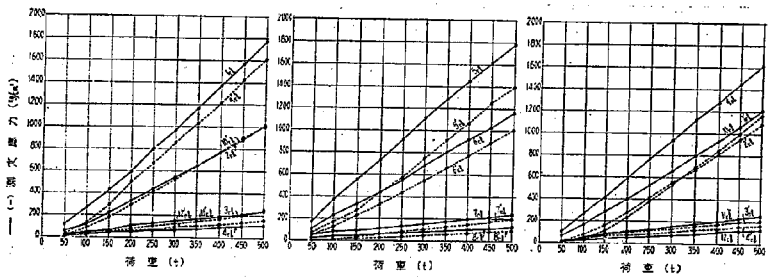
以下は第 1 次乃至第 3 次の試驗結果をまとめたものである．

〔10〕 第 1 次試驗

鈑桁橋用の鎔接沓は厚 22 mm の主肋鈑が中央厚 22 mm の主隔鈑と厚さ 16 mm の副

隔鈑によつて連結せられ，兩外側主肋鈑はこのほかに厚さ 16 mm の補剛鈑 3 個を有し大體の構造は構橋用のものと同樣である（第 5 圖參照）.

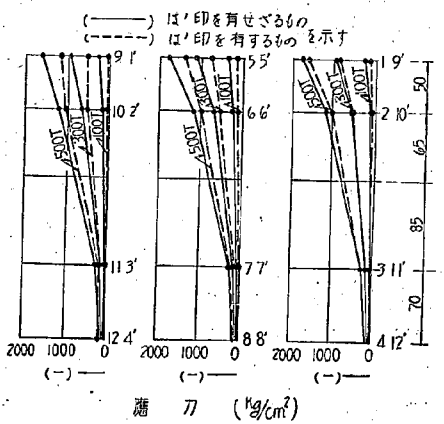
（A） 主肋鈑　主肋鈑の緣應力測定のために設けた測點は，各鈑の兩傾斜緣部に 4 個合計 24 個であつて（1～12 及び 1′～12′）各緣部に平行に應力計取付の關係上緣邊より



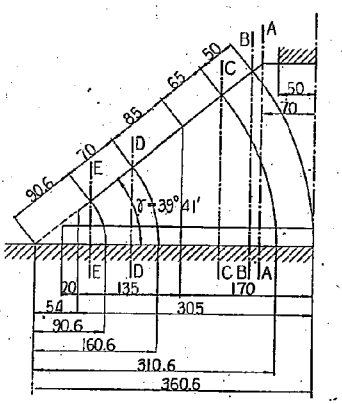
第 30 圖　主肋鈑緣應力

3 mm 內側に設けた．第 30 圖はこれ等の諸點に於ける應力測定結果を圖示したもので，1 主肋鈑に於ける 8 測點の觀測値を 1 圖表上に置いた．

第 30 圖に示した結果に基くと 3 主肋鈑中 1 端のもの應力幾分低きも，これ等の間の差異は構橋用脊の場合の如く著しくなく，最大壓縮應力を示せる頂部に於て，最大荷重 500 t に對し約 1,800 kg/cm² である．各主肋鈑とも發生應力は頂部に於て大きく，底部に至るほど低く，これ等の間の變化は大體第 31 圖によつて知ることが出來る．



第 31 圖　主肋鈑緣應力の變化



第　32　圖

今この實測應力と比較するために，各測點を通る垂直斷面（第 32 圖）について慣用近似計算法による荷重 500 t の場合の緣應力を求めると第 8 表の如くなる．

第 8 表 近似計算による主肋鈑緣應力

測點		(1) (5) (9) (1′) (5′) (9′)	(2) (6) (10) (2′) (6′) (10′)	(3) (7) (11) (3′) (7′) (11′)	(4) (8) (12) (4′) (8′) (12′)
斷面	A—A	B—B	C—C	D—D	E—E
曲げモーメント (kg cm)	2,500,900	1,616,300	924,000	308,800	—
斷面二次モーメント (cm^4)	16,600	9,600	4,960	1,440	—
緣距離 (cm)	17.2	14.5	11.7	7.8	—
緣應力 (kg/cm^2)	−2,580	−2,440	−2,180	−1,670	—

更に緣應力を (4) 式によつて算出すれば

$$\gamma = 39°41' = 0.693 \text{ rad.}$$

にして $m=54.0$，各測點に對し，夫々 $r=360.6$; 310.6; 160.6; 90.6 となり，其緣應力は

測點 1, 5, 9 に對し $\sigma_r = -4.395\,p$

測點 2, 6, 10 〃 $\sigma_r = -4.144\,p$

測點 3, 7, 11 〃 $\sigma_r = -2,653\,p$

測點 4, 8, 12 〃 $\sigma_r = -0.927\,p$

となる．等布荷重 p の決定には構橋用支承の場合と同樣の方法を用ひて平均幅員 $b=32.8$ mm を求め，各主肋鈑が總荷重の $\frac{1}{3}$ を分擔するものと假定すれば

$$p = \frac{500,000}{3} \cdot \frac{1}{650.32.8} = 7.82 \text{ kg/mm}^2$$

となり，測點緣應力は，

測點 1, 5, 9 に對し $\sigma_r = -3,437 \text{ kg/cm}^2$

測點 2, 6, 10 〃 $\sigma_r = -3,240$ 〃

測點 3, 7, 11 〃 $\sigma_r = -2,080$ 〃

測點 4, 8, 12 〃 $\sigma_r = -730$ 〃

にて與へらる．

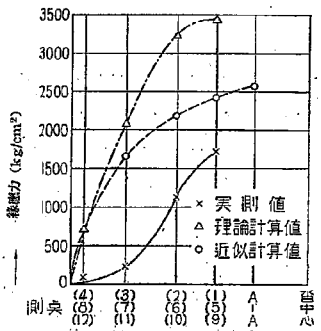
今これ等の計算による應力と實測値とを比較すれば第 9 表の結果が得られる．

第 9 表に於て特に注目せらるゝ點は實測應力と計算値との間に著しい差のあることである．この傾向は構橋用の者に於ても認められたのであるが，斯くの如き甚しいものではなかつた．第 33 圖の分布圖によれば測點 (1) (5) (9) に於ける緣應力の實測値は理論計算値の $\frac{1}{3}$，慣用計算による値の $\frac{3}{4}$ に達するに過ぎないが，其分布狀況は構橋用者の場合

第 9 表　各種計算法による主肋鈑緣應力と實測値との比較

測　點	斷　面 (A−A)	(1) (5) (9) (1′) (5′) (9′) (平　均)	(2) (6) (10) (2′) (6′) (10′) (平　均)	(3) (7) (11) (3′) (7′) (11′) (平　均)	(4) (8) (12) (4′) (8′) (12′) (平　均)
實測緣應力 (kg/cm²)	—	−1,725 −1,393	−1,131 −1,040	−245 −217	−123 −140
慣用計算法によるもの(〃)	−2,583	−2,440	−2,180	−1,670	—
理論式によるもの(〃)	—	−3,440	−3,240	−2,080	−730

と全く類似してをる．又兩計算値の分布竝に相互關係も構橋脊に於けると全く同一である．然らば何故に鈑桁橋脊に於て特に實測値がかくの如き僅少なる數値を示したか，これが直接の原因は底面に於ける荷重の分布が中央部に集中する程度の相違に歸すことは當然であるが，この相違を生ぜしめたる理由としては，先づ主肋鈑の間隔，從つて其間に設けられた主隔鈑の荷重傳達に對する効果の大小を擧げねばならぬ．構橋脊に於ては主肋鈑數 4 にして，鈑桁橋脊にては 3，主肋鈑間隔 d と主肋鈑高 h との比は，前者（下部支承）に於て $\frac{d}{h}=\frac{175}{350}=0.5$ なるに對し，後者は $\frac{d}{h}=\frac{180}{240}=0.75$ である．從つて中央主隔鈑の傳達する荷重は後者の場合，遙かに大なるべく，後述すべき隔鈑の應力測定結果に於てこれに發生せる應力の主肋鈑緣應力に比して遙かに大なることに徴しても，主隔鈑によつて直接底面に傳達せらるゝ荷重の極めて大なるべきことが窺はれる，從つて底面荷重の分布が中央部に集中すべきは當然であつて，後述する底鈑應力の測定結果にも，このことを立證しうる結果が現はれてをる．



第 33 圖　主肋鈑緣應力の分布

更に底面荷重分布を不均一ならしむる原因としては荷重をうける牾承部の幅と底面幅の比の大小がある．構橋脊下部支承にて $\frac{b_1}{b_2}=\frac{160}{1,100}=0.146$，同上上部支承にて $\frac{b_1}{b_2}=\frac{220}{600}=0.367$，鈑桁橋脊にて $\frac{b_1}{b_2}=\frac{100}{650}=0.154$ となつてをる．

今試驗に供した構橋脊上下支承竝に鈑桁橋脊の主肋鈑實測應力と計算應力の比と，主肋鈑間隔と主肋鈑高との比 $\lambda=\frac{d}{h}$，竝に牾承部の幅と底面幅との比 $\mu=\frac{b_1}{b_2}$ との關係を比較すれば第 10 表の如くである．

第 10 表に於て各主肋鈑の形狀が大體相似形であり，最大應力を觀測したる點もほゞ相似の點なりと假定すれば，實測緣應力と計算値との比 α，又は β が，主肋鈑の間隔

第10表　主肋鈑實測線應力と計算應力との比

	構橋沓下部支承	構橋沓上部支承	鈑桁橋沓下部支承
荷重 500 t に於ける最大實測應力 σ_a	1,520 (kg/cm²)	1,390 (kg/cm²)	1,725 (kg/cm²)
同　上　理論計算値 σ_b	1,640 〃	1,770 〃	3,440 〃
同　上　近似計算値 σ_c	1,300 〃	1,250 〃	2,440 〃
$\alpha=\sigma_a/\sigma_b$	0.93	0.79	0.50
$\beta=\sigma_a/\sigma_c$	1.06	1.11	0.71
$\lambda=d/h$	0.5	0.88	0.75
$\mu=b_1/b_2$	0.146	0.367	0.154
γ	34°10′	39°52′	39°41′

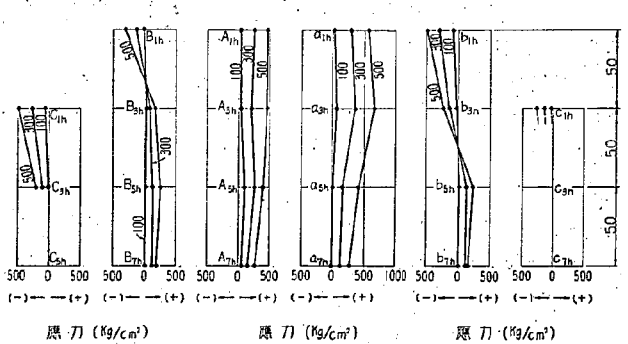
と高さとの比 λ 及，主肋鈑の頂部載荷の幅と底面との比 μ によつて左右されてをることが知られ，λ 大なれば α は小となり實測値は理論計算値より遙かつて其値は減じ，μ 大なれば理論計算値に接近することが知られる．第10表の數値から α, β と λ, μ との關係を求めると

$$\alpha=-1.8\lambda+2.46\mu+1.47$$

$$\beta=-1.49\lambda+2.78\mu+1.4$$

が得られる．

更に主肋鈑については其側面に第 5 圖指示の 22 個の測點を設け，各測點に於て 4 方向の變形を求め，これによつて肋鈑に於ける應力分布狀況を確めた．

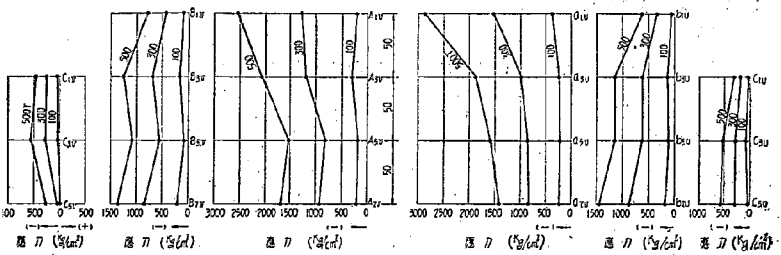


第 34 圖　主肋鈑水平方向の應力の分布

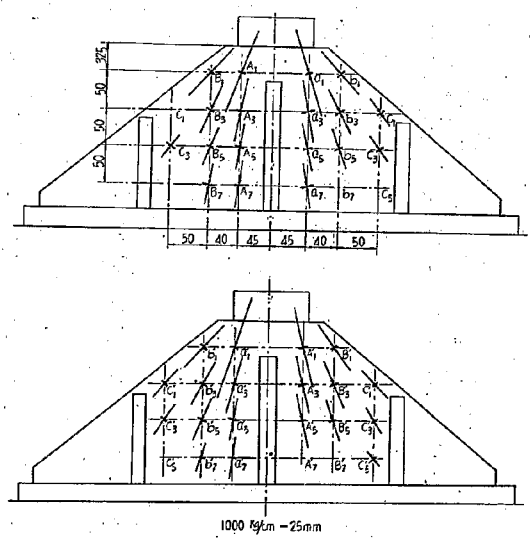
先づ測定の結果に基いて，水平方向の應力分布を見るに第 34 圖に示せるが如く 6 列の測點中，揺承の直下に位する中央部 A 及び a 列に於ては各測點とも水平引張應力を示し，其値は下部に至るにつれて減少してをる．この變化は第 35 圖に示せるこの部分の垂

直壓縮應力の變化によく對應せることが知られる．B, b 及 C, c 列に於ては其位置に高低あるも孰れも中立軸を有し，これ等の部分に於て主肋鈑が彎曲をうけつゝあることが窺はれる．

更に垂直應力の分布を第 35 圖につきて見るに A 及び a 列に於ては橋承の直下に現はれたる壓縮應力は底部にむかひて急激に減少し，高さの $\frac{1}{3}$ 以下に至つて大體一定値に達するの傾向が見える．この部分の應力强度が第 38 圖に示す補剛鈑の壓縮强度と大體一致してをるは沓底面に於ける荷重の分布の點から見て見逃すべからざる點である．



第 35 圖　主肋鈑垂直應力の分布



第 36 圖　主力鈑に於ける應力

B 及 b 列に於ける垂直壓縮應力は上部に於て少く，下部に至るにつれて增加してをる．肋鈑に於ける荷重の分布の擴がりを示すものと認める．c 列に於ても B, b 列と同樣の傾向を示せるに對し C 列に於ては下部に於て壓縮應力の激減が認められるが，この原因については確しかなる判斷を下し得ない．

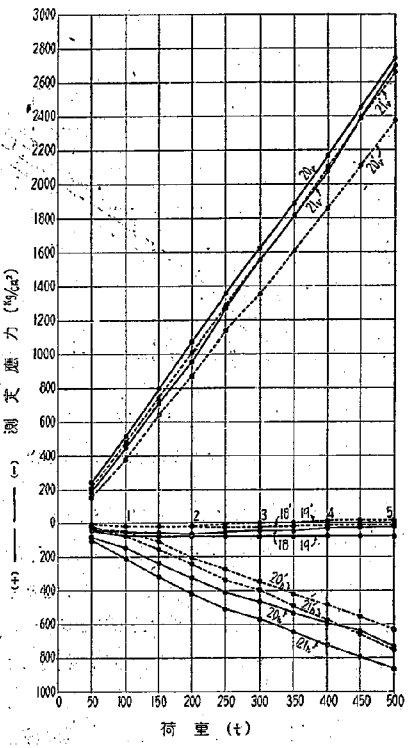
次ぎに (5) 式竝に (6) 式を用ひて算出した主應力の大さ及び方向は第 11 表に示す如くである．觀測は a_1～c_5, a_1'～c_5', A_1～C_5, A_1'～C_5' の 44 箇所について實測してをるが，こゝには資料最も纏りたる a_1'～c_5' の計算結果を掲ぐるに止める．其他の部分のものは第 36 圖を參照せられたい．

第 11 表 鈑桁橋支承主肋鈑に於ける主應力

測點	主應力	荷重 (t) 100	200	300	400	500	平均
a_1'	σ_1(kg/cm²)	− 42.0	− 80.5	− 138.3	− 246.8	− 318.5	
	σ_2(〃)	− 514.5	−1,256.5	−2,038.8	−2,745.8	−3,538.5	
	α	−18°30′	−18°15′	−18°40′	−18°0′	−18°40′	−18°25′
a_3'	σ_1	0	+ 49.0	+ 138.3	+ 189.0	+ 241.5	
	σ_2	− 280.0	− 693.0	−1,142.8	−1,571.5	−2,026.5	
	α	−16°30′	−16°20′	−16°45′	−16°45′	−16°30′	−16°34′
a_5'	σ_1	+ 80.5	+ 148.8	+ 224.0	+ 399.0	+ 369.3	
	σ_2	− 154.0	− 418.3	− 721.0	−1,148.0	−1,373.8	
	α	− 8°40′	− 7°20′	− 9°10′	−10°40′	−11°30′	− 9°28′
a_7'	σ_1	+ 35.0	+ 68.3	+ 101.5	+ 133.0	+ 169.8	
	σ_2	− 199.5	− 488.3	− 784.0	−1,050.0	−1,370.3	
	α	− 4°00′	− 5°05′	− 8°25′	− 9° 55′	−10°25′	− 7°34′
b_1'	σ_1	+ 19.3	− 28.0	− 22.8	− 10.5	− 3.5	
	σ_2	− 229.3	− 619.5	−1,058.8	−1,478.5	−1,872.5	
	α	−39°20′	−42°20′	−43°0′	−43°30′	−43°10′	−42°18′
b_3'	σ_1	+ 12.3	+ 36.8	+ 140.0	+ 98.0	+ 145.3	
	σ_2	− 162.8	− 488.3	− 920.5	−1,225.0	−1,597.8	
	α	−28°10′	−28°10′	−28°35′	−29°00′	−29°15′	−28°38′
b_5'	σ_1	− 7.0	+ 26.3	+ 94.5	− 162.8	+ 239.8	
	σ_2	− 189.0	− 523.3	−847.0	−1,167.3	−1,517.3	
	α	−20°45′	−23°05′	−24°40′	−25°15′	−25°30′	−23°51′
b_7'	σ_1	+ 26.3	+ 35.0	+ 78.8	+ 94.5	+ 138.3	
	σ_2	− 71.8	− 259.0	− 498.8	− 742.0	−1,009.8	
	α	−13°25′	−15°45′	−17°55′	−19°20′	−19°40′	−17°14′
c_1'	σ_1	− 19.3	− 89.3	− 122.5	− 157.5	− 206.5	
	σ_2	− 131.3	− 407.8	− 689.5	− 983.5	−1,263.5	
	α	−45°00′	−41°20′	−44°10′	−43°20′	−41°55′	−43°09′
c_3'	σ_1	− 26.3	− 31.5	− 33.3	− 28.0	− 66.5	
	σ_2	− 124.3	− 388.5	− 673.8	− 948.5	−1,263.5	
	α	−40°15′	−35°45′	−35°45′	−35°00′	−35°35′	−36°28′

主應力算出の結果に徴するに，其方向，其大さの變化は構橋用主肋鈑の場合と全く一致し，第 36 圖に示すが如き分布を示してをる．捲承部附近にては σ_2 の壓縮應力は極めて大きく第 11 表中其大さ鋼の降伏點强度を超へたりと認らるゝ部分あるも計算の結果を其儘記載した．これに對し σ_1 の値は捲承附近にては壓縮か又は極めて小さき引張を示し，σ_2 の値はこれより遠ざかるにつれて壓縮量を減じ，σ_1 は其引張量を增してをる．

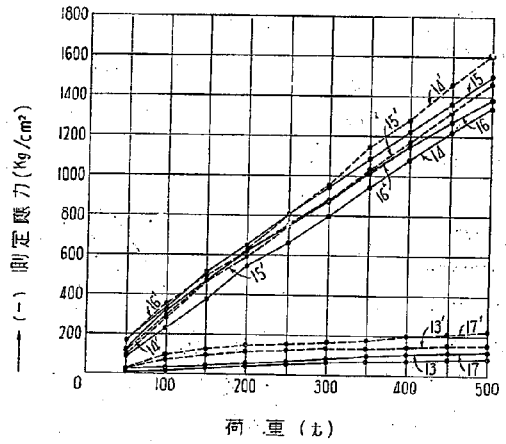
（B）隔鈑　中央主隔鈑の應力測定點としては，第5圖に示す如く主肋鈑間の中央にて，脊の $\frac{1}{2}$ 高の位置を選んだ（測點 20, 21, 20′, 21′），今これ等の點に於ける實測結果を示せば第 37 圖の如くにて，其垂直壓縮應力は主肋鈑の A 及び a 列の應力に匹敵し，同時にこれに對應する水平引張應力が現はれてをる．この點より見て主隔鈑が捲承よりの荷重傳達に有効に働いてをり，其應力が各測點とも殆ど同樣の結果を示してをる點から見ても，接手工法に兩刃接ぎを使用してをることが，少くも不良なる結果を齎してをらないことを確言出來る．主隔鈑にては測點 2 箇所にすぎず應力の分布狀況を知ること困難なるも，其作用上より見て隔鈑內の著しい應力分布の變化は考へられない．



第 37 圖　主肋鈑に於ける應力

副隔鈑に於ける發生應力は測點（18, 19, 及 18′, 19′）について求めてをるが，各測點とも 80 kg/cm² 以下の應力を示したにすぎず（第 37 圖），この副隔鈑が主肋鈑の剛性を增加する意味以外，荷重の傳達には働いてをらぬことが知れる．

（C）補剛鈑　外側主肋鈑は其側面に厚さ 22 mm 及 16 mm の補剛鈑各 3 個を有してをる．これはほゞ 3 角形をなし，其高さは取付け部分の主肋鈑高に應じ 175 mm 及 120 mm にして底邊は各 121 mm の長さを有してをる．これら補剛鈑に於ける應力測定には

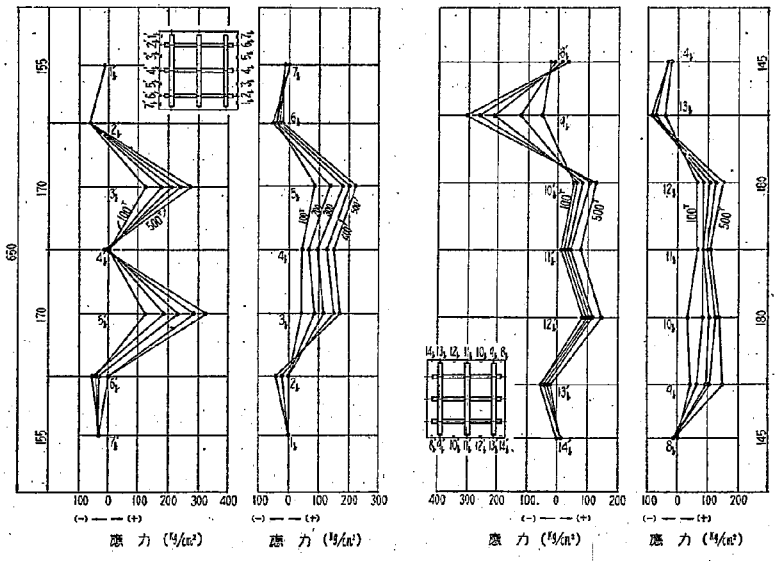


第 38 圖 補剛鈑に於ける應力

中央補剛鈑に各 3 個 (14～16, 及び 14′～16′), 兩側補剛鈑に各 1 個 (13, 17 及 13′, 17′) を設けた. 第 38 圖は中央補剛鈑に於ける應力分布を示したもので, 各測點に於ける壓縮應力に著しい變化が認められず, 且つ其大さは, 主肋鈑の側面 A 及 a 列の測點中下部のもの〻觀測値と極めて接近してをる. これに對し兩側補剛鈑に於ける應力は 500 t 荷重にて 4 測點中最大のもの 221 kg/cm², 最小のもの 84 kg/cm², 平均 165 kg/cm² の壓縮强度を示せるにすぎず, これを中央補剛鈑の壓縮强度平均 1,450 kg/cm² に比較するとき僅かに其 1/9 に達するのみである. この點より考ふるとき橋承よりの荷重の大部分は主肋鈑の中央部, 主隔鈑, 中央補剛鈑等によりて底鈑に傳達せらるゝもの多く, 底面に於ける荷重の分布は一般に取扱はるゝ如く均等ではなく, 中央部に於ける集中が相當量に及ぶものと考へねばならぬ.

（D） 底鈑　底鈑については其周緣に沿ひて其表面應力を測定したにとゞまる. 內部の表面應力は容の構造上測定困難なるためこれを省略した. 周緣に於ける測點は第 5 圖に示せるが如く, 4 周邊とも, 主肋鈑又は補剛鈑の中心線上の點とこれ等の中間點とにて總測點數 28 箇 (1_b～7_b, $1_b'$～$7_b'$, 8_b～14_b, $8_b'$～$14_b'$) となる. 各測點の實測應力により其分布狀況を示したものが第 39 圖である.

先づ主肋鈑に平行なる 1_b～7_b 及び $1_b'$～$7_b'$ の應力分布を見るに, 補剛鈑中心線上の諸點に於ては, 4_b 點を除き, 壓縮應力を示してをる. この部分は底鈑を分布荷重をうけた連桁と考へたるとき其支點にあたる點にして壓縮應力を示すことは當然と考へられる. 只測點が補剛鈑端より幾分距りたる位置にあるが故に觀測の結果には橫方向の曲りの影響も加りをるものと考へねばならぬ. これ等の壓縮應力は其大さに於ては極めて僅少にて 500 t 荷重にても 100 kg/cm² に達するものはない. 次に補剛鈑中心線の中間點の應力を見るに, これ等の點の中, 中央部の 2 點にては顯著なる引張應力を示し, 其大さは 500 t 荷重にて



第 39 圖　床鈑周緣の應力分布

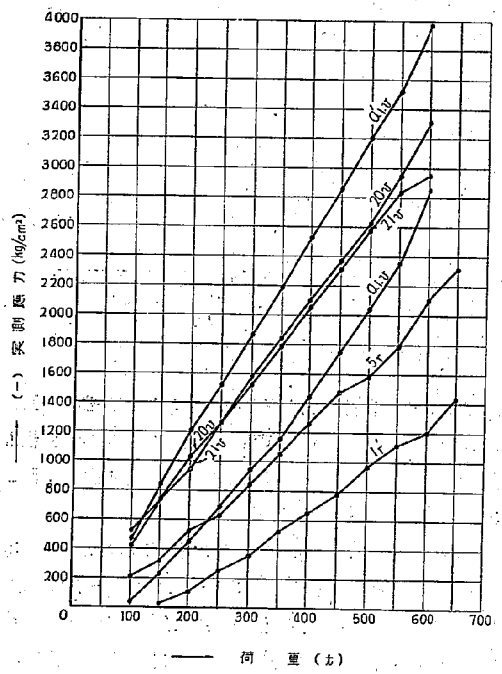
300 kg/cm² を超過してをるものもある．この部分に引張應力を生ずることは連桁の正曲げモーメントによるものと考ふるとき當然のことであり，兩側の 2 點に於て僅少の壓縮應力を示せるのみにて引張應力を示してをらないことも，この 2 點の狀況が中央部の 2 點と全く異る事から充分首肯し得る事柄である．

次に主肋鈑に直角の方向にある 8_b～14_b 及び $8_b'$～$14_b'$ に於ける應力分布を見るに，其大體の傾向は前揭 1_b～7_b 及び $1_b'$～$7_b'$ のものと大差なきも其應力の大さは一般に僅少である．この事實は本鉚接者の機構に於て荷重は主隔鈑に沿ひて主肋鈑の中央部分に比較的集中し，主肋鈑の兩端附近にての荷重は中部に比して低きものと見做すことが出來る．$9_b'$ 及 13_b に於て他の部分に比して大なる壓縮應力を生じてをることは 3 主肋鈑中この點のものが最もよく働いてをり，其發生應力も他主肋鈑に比して大なることから見て，其直下の底鈑に比較的大なる壓縮應力の發生を見たことも妥當なりと考へらる．

〔11〕 第 2 次並に第 3 次試驗

第 1 次試驗にて各部の彈性限度內の應力分布の測定を終つた鉚接者はこゝに其破壞試驗を行つた．この試驗に於ては，第 1 次試驗に於ける最大應力發生點 6 箇所を選び（測點 $1_r'$，5_r，20_v，21_v，a_{1v}，a_{1v}'）これ等の點にて載荷 650 t に至るまでの間は應力の測定を行つた．

第40圖は其測定結果である．應力の算出は〔4〕に說きたる方法によりたるものなるが故に降伏點强度以上の部分に對しては信賴し得ざるものなること當然である．圖中 a'_{1v} 卽ち中央隔鈑の橋承直下のものが最大である．荷重の增加に伴ひ小音響を發し，載荷 700 t に至つて先づ表面黑皮の龜裂離脫を示し始めた點も又この測點附近である．つゞいて主肋鈑頂部より中央部に亘つて黑皮の離脫を生じ，850 t 前後に達して主肋鈑の彎折が顯著となり，側面より其彎曲を認め得る狀態となつた．中央隔鈑の彎折は容の構造上識別困難であつた．載荷は更に進み總荷重 860 t に至り試驗機に故障を生じたるため荷重の增加不能となつた．試驗體は未だ破壞に至らず局部的の彎折を示すに至れるのみなるも，止むなく荷重を取除き，試驗機修理の後第3次の試驗を行つた．



第 40 圖　最大應力發生點の應力圖

第3次試驗の狀況は第2次試驗に於ける夫れと大差なく，載荷 900 t を超すに至つて更に表面黑皮の離脫を見たるも，其他の部分に顯著なる變形なく，僅かに第2次試驗に於ける主肋鈑の彎折の增加を見たのみである．載荷が更に進み試驗機の最大荷重 1000 t に至つても特別なる變化なく，これ等の狀況が幾分進行せるを見るのみであつて，試驗體は遂に破壞するに至らなかつた．

この鈑桁橋容のうくべき設計荷重 126 t に對して，觀測點中の最大應力發生點たる a'_{1v} の應力が降伏點强度 (2,500 kg/cm² と假定) に達したるときの荷重は 400 t である．從つてこの鎔接容のもつ安全率は橋梁本體の有する夫れに比して稍〻過大の感がある．

V. 要　　約

以上瑞西橋の桁橋竝に鈑桁橋用兩種の鎔接支承脊の試驗を通して見るに，其接手に片及又は兩及鎔接を使用せる此等の脊が，少くも其靜力學的試驗に於ては何等の好しからざる性狀を示さなかつたと斷定出來る．只應力實測の結果から見て，一般設計に用ひらるゝ慣用計算法による應力が實測値と一致しないこと．この原因が主として底面に於ける荷重の分布を均等なりと假定するところにあることが明かである．

今これ等の脊について行つた試驗の結果を要約すれば下揭の如くである．

1. 主肋鈑の緣應力の實測値は其端部に於て比較的少く，中央部にむかつて急激に增加する．この理由は底面に於ける荷重の分布が均等でないことによるものである．又其實測値を主肋鈑を等布荷重をうくる桁として取扱ふ慣用計算法又は理論計算法による値に比較するとき，端部のものは桁橋，鈑桁橋用兩種の支承脊とも，計算値より低く，中央部のものは桁橋用脊にては慣用計算法によるものと理論計算値との中間の値を示し，鈑桁橋用の脊にては兩計算値よりも遙かに低い値を示してをる．兩鎔接脊にて其最大實測應力の割合に斯くの如き大なる相違あることは，底面の荷重の中央部集中の程度の差によるものであり，其集中の度は主肋鈑の高さと其間隔との比，及主肋鈑の高さと其幅員との比に左右せられてをることが明かである．

2. これ等の關係は桁橋用脊についての實驗では，載荷 100 t 乃至 500 t の間にては，載荷の大さに伴つての顯著な變化は認められない．

3. 主肋鈑の鉛直斷面に沿ひての水平應力の分布は，揺承の下にあたる部分に於ては，全高に亘り引張應力を示すもの多く，揺承直下にて壓縮應力を示す場合あるも，其量極めて低い．これに對し揺承より左右に距りたる斷面に於ては上部に壓縮，下部に引張應力を生じ高さの中央部に中立軸の存在を示してをる．又鉛直斷面に沿ひての垂直應力を見るに，揺承直下の斷面は其頂部に於て著しく大なる壓縮應力を示し，高さの $\frac{1}{8}$ 以下に至つて大體一定値に達する．揺承直下より距りたる部分にては，この垂直壓縮應力は顯著に低下してをることが見られる．

以上の關係から見て，揺承にて傳達せらるゝ荷重の一部は，主肋鈑の揺承直下にあたる部分及中央隔鈑の壓縮にて直接底鈑に集中傳達せられ，其殘部が底鈑に分布して主肋鈑端部に曲げを生ずるものであり，其分布も中央部より端部にむかひ漸減してをることが推斷出來る．

4. 主隔鈑は主肋鈑の中央部と同等の壓縮垂直應力を示し，これと共に荷重の底鈑への傳達に顯著に作用してをることが窺れる．

5. 主肋鈑の補剛鈑中，中央部のものは主肋鈑のこれが取り付けられた部分にて實測せられたる値と略ゝ同等の壓縮應力を全高に亘つて生じてをり，兩側の補剛鈑に至つては極めて僅少の應力を示したにすぎぬ．これ3に掲げたる荷重の中央部集中の結果に基くものである．

6. 底鈑周邊の上面緣應力は，主肋鈑に平行なる邊の中央部に於て最も大なる値を示し，これと直角の邊に於ては比較的少い．この原因も，主桁鈑並に主肋鈑の中央部にてなされる應力集中の結果と見做されねばならぬ．

7. 慣用計算法を用ひて設計せられた兩鎗接合中，構橋用のものは設計荷重 320 t に對し其 2 倍 640 t までの載荷をなしたるも，實測せる最大應力は，鋼の降伏點に達したると認めらるゝもの幾分ありたるに止まる．從つてこの合が靜荷重に對しては構橋主體とほぼ同値の安全率を有するものと斷定出來る．

鈑桁橋用のものは設計荷重 126 t にして，測定點中の最大應力が鋼の降伏點に達したりと見做さるゝ時の載荷は 400 t にて，この合の有する安全率は構橋用のものに比して幾分大なりと考へられる．

基礎版の基本的研究(第2報)
基礎桁

内務技師　松村孫治

目次

緒言……(1)
I 對稱荷重の場合……(1)
II 非對稱荷重の場合……(2)
III 計算例……(7)

緒言

基礎版の基本的研究(第1報)に於ては，彈性地盤上に設置せる基礎版に作用する地盤反力の近似計算法に就て述べ，その第一歩として版の長さに比し幅の極めて小なる基礎版(假りに基礎桁と呼ぶ)に對稱荷重の作用する場合を計算した結果，本計算法が設計の基準とするに足る地盤反力及彎曲力率を與へ得る可能性あるを以て，更に廣き範圍に亘つて計算するときは實用に供し得る見込あるを知つた．

本文は基礎桁に任意の垂直荷重が作用する場合，版に作用する地盤反力及彎曲力率を求めるに必要なる係數の算定を行つた．一般に版に作用する荷重は對稱なる部分と非對稱なる部分とに分ち得るを以て，夫々對稱なる荷重のみと，非對稱なる荷重のみとの作用する場合の計算法を示す時は，任意の荷重の作用する場合の計算を行ひ得る譯である．對稱なる荷重に依る計算に必要なる諸係數は既に第1報に求めたるを以て，本文に於ては主として非對稱荷重に必要なる係數を求めた．

更に最後に本計算法の使用例として二三の計算例を示した．(本文中に使用する記號は第1報と同一である)．

I. 對稱荷重の場合

對稱なる荷重の作用する場合は第1報に於て求めた，即ち地盤反力 $q(x)$ 及基礎地盤表面の沈下 w は夫々次の如し．

$$q(x)=a_0+a_2\left(\frac{x}{l}\right)^2+a_3\left(\frac{x}{l}\right)^3+\cdots\cdots+a_n\left(\frac{x}{l}\right)^n \quad\cdots\cdots(1)$$

$$w=\frac{1}{\pi}\frac{1-\sigma_2^2}{E_2}l(a_0A_0+a_2A_2+\cdots\cdots+a_nA_n) \quad\cdots\cdots(2)$$

但し $A_0, A_2, \cdots\cdots A_n$ は次式より與へらる.

$$A_0=\tfrac{1}{2}F_0(n\gamma,\alpha,\xi),\qquad A_2=\tfrac{1}{2}\{F_0(n\gamma,\alpha,\xi)-2F_1(n\gamma,\alpha,\xi)+2F_2(n\gamma,\alpha,\xi)\}$$

$$A_3=\tfrac{1}{2}\{F_0(n\gamma,\alpha,\xi)-3F_1(n\gamma,\alpha,\xi)+6F_2(n\gamma,\alpha,\xi)-6F_3(n\gamma,\alpha,\xi)+12G_3(n\gamma,\alpha,\xi)\}$$

$$A_4=\tfrac{1}{2}\{F_0(n\gamma,\alpha,\xi)-4F_1(n\gamma,\alpha,\xi)+12F_2(n\gamma,\alpha,\xi)-24F_3(n\gamma,\alpha,\xi)+24F_4(n\gamma,\alpha,\xi)\}$$

$$A_5=\tfrac{1}{2}\{F_0(n\gamma,\alpha,\xi)-5F_1(n\gamma,\alpha,\xi)+20F_2(n\gamma,\alpha,\xi)-60F_3(n\gamma,\alpha,\xi)+120F_4(n\gamma,\alpha,\xi)-120F_5(n\gamma,\alpha,\xi)+240G_5(n\gamma,\alpha,\xi)\}$$

$$A_6=\tfrac{1}{2}\{F_0(n\gamma,\alpha,\xi)-6F_1(n\gamma,\alpha,\xi)+30F_2(n\gamma,\alpha,\xi)-120F_3(n\gamma,\alpha,\xi)+360F_4(n\gamma,\alpha,\xi)-720F_5(n\gamma,\alpha,\xi)+720F_6(n\gamma,\alpha,\xi)\}$$

但し $$n\gamma=x/l,\qquad \alpha=b/l,\qquad \xi=y/l \quad\cdots\cdots(3)$$

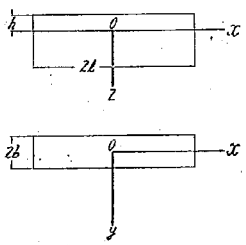
第 1 報に於ては A_0, A_2, A_3 及 A_4 の $\xi=0$ に於ける値を $n\gamma=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 及 1, $\alpha=0.01, 0.02, 0.05$ 及 0.1 に就て計算した. 本文に於ては更に係數 A_5, A_6 を加へ, $\alpha=0.2, 0.3$ に就て計算を行つた. 從つて (2) 式に含まるゝ未知數は 6 個となり, 基礎地盤表面の沈下と桁の撓度とを 6 個所に於て一致せしむることが出來る. A_0, A_2, A_3, A_4, A_5 及 A_6 の値を附表第 1 に示した.

此の場合 α の値が大なる時は幅の方向に於ける壓力分布を考慮する必要があり, 基礎桁として計算することが不可能になる. 而して基礎桁として取り扱ひ得る α の値の範圍に就ては本文に於ては觸れず, 改めて述べることにする.

II. 非對稱荷重の場合

〔1〕 地盤反力

第 1 圖に示す如く桁の中央に原點をとり, 長さの方向を x 軸, 幅の方向を y 軸, 鉛直方向を z 軸とする.



第 1 圖

地盤反力 $q(x)$ は一般に次の如く示される. (但し上方に作用するものを正の方向とする).

$$q(x)=a_0+a_1\left(\frac{x}{l}\right)+a_2\left(\frac{x}{l}\right)^2+\cdots\cdots$$

然るに荷重が x に對し非對稱なるを以て

$$x=0;\qquad q=0$$

從つて非對稱なる場合の地盤反力 $q(x)$ は次式の如く示さる.

$$q(x)=a_1\left(\frac{x}{l}\right)+a_2\left(\frac{x}{l}\right)^2+\cdots\cdots+a_n\left(\frac{x}{l}\right)^n \quad\cdots\cdots(4)$$

〔2〕 地盤表面の沈下 w 及原點の傾斜 $\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{x=0}$

(4) 式に示す地盤反力に依る基礎地盤表面の沈下 w は地中に向ふものを正の値とすれば，對稱荷重の場合と同樣に附錄 I の (6) 式より次の如く示される．

$$w=\frac{1}{\pi}\frac{1-\sigma_2^2}{E_2}l(a_1A_1+a_2A_2+\cdots\cdots+a_nA_n)\cdots\cdots(5)$$

但し A_1, A_2…… は次式により與へらる．

$$\left.\begin{aligned}
A_1&=\tfrac{1}{2}\{-F_0(n\gamma,\alpha,\xi)+F_1(n\gamma,\alpha\xi)\},\\
A_2&=\tfrac{1}{2}\{-F_0(n\gamma,\alpha,\xi)+2F_1(n\gamma,\alpha,\xi)-2F_2(n\gamma,\alpha,\xi)+2G_2(n\gamma,\alpha,\xi)\},\\
A_3&=\tfrac{1}{2}\{-F_0(n\gamma,\alpha,\xi)+3F_1(n\gamma,\alpha,\xi)-6F_2(n\gamma,\alpha,\xi)+6F_3(n\gamma,\alpha,\xi)\},\\
A_4&=\tfrac{1}{2}\{-F_0(n\gamma,\alpha,\xi)+4F_1(n\gamma,\alpha,\xi)-12F_2(n\gamma,\alpha,\xi)+24F_3(n\gamma,\alpha,\xi)\\
&\quad-24F_4(n\gamma,\alpha,\xi)+24G_4(n\gamma,\alpha,\xi)\},\\
A_5&=\tfrac{1}{2}\{-F_0(n\gamma,\alpha,\xi)+5F_1(n\gamma,\alpha,\xi)-20F_2(n\gamma,\alpha,\xi)+60F_3(n\gamma,\alpha,\xi)\\
&\quad-120F_4(n\gamma,\alpha,\xi)+120F_5(n\gamma,\alpha,\xi)\},\\
A_6&=\tfrac{1}{2}\{-F_0(n\gamma,\alpha,\xi)+6F_1(n\gamma,\alpha,\xi)-30F_2(n\gamma,\alpha,\xi)+120F_3(n\gamma,\alpha,\xi)\\
&\quad-360F_4(n\gamma,\alpha,\xi)+720F_5(n\gamma,\alpha,\xi)-720F_6(n\gamma,\alpha,\xi)+720G_6(n\gamma,\alpha,\xi)\}
\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(6)$$

(6) 式中の各函數は附錄 I の (9) 式に示さる．A_1, A_2,…… は何れも $n\gamma$, α, ξ の函數にして，與へられたる α に對して A_1, A_2…… の値を計算して置く時は，それと形狀の相似なる總ての桁に使用し得る點は對稱荷重の場合と全く同樣である．w_0 は上式に於て $\xi=0$, w_b は $\xi=\alpha$ と置ける値である．

(6) 式及附錄 I の (9) 式より $x=0$ に於ける w は零となり，常數 a_1, a_2,…… を決定する場合には，原點に於ける地盤表面の沈下と桁の撓度とは常に相等しきを以て，原點に於ては基礎地盤の傾斜 $\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{x=0}$ を使用するが便利である，かくする時は對稱荷重の場合は原點の傾斜は水平なるを以て，原點に於ては傾斜と沈下とは兩者共常に等しくなる．

原點に於ける傾斜は附錄 I の (16) 式より次の如く示される．

$$\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{x=0}=\frac{1}{\pi}\frac{1-\sigma_2^2}{E_2}(a_1C_1+a_2C_2+\cdots\cdots+a_nC_n)\cdots\cdots(7)$$

但し C_1, C_2,…… は次式より與へられる．

$$\left.\begin{aligned}
C_1&=\tfrac{1}{2}\{-F(o,\alpha,\xi)+F_0(o,\alpha,\xi)\}\\
C_2&=\tfrac{1}{2}\{-F(o,\alpha,\xi)+2F_0(o,\alpha,\xi)-2F_1(o,\alpha,\xi)\}\\
C_3&=\tfrac{1}{2}\{-F(o,\alpha,\xi)+3F_0(o,\alpha,\xi)-6F_1(o,\alpha,\xi)+6F_2(o,\alpha,\xi)\}\\
C_4&=\tfrac{1}{2}\{-F(o,\alpha,\xi)+4F_0(o,\alpha,\xi)-12F_1(o,\alpha,\xi)+24F_2(o,\alpha,\xi)-24F_3(o,\alpha,\xi)
\end{aligned}\right\}\cdots$$

$$+48G_3(o,a,\xi)\}$$

$$C_5=\frac{1}{2}\{-F(o,a,\xi)+5F_0(o,a,\xi)-20F_1(o,a,\xi)+60F_2(o,a,\xi)$$
$$-120F_3(o,a,\xi)+120F_4(o,a,\xi)\}$$

$$C_6=\frac{1}{2}\{-F(o,a,\xi)+6F_0(o,a,\xi)-30F_1(o,a,\xi)+120F_2(o,a,\xi)$$
$$-360F_3(o,a,\xi)+720F_4(o,a,\xi)-720F_5(o,a,\xi)+1440G_5(o,a,\xi)\} \quad \cdots\cdots(8)$$

(8) 式中の各函數は附錄 I の (18) 式に示さる.

$\xi=0$ なる A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6 の値を $a=0.01$, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 に就て, $x/l=0.2$, 0.4, 0.6, 0.8, 1 の 6 ヶ所に於て求め附表第 2 に示す. 又 $\xi=0$ なる點の C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6 の値を $a=0.01$, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 に就て求め附表第 3 に示す.

〔3〕 常數決定法

桁の各點の撓度及原點に於ける傾斜は普通の計算法に依り各荷重, 各限界條件に就て容易に求められ, 非對稱荷重の作用する場合には一般に次の如き形を有す.

$$v=\frac{bl^4}{E_1I}(a_1B_1+a_2B_2+\cdots\cdots+Cx+L) \quad \cdots\cdots(9)$$

式中 B_1, B_2,…… は何れも桁の彈性係數, 大さ等に無關係にして, 限界條件によりて定まり, L は荷重に關係する項, C は積分常數である.

(5) 及 (9) 式より a_1, a_2,…… は w と v とを等しくすることにより求められる.

$$x=x_0,\ x_1,\cdots\cdots; \quad w=v \quad \cdots\cdots(10)$$

$x=0$ に於ては w と v とは常に零なるを以て, 對稱荷重の場合と異なり, $x=0$ に於ては基礎地盤表面の傾斜と桁の傾斜とを等しくせしむるを要す. 即ち

$$x=0; \quad \frac{\partial w}{\partial x}=\frac{\partial v}{\partial x} \quad \cdots\cdots(11)$$

桁に作用する全荷重の總和は零であるが, その半部に作用する全荷重を P とすれば P はその部分に作用する地盤反力の總和と等しきを以て

$$\frac{a_1}{2}+\frac{a_2}{3}+\cdots\cdots+\frac{a_n}{n+1}=\frac{1}{2bl}P \quad \cdots\cdots(12)$$

從つて (10), (11), (12) 式に示す聯立方程式を解きて a_1, a_2,…… を求むれば, 桁の各點に作用する地盤反力及彎曲力率が求められる. 今決定する未知數の數を n 個とすれば, 上記聯立方程式中に含まれる未知數の總和は $(n+1)$ 個となる. 從つて $(n-1)$ 個所に於て (10) 式を滿足せしむる事が出來る. 然るに $x=0$ に於ては常に $w=v=0$ なるを以て, 此の場合も亦原點を含みて n 個所に於て桁の撓度と地盤表面の沈下とを一致せしめ得るを以

て，對稱荷重の場合と同一となる．

〔4〕 近似の程度

計算に使用する未知數の數及地盤表面の沈下と桁の撓度とを一致せしむべき個所の採り方により，地盤反力の分布及彎曲力率に如何なる影響があるかを求める爲に，次の9場合に就き第2圖に示す如く等布荷重の作用する場合の比較を行つた．

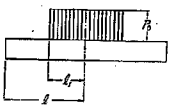
① $\xi=1,\ 0.8,\ 0.6,\ 0$　② $\xi=1,\ 0.8,\ 0.2,\ 0$

③ $\xi=1,\ 0.6,\ 0.4,\ 0$　④ $\xi=1,\ 0.4,\ 0.2,\ 0$

⑤ $\xi=1,\ 0.8,\ 0$　⑥ $\xi=1,\ 0.6,\ 0$

⑦ $\xi=1,\ 0.4,\ 0$　⑧ $\xi=1,\ 0.2,\ 0$

⑨ $\xi=1,\ 0.8,\ 0.6,\ 0.4,\ 0$



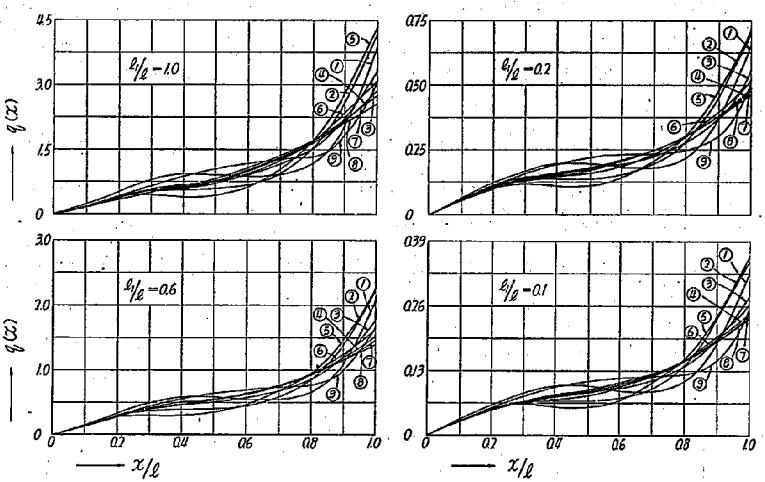
第 2 圖

⑤, ⑥, ⑦, ⑧ は未知數 3 個, ①, ②, ③, ④ は 4 個, ⑨ は 5 個である．

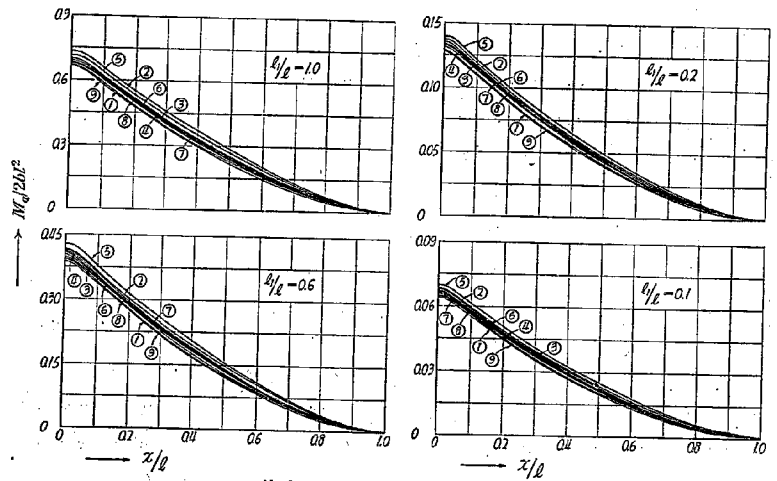
第 1 報に述べたる如く $\alpha=0.01$, $\varepsilon=1$ の場合の比較を以て α, ε の異なる場合も大體推定し得るを以て，本文の計算は $\alpha=0.01$, $\varepsilon=1$ なる場合に止めた．且つ荷重の分布は $l_1/l=1,\ 0.6,\ 0.2,\ 0.1$ の 4 場合を採つた．

地盤反力分布を第 3 圖 (a)，地盤反力のみに依る彎曲力率 M_q を第 3 圖 (b) に示す．

第3 (a) 圖より地盤反力に及ぼす未知數の數及位置の影響を知る事が出來，その大體の傾向は對稱荷重の場合と殆ど同樣である．即ち未知數の 3 個と 4 個と 5 個の反力分布曲線



第 3 圖 (a) 地盤反力の値
（但し圖中の値は p_0 の係數を示す）



第 3 圖 (b) 彎曲率力の値
(但し圖中の値は p_0 の係數を示す)

は多少の差異が認められ，特に 5 個の場合には壓力分布を一樣ならしむる傾向を有す．而して必要なる最大地盤反力に就ては，その最大なるものと最小なるものとの差異は常に 50% 以下にして，荷重が中央に集中するに從ひその差異は減小する．未知數 4 個の場合には位置の撰び方に依り多少異なるも，未知數 3 個の場合は ⑤ [$x=0.8l$ の如き端に近き點にて沈下と撓度とを一致せしめたるを以て除外するが當然である] を除き他の ⑥, ⑦, ⑧ は殆ど一致する．

第 3 圖 (b) より地盤反力のみによる彎曲力率の變化を見るに，①, ⑤, ⑨ を除き他は殆ど一致し ⑤ の絕對値は常に最大，⑨ の絕對値は最小にして ① と ⑨ との間には大なる差異がない．第 3 圖 (a) の地盤反力分布圖と比較すれば差異極めて小にして，實用上殆ど一致すると考へられる．然るに荷重のみに依る彎曲力率 M_1 と M_q との符號異な

第 1 表 $(M_q+M_1)/2bl^2$ の値 $(x=0)$

	$l_1/l=1.0$	$l_1/l=0.6$	$l_1/l=0.2$	$l_1/l=0.1$		$l_1/l=1.0$	$l_1/l=0.6$	$l_1/l=0.2$	$l_1/l=0.1$
①	−0.180	−0.214	−0.109	−0.0594	⑥	−0.212	−0.230	−0.114	−0.0629
②	−0.228	−0.239	−0.116	−0.0634	⑦	−0.202	−0.225	−0.112	−0.0612
③	−0.203	−0.226	−0.112	−0.0643	⑧	−0.196	−0.223	−0.112	−0.0611
④	−0.202	−0.225	−0.112	−0.0612	⑨	−0.175	−0.211	−0.108	−0.0590
⑤	−0.249	−0.250	−0.119	−0.0649					

上表の數字は p_0 の係數を示す．

るを以て，兩者の絶對値が殆ど等しき場合は M_q の僅少の差異も影響が著しく大となる．今一般に彎曲力率最大なる $x=0$ に於ける (M_l+M_q) の値を求め第 1 表に示す．上表により餘り大なる差異のなきことが分る．

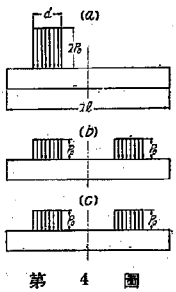
是等の計算の結果對稱荷重の場合と全く同様に，未知數の數及撓度と沈下とを一致せしむべき點の位置の地盤反力分布及彎曲力率に及ぼす影響の大體の傾向を推定することが出來，近似の程度も推定し得る．

III. 計　算　例

基礎桁に對稱及非對稱荷重の作用する場合の基礎地盤表面の沈下量を求めるに必要なる諸係數を，附表第 1，第 2 及第 3 に與へたるを以て，桁に作用する荷重が既知なる時は地盤反力及桁の强度計算を行ふことが出來る．本文の近似計算法の使用を説明する爲に，二三の例に就て計算を行つた．元より實際問題への適用を目的として行つたものではないが，比較的實際問題に近き場合に就て計算したるを以て，此等の計算例より本近似計算法を實在問題に如何に適用すべきかは充分理解し得ると思ふ．然しかゝる計算法を實在問題に適用するに當りては，本計算法の根底をなす諸假定，問題の要求してゐる近似の程度等を充分考慮して行ふが至當である．

計算例 1

長さ $2l$，幅 $2b$，厚さ一樣なる基礎桁に，第 4 圖 (a) に示す如く，$2p_0$ なる荷重が d なる幅に作用する時，此の荷重は (b) 及 (c) に示す如く，對稱なるものと非對稱なるものとの二荷重に分ち得る．



第　4　圖

未知數は 5 個とし $x=l$，$0.6l$，$0.4l$，$0.2l$ 及 0 の 5 ヶ所，即ち桁全體としては 9 ヶ所に於て桁と基礎地盤の沈下とを一致せしむる．特に原點に於ては傾斜も亦一致する．

1. 對稱なる場合

未知數は 5 個なるを以て地盤反力は (1) 式より次の如く示される．

$$q(x)=a_0+a_2\left(\frac{x}{l}\right)^2+a_3\left(\frac{x}{l}\right)^3+a_4\left(\frac{x}{l}\right)^4+a_5\left(\frac{x}{l}\right)^5 \quad \cdots\cdots(13)$$

(13) 式の地盤反力による基礎地盤表面の沈下 w_0 は (2) 式より次の如く示される．

$$w_0=\frac{1}{\pi}\frac{1-\sigma_2^2}{E_2}l(a_0A_0+a_2A_2+a_3A_3+a_4A_4+a_5A_5) \quad \cdots\cdots(14)$$

上式の係數 A_0，A_2，…… は附表第 1 より求められる．例へば $a=0.02$ の場合の $x=0.8l$

なる點の w_0 の値は次の如し.

$$w_0=\frac{1}{\pi}\frac{1-\sigma_2^2}{E_2}l(0.4075812a_0+0.2240500a_2+0.1782156a_3$$
$$+0.1442317a_4+0.1182084a_5)$$

同樣に $x=l$, $0.6l$, $0.4l$, $0.2l$ 及 0 なる點の w_0 の値は附表第 1 より求められる.

(13) 式の地盤反力に依る桁の撓度 v_q は第 1 報の附錄 II より

$$v_q=\frac{bl^4}{E_1I}(a_0B_0+a_2B_2+a_3B_3+a_4B_4+a_5B_5)+C_4 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(15)$$

第 2 表 B_0, B_2, B_3, B_4, B_5 の値

對稱荷重, 兩端自由

x/l	B_0	B_2	B_3	B_4	B_5
1.0	−0.25	−0.14	−0.1190476190	−0.1011904762	−0.0879629629
0.8	−0.1834$\dot{6}$	−0.10456746	−0.0858326552	−0.0727330621	−0.0630728953
0.6	−0.1188	−0.0662592	−0.0540666514	−0.0456199954	−0.0394352366
0.4	−0.0608	−0.03291164	−0.0266705676	−0.0224007802	−0.0193017606
0.2	−0.01746	−0.00911146	−0.0073333638	−0.0061333364	−0.0052698416
0	0	0	0	0	0

B_0, B_2,…… の値は第 2 表に示す如し. 此の場合 B_0, B_1,…… は a には無關係にて, x/l のみの函數にて示される. 今 $x=l$ なる點の v_q は第 1 表より次の如し.

$$v_q=-\frac{bl^4}{E_1I}(0.25a_0+0.144a_2+0.1190476a_3+0.1011905a_4-0.0879630a_5)+C_4$$

次に第 4 圖 (b) に示す荷重が作用する時の桁の撓度 v_p は次の如く示される.

$$v_p=\frac{bl^4}{E_1I}p_0L+e \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(16)$$

L は附錄 II の第 6 式より求められる.

基礎地盤表面の沈下と桁の撓度とは等しきを以て

$$w_0=v_q+v_p$$

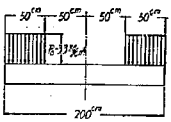
又は
$$a_0(A_0-\varepsilon B_0)+a_2(A_2-\varepsilon B_2)+a_3(A_3-\varepsilon B_3)+a_4(A_4-\varepsilon B_4)$$
$$+a_5(A_5-\varepsilon B_5)+C=\varepsilon Lp_0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(17)$$

但し
$$\varepsilon=\frac{6\pi}{1-\sigma_2^2}\frac{E_2}{E_1}\left(\frac{l}{h}\right)^3 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(18)$$

上式の C は積分常數にして $-\frac{\pi E_2}{1-\sigma_2^2}\frac{1}{l}(C_4+e)$ を示す. 更に地盤反力の總和は荷重の總和に等しきを以て

$$a_0+\frac{1}{3}a_2+\frac{1}{4}a_3+\frac{1}{5}a_4+\frac{1}{6}a_5=\frac{d}{l}p_0 \quad \cdots\cdots(19)$$

今一例として第 5 圖に示す如く荷重が幅 20 cm, 長 2 m の基礎桁に作用する時地盤反力及彎曲力率を求める.



第 5 圖

基礎桁の材料はコンクリートとして $E_1=200{,}000\ \mathrm{kg/cm^2}$, 基礎地盤の彈性係數 $E_2=100\ \mathrm{kg/cm^2}$ (大體赤土の應壓試驗より得たる彈性係數の値) $\sigma_2=0$, $l=100$ cm, $h=15$ cm 從つて ε は (18) 式より 2.79 となる. 然るに第 1 報に於て述べたる如く ε の多少の差異は, 地盤反力及彎曲力率に餘り影響を及ぼさざるを以て, 本計算法の近似の程度に於ては $\varepsilon=3$ として差支へなく, 以下の計算は $\varepsilon=3$ として行ふ.

(17) 式に示す聯立方程式を求めるに當り L を計算しなければならぬ. 附錄 II の (6) 式より

x/l	1.0	0.6	0.4	0.2	0
L	0.2135416	0.0990083	0.0493	0.0136	0

(17) 式に於て常數 C を消去する爲に, $x=0$ に相當する式を各式より引き去つて置けばよい. 然るに $x=0$ に於ける B_0,…… 及 L の値は總て zero なるを以て, A の係數に於て $x=0$ の値を豫め除去して置く時は, 直ちに C を消去せる式を求め得る. 而して $\alpha=b/l=0.1$ なるを以て附表第 1 の $\alpha=0.1$ に相當ずる A の係數を用ひて, (17) 式は次の如く示さる.

$$0.0893920a_0+0.7899309a_2+0.7115523a_3+0.6425838a_4+0.5860040a_5=0.640625p_0$$
$$0.2679024a_0+0.5273100a_2+0.3877075a_3+0.2941757a_4+0.2314074a_5=0.297025p_0$$
$$0.1477418a_0+0.2532791a_2+0.1638117a_3+0.1166009a_4+0.0899899a_5=0.148p_0$$
$$0.0442781a_0+0.0670232a_2+0.0385349a_3+0.0272589a_4+0.0215899a_5=0.041p_0$$
$$a_0+0.333a_2+0.25a_3+0.2a_4+0.166a_5=0.5p_0$$

是等の聯立方程式を解きて a_0, a_2, a_3, a_4, a_5 を求むれば

$$\left.\begin{aligned} &a_0=0.33686, \quad a_2=-0.26091, \quad a_3=4.04118, \\ &a_4=-10.12766, \quad a_5=7.59143 \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(20)$$

(20) 式の値より地盤反力 $q(x)$ は (13) 式より, 地盤反力のみによる桁の彎曲力率 M_q は第 1 報の附錄 II の (6) 式より夫々次の如く求めらる.

$$q=(0.33686-0.26091\xi^2+4.04118\xi^3-10.12766\xi^4+7.59143\xi^5)p_0$$

$$M_q=-2bl^2(0.16842\xi^2-0.02174\xi^4+0.20205\xi^5-0.33757\xi^6+0.18074\xi^7)p_0$$
$$+2bl^2 0.5\xi p_0-2bl^2 0.3086 p_0$$

荷重のみに依る彎曲力率 M_p は附錄 II の (7) 式に於て $l_1=50$, $d=50$, $l=100$ と置きて求めらる．上記の計算より得たる地盤反力 M_q, M_p 及 M_q+M_p によりて生ずる桁の邊維應力 (σ) を求むれば次の如し．但し $p_0=3.3$ kg/cm とする．

x/l	地盤反力	M_q	M_p	M_q+M_p	σ
1.0	5.218	0	0	0	0
0.8	1.909	− 14902	13200	−1702	2.3
0.6	1.299	− 46800	52800	6000	8.0
0.4	1.228	− 89390	115500	26110	34.8
0.2	1.138	−141774	181500	39726	53.0
0	1.112	−203319	247500	44181	58.9

單位は總て kg, cm とし，且つ σ は應張力のみを採る．

本計算に使用したる荷重は道路構造令細則の第1種自動車荷重の後輪に相當する．

今桁の長さ $l=200$ cm とすれば $\varepsilon=22.34$, $\alpha=0.05$ となる．從つて $\varepsilon=20$ として上記と同じ計算を行へば地盤反力，彎曲力率，邊維應力は次表の如し．

x/l	地盤反力	M_q	M_p	M_q+M_p	σ
1.0	0.227	0	0	0	0
0.8	0.439	− 4184	0	− 4148	5.5
0.6	0.808	− 22822	0	−22822	30.4
0.4	1.058	− 66963	13200	−53763	71.6
0.2	1.140	−144447	115500	−28947	38.6
0	1.139	−258205	247500	−10705	14.3

單位は kg, cm とする．

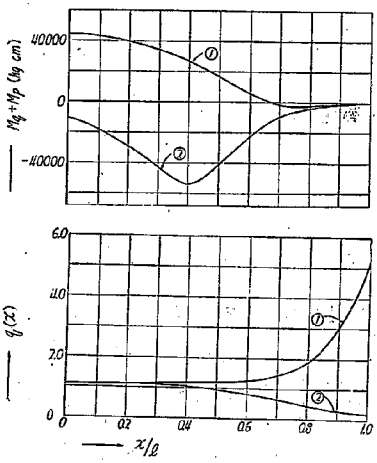
二つの場合の地盤反力及彎曲力率を第6圖に示す．同圖より桁の長さを變へたる爲に彎曲力率の附號が變り，又地盤反力の分布も亦可成り異なることが分る．

2. 非剛桁の場合

地盤反力 $q(x)$ 及それによりて生ずる基礎地盤表面の沈下 w_0 は (4) 式, (5) 式より次の如く示さる．

$$\left.\begin{aligned} q(x)&=a_1\left(\frac{x}{l}\right)+a_2\left(\frac{x}{l}\right)^2+a_3\left(\frac{x}{l}\right)^3+a_4\left(\frac{x}{l}\right)^4+a_5\left(\frac{x}{l}\right)^5 \\ w_0&=\frac{1}{\pi}\frac{1-\sigma_2^2}{E_2}l(a_1A_1+a_2A_2+a_3A_3+a_4A_4+a_5A_5) \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots(21)$$

係数 A_1, A_2, A_3, A_4 及 A_5 は附表第2に示す．對稱なる場合と異なり $x=0$ に於ては $w=0$ なるを以て，原點に於ける地盤表面の傾斜と基礎桁の傾斜とを一致せしむるを要す．而して對稱なる場合は原點に於ける基礎地盤表面の傾斜と基礎桁のそれとは等しきを以て，結局原點に於ては沈下と傾斜とは兩者共等しくなる．



第 6 圖

基礎地盤表面の傾斜 $\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{x=0}$ は (7) 式より次の如し．

$$\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{x=0}=\frac{1}{\pi}\frac{1-\sigma_2^2}{E_2}[a_1C_1+a_2C_2+a_3C_3+a_4C_4+a_5C_5]\cdots\cdots\cdots(22)$$

C_1, C_2,…… の係數は附表第 3 に與へらる．

(21) 式の地盤反力に依る桁の撓度 v_q は附錄 II の (4) 式より

$$v_q=\frac{bl^4}{E_1I}(a_1B_1+a_2B_2+a_3B_3+a_4B_4+a_5B_5)+C_3x$$

但し B_1, B_2,…… は第 3 表に示す．桁の原點に於ける傾斜 $\left(\frac{\partial v_q}{\partial x}\right)_{x=0}$ は上式より

第 3 表　B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 の値
非對稱荷重，兩端自由

x/l	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
1.0	−0.183	−0.14	−0.1190476190	−0.1011904762	−0.0879629629
0.8	−0.1334613	−0.10456746	−0.0858326552	−0.0727330621	−0.0630728953
0.6	−0.085296	−0.0662592	−0.0540666514	−0.0456199954	−0.0394352366
0.4	−0.0428373	−0.03291164	−0.0266705676	−0.0224007802	−0.0193017607
0.2	−0.0120053	−0.00911146	−0.0073333638	−0.0061333364	−0.0052698416
0	0	0	0	0	0

$$\left(\frac{\partial v_q}{\partial x}\right)_{x=0}=C_3\cdots\cdots\cdots(23)$$

第 4 圖 (c) に示す荷重が作用する時の桁の撓度 v_p は次の如し．

$$v_p=\frac{bl^4}{E_1I}p_3L+ex\cdots\cdots\cdots(24)$$

L は附錄 II の (6) 式に與へられ，又桁の原點に於ける傾斜は (24) 式より

$$\left(\frac{\partial v_p}{\partial x}\right)_{x=0}=e$$

對稱なる場合と同樣に $w_0=v_0+v_p$ なるを以て

$$a_1(A_1-\varepsilon B_1)+a_2(A_2-\varepsilon B_2)+a_3(A_3-\varepsilon B_3)+a_4(A_4-\varepsilon B_4)$$
$$+a_5(A_5-\varepsilon B_5)+C\frac{x}{l}=\varepsilon L p_0 \quad \cdots\cdots(25)$$

但し $\varepsilon=\frac{6\pi}{1-\sigma_2^2}\frac{E_2}{E_1}\left(\frac{l}{h}\right)^3$, $C=-\frac{\pi E_2}{1-\sigma_2^2}(C_3+e)$

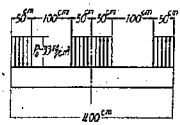
亦原點に於ける傾斜が等しきを以て

$$C=a_1C_1+a_2C_2+a_3C_3+a_4C_4+a_5C_5 \quad \cdots\cdots(26)$$

桁の半分に作用する地盤反力の總和は荷重の總和に等しきを以て

$$\frac{a_1}{2}+\frac{a_2}{3}+\frac{a_3}{4}+\frac{a_4}{5}+\frac{a_5}{6}=\frac{d}{l}p_0 \quad \cdots\cdots(27)$$

(25), (26), (27) より a_1, a_2,…… の値を求める時は地盤反力及彎曲力率を容易に求め得る．



第 7 圖

今一例として第 7 圖に示す荷重が幅 20 cm，長さ 4 m の基礎桁に作用する時の地盤反力及彎曲力率を求める．

E_1, E_2, σ_2, h の値は總て對稱荷重の場合と同樣なりとすれば $\varepsilon=22.34$, $a=0.05$ となり $\varepsilon=20$ として以下の計算を行ふ．

(25) 式の聯立方程式を求める爲に L の値を求めなければならぬ．L は附錄 II の (8) 式を組み合せて次の如く求められる．

x/l	1.0	0.6	0.4	0.2	0
L	0.140625	0.06354948	0.03142448	0.0088	0

從つて未知數 a_1, a_2,…… を與へる聯立方程式は次の如し．

$$4.0073537a_1+3.1932557a_2+2.6594854a_3+2.2824952a_4+2.0019479a_5+C$$
$$=2.8125p_0$$
$$2.1219692a_1+1.5879789a_2+1.2547217a_3+1.0314891a_4+0.8737792a_5+0.6C$$
$$=1.2709896p_0$$
$$1.1449959a_1+0.7971605a_2+0.6085669a_3+0.4937109a_4+0.4169168a_5+0.4C$$
$$=0.6284896p_0$$

$$0.38687221a_1+0.23301075a_2+0.17104762a_3+0.13777310a_4+0.11630803a_5+0.2C$$
$$=0.176p_0$$
$$0.73790077a_1+0.20024984a_2+0.09920255a_3+0.06654120a_4+0.04987646a_5$$
$$=C$$
$$0.5a_1+\tfrac{1}{3}a_2+0.25a_3+0.2a_4+\tfrac{1}{6}a_5=0.5p_0 \quad \cdots\cdots(28)$$

(28) 式より a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 を求むれば $q(x)$ は (21) 式より，地盤反力による彎曲力率 M_q は附錄 II の (4) 式より，荷重に依る彎曲力率 M_p は附錄 II の (9) 式を組み合せて求めらる．今上記の計算より得たる地盤反力，M_q，M_p 及 M_q+M_p は次の如し．但し $p_0=3.3$ kg/cm とする．

x/l	地盤反力	M_q	M_p	M_q+M_p
1.0	6.40	0	0	0
0.8	1.72	− 64162	52800	− 11362
0.6	1.61	−194367	181500	− 12868
0.4	1.39	−375571	313500	− 62071
0.2	1.07	−600653	448800	−151853
0	0	−856442	660000	−196442

単位は總て kg, cm とす．

3. 一般の場合

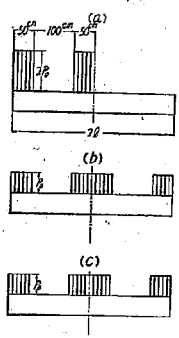
一般の場合として第8圖に示す荷重の作用する場合に就て計算する．

$l=200$ cm,　$h=15$ cm,　$b=20$ cm

$E_1=200{,}000$ kg/cm^2,　$E_2=100$ kg/cm^2　$\sigma_2=0$

然る時 $\varepsilon=22.34$, $\alpha=0.05$ となり，$\varepsilon=20$ として計算を行ふ．

第8圖 (b) は對稱なる荷重の場合にて 1. の2の場合と唯 L の値が異なるのみである．a_0, a_1,…… を求め地盤反力，彎曲力率を求むれば



第　8　圖

x/l	地盤反力	M_q	M_p	M_q+M_p
1.0	1.88	0	0	0
0.8	0.83	− 22717	26400	3682
0.6	0.62	− 74118	90750	16631
0.4	0.68	−146058	156750	10692
0.2	0.78	−239936	224400	−15536
0	0.83	−358789	330000	−28789

第 8 圖 (c) は第 7 圖と全く同樣にして此の場合は p_0 の代りに $p_0/2$ を用ふればよい，從つて第 8 圖 (a) なる荷重による地盤反力，彎曲力率，邊維應力は次の如し．

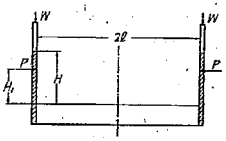
	地盤反力	彎曲力率	邊維應力
1.0	5.08	0	0
0.8	1.69	− 1998	2.6
0.6	1.43	10197	13.6
0.4	1.38	− 20343	27.1
0.2	1.31	− 91463	121.9
0	0.83	−127010	169.3

單位は kg, cm とする．

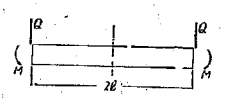
上記の計算例に示す如く作用する荷重が異なる時は，唯 L のみを新に計算すれば足り，桁に使用する材料，地盤の力學的性質は單に ε のみに關係するに止まり，厚さ一樣にて兩端自由なる基礎桁に對しては，常に同一の A 及 B の係數を使用し得る．而して桁の厚さが一樣ならざる場合，桁の限界條件が異なる場合には，B 及 L を新に計算する必要がある．而して一般に B 及 L は A に比し簡單に求め得る．倘本計算法に於ては桁の厚さが如何に變化するとも，亦如何なる限界條件に於ても B 及 L を計算し得る時は，常に地盤反力竝に桁に作用する彎曲力率を計算し得る．表に示したる各係數の値は小數點以下 10 桁迄求めてある．然し實際計算する場合には，10 桁迄用ひる必要はなく餘程少ない桁數にて充分である，但し餘り桁數を少なく採る時は稀には未知數を決定する事が不可能となる虞れがある．

計算例 2

第 9 圖に示す如く一樣なる厚さの基礎桁の兩端に柱が連結し，柱に荷重が作用する時は，一見計算例 1 と限界條件を異にする如くであるが，第 10 圖に示す如く，基礎桁の兩端に作用する彎曲力率 M 及外力 Q を荷重と考ふる時は兩端自由と見做し得るを以て，計算例 1 と全く同樣になる．從つて荷重のみに依る桁の撓度 v_p を求むれば足る．v_p は次式に示さる．



第 9 圖



第 10 圖

$$v_p = \frac{M}{E_1 I}\frac{x^2}{2} - \frac{Q}{E_1 I}\left(\frac{x^3}{6} - \frac{Lx^2}{2}\right) + e \cdots\cdots (29)$$

今第 9 圖に示す如く柱の高さ H，垂直荷重 W 及柱底より H_1 なる點に水平荷重 P が作用するとする．計算を簡單にする爲に柱及桁の自重，軸方向に作用する力に依る變位，竝に彎曲力率，及柱脚の底部に作用する地盤反力を無視する時は (29) 式の Q, M は次の如く求めらる．

$$Q = W, \qquad M = PH_1$$

柱の代りに不靜定構造物なる時は柱の變位を求める必要がある．その場合は柱と桁とが固定するとすれば，柱底と桁端の角變位が夫々等しき條件より求めらる．

$E_1=200{,}000\ \mathrm{kg/cm^2}$, $E_2=100\ \mathrm{kg/cm^2}$, $\sigma_2=0$, $l=100\ \mathrm{cm}$, $h=15\ \mathrm{cm}$, $b=10\ \mathrm{cm}$ とし，計算例 1 と同様に $\varepsilon=2.79$ の代りに 3 を採用する時は，(16) 式の v_2 の代りに (29) 式の v_p を使用し，聯立方程式を解きて容易に求められる．未知數を 5 個とし $x=l$, $0.6l$, $0.4l$, $0.2l$ 及 0 にて沈下と撓度とを一致せしむる時には，夫等の値は次の如し．

$$\left.\begin{aligned} a_0&=-0.000004782M+0.000219W\\ a_2&=0.000000653M-0.0002120W\\ a_3&=0.000062596M+0.005388W\\ a_4&=-0.000154169M-0.013439W\\ a_5&=0.000118490M+0.010153W \end{aligned}\right\}\cdots\cdots(30)$$

基礎桁の端に於ける角變位は次の如く示さる．

$$\frac{d(v_q+v_p)}{dx}=-\frac{2bl^3}{E_1I}\left\{\sum_{n=0}^{5}\frac{a_n}{(n+1)(n+2)(n+3)}-\frac{1}{2}\sum_{n=0}^{5}\frac{a_n}{n+1}+\sum_{n=0}^{5}\frac{a_n}{n+2}\right\}+\frac{Wl^2}{2E_1I}+\frac{Ml}{E_1I}$$

(30) 式の a_0, a_2,…… の値を代入すれば

$$\frac{d(v_q+v_p)}{dx}=\frac{1}{E_1I}(-304762M-32792W)$$

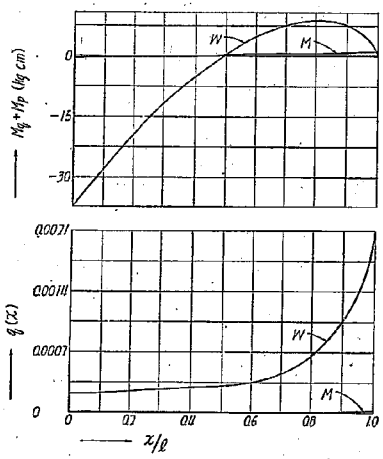
地盤反力及彎曲力率は第 11 圖の如し．

計算例 3

桁の厚さの異なる例として，第 12 圖に示す基礎桁に就て計算する．

今基礎桁と柱との接合部の變形を無視する時は，桁の斷面の moment of inertia は次の如く示さる．

$$\left.\begin{aligned} I&=\infty & 0<x<l_1\\ &=\frac{bh^3}{6} & l_1<x<l \end{aligned}\right\}\cdots(31)$$



第　11　圖

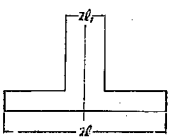
1. 作用する荷重對稱なる場合

地盤反力は

$$q(x)=a_0+a_2\left(\frac{x}{l}\right)^2+\cdots\cdots+a_n\left(\frac{x}{l}\right)^n+\cdots\cdots$$

今 $l_1<x<l$ 間の桁の撓度を v_1, $0<x<l_1$ 間の 値を v_2 とすれば

$$\frac{d^4v_1}{dx^4}=-\frac{2b}{E_1I}\left\{a_0+a_2\left(\frac{x}{l}\right)^2+\cdots\cdots\right\},\qquad v_2=C$$



第　12　圖

限界條件として

$$x=l;\quad \frac{d^3v_1}{dx^3}=0,\quad \frac{d^2v_1}{dx^2}=0,\qquad x=l_1;\quad v_1=v_2,\quad \frac{dv_1}{dx}=0$$

從つて桁の撓度 v_q 及彎曲力率 M_q は次の如く求められる.

$$v_q=-\frac{2bl^4}{E_1I}\Sigma\frac{a_n}{(n+1)(n+2)(n+3)(n+4)}\left\{\left(\frac{x}{l}\right)^{n+4}-(n+4)\left(\frac{x}{l}\right)\left(\frac{l_1}{l}\right)^{n+3}\right.$$
$$\left.+(n+3)\left(\frac{l_1}{l}\right)^{n+4}\right\}+\frac{bl^4}{3E_1I}\left\{\left(\frac{x}{l}\right)^3-3\left(\frac{x}{l}\right)\left(\frac{l_1}{l}\right)^2+2\left(\frac{l_1}{l}\right)^3\right\}\Sigma\frac{a_n}{n+1}$$
$$-\frac{bl^4}{E_1I}\left\{\left(\frac{x}{l}\right)^2-2\left(\frac{x}{l}\right)\left(\frac{l_1}{l}\right)+\left(\frac{l_1}{l}\right)^2\right\}\times\Sigma\frac{a_n}{n+2}+C \qquad l_1<x<l$$
$$=C \qquad 0<x<l$$

又は

$$v_q=\frac{bl^4}{E_1I}(a_0B_0+a_2B_2+a_3B_3+a_4B_4)+C \qquad l_1<x<l$$
$$=C \qquad 0<x<l_1 \cdots\cdots (32)$$

B_0, B_2, B_3, B_4 の値を第 4 表に示す.

第 4 表

$l_1/l=0.1$

x/l	B_0	B_2	B_3	B_4
1.0	−0.164025	−0.100055249	−0.083330937	−0.071390476
0.8	−0.115558333	−0.069411672	−0.057665977	−0.049199728
0.6	−0.06895833	−0.042759027	−0.033399976	−0.028353328
0.4	−0.029025	−0.016522649	−0.013503895	−0.011400780
0.2	−0.003758333	−0.002055872	−0.001666693	−0.001400003
0.0	0	0	0	0

$l_1/l=0.2$

x/l	B_0	B_2	B_3	B_4
1.0	−0.1024	−0.065991111	−0.055713401	−0.048123708
0.8	−0.0684	−0.043449600	−0.036498651	−0.031399652
0.6	−0.036266666	−0.022476800	−0.01873286	−0.016019943
0.4	−0.0108	−0.006467111	−0.005336990	−0.004534086
0.2	0	0	0	0
0.0	0	0	0	0

$$M_q=-2bl^2\left[\Sigma\frac{a_n}{(n+1)(n+2)}\left(\frac{x}{l}\right)^{n+2}-\Sigma\frac{a_n}{n+1}\frac{x}{l}+\Sigma\frac{a_n}{n+2}\right]$$

但し $a_1=0$

今一例として柱に $2P$ なる荷重が作用する時, 荷重のみに依る桁の撓度 $v_p=C_1$, 彎曲力

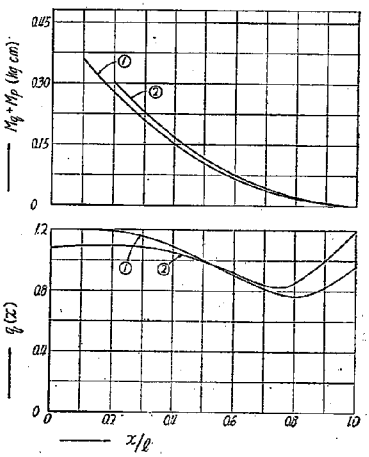
率 $M_p=0$ となる．且つ全荷重と地盤反力とは等しきを以て

$$a_0+\frac{1}{3}a_2+\frac{1}{4}a_3+\cdots\cdots=\frac{P}{2bl} \quad \cdots\cdots(33)$$

今未知數 4 個即ち地盤反力を次の如く示し

$$q(x)=a_0+a_2\left(\frac{x}{l}\right)^2+a_3\left(\frac{x}{l}\right)^3+a_4\left(\frac{x}{l}\right)^4$$

$a=0.01$ 即ち $b=\frac{l}{100}$ なる場合に就て，$x=l$, $0.6l$, $0.4l$ 及 0 の 4 ケ所にて地盤表面の沈下と桁の撓度とを一致せしめて，求めたる地盤反力及彎曲力率を第 13 圖に示す．



第 13 圖　圖中 ① 曲線は $l_1/l=0.1$, ② 曲線は $l_1/l=0.2$ に相當する

2. 作用する荷重が非對稱の場合

地盤反力は

$$q(x)=a_1\left(\frac{x}{l}\right)+a_2\left(\frac{x}{l}\right)^2+\cdots\cdots$$
$$+a_n\left(\frac{x}{l}\right)^n+\cdots\cdots$$

にして $l_1<x<l$ 間の撓度を v_1, $0<x<l_1$ の値を v_2 とすれば 1 と同樣に

$$\frac{d^4v_1}{dx^4}=-\frac{2b}{E_1I}\left\{a_1\left(\frac{x}{l}\right)+a_2\left(\frac{x}{l}\right)^2+\cdots\cdots\right\},$$
$$v_2=Cx$$

限界條件は $x=l$ に於ては 1 と同樣にして

$$x=l_1; \qquad v_1=v_2\ , \qquad \frac{dv_1}{dx}=\frac{dv_2}{dx}$$

從つて桁の撓度 v_q, 彎曲力率 M_q は次の如し．

$$v_q=\frac{bl^4}{E_1I}\Bigg[-\Sigma\frac{2a_n}{(n+1)(n+2)(n+3)(n+4)}\left(\frac{x}{l}\right)^{n+4}+\Sigma\frac{a_n}{n+1}\left(\frac{1}{3}\frac{x^3}{l^3}-\frac{l_1^2}{l^2}\frac{x}{l}+\frac{2}{3}\frac{l_1^3}{l^3}\right)$$
$$-\Sigma\frac{a_n}{n+2}\left(\frac{x^2}{l^2}-2\frac{l_1}{l}\frac{x}{l}+\frac{l_1^2}{l^2}\right)+\Sigma\frac{2a_n}{(n+1)(n+2)(n+3)}\left(\frac{l_1}{l}\right)^{n+3}\frac{x}{l}$$
$$-\Sigma\frac{2a_n}{(n+1)(n+2)(n+4)}\left(\frac{l_1}{l}\right)^{n+4}+C\frac{x}{l}\Bigg] \qquad l_1<x<l$$

$$=\frac{bl^4}{E_1I}C\frac{x}{l} \qquad 0<x<l_1$$

又は $$v_0=\frac{bl^4}{E_1I}\left(a_1B_1+a_2B_2+a_3B_3+a_4B_4+a_5B_5+C\frac{x}{l}\right) \qquad l_1<x<l$$
$$=\frac{bl^4}{E_1I}C\frac{x}{l} \qquad 0<x<l_1 \qquad \cdots\cdots(34)$$

B_1, B_2,…… の値を第 5 表に示す.

第 5 表

$l_1/l=0.1$

x/l	B_1	B_2	B_3	B_4
1.0	−0.124659000	−0.100055249	−0.083330937	−0.071390476
0.8	−0.087122666	−0.069411672	−0.057665977	−0.049199728
0.6	−0.051291666	−0.042759027	−0.033399976	−0.028353328
0.4	−0.021168000	−0.016522649	−0.013503895	−0.011400780
0.2	−0.002671000	−0.002055872	−0.001666693	−0.001400003
0.0	0	0	0	0

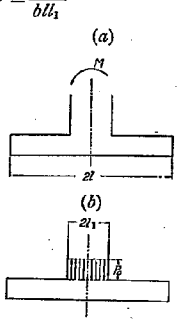
$$M_q=-2bl^2\left[\Sigma\frac{a_n}{(n+1)(n+2)}\left(\frac{x}{l}\right)^{n+2}-\Sigma\frac{a_n}{n+1}\left(\frac{x}{l}\right)+\Sigma\frac{a_n}{n+2}\right]$$

但し $a_0=0$

一例として第 14 圖 (a) の如く, M なる彎曲力率が中央の柱に作用する時, 柱の幅を $2l_1$ とすれば, l_1 が l に比して小なる時は (b) 圖に示す荷重と同様に考へられ, $p_0=M/bl_1^2$ となる. 桁の半分の全荷重と地盤反力とは等しきを以て

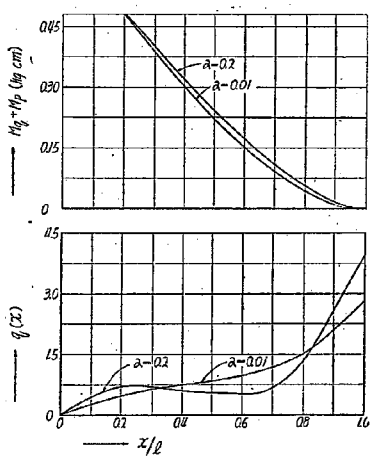
$$\frac{a_1}{2}+\frac{a_2}{3}+\cdots\cdots=\frac{M}{bll_1}$$

且つ荷重のみに依る桁の撓度 $v_p=C_1x$, 彎曲力率 $M_p=0$ となる.



第 14 圖

未知數を 4 個とし $l_1/l=0.1$, $\alpha=0.01$ 及 0.2, $\varepsilon=1$ の場合に就き地盤反力及彎曲力率を求め第 15 圖に示す.



第 15 圖

第 15 圖より α の地盤反力及彎曲力率に及ぼす影響の餘り著しくないことが分る.

附表第1　A_0, A_2,……の値
（基礎桁；對稱荷重）

$\alpha=0.01$

x/l	A_0	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
1.0	0.1298293742	0.0964937382	0.0873972819	0.0844864575	0.0787552873	0.0770484530
0.8	0.2115081094	0.1190318484	0.0931478922	0.0764874322	0.0622868333	0.0596580074
0.6	0.2230091657	0.0768144090	0.0480244515	0.0319299118	0.0214971811	0.0152295026
0.4	0.2284467228	0.0424152078	0.0216099880	0.0126815466	0.0082700078	0.0056120768
0.2	0.2311170070	0.0207081199	0.0105402458	0.0069010844	0.0051519752	0.0041336512
0.0	0.2319326116	0.0133300236	0.0083327571	0.0059997326	0.0046664929	0.0038093813

$\alpha=0.02$

x/l	A_0	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
1.0	0.2519330276	0.1727166766	0.1576408719	0.1467932497	0.1383672031	0.1315034248
0.8	0.4075812351	0.2240499787	0.1782155807	0.1442316754	0.1182083869	0.0978931130
0.6	0.4305712151	0.1517891509	0.0998088019	0.0685618382	0.0470289716	0.0366228738
0.4	0.4414438623	0.0914098412	0.0518928555	0.0334129905	0.0249593085	0.0247713110
0.2	0.4467837439	0.0530482304	0.0311061915	0.0220406516	0.0172293278	0.0142375117
0.0	0.4484162812	0.0399763274	0.0266620630	0.0199973374	0.0159982237	0.0133320043

$\alpha=0.05$

x/l	A_0	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
1.0	0.5382078709	0.3484905623	0.3148164815	0.2918093662	0.2503740044	0.2338605492
0.8	0.8361308807	0.4531654754	0.3668023800	0.3053526397	0.2351097731	0.1961523590
0.6	0.8932854789	0.3234012638	0.2246750459	0.1672897407	0.1081357996	0.0826949302
0.4	0.9205239825	0.2090291201	0.1327580187	0.0986225764	0.0578569982	0.0462397103
0.2	0.9337408532	0.1350650207	0.0911534377	0.0747124370	0.0429829193	0.0354885061
0.0	0.9378175340	0.1097064354	0.0816144895	0.0699419771	0.0399723184	0.0333125607

$\alpha=0.1$

x/l	A_0	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
1.0	0.9380175340	0.5563767339	0.4871398317	0.4386868588	0.4018895609	0.3724230406
0.8	1.3979670174	0.7114141575	0.5630127465	0.4573338150	0.3784317865	0.3177044801
0.6	1.5101279065	0.5266448441	0.3582379012	0.2569902095	0.1928760662	0.1505886424
0.4	1.5639672695	0.3526566688	0.2165303913	0.1490731236	0.1118590783	0.0892668301
0.2	1.5905035774	0.2378013029	0.1492651821	0.1085333951	0.0855548354	0.0707547068
0.0	1.5986254958	0.1981124608	0.1327303394	0.0996745130	0.0797744105	0.0664652224

$\alpha=0.2$

x/l	A_0	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
1.0	1.5986254953	0.8684126574	0.7431123861	0.6596872050	0.6041121013	0.5764676632
0.8	2.2616579578	1.0868636413	0.8551875474	0.6946165052	0.5767381115	0.4864863042
0.6	2.4719781525	0.8532899784	0.5914299858	0.4341517884	0.3336415987	0.2663156971
0.4	2.5766188690	0.6112350083	0.3907425825	0.2777919788	0.2130815316	0.1724099439
0.2	2.6287142190	0.4462483930	0.2891782058	0.2131014310	0.1690359978	0.1400243515
0.0	2.6447111146	0.3775609965	0.2601714165	0.1975187093	0.1582977323	0.1320437925

$\alpha=0.3$

x/l	A_0	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
1.0	2.1552796542	1.1044521223	0.9291478054	0.8109265538	0.7242636745	0.6497366518
0.8	2.9456766500	1.3577046867	1.0630263254	0.8625098046	0.7170494082	0.6008858219
0.6	3.2357033845	1.1070348296	0.7756880762	0.5769203791	0.4492470825	0.3574533635
0.4	3.3860634284	0.8301049834	0.5433375629	0.3934534768	0.3153717055	0.3027294541
0.2	3.4619532642	0.6363766017	0.4205571290	0.3126862989	0.2488947474	0.2023415437
0.0	3.4853679568	0.5684967238	0.3866835610	0.2921225045	0.2345080862	0.191480035

$$w_0=\frac{1}{\pi}\frac{1-\sigma_2^2}{E_2}l\,(a_0A_0+a_2A_2+a_3A_3+a_4A_4+a_5A_5+a_6A_6)$$

附記　第 1 報の $\alpha=0.02$ の値は計算に誤りを見出したるを以て本表に於ては訂正せる値を示した.

附表第 2　A_1, A_2,…… の値

(基礎桁; 非對稱荷重)

$\alpha=0.01$

x/l	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
1.0	0.0999291659	0.0889672298	0.0867903412	0.0804924602	0.0789727727	0.0657832632
0.8	0.1452083383	0.1114055173	0.0904223771	0.0716715677	0.0586971752	0.0473829180
0.6	0.1158076863	0.0689601309	0.0446696999	0.0285524319	0.0191357654	0.0120510311
0.4	0.0793790512	0.0343977123	0.0168956742	0.0089125996	0.0053675372	0.0029776653
0.2	0.0402235750	0.0111750926	0.0043504590	0.0036770057	0.0012149066	0.0005628373
0.0	0	0	0	0	0	0

$\alpha=0.02$

x/l	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
1.0	0.1723316949	0.1572652661	0.1464265884	0.1380097845	0.1311561081	0.1253924078
0.8	0.2620768146	0.2065308690	0.1655649359	0.1343526632	0.1101119181	0.0910402756
0.6	0.2103477266	0.1315419552	0.0852915085	0.0572729300	0.0398759627	0.0288256564
0.4	0.1445800840	0.0673759764	0.0348412428	0.0202346321	0.0131947754	0.0095100686
0.2	0.0733578598	0.0233178582	0.0103879982	0.0061857923	0.0044013787	0.0034175302
0.0	0	0	0	0	0	0

$\alpha=0.05$

x/l	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
1.0	0.3406870397	0.3043668028	0.2785330461	0.2586856588	0.2426886156	0.2392651153
0.8	0.5090879815	0.3993749814	0.3201803490	0.2606723338	0.2148578837	0.1789748391
0.6	0.4160492453	0.2627949401	0.1733886717	0.1190891809	0.0850744323	0.0631651583
0.4	0.2882492092	0.1389276208	0.0751555221	0.0456953051	0.0308815813	0.0224301614
0.2	0.1467655423	0.0507814200	0.0243803442	0.0151063751	0.0109111992	0.0085801242
0.0	0	0	0	0	0	0

$\alpha=0.1$

x/l	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
1.0	0.5476509299	0.5190298822	0.4310956961	0.3946948808	0.3658269487	0.3420067513
0.8	0.7997976671	0.6558832355	0.4998019661	0.4079618771	0.3379746791	0.2835195067
0.6	0.6666942226	0.4495120847	0.2857158196	0.2005852681	0.1467816182	0.1116321199
0.4	0.4659022578	0.2486677089	0.1313807413	0.0831238761	0.0582773617	0.0441055765
0.2	0.2382389218	0.0975353692	0.0459242753	0.0347222668	0.0219374896	0.0178352648
0.0	0	0	0	0	0	0

$\alpha=0.2$

x/l	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
1.0	0.8372941553	0.7142558898	0.6312049555	0.5720158034	0.5272817161	0.4864574118
0.8	1.1796711023	0.9122013917	0.7290276747	0.5960811922	0.4959740305	0.4180920600
0.6	1.0079607206	0.6516559576	0.4467869858	0.3216463531	0.2416778432	0.1885864950
0.4	0.7131217351	0.3723601595	0.2211096880	0.1466275294	0.1062752194	0.0823753745
0.2	0.3668325506	0.1520174670	0.0836726845	0.0556667520	0.0414497434	0.0322988877
0.0	0	0	0	0	0	0

$\alpha=0.3$

x/l	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
1.0	1.0407947209	0.8738835864	0.7617333033	0.6797520606	0.6165175532	0.5690909456
0.8	1.4271950165	1.0964908202	0.8743717026	0.7150745833	0.5962241931	0.5079099827
0.6	1.2367298765	0.8061223673	0.5597048987	0.4088719277	0.3118540343	0.2492840906
0.4	0.8825227431	0.4744392811	0.2905010618	0.1978430616	0.1366368224	0.0587231883
0.2	0.4559833011	0.2006877701	0.1152760754	0.0785395768	0.0592077847	0.0484568795
0.0	0	0	0	0	0	0

$$w_0=\frac{1}{\pi}\frac{1-\sigma_2^2}{E_2}l(a_1A_1+a_2A_2+a_3A_3+a_4A_4+a_5A_5+a_6A_6)$$

附表第 3 C_1, C_2,…… の値

(基礎桁; 非對稱荷重)

α	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
0.01	0.2119329449	0.0400020006	0.0199904042	0.0133313617	0.0099989963	0.0079992911
0.02	0.3684216136	0.0800159984	0.0399343148	0.0266535845	0.0199920198	0.0159946749
0.05	0.7379007737	0.2002498439	0.0992025460	0.0665411982	0.0498764565	0.0399171170
0.10	1.1992891802	0.4019950249	0.1950010668	0.1315850421	0.0990362496	0.0793101489
0.20	1.8499506730	0.8158431222	0.3709225478	0.2459252245	0.1928331050	0.1550259541
0.30	2.3026757664	1.2528367810	0.5227979810	0.3640420539	0.2779203322	0.2243563269

$$\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{x=0}=\frac{1}{\pi}\frac{1-\sigma_2^2}{E_2}(a_1C_1+a_2C_2+a_3C_3+a_4C_4+a_5C_5+a_6C_6)$$

附錄 I 基礎地盤表面の沈下及傾斜

1. 基礎地盤の沈下

基礎地盤を semiinfinite elastic body と考へ，その表面に x に對して非對稱，y に對しては對稱なる垂直荷重 $q(x,y)$ が作用し，水平荷重の作用なき場合の表面の沈下 w は次式の如く示さる．

$$w=-\frac{1-\sigma_2}{1-2\sigma_2}\int_0^\infty\int_0^\infty \frac{A_1}{\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\sin\alpha x\cos\beta y\,d\alpha\,d\beta \cdots\cdots(1)$$

(1) 式の A_1 は $q(x,y)$ をフーリエの double integral にて示し次の如く求めらる．

$$A_1=+\frac{8}{\pi^2}\frac{(1-2\sigma_2)(1+\sigma_2)}{E_2}\int_0^\infty\int_0^\infty q(\lambda,\mu)\cos\beta\mu\sin\alpha\lambda\,d\mu\,d\lambda \cdots\cdots(2)$$

(2) 式を (1) 式に代入すれば

$$w=-\frac{1-\sigma_2^2}{E_2}\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty\int_0^\infty\int_0^\infty \frac{q(\lambda,\mu)}{\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\sin\alpha x\cos\beta y\cos\beta\mu\sin\alpha\lambda\,d\alpha\,d\beta\,d\lambda\,d\mu \cdots(3)$$

$q(x,y)$ は次の如く示さるゝを以て

$$q(x,y)=-a_1\left(\frac{x}{l}\right)-a_2\left(\frac{x}{l}\right)^2-\cdots\cdots-a_n\left(\frac{x}{l}\right)^n \qquad |x|<l,\ |y|<b$$
$$=0 \qquad |x|>l \text{ or } |y|>b$$

$q(x,y)$ を (3) 式に代入すれば

$$w=\frac{1-\sigma_2^2}{E_2}\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty \frac{A}{\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\sin\alpha x\cos\beta y\,d\alpha\,d\beta$$

但し
$$A=\int_0^l\int_0^b\left\{a_1\left(\frac{\lambda}{l}\right)+a_2\left(\frac{\lambda}{l}\right)^2+\cdots\cdots+a_n\left(\frac{\lambda}{l}\right)^n\right\}\cos\beta\mu\sin\alpha\lambda\,d\mu\,d\lambda \cdots\cdots(4)$$

(4) 式の A を積分する時は次の如し

$$A=\frac{\sin\beta b}{\beta}(a_1B_1+a_2B_2+\cdots\cdots+a_nB_n)$$

但し
$$B_n=\int_0^l\left(\frac{\lambda}{l}\right)^n\sin\alpha\lambda\,d\lambda \quad \text{にして } n=6 \text{ 迄の値を求れば}$$

$$B_1=-\frac{\cos\alpha l}{\alpha}+\frac{\sin\alpha l}{\alpha^2 l},\qquad B_2=-\frac{\cos\alpha l}{\alpha}+2\frac{\sin\alpha l}{\alpha^2 l}-2\frac{1-\cos\alpha l}{\alpha^3 l^2}$$

$$B_3=-\frac{\cos\alpha l}{\alpha}+3\frac{\sin\alpha l}{\alpha^2 l}-6\frac{1-\cos\alpha l}{\alpha^3 l^2}+6\frac{\alpha l-\sin\alpha l}{\alpha^4 l^3}$$

$$B_4=-\frac{\cos\alpha l}{\alpha}+4\frac{\sin\alpha l}{\alpha^2 l}-12\frac{1-\cos\alpha l}{\alpha^3 l^2}+24\frac{\alpha l-\sin\alpha l}{\alpha^4 l^3}-24\frac{\cos\alpha l+\frac{\alpha^2 l^2}{2}-1}{\alpha^5 l^4}$$

$$B_5=-\frac{\cos\alpha l}{\alpha}+5\frac{\sin\alpha l}{\alpha^2 l}-20\frac{1-\cos\alpha l}{\alpha^3 l^2}+60\frac{\alpha l-\sin\alpha l}{\alpha^4 l^3}-120\frac{\cos\alpha l+\frac{\alpha^2 l^2}{2}-1}{\alpha^5 l^4}$$
$$+120\frac{\sin\alpha l-\alpha l+\frac{\alpha^3 l^3}{6}}{\alpha^6 l^5}$$

$$B_6=-\frac{\cos\alpha l}{\alpha}+6\frac{\sin\alpha l}{\alpha^2 l}-30\frac{1-\cos\alpha l}{\alpha^3 l^2}+120\frac{\alpha l-\sin\alpha l}{\alpha^4 l^3}-360\frac{\cos\alpha l+\frac{\alpha^2 l^2}{2}-1}{\alpha^5 l^4}$$
$$+720\frac{\sin\alpha l-\alpha l+\frac{\alpha^3 l^3}{6}}{\alpha^6 l^5}-720\frac{1-\cos\alpha l-\frac{\alpha^2 l^2}{2}+\frac{\alpha^4 l^4}{24}}{\alpha^7 l^6}$$

B_0, B_1…… の値を (4) 式に代入する時は w は次の (5) 式に示す定積分を適當に組み合せて (6) 式の如く示さる.

$$\left.\begin{aligned}
I_0&=\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty\frac{\sin\beta b\cos\alpha l}{\alpha\beta\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\cos\beta y\sin\alpha x\,d\alpha\,d\beta\\
I_1&=\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty\frac{\sin\beta b\sin\alpha l}{\alpha^2\beta\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\cos\beta y\sin\alpha x\,d\alpha\,d\beta\\
I_2&=\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty\frac{\sin\beta b(1-\cos\alpha l)}{\alpha^3\beta\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\cos\beta y\sin\alpha x\,d\alpha\,d\beta\\
I_3&=\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty\frac{\sin\beta b(\alpha l-\sin\alpha l)}{\alpha^4\beta\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\cos\beta y\sin\alpha x\,d\alpha\,d\beta\\
I_4&=\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty\frac{\sin\beta b\left(\cos\alpha l+\frac{\alpha^2 l^2}{2}-1\right)}{\alpha^5\beta\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\cos\beta y\sin\alpha x\,d\alpha\,d\beta\\
I_5&=\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty\frac{\sin\beta b\left(\sin\alpha l-\alpha l+\frac{\alpha^3 l^3}{6}\right)}{\alpha^6\beta\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\cos\beta y\sin\alpha x\,d\alpha\,d\beta\\
I_6&=\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty\frac{\sin\beta b\left(1-\cos\alpha l-\frac{\alpha^2 l^2}{2}+\frac{\alpha^4 l^4}{24}\right)}{\alpha^7\beta\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\cos\beta y\sin\alpha x\,d\alpha\,d\beta
\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(5)$$

$$w=\frac{1}{\pi}\frac{1-\sigma_2^2}{E_2}l(a_1A_1+a_2A_2+\cdots\cdots+a_nA_n)\cdots\cdots(6)$$

但し

$$\left.\begin{aligned}
A_1&=\frac{\pi}{l^2}(-lI_0+I_1),\qquad A_2=\frac{\pi}{l^3}(-l^2I_0+2lI_1-2I_2)\\
A_3&=\frac{\pi}{l^4}(-l^3I_0+3l^2I_1-6lI_2+6I_3)\\
A_4&=\frac{\pi}{l^5}(-l^4I_0+4l^3I_1-12l^2I_2+24lI_3-24I_4)\\
A_5&=\frac{\pi}{l^6}(-l^5I_0+5l^4I_1-20l^3I_2+60l^2I_3-120lI_4+120I_5)\\
A_6&=\frac{\pi}{l^7}(-l^6I_0+6l^5I_1-30l^4I_2+120l^3I_3-360l^2I_4+720lI_5-720I_6)
\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(7)$$

(5) 式に示す積分値は第 1 報に於けると全く同様に得られ，是等を (7) 式に代入すれば w の係數なる A_1, A_2,…… は次の如く示さる.

$$\left.\begin{aligned}
A_1&=\tfrac{1}{2}\{-F_0(n\gamma,a,\xi)+F_1(n\gamma,a,\xi)\}\\
A_2&=\tfrac{1}{2}\{-F_0(n\gamma,a,\xi)+2F_1(n\gamma,a,\xi)-2F_2(n\gamma,a,\xi)+4G_2(n\gamma,a,\xi)\}
\end{aligned}\right\}$$

$$A_3=\tfrac{1}{2}\{-F_0(n\gamma,\alpha,\xi)+3F_1(n\gamma,\alpha,\xi)-6F_2(n\gamma,\alpha,\xi)+6F_3(n\gamma,\alpha,\xi)\}$$
$$A_4=\tfrac{1}{2}\{-F_0(n\gamma,\alpha,\xi)+4F_1(n\gamma,\alpha,\xi)-12F_2(n\gamma,\alpha,\xi)+24F_3(n\gamma,\alpha,\xi)-24F_4(n\gamma,\alpha,\xi)+48G_4(n\gamma,\alpha,\xi)\}$$
$$A_5=\tfrac{1}{2}\{-F_0(n\gamma,\alpha,\xi)+5F_1(n\gamma,\alpha,\xi)-20F_2(n\gamma,\alpha,\xi)+60F_3(n\gamma,\alpha,\xi)-120F_4(n\gamma,\alpha,\xi)+120F_5(n\gamma,\alpha,\xi)\}$$
$$A_6=\tfrac{1}{2}\{-F_0(n\gamma,\alpha,\xi)+6F_1(n\gamma,\alpha,\xi)-30F_2(n\gamma,\alpha,\xi)+120F_3(n\gamma,\alpha,\xi)-360F_4(n\gamma,\alpha,\xi)+720F_5(n\gamma,\alpha,\xi)-720F_6(n\gamma,\alpha,\xi)+1440G_6(n\gamma,\alpha,\xi)\}$$

……(8)

但し　　$n\gamma=x/l$,　　$\alpha=b/l$,　　$\xi=y/l$

上式の $F_0(n\gamma,\alpha,\xi)$, $F_1(n\gamma,\alpha,\xi)$, は次式の如し.

$$F_0(n\gamma,\alpha,\xi)=f_0\{(1+n\gamma),(\alpha+\xi)\}+f_0\{(1+n\gamma),(\alpha-\xi)\}-f_0\{(1-n\gamma),(\alpha+\xi)\}-f_0\{(1-n\gamma),(\alpha-\xi)\}$$
$$F_1(n\gamma,\alpha,\xi)=f_1\{(1+n\gamma),(\alpha+\xi)\}+f_1\{(1+n\gamma),(\alpha-\xi)\}-f_1\{(1-n\gamma),(\alpha+\xi)\}-f_1\{(1-n\gamma),(\alpha-\xi)\}$$
$$F_2(n\gamma,\alpha,\xi)=f_2\{(1+n\gamma),(\alpha+\xi)\}+f_2\{(1+n\gamma),(\alpha-\xi)\}-f_2\{(1-n\gamma),(\alpha+\xi)\}-f_2\{(1-n\gamma),(\alpha-\xi)\}$$
$$F_3(n\gamma,\alpha,\xi)=f_3\{(1+n\gamma),(\alpha+\xi)\}+f_3\{(1+n\gamma),(\alpha-\xi)\}-f_3\{(1-n\gamma),(\alpha+\xi)\}-f_3\{(1-n\gamma),(\alpha-\xi)\}$$
$$F_4(n\gamma,\alpha,\xi)=f_4\{(1+n\gamma),(\alpha+\xi)\}+f_4\{(1+n\gamma),(\alpha-\xi)\}-f_4\{(1-n\gamma),(\alpha+\xi)\}-f_4\{(1-n\gamma),(\alpha-\xi)\}$$
$$F_5(n\gamma,\alpha,\xi)=f_5\{(1+n\gamma),(\alpha+\xi)\}+f_5\{(1+n\gamma),(\alpha-\xi)\}-f_5\{(1-n\gamma),(\alpha+\xi)\}-f_5\{(1-n\gamma),(\alpha-\xi)\}$$
$$F_6(n\gamma,\alpha,\xi)=f_6\{(1+n\gamma),(\alpha+\xi)\}+f_6\{(1+n\gamma),(\alpha-\xi)\}-f_6\{(1-n\gamma),(\alpha+\xi)\}-f_6\{(1-n\gamma),(\alpha-\xi)\}$$
$$G_2\{n\gamma,\alpha,\xi\}=f_2(n\gamma,\alpha+\xi)+f_2(n\gamma,\alpha-\xi)$$
$$G_4\{n\gamma,\alpha,\xi\}=f_4(n\gamma,\alpha+\xi)+f_4(n\gamma,\alpha-\xi)$$
$$G_6\{n\gamma,\alpha,\xi\}=f_6(n\gamma,\alpha+\xi)+f_6(n\gamma,\alpha-\xi)$$

……(9)

但し f_0, f_1,…… は次式の如し

$$f_0(x,y)=x\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+y}{\sqrt{x^2+y^2}-y}+y\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}$$
$$f_1(x,y)=\frac{x^2}{2}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+y}{\sqrt{x^2+y^2}-y}+xy\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}-y(x^2+y^2)^{1/2}$$
$$f_2(x,y)=\frac{x^3}{6}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+y}{\sqrt{x^2+y^2}-y}+\frac{x^2y}{2}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}-\frac{y^3}{12}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}-\frac{5}{6}xy(x^2+y^2)^{1/2}$$
$$f_3(x,y)=\frac{x^4}{24}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+y}{\sqrt{x^2+y^2}-y}+\frac{x^3y}{6}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}-\frac{xy^3}{12}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}-\frac{13}{36}y(x^2+y^2)^{3/2}+\frac{5}{12}y^3(x^2+y^2)^{1/2}$$
$$f_4(x,y)=\frac{x^5}{120}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+y}{\sqrt{x^2+y^2}-y}+\frac{x^4y}{24}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}-\frac{x^2y^3}{24}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}+\frac{y^5}{320}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}-\frac{77}{720}xy(x^2+y^2)^{3/2}+\frac{15}{96}xy^3(x^2+y^2)^{1/2}$$
$$f_5(x,y)=\frac{x^6}{720}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+y}{\sqrt{x^2+y^2}-y}+\frac{x^5y}{120}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}-\frac{x^3y^3}{72}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}+\frac{xy^5}{320}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}-\frac{29}{1200}y(x^2+y^2)^{5/2}+\frac{61}{864}y^3(x^2+y^2)^{3/2}-\frac{23}{480}y^5(x^2+y^2)^{1/2}$$

$$f_6(x,y)=\frac{x^7}{5040}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+y}{\sqrt{x^2+y^2}-y}+\frac{x^5y}{720}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}-\frac{x^4y^3}{144}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}$$
$$+\frac{x^2y^5}{320}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}-\frac{y^7}{8064}\log\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{\sqrt{x^2+y^2}-x}-\frac{223}{50400}xy(x^2+y^2)^{5/2}$$
$$+\frac{473}{30240}xy^3(x^2+y^2)^{3/2}-\frac{169}{13440}xy^5(x^2+y^2)^{1/2}$$
……(10)

桁の中央即ち $y=0$ に於ける基礎地盤の沈下は (9) 式に於て $\xi=0$ と置けるものにして，その場合の $F_0(n\gamma, a, \xi)$ は次の如く示さる．

$$\left.\begin{aligned}
&F_0(n\gamma, a, o)=2\{f_0(1+n\gamma, a)-f_0(1-n\gamma, a)\}\\
&F_1(n\gamma, a, o)=2\{f_1(1+n\gamma, a)-f_1(1-n\gamma, a)\}\\
&F_2(n\gamma, a, o)=2\{f_2(1+n\gamma, a)-f_2(1-n\gamma, a)\}\\
&F_3(n\gamma, a, o)=2\{f_3(1+n\gamma, a)-f_3(1-n\gamma, a)\}\\
&F_4(n\gamma, a, o)=2\{f_4(1+n\gamma, a)-f_4(1-n\gamma, a)\}\\
&F_5(n\gamma, a, o)=2\{f_5(1+n\gamma, a)-f_5(1-n\gamma, a)\}\\
&F_6(n\gamma, a, o)=2\{f_6(1+n\gamma, a)-f_6(1-n\gamma, a)\}\\
&G_2(n\gamma, a, o)=2f_2(n\gamma, a),\quad G_4(n\gamma, a, o)=2f_4(n\gamma, a)\\
&G_6(n\gamma, a, o)=2f_6(n\gamma, a)
\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(11)$$

又桁の端 $y=b$ に於ける基礎地盤の沈下 w_b は $\xi=b/y=\alpha$ と置けるものにして $F_0(n\gamma, a, \xi)$, etc は次の如し．

$$\left.\begin{aligned}
&F_0(n\gamma, a, \alpha)=f_0(1+n\gamma, 2\alpha)-f_0(1-n\gamma, 2\alpha)\\
&F_1(n\gamma, a, \alpha)=f_1(1+n\gamma, 2\alpha)-f_1(1-n\gamma, 2\alpha)\\
&F_2(n\gamma, a, \alpha)=f_2(1+n\gamma, 2\alpha)-f_2(1-n\gamma, 2\alpha)\\
&F_3(n\gamma, a, \alpha)=f_3(1+n\gamma, 2\alpha)-f_3(1-n\gamma, 2\alpha)\\
&F_4(n\gamma, a, \alpha)=f_4(1+n\gamma, 2\alpha)-f_4(1-n\gamma, 2\alpha)\\
&F_5(n\gamma, a, \alpha)=f_5(1+n\gamma, 2\alpha)-f_5(1-n\gamma, 2\alpha)\\
&F_6(n\gamma, a, \alpha)=f_6(1+n\gamma, 2\alpha)-f_6(1-n\gamma, 2\alpha)\\
&G_2(n\gamma, a, \alpha)=f_2(n\gamma, 2\alpha),\quad G_4(n\gamma, a, \alpha)=f_4(n\gamma, 2\alpha)\\
&G_6(n\gamma, a, \alpha)=f_6(n\gamma, 2\alpha)
\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(12)$$

(11) 式と (12) 式とより對稱なる荷重の場合と同様に $b/l=\alpha$ なる桁の端の沈下 $(w_b)_\alpha$ は幅が 2 倍なる桁の中央の沈下 $(w_0)_{2\alpha}$ の半分に等し，即ち

$$(w_b)_\alpha=\tfrac{1}{2}(w_0)_{2\alpha}\quad\cdots\cdots(13)$$

2. 基礎地盤表面の傾斜

基礎地盤表面の傾斜 $\dfrac{\partial w}{\partial x}$ は (4) 式より次の如く示さる．

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial w}{\partial x}=\frac{1-\sigma_2^2}{E_2}\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty\frac{A\alpha}{\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\cos\alpha x\cos\beta y\,d\alpha\,d\beta\\
&\text{但し}\qquad A=\frac{\sin\beta b}{\beta}(a_1B_1+a_2B_2+\cdots\cdots)
\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(14)$$

従つて (14) 式は次の積分を適當に組み合すことに依り (16) 式の如く求めらる.

$$\left.\begin{aligned}
I_0&=\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty \frac{\sin\beta b\cos\alpha l}{\beta\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\cos\beta y\cos\alpha x\,d\alpha\,d\beta\\
I_1&=\frac{8}{\pi^2}\int_2^\infty\int_2^\infty \frac{\sin\beta b\sin\alpha l}{\alpha\beta\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\cos\beta y\cos\alpha x\,d\alpha\,d\beta\\
I_2&=\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty \frac{\sin\beta b(1-\cos\alpha l)}{\alpha^2\beta\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\cos\beta y\cos\alpha x\,d\alpha\,d\beta\\
I_3&=\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty \frac{\sin\beta b(\alpha l-\sin\alpha l)}{\alpha^3\beta\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\cos\beta y\cos\alpha x\,d\alpha\,d\beta\\
I_4&=\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty \frac{\sin\beta b\left(\cos\alpha l+\frac{\alpha^2l^2}{2}-1\right)}{\alpha^4\beta\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\cos\beta y\cos\alpha x\,d\alpha\,d\beta\\
I_5&=\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty \frac{\sin\beta b\left(\sin\alpha l-\alpha l+\frac{\alpha^3l^3}{6}\right)}{\alpha^5\beta\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\cos\beta y\cos\alpha x\,d\alpha\,d\beta\\
I_6&=\frac{8}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty \frac{\sin\beta b\left(1-\cos\alpha l-\frac{\alpha^2l^2}{2}+\frac{\alpha^4l^4}{24}\right)}{\alpha^6\beta\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\cos\beta y\cos\alpha x\,d\alpha\,d\beta
\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(15)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x}=\frac{1}{\pi}\frac{1-\sigma_2^2}{E_2}(a_1C_1+a_2C_2+a_3C_3+\cdots\cdots)\quad\cdots\cdots(16)$$

但し

$$\left.\begin{aligned}
C_1&=\frac{\pi}{l}(-lI_0+I_1),\qquad C_2=\frac{\pi}{l^2}(-l^2I_0+2lI_1-2I_2)\\
C_3&=\frac{\pi}{l^3}(-l^3I_0+3l^2I_1-6lI_2+6I_3)\\
C_4&=\frac{\pi}{l^4}(-l^4I_0+4l^3I_1-12l^2I_2+24lI_3-24I_4)\\
C_5&=\frac{\pi}{l^5}(-l^5I_0+5l^4I_1-20l^3I_2+60l^2I_3-120lI_4+120I_5)\\
C_6&=\frac{\pi}{l^6}(-l^6I_0+6l^5I_1-30l^4I_2+120l^3I_3-360l^2I_4+720lI_5-720I_6)
\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(17)$$

(15) 式に示す積分値を求め (17) 式に代入すれば $\frac{\partial w}{\partial x}$ の係数 C_1, C_2, etc は次の如く示さる.

$$\begin{aligned}
C_1&=\tfrac{1}{2}\{-F(n\gamma,\alpha,\xi)+F_0(n\gamma,\alpha,\xi)\}\\
C_2&=\tfrac{1}{2}\{-F(n\gamma,\alpha,\xi)+2F_0(n\gamma,\alpha,\xi)-2F_1(n\gamma,\alpha,\xi)\}\\
C_3&=\tfrac{1}{2}\{-F(n\gamma,\alpha,\xi)+3F_0(n\gamma,\alpha,\xi)-6F_1(n\gamma,\alpha,\xi)+6F_2(n\gamma,\alpha,\xi)\}\\
C_4&=\tfrac{1}{2}\{-F(n\gamma,\alpha,\xi)+4F_0(n\gamma,\alpha,\xi)-12F_1(n\gamma,\alpha,\xi)+24F_2(n\gamma,\alpha,\xi)\\
&\qquad-24F_3(n\gamma,\alpha,\xi)+48G_3(n\gamma,\alpha,\xi)\}\\
C_5&=\tfrac{1}{2}\{-F(n\gamma,\alpha,\xi)+5F_0(n\gamma,\alpha,\xi)-20F_1(n\gamma,\alpha,\xi)+60F_2(n\gamma,\alpha,\xi)\\
&\qquad-120F_3(n\gamma,\alpha,\xi)+120F_4(n\gamma,\alpha,\xi)\}
\end{aligned}$$

$$C_6=\frac{1}{2}\{-F(n\gamma,\ a,\ \xi)+6F_0(n\gamma,\ a,\ \xi)-30F_1(n\gamma,\ a,\ \xi)+120F_2(n\gamma,\ a,\ \xi)$$
$$-360F_3(n\gamma,\ a,\ \xi)+720F_4(n\gamma,\ a,\ \xi)-720F_5(n\gamma,\ a,\ \xi)+1440G_5(n\gamma,\ a,\ \xi)\}$$

但し　　$n\gamma=x/l$,　　$a=b/l$,　　$\xi=y/l$

上式に於ける $F_0(n\gamma,\ a,\ \xi)$, $F_1(n\gamma,\ a,\ \xi)$, $F_2(n\gamma,\ a,\ \xi)$ 等は第 1 報の附錄 I の (12) 式に示すものと全く同一にして，附錄 I に含まれざる $F(n\gamma,\ a,\ \xi)$ は次の如く示さる．

$$F(n\gamma,\ a,\ \xi)=f\{(1+n\gamma),\ (a+\xi)\}+f\{(1+n\gamma),\ (a-\xi)\}$$
$$+f\{(1-n\gamma),\ (a+\xi)\}+f\{(1-n\gamma),\ (a-\xi)\}$$

但し　　$f(x,y)=\log\dfrac{\sqrt{x^2+y^2}+y}{\sqrt{x^2+y^2}-y}$

而して我々の必要なるは $x=0$, 即ち $n\gamma=0$ なる點の値にして，その場合の $F(n\gamma,\ a,\ \xi)$ etc の値は次の如し，

$$\left.\begin{aligned}
&F(o,\ a,\ \xi)=2\{f(1,\ a+\xi)+f(1,\ a-\xi)\}, && F_0(o,\ a,\ \xi)=2\{f_0(1,\ a+\xi)+f_0(1,\ a-\xi)\}\\
&F_1(o,\ a,\ \xi)=2\{f_1(1,\ a+\xi)+f_1(1,\ a-\xi)\}, && F_2(o,\ a,\ \xi)=2\{f_2(1,\ a+\xi)+f_2(1,\ a-\xi)\}\\
&F_3(o,\ a,\ \xi)=2\{f_3(1,\ a+\xi)+f_3(1,\ a-\xi)\}, && F_4(o,\ a,\ \xi)=2\{f_4(1,\ a+\xi)+f_4(1-a-\xi)\}\\
&F_5(o,\ a,\ \xi)=2\{f_5(1,\ a+\xi)+f_5(1,\ a-\xi)\}, && G_5(o,\ a,\ \xi)=f_5(o.\ a+\xi)+f_5(o,\ a-\xi)\\
&G_5(o,\ a,\ \xi)=f_5(o,\ a+\xi)+f_5(o,\ a-\xi)
\end{aligned}\right\}$$
……(18)

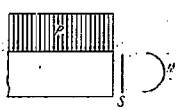
(18) 式より $b/l=a$ なる桁の端の地盤表面の傾斜 $\left(\dfrac{\partial w_b}{\partial x}\right)_a$ は幅が 2 倍なる桁の中央の傾斜 $\left(\dfrac{\partial w_0}{\partial x}\right)_{2a}$ の半分に等しい．

$$\left(\frac{\partial w_b}{\partial x}\right)_a=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w_0}{\partial x}\right)_{2a} \quad\cdots\cdots(19)$$

附錄 II　桁の撓度

座標及附號は本文に於けるものと同一なるものを使用し，bending moment (M), shear (S) 及荷重 p の正の方向は第 1 圖に示す如くとり，桁の撓度 v は下方を正とする時は v, M, S 及 p の間には次式に示す關係あり．

$$\frac{d^4v}{dx^4}=\frac{p}{E_1I},\quad M=E_1I\frac{d^2v}{dx^2},\quad S=E_1I\frac{d^3v}{dx^3} \quad\cdots\cdots(1)$$



第 16 圖

1. 厚さ一樣なる桁が兩端にて自由なる場合 (非對稱荷重の作用する場合)

桁の撓度 v_q と地盤反力 q との間には次の關係あり

$$\frac{d^4v_q}{dx^4}=-\frac{2bq}{E_1I}$$

q の代りに本文の (4) 式に示す値を代入し積分すれば，v_q は次の如し．

$$v_q=-\frac{2bl^4}{E_1I}\left[\frac{a_1}{2\cdot3\cdot4\cdot5}\left(\frac{x}{l}\right)^5+\frac{a_2}{3\cdot4\cdot5\cdot6}\left(\frac{x}{l}\right)^6+\cdots+\frac{a_n}{(n+1)(n+2)(n+3)(n+4)}\left(\frac{x}{l}\right)^{n+4}+\cdots\right]$$
$$+\frac{c_1}{6}x^3+\frac{c_2}{2}x^2+c_3x+c_4 \quad\cdots\cdots(2)$$

荷重非對稱にして，兩端自由なるを以て (2) 式の積分常數 c_1, c_2, c_3, c_4 は次の限界條件より求めらる．

$$x=0;\quad v_q=0,\qquad x=l;\quad \frac{d^2v_q}{dx^2}=0,\quad \frac{d^3v_q}{dx^3}=0 \quad\cdots\cdots(3)$$

(2) 式を (3) 式に代入して c_1, c_2, c_4 を求むれば次の如し．

$$c_1=\frac{2bl}{E_1I}\left\{\frac{a_1}{2}+\frac{a_2}{3}+\cdots\cdots+\frac{a_n}{n+1}+\cdots\cdots\right\}$$
$$c_2=-\frac{2bl^2}{E_1I}\left\{\frac{a_1}{3}+\frac{a_2}{4}+\cdots\cdots+\frac{a_n}{n+2}+\cdots\cdots\right\},\quad c_4=0$$

是等の値を (2) 式に代入し v_q, M_q を求むれば夫々次の如し．

$$\left.\begin{aligned}
&v_q\frac{bl^4}{E_1I}(a_1B_1+a_2B_2+\cdots\cdots)+c_3x\\
&\text{但し}\qquad B_1=-\frac{2}{2\cdot3\cdot4\cdot5}\left(\frac{x}{l}\right)^5+\frac{1}{3\cdot2}\left(\frac{x}{l}\right)^3-\frac{1}{3}\left(\frac{x}{l}\right)^2\\
&B_2=-\frac{2}{3\cdot4\cdot5\cdot6}\left(\frac{x}{l}\right)^6+\frac{1}{3\cdot3}\left(\frac{x}{l}\right)^3-\frac{1}{4}\left(\frac{x}{l}\right)^2\\
&B_3=-\frac{2}{4\cdot5\cdot6\cdot7}\left(\frac{x}{l}\right)^7+\frac{1}{3\cdot4}\left(\frac{x}{l}\right)^3-\frac{1}{5}\left(\frac{x}{l}\right)^2\\
&B_4=-\frac{2}{5\cdot6\cdot7\cdot8}\left(\frac{x}{l}\right)^8+\frac{1}{3\cdot5}\left(\frac{x}{l}\right)^3-\frac{1}{6}\left(\frac{x}{l}\right)^2\\
&B_5=-\frac{2}{6\cdot7\cdot8\cdot9}\left(\frac{x}{l}\right)^9+\frac{1}{3\cdot6}\left(\frac{x}{l}\right)^3-\frac{1}{7}\left(\frac{x}{l}\right)^2\\
&B_6=-\frac{2}{7\cdot8\cdot9\cdot10}\left(\frac{x}{l}\right)^{10}+\frac{1}{3\cdot7}\left(\frac{x}{l}\right)^3-\frac{1}{8}\left(\frac{x}{l}\right)^2\\
&M_q=-2bl^2\left\{\frac{a_1}{2\cdot3}\left(\frac{x}{l}\right)^3+\frac{a_2}{3\cdot4}\left(\frac{x}{l}\right)^4+\frac{a_3}{4\cdot5}\left(\frac{x}{l}\right)^5+\cdots\cdots\right\}\\
&+2bl^2\left(\frac{a_1}{2}+\frac{a_2}{3}+\frac{a_3}{4}+\cdots\cdots\right)\left(\frac{x}{l}\right)-2bl^2\left(\frac{a_1}{3}+\frac{a_2}{4}+\frac{a_3}{5}+\cdots\cdots\right)
\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(4)$$

2. 厚さ一樣なる桁が兩端にて自由なる時

本文の第 4 圖 (*b*) なる荷重による桁の撓度 v_p を求める．

$0<x<l_1$ 間の撓度 v_3，　$l_1<x<l_1+d$ 間の撓度 v_2，　$l_1+d<x<l$ 間の撓度 v_1

とすれば次の微分方程式が成立する．

$$\frac{d^4v_1}{dx^4}=0,\qquad \frac{d^4v_2}{dx^4}=\frac{2bf_0}{E_1I},\qquad \frac{d^4v_3}{dx^4}=0 \quad\cdots\cdots(5)$$

限界條件は次の如く

$$x=l;\quad \frac{d^3v_1}{dx^3}=0,\quad \frac{d^2v_1}{dx^2}=0,\qquad x=0;\quad \frac{dv_3}{dx}=0$$

$$x=l_1+d;\quad v_1=v_2,\quad \frac{dv_1}{dx}=\frac{dv_2}{dx},\quad \frac{d^2v_1}{dx^2}=\frac{d^2v_2}{dx^2},\quad \frac{d^3v_1}{dx^3}=\frac{d^3v_2}{dx^3}$$

$$x=l_1;\quad v_2=v_3,\quad \frac{dv_2}{dx}=\frac{dv_3}{dx},\quad \frac{d^2v_2}{dx^2}=\frac{d^2v_3}{dx_2},\quad \frac{d^3v_2}{dx^3}=\frac{d^3v_3}{dx^3}$$

(5) 式を解きて上記の限界條件に代入し常數を決定すれば v_p は次の如く求めらる．

$$\left.\begin{aligned} v_p&=\frac{bp_0l^4}{E_1I}\left[-\frac{1}{3}\frac{d}{l}\left(\frac{x}{l}\right)^3+\left(\frac{l_1}{l}\frac{d}{l}+\frac{1}{2}\frac{d^2}{l^2}\right)\left(\frac{x}{l}\right)\right]+e && 0<x<l_1\\ &=\frac{bp_0l^4}{E_1I}\left[\frac{1}{12}\left(\frac{x}{l}\right)^4-\frac{1}{3}\left(\frac{l_1}{l}+\frac{d}{l}\right)\left(\frac{x}{l}\right)^3+\frac{1}{2}\left(\frac{l_1}{l}+\frac{d}{l}\right)^2\left(\frac{x}{l}\right)^2-\frac{1}{3}\left(\frac{l_1}{l}\right)^3\left(\frac{x}{l}\right)\right.\\ &\qquad\left.+\frac{1}{12}\left(\frac{l_1}{l}\right)^4\right]+e && l_1<x<l_1+d\\ &=\frac{bp_0l^4}{E_1I}\left[\frac{1}{3}\left\{\left(\frac{l_1}{l}+\frac{d}{l}\right)^3-\left(\frac{l_1}{l}\right)^3\right\}\frac{x}{l}-\frac{1}{12}\left\{\left(\frac{l_1}{l}+\frac{d}{l}\right)^4-\left(\frac{l_1}{l}\right)^4\right\}\right]+e && l_1+d<x<l \end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(6)$$

彎曲力率 M_p は次の如し

$$\left.\begin{aligned} M_p&=bp_0l^2\left[\left(\frac{x}{l}\right)^2-2\left(\frac{l_1}{l}+\frac{d}{l}\right)\frac{x}{l}+\left(\frac{l_1}{l}+\frac{d}{l}\right)\right] && l_1<x<l_1+d\\ &=bp_0l^2\left[-2\left(\frac{d}{l}\right)\left(\frac{x}{l}\right)+\left(\frac{2l_1}{l}+\frac{d}{l}\right)\left(\frac{d}{l}\right)\right] && 0<x<l_1 \end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(7)$$

3. 兩端にて自由なる厚さ一樣なる桁に第 4 圖 (c) なる荷重が作用する時

桁の撓度 v_p を求めるに

$0<x<l_1$ 間の撓度 v_3，　$l_1<x<l_1+d$ 間の撓度 v_2，　$l_1+d<x<l$ 間の撓度 v_1

とすれば

$$\frac{d^4v_1}{dx^4}=0,\qquad \frac{d^4v_2}{dx^4}=\frac{2bp_0}{E_1I},\qquad \frac{d^4v_3}{dx^4}=0$$

限界條件は次の如く示され

$$x=l;\quad \frac{d^3v_1}{dx^3}=0,\quad \frac{d^2v_1}{dx^2}=0,\quad x=0;\quad v_3=0$$

$$x=l_1+d;\quad v_1=v_2,\quad \frac{dv_1}{dx}=\frac{dv_2}{dx},\quad \frac{d^2v_1}{dx^2}=\frac{d^2v_2}{dx^2},\quad \frac{d^3v_1}{dx^3}=\frac{d^3v_2}{dx^3}$$

$$x=l_1;\quad v_2=v_3,\quad \frac{dv_2}{dx}=\frac{dv_3}{dx},\quad \frac{d^2v_2}{dx^2}=\frac{d^2v_3}{dx^2},\quad \frac{d^3v_2}{dx^3}=\frac{d^3v_3}{dx^3}$$

是等兩式より v_p は次の如く求めらる．

$$
\left.\begin{aligned}
v_p&=\frac{bp_0l^4}{E_1I}\left[-\frac{1}{3}\frac{d}{l}\left(\frac{x}{l}\right)^3+\left(\frac{l_1}{l}\frac{d}{l}+\frac{1}{2}\frac{d^2}{l^2}\right)\left(\frac{x}{l}\right)^2\right]+ex && 0<x<l_1\\
&=\frac{bp_0l^4}{E_1I}\left[\frac{1}{12}\left(\frac{x}{l}\right)^4-\frac{1}{3}\left(\frac{l_1}{l}+\frac{d}{l}\right)\left(\frac{x}{l}\right)^3+\frac{1}{2}\left(\frac{l_1}{l}+\frac{d}{l}\right)^2\frac{x^2}{l^2}\right.\\
&\qquad\left.-\frac{1}{3}\left(\frac{l_1}{l}\right)\frac{x}{l}+\frac{1}{12}\left(\frac{l_1}{l}\right)^4\right]+ex && l_1<x<l_1+d\\
&=\frac{bp_0l^4}{E_1I}\left[\frac{1}{3}\left\{\left(\frac{l_1}{l}+\frac{d}{l}\right)^3-\left(\frac{l_1}{l}\right)\right\}\frac{x}{l}-\frac{1}{12}\left\{\left(\frac{l_1}{l}+\frac{d}{l}\right)^4-\left(\frac{l_1}{l}\right)^4\right\}\right]+ex && 0<x<l_1
\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(8)
$$

彎曲力率 M_p は次の如し

$$
\left.\begin{aligned}
M_p&=bp_0l^2\left[-2\frac{d}{l}\frac{x}{l}+\left(2\frac{l_1}{l}\frac{d}{l}+\frac{d^2}{l^2}\right)\right] && 0<x<l_1\\
&=bp_0l^2\left[\left(\frac{x}{l}\right)^2-2\left(\frac{l_1}{l}+\frac{d}{l}\right)\left(\frac{x}{l}\right)+\left(\frac{l_1}{l}+\frac{d}{l}\right)^2\right] && l_1<x<l_1+d\\
&=0 && l_1+d<x<l
\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(9)
$$

原點に於ける桁の傾斜 $\left(\frac{\partial v_p}{dx}\right)_{x=0}$ は

$$
\left(\frac{\partial v_p}{dx}\right)_{x=0}=e\quad\cdots\cdots(10)
$$

道路舗装用アスファルトの力學的特性に就て(其の1)

内務技師　島田八郎

目　次

緒　言……(2)
I 概　説……(2)
II 靜的荷重による實驗的研究……(5)
〔1〕一般的考察……(5)
〔2〕實驗裝置，實驗方法竝に試料……(8)
(a) 實驗裝置……(8)
(b) 實驗方法竝に數式……(9)
(c) 端部影響……(12)
(d) 試　料……(14)
III 實驗結果に就て……(15)
〔1〕一般的事項……(15)
(a) 實驗條件……(15)
(b) 試驗圓筒壁に於ける滑り……(16)
〔2〕實驗結果，特に變形～時間(θ～t)の關係……(16)
〔3〕可塑性(粘性係數)の正規性……(24)
〔4〕靜的實驗による彈性率……(27)
〔5〕可塑性(粘性係數)と温度との關係……(29)
IV 結　論……(32)
V アスファルトと水硝子の可塑性より見たる差異に就て……(34)
〔1〕一般的考察竝に試料……(34)
〔2〕實驗方法竝に結果……(34)
〔3〕理論的考察……(36)
(a) 變形(θ)～時間(t)の關係……(36)
(b) 歪力消失現象……(38)
(c) 可塑性範圍に於ける歪力消失現象……(40)
〔4〕要　約……(42)
VI 動的荷重による實驗的研究(其の1)……(42)
〔1〕概　説……(42)
〔2〕實驗裝置……(44)
(a) 實驗方法の選擇……(44)
(b) ピエゾ水晶による實驗……(45)
〔3〕實驗結果……(47)
〔4〕振動法による彈性特性の算定……(49)
(a) 一般論……(49)
(b) 本實驗に於ける特性……(52)
〔5〕要　約……(56)
VII I章～VI章の結論……(57)

緒　言

近世の鋪裝工學に於けるアスファルト類の位置は其の特異な性質により頗る重要である．卽ち鋪裝上層部にアスファルト單獨として使用され或ひは他の材料骨材との混和狀態に於て使用されてゐる．斯る現狀はアスファルトの鋪裝材料として他の材料の有しない特性によるものである．例へば交通車輛に對する摩擦係數，衝撃減衰性，其の他彈性的諸性質に就き特異なる性質を有し，其の性質を利用せる事は明な事實である．然るに特に彈性的（力學的)性質に就て研究されたもの少く從て性質に不明な點が多い．一方鋪裝は直接氣溫の影響を蒙る事著しく本邦中央部に於ても路面溫度は ＋30°C～－10°C 程度の範圍に變る，斯る程度の溫度差にてもアスファルトは他の土木材料と異なり所謂可塑性より脆性範圍に變り溫度差に對する感應度が頗る高い．勿論現今鋪裝材料工學上針度試驗，感應比，延性試驗等により其の特性は種々試驗研究されつゝあるも，其の實驗の困難なる爲めか，他の材料に就き行はれつゝある如き標準基本試驗により彈性力學上の係數を測定したものが少い，特に所謂彈性係數に就ては研究されたものが無い，蓋し材料試驗方法は目的の如何により定まるものであるから標準試驗の無き事を以て必ずしも研究の不充分を云々するものでないが，少くとも路面鋪裝の設計に工學的方法を適用する場合頗る不便が多い．例へば車輪荷重强度は車輪種類，車輛速度等によりて異り，鐵車輪に對し 30 kg/cm², ゴム車輪に對し 10 kg/cm² 程度の荷重を及ぼすとするも，アスファルトは斯る强度の荷重に對し如何なる性狀を呈するや明かでない．殊に從來の靜荷重程度の低速度及び停止車輪による場合，車輛速度 36 km/時 卽ち接觸時間 0.015 秒程度の高速度車輪による場合の兩者は自ら異り一層現象を複雜にする．以下述べる如く可及的に實驗方法を單純化し應力分布を明かにし，先づ實用上の目的を主眼とすれば溫度範圍 ＋30°C～－5°C に於けるアスファルトの特性を明かにする必要がある．本研究は斯る見地より道路鋪裝用アスファルトの各種力學的特性を實驗的に研究したものにして，先づ第Ⅰ章に於て實驗研究の範圍を吟味する．

Ⅰ. 概　說

道路鋪裝用アスファルトの力學的特性を研究するに先づ第一如何なる荷重分布の下に各種の抵抗力を實測すべきやを考察する必要がある．從つて輪帶の路面上に於ける作用を解析闡明する必要あるも，路面が所謂彈性的狀態或は非彈性的狀態にあるやにより，殊に輪帶が囘轉直線兩速度を有する時は，應力分布も種々異り其の概略と雖も簡單に記述する事は困難である．假りに一樣な應力の場合を考ふるもアスファルトの如き材料の呈する抵抗力は加ふる應力の狀況に依て著しく異るものである．卽ち壓力の大きさ，載荷速度の變化

に伴ふ歪力變化速度により或は高粘性液體の如く又は彈性體の如く變形するものである事は路面上に於て屢々經驗する所である．即ち路面上に於ける斯る兩極端の歪狀態は停止せる車輪，高速度にて疾走せるゴム車輪に於て實現せるものであらう．最も一般の場合は兩者の中間に在るものである．斯く車輪の運動狀態に應じ全く異る性狀を呈し殊に彈性的性狀を呈する場合は車體の共鳴現象を伴ひ，殊にアスファルトの不完全彈性特性等により減衰振動を生じ力學上頗る興味ある現象を生ずる．

一方都市騷音問題等に關連せる部門に屬するもので材料の力學的特性に密接な關係を有す二三の重大な事項がある．即ち交通車輛により路面上に發生せる振動性現象は其の彈性的特性により惹起され，或る一定の速度を以て其の振動性勢力を散逸しつゝ傳播し，周圍の工作物に影響を及ぼし，時に音響を伴ふ．斯る振動現象は一般に彈性係數（E）により左右されるものである．玆に云ふ彈性係數とは單に歪～應力に對する一關係といふ意味に解してをく，其の詳論は本研究により明かとなる．上述車輪による各種力學的現象及び彈性振動性勢力傳播の場合に於ても所謂內部抵抗により種々異る個々の場合を得，材料內部抵抗は彈性的勢力を逸散せしむる特性によるもので，其の表示方法として大別し 3 種に分類する事が出來る．今假りに斯る內部抵抗の種類により物質を分類し i) Maxwell 物質[1] ii) Voigt 物質[2] iii) Maxwell-Voigt 物質等と稱する．各々には應力と歪の間に特種の關係が成立つてゐる．今簡單に示すと，下記 (1), (2), (3) 式の如くなる，但し $\tilde{\sigma}$; 應力，$\tilde{\varepsilon}$; 歪，t; 時間，β_0, γ, η; 物質に特有な常數を示す．

i) Maxwell 物質*　$$\dot{\tilde{\sigma}}=\frac{1}{\beta_0}\left(\dot{\tilde{\varepsilon}}-\frac{1}{\eta}\tilde{\sigma}\right) \quad \cdots\cdots(1)$$

ii) Voigt 物質　$$\tilde{\sigma}=\frac{1}{\beta_0}\tilde{\varepsilon}+\gamma\dot{\tilde{\varepsilon}} \quad \cdots\cdots(2)$$

iii) Maxwell-Voigt 物質　$$\dot{\tilde{\sigma}}=\frac{1}{\beta_0}\left(\dot{\tilde{\varepsilon}}-\frac{1}{\eta}\tilde{\sigma}\right)+\gamma\ddot{\tilde{\varepsilon}} \quad \cdots\cdots(3)$$

後章各論に於て上式の詳細に就き論ずるも，(1), (2), (3) 式の $\left(\frac{1}{\beta_0}\right)$, η, γ は通常の彈性係數粘性係數，固體粘性係數に相當するものである．各式の特性を述ぶれば，

(1) 式には一定の應力（$\tilde{\sigma}$）狀態で歪（$\tilde{\varepsilon}$）の無限に增大する特性がある．

(2) 式には歪（$\tilde{\varepsilon}$）の應力（$\tilde{\sigma}$）に直ちには伴はず後れる特性がある．

---

1) J.C. Maxwell: On the Dynamical Theory of Gases, Phil. Mag. 1868, 35. 133, Phil. Trans., 157, 52, 1867.

2) Voigt: Ueber innere Reibung fester Körper insbesondere der Metalle, Ann. Physik, Bd. 47, S. 671, 1892.

* 玆に云ふ Maxwell 物質，Voigt 物質は又 "elastico-viscous" "visco-elastic" と稱へらる．後者を Jeffreys は "firmo-viscous" と稱ふ．

(3) 式は (1), (2) 式の特性の共に現れる場合である.

(1) 式の極限の場合は液體であり, (2) 式は金屬材料等固體に於ける振動現象に用ひられるもので通常容積粘性係數 (Voluminal solid viscosity, Normal solid viscosity) λ'. 及び定積粘性係數 (Equi voluminal, distortional solid viscosity) μ', を用ひ (2) 式の $(\gamma\dot{\varepsilon})$ の項に對應し, $\lambda'\frac{\partial e}{\partial t}$, $\mu'\frac{\partial \phi}{\partial t}$ を用ふ, 但し e; 容積歪, ϕ; 定積歪を示す. (1) 式は一般に所謂 Maxwell の垂力消失現象を示すものである.

以上の3種の物質の力學上の特性は全く異るものである.

一方鋪裝用アスファルトの路面上に於ける狀況を考察するに上述分類の各異る物質として存在する. 即ち振動的現象に對しては外荷重に應じ異なるも $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ (E; 彈性率, ρ; 密度) の一定値を有し自己振動を發生する場合あるも, 載荷速度の減少又は應力强度增加に伴ひ斯る彈性的特性は次第に消失し, 靜的荷重に於ては可塑性を顯著に示し高粘性流をなす. 之れ明かに Voigt 物質より Maxwell 物質に轉化せるものである. 斯くの如き狀態なれば其の力學的特性を研究するには少くとも荷重の2變數, 即ち載荷速度, 强度とアスファルトの特性との關係を明かにする必要がある.

以下實用上の便宜から其の條件を 2, 3 分類する. 載荷速度, 方向性等により分類する事が出來る. 即ち

方向性に就て
- (i) 單一方向的のもの (靜荷重によるもの)
- (ii) 反復方向的のもの
  - A 自己振動
  - B 强制振動

の2種を考ふに (ii) は主に週期的現象にて, 又載荷速度として外力振動數を (f) とすれば供試體のす法等により (A) 供試體が自己振動狀態に入る場合, (B) 强制振動狀態に入る場合とに上表の如く分類する事が出來る.

荷重の大さに從つて變形量も荷重條件により種々異るものでアスファルトに於ては頗る重要なものである, 下記の3種に便宜上分類する,

變形量に就て
- (i) 共振, 非共振狀態に於ける音波又は類以のエネルギー傳播に對する彈性特性
- (ii) 路面上に於ける振動等一般工學的現象の程度の變形量に對する彈性的特性
- (iii) 靜荷重に於ける永續變形

以上の3分類によればアスファルトの路面上の特性は主として (ii), (iii) の狀態に於けるものである. (i) の場合も材料學的に考察すれば頗る重要なものであるが本研究は特に(i)を省略す.

斯くの如く載荷速度及び變形量より判斷し道路鋪裝用アスファルトの力學的特性を明かにせん爲め問題を２分し，研究を進めた．卽ち

靜的荷重による研究．　動的荷重による研究

に分ち實驗的に其の性狀を檢討した．後述の如くアスファルトの力學的特性を明瞭に理解する爲め，一見アスファルト類似の力學的特性を持つと考へられてゐる水硝子に就き實驗した結果をも參考として添附す．兩者は可塑性の點より類似せる如く見ゆるも或る種の材料力學上の特性（歪力消失現象等）に於て全く異る性狀を呈するもので兩者を對比する事は頗る有意義である．

更に本研究に於ては實驗方法の意義を可及的分析考察し實驗方法が如何に試料を Voigt 物質又は Maxwell 物質として取扱ふかを吟味した．Maxwell 物質としての實驗に於ても Maxwell 歪力消失現象の測定し得る場合と否との理由をも明かにし道路鋪裝用 アスファルトを各種の方向より考察し，其の性狀を明かにし將來の研究方向及び主要點をも吟味する事が出來た．

II. 靜的荷重による實驗的研究

〔1〕 一般的考察

第 I 章に述べた如く鋪裝用アスファルト の靜荷重狀態に於ける抗力を明かにするには變形量を測定し I 章 Maxwell 物質性狀式に代入し粘性係數として斯かる材料の可塑係數を求める必要がある．斯かる材料の可塑的流れを伴ふ場合には各種形式の實驗方法が用ひられてゐる．可なり多數あるも 2, 3 代表的のものを表示すれば第１表の如きものを得．

可塑性物質に對する最近の研究に就き考察するに，G. Ungar[3] は半球形の可塑計（plastometer）を考案し，容器内の流れの狀態を研究 した．H. Umstätter[4] も圓錐形可塑計（plastometer）を考案し且つ一般可塑的物質の粘性係數（η）を論じ溫度との關係を考察し，溫度 50°C, 35°C に於て夫々 7.05×10^{5}, 2.97×10^{5} (C.G.S.) を得，且つ實驗も相當嚴密に行はれたが溫度範圍大略 52°C～34°C にて道路鋪裝用材としては不充分である．其の他 Pochettino[5] は溫度範圍を 9°C～50°C, 34°～80°, 80°C 以上の３階段に分ち，各範圍に

3) Georg Ungar: Plastometrische Untersuchungen an hochkonsistenten Substanzen, (I) Kollod-Zst., 69, H. 1, 1934, s. 30. (II) Kollod-Zst., 70, H. 3, 1935, s. 77.

4) H. Umstätter: Zustandänderung zäher Systeme VIII; die Temperaturabhängigkeit der Viskosität der Asphalte, Kolloidst Beihefte, Bd. 39, H. 5–7, 1934, s. 264.
VII; Erweiterungen der Theorie auf fester Körper, Kolloid-Beihefte, Bd. 37, H. 7–9, 1932, S. 287.
IX; Viskosität und Elastizität, Kolloid-Zst., 1935, Bd. 70. H. 2, S. 174–
Hinshelwood Leipziger Vorträge 1928, 52. Hückel Leipziger Vorträge 1929, 93.

5) Pochettino: Nuovo Cimento; 8, 1914, 77.
Hatschek: Die Viskosität pechartiger Körper; Viskosität der Flüssigkeit,

第 1 表

Th. Schwedoff[6] (1889);	ゼラチン凝固物の粘性
Obermayer[7] (1877);	パラフィン並行六面盤の捩り，壓縮による粘性實驗
H. Glaser[8];	樹脂～タールタン油混和固形物の圓筒内に於ける流れと Poiseuille 法測との關係
G. F. C. Searle[9];	回轉捩り測器による高粘性物質粘性の研究
F. T. Trouton[10];	ピッチに對する剪應狀態直壓縮狀態に於ける粘性係數を夫々 μ, λ とし前者の値は水平梁の懸垂變形より求め $\lambda=9.6\times10^7$ (C.G.S.), $\mu=3.2\times10^7$ (C.G.S.) 16°C を得，$\mu=\frac{1}{3}\lambda$ の成立つ事を明かにす
Boris Weinberg[11];	ピッチ，パラフィン，アスファルト等は勿論鉛岩鹽等に對し種々實驗方法を吟味した，其の内アスファルト粘性係數は (1.4～4～8.1)×10[10] (C.G.S.) (18°～15°C) 1.2×10[5] (C.G.S.) 50°C である

於て夫々回轉圓筒法，ストーク落球法，毛細管を用ひ實驗しピッチに就き粘性係數 $\eta=2.31\times10^{10}$ (C.G.S.) (90°C), $\eta=1.19\times10^{9}$ (C.G.S.) (99.9°C) を得，彈性係數として $E=720$ (C.G.S.) 9.8°C を得たと報告されてゐるが原著によらず詳細不明である．仮田氏[12]はピッチ様物質の粘性～彈性 (viscoelastic と原著者稱す) 的性質を實驗的に研究し一種の彈性捩り載荷器を用ひ平衡狀態に至る過程より判斷し例へばピッチに就き溫度 19°C に於て $\eta=7.57\times10^{11}$ (C.G.S.) 其の他剛性係數をも測定されてゐるが同論文は明かに第Ⅰ章の材料分類によるに Voigt 物質としての取扱ひの様である．且つ溫度範圍は約 19°C～80°C である．

鋪裝上靜荷重による現象は稍〻趣を異にし Maxwell 物質としての性狀を明かにする事を必要とするもので全く別個の意義を有するもので抵抗係數としての記號 (η) により其の意義を混同せざる事を要す．此點は各論と本研究の進むに從ひ一層明瞭となる．

更にアスファルトの可塑性の正規性 (粘性係數の物質常數にて應力狀態に無關係なる事) に關し B. Manning[13] が溫度 30°C～110°C の範圍に於てタール，アスファルトの粘性係數 η を研究し，タールは正規性液體なるも，アスファルトは前者と異り構造粘性を示すと

6) Th. Schwedoff (1889): J. de Physique, 1889, 341 (B. Weinberg 後掲 (8)).
7) Obermayer: Sitzber. Wien Akad., 75, 1877, 665.
8) Heinrich Glaser: Ueber die innere Reibung Zäher u. plastisch-fester Körper und die Giltigkeit des Poiseuilleschen Gesetzes, Ann. d. Physik, Bd. 22, 1907, 694.
9) G.F.C. Searle: A Simple Viscometer for very Viscous Liquids, Proc. Camb., Phil. Soc., 16, 600, 1912.
10) F.T. Trouton, E.S. Andrews: On the Viscosity of pitch-like Substances., Proc. Phys. Soc. London, 19, 1903–1905.
11) Boris Weinberg: Some Results of experimental Studies of Substances having considerable internal Friction, Ind. J. Phys. 1, 1926–1927, 279.
12) 仮田彪：Experiments on the Visco-elastic Properties of Pitch-like Materials (I), 東京帝大地震研究所彙報 13, 1, 1935, p. 198.
13) B. Manning: Viscosity of Pitch, Nature 30, 1933, 1009.

報告してゐる．C.U. Pittman, R.N. Traxler[14], は Bingham[15] 等の毛細管式可塑計を用ひアスファルトに就き溫度 15°C～130°C の範圍に於て實驗し $\eta=4\times10^{7}\sim9.1\times10^{2}$ (C.G.S.) の値を得，且つ溫度關係をも考察した．一方一般に土木材料用アスファルトの試驗に用ひられてゐる針度 (P) と粘性係數と如何なる關係にあるやを明かにするには針端より試料內部に於ける應力分布を知り且つ針の運動狀態を知れば粘性係數より推測する事が出來る，R.N. Traxler, C.U. Pittman, Burns[16] は針度 P (100 gr 5″) と前論文[17] の粘性係數 (η) とを比較し種々の溫度の實驗結果より …η (C.G.S.)$=5.13\times10^{9}/P^{1.93}$… なる實驗式を求めてゐるが各實驗結果には上式と相當偏差がある．針度として荷重開始よりの時間 (0～5″) を採らず最後に近き時間を適當に定め採れば後卒アスファルトの粘性の正規性なる事を考慮に入るれば一層合理的に針度 (P)～粘性係數 (η) の關係を定める事が出來る．勿論斯くすれば針度の意義が現行試驗法の與へるものとは自ら異る事明かである．

以上は各研究家のアスファルト類の可塑性に對する實驗的研究の現狀である．鋪裝用アスファルトの可塑性に對する傾向は之を推測し得るも靜的荷重狀態に於ける路面上の工學的要素に就き欠ける所が多い，例へば溫度範圍も高溫度の研究あるも攝氏 10° 以下のもの無く荷重强度との關係も明かにされてゐない，且つ實驗方法に關しても深く吟味したものが無い．

依て著者は下記の如き事項に研究の主眼點をおきつゝ，アスファルトの可塑性 (粘性係數) を實驗的に研究した．

（1） 鋪裝用アスファルトは正規性粘性物質なるや，卽ち粘性係數が應力の値に無關係な物質常數であるかを吟味する．

（2） 粘性係數～溫度關係の理論及實驗的考察

（3） 本研究は溫度範圍を大略路面上溫度を標準として差當り攝氏 −5°C～+35°C とした．

（4） 本研究の溫度範圍，荷重範圍に於て採用した實驗方法が材料の Maxwell 物質としての上記粘性係數を測定せるものなるやを吟味し，更に Maxwell 歪力消失現象有無との關係，進んで若し Voigt 物質としての特性の伴ふ場合との關係をも詳細に論じた．

以上の外荷重の値，載荷方法の詳細は次節に述ぶるも有要な上記の諸點を實驗的に明か

14) C.U. Pittman; R.N. Traxler: Rheological Properties of Asphalts. I. Effect of Temperatures, Physics, 5, 1934, PP. 221–224.

15) E.C. Bingham: On Plasticity and Fluidity, 1924.

16) R.N. Traxler, C.U. Pittman, E.B. Burns: Rheological Properties of Asphalts, II, Discussion of Penetration-Viscosity Relationships, Physics, 6, No. 2, 1935, 58.

17) R.N. Traxler, C.U. Pittman, E.B. Burns: 前揭 (16).

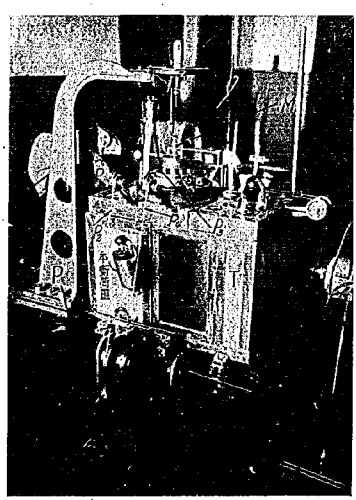
にする事が出來た.

〔2〕 實驗裝置, 實驗方法並に試料

本節に用ひる實驗方法としては II 章〔1〕節の檢討より判斷し材料の Maxwell 物質としての粘性係數を可及的一定せる剪應力の分布の下にて實驗する必要がある, 又簡單な載荷法による事が望ましい, 斯かる見解の下に實驗裝置方法を選擇した.

(a) 實驗裝置　Maxwell 物質としての粘性を明かにする爲め略, Searle[18] の用ひた實驗裝置に準じたが懸垂法及び載荷方法として試料に純然たる捩り能率を與へる樣改良した. 裝置の主要部は 2 個の同心圓筒を用ひ內外兩圓筒の間隙に一定の高さまで試料を裝入し外部圓筒を固定し內部圓筒は弱き燐靑銅のストリップにて吊される. 外荷重により一定の純然たる扭力のみを內部圓筒に與へ, 該圓筒の回轉角速度を測定し後述の數式に從つて必要なる粘性係數を得る.

內外兩圓筒の半徑を可なり相等しくすれば兩圓筒間の試料內の應力分布を可なり一樣のものとなし得るを以て[19]此種の實驗裝置としては簡單なる且つ最も合理的のものである. 寫眞第 1 は本研究實驗裝置を示すものである. T は恒溫水槽にて實驗中所定溫度に 0.2° C の精度に一定に保ち 1°C の場合は氷のみ使用, −5°C の場合は氷及び食鹽を使用した. 其の他 $P_1 \cdots P_6$ の滑車等の記號は附圖に於けるものと同一である, P_1, P_3 滑車には平衡荷重, P_2, P_4 滑車にはスプリング秤を經て有效荷重を加ふ. 第 1 圖, 第 2 圖は本裝置の平面圖及び垂直斷面圖を示す. 圖示の如く明かであるが簡單に記號を說明すれば,



寫眞第 1

A; 裝入せる試料

C_1; 固定外圓筒, 半徑 4 cm.

C_2; 內部圓筒, 半徑 3 cm.

M; 反射鏡にて光點を 1 m 隔てゝ置かれたる回轉ドラム上に結ばしめる.

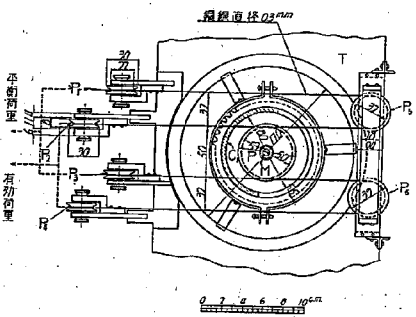
S; 燐靑銅ストリップ (厚さ 5/100 mm, 幅 83/100 mm)

18) G.F.C. Searle: 前揭 (6)

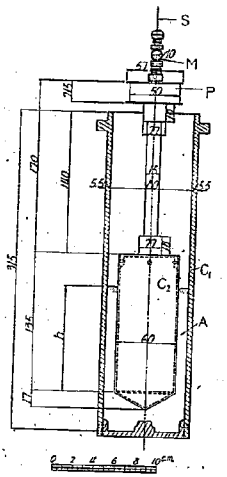
19), 20), 21) 島田八郎: 道路鋪裝用瀝靑乳劑の性狀に關する基本的研究 (第 2 報) 土木試驗所報告第 29 號.

P; 直徑 5 cm 圓筒にて扭り力率をうける．P_1P_3; P_2P_4 は 2 組の滑車にて P_1P_3 は平衡用荷重を傳へ，P_2P_4 は有效荷重を傳へ P_6P_6 滑車を經て切線的に P 圓筒に荷重を加ふ．

h; 內部圓筒に對する試料の深さにて第 2 圖にその位置を示す．實驗操作は簡單にて，今 P_1P_3 に吊せる鋼線（直徑 27/100 mm）に加はる荷重を P', P_2P_4 に吊せる



第　1　圖



第　2　圖

方の荷重を P'' とすれば圓筒 P の圓周には完全な扭り力率を與へ，其の外，力の合力は零である．

荷重による力率 $M=(P''-P')(M$ の直徑/2$)=P\times 2.5$ kg. cm である，斯かる荷重の下に 1 m 隔てる光點を M にて反射し C_2 圓筒の回轉を 1 m 隔てる回轉ドラム上に結ばしめ實驗を行つた．

(b) 實驗方法竝に數式　實驗方法の操作は裝置の部に說明した如く要するに同心二圓筒間內の材料の可塑的流れを測定するものであるから粘性係數の數値に差異あるも形式的には全く著者の試みた[20]凝青乳劑の場合と類似せるもので詳論は今省略するも內部圓筒に一定の扭り力能率 M を與へる時 C_1, C_2 兩圓筒の壁と試料間に滑り無き時 M は試料內に分布された各種の應力と釣合ふ．今實驗方法の意義を吟味する爲め第 I 章 (1), (2) 式より變形し (4), (5) 式を得，β_0 の代りに一般の形 β と書換ふ，

Maxwell 物質　$$\dot{\sigma}=\frac{1}{\beta}\left(\dot{\varepsilon}-\frac{1}{\eta}\sigma\right) \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\frac{\varepsilon}{\beta}=\sigma+\frac{1}{\tau_1}\int_0\sigma\,dt \quad \cdots\cdots(4)$$

$$\dot{\tilde{\sigma}}=\frac{1}{\beta}\dot{\tilde{\varepsilon}}-\frac{1}{\tau_1}\tilde{\sigma}\quad\cdots\cdots(1)'$$

Voigt 物質

$$\tilde{\sigma}=\frac{1}{\beta_0}\tilde{\varepsilon}+\gamma\dot{\tilde{\varepsilon}}\quad\cdots\cdots(2)$$

$$\tilde{\sigma}=\frac{1}{\beta}(\tilde{\varepsilon}+\tau_2\dot{\tilde{\varepsilon}})\quad\cdots\cdots(5)$$

但し $\tilde{\sigma}$, $\tilde{\varepsilon}$; 應力, 歪 $\dot{\tilde{\sigma}}$, $\dot{\tilde{\varepsilon}}$ 應力歪の時間微分, $1/\beta$; 彈性係數に相當するもの γ; 固體粘性係數 η; (可塑) 粘性係數 $\tau_1\tau_2$; [t] のデメンションを持つものにて (6) 式の關係を有す

$$\frac{\tau_1}{\beta}=\eta,\qquad \gamma=\frac{\tau_2}{\beta}\quad\cdots\cdots(6)$$

$1/\beta_0$ は說明の便の爲め第 I 章に於て $1/\beta$ の代りに用ひた實數係數である. 以上の $\tilde{\sigma}$, $\tilde{\varepsilon}$, …$1/\beta$…等は一般に複素數を示すもので實數値との關係は後章振動的現象に就て說明するも本章靜的荷重の場合は總て實數と解し置くも差閊へ無く, 一方 (6) 式等の各係數は全く同じ狀態に於て測定せる値なる事を要するものである事を特に附記す. τ_1: は Maxwell の歪力消失の時間常數, τ_2: は振動現象に於ける減衰作用を示す常數であり, $\tau_1=\infty$, $\tau_2=0$ が理想的彈性體を示す.

本裝置の如きは靜荷重下にて且つ一定の扭り力率 M を與へ相當長き時間測定を繼續するものであるから (4) 式の右邊第 2 項積分の上限は大となる. 若し試料の τ_1 が零に近いものであれば η, β の値如何に拘らず相當時間經過すれば $\frac{1}{\tau_1}\int\tilde{\sigma}dt$ の項が顯著に現れて來る. 卽ち $\tilde{\varepsilon}\propto\int\tilde{\sigma}\,dt$ 又は $\dot{\tilde{\varepsilon}}\propto\tilde{\sigma}$ で示され比例常數を適當にとる事により

$$\eta\dot{\tilde{\varepsilon}}=\tilde{\sigma},\qquad \gamma\dot{\tilde{\varepsilon}}=\tilde{\sigma}\quad\cdots\cdots(7)$$

となる. 形式的に斯かる特別の場合は Maxwell 物質も Voigt 物質も同一となるも其の意義は非常に異るものである. 兩者の抵抗性が混同され易いのは此の理由によるものである. 或る種の物質にては $\tau_2\neq\infty$ にて有限の値を持ち且つ $\tau_1\fallingdotseq 0$ に近き場合がある, 斯る場合本實驗にては, $\dot{\tilde{\varepsilon}}$ の一定値に達するまでは, Maxwell-Voigt 物質としての特性を現してをるが $\dot{\tilde{\varepsilon}}$ 一定に達せし後は (7) 式の內 Maxwell 物質としての粘性係數を與へる變形のみが顯著に現れる. Maxwell 物質として, 更に一つの特性は歪力消失現象を伴ふものであるが此の現象たるや $\tau_1=0$ なる Maxwell 物質の極限なる場合は寧ろ歪力消失速かにて明瞭に實測する事が出來ず, 反つて (τ_1) の値の有限の場合には明瞭に實測する事が出來る. 此の特性は該物質が更に Voigt 物質としての特性を發揮しをるや否とには全く無關係である勿論物質の兩特性の有無, 程度は個々の場合異るものである.

後節實驗部と對照する爲め (4) 式による實驗中に於ける歪力消失現象に就き簡單に述べ

んに，……$t=0$ に於て歪を $\tilde{\varepsilon}_0$（常數）とすれば (1) 式の解は

$$\tilde{\sigma}=\left(\frac{\tilde{\varepsilon}_0}{\beta_0}\right)e^{-t/\tau_1} \quad \cdots\cdots(8)$$

となる，e 羃に從ひ時間の經過中物質中に蓄積し得る應力の減少を來たすものである，斯る現象は歪增大中に於ても行れるもので且つ $\tilde{\varepsilon}_0$ として採るべき値は Maxwell 物質の定義に嚴密に從へば彈性的歪に相當し複素數歪の實數部を示すが後述實驗の結果によれば $(\tilde{\varepsilon}_0)$ としては可塑性部による虛數部をも含む一般複素數歪を採らねばならない事が分る．斯く相當論すべき問題あるも形式的に本實驗中には (8) の如き歪力消失現象が觀測されるものである．

以上の見解により本實驗裝置方法を考察するに物質の Voigt 特性の有無に關らず Maxwell 物質としての可塑性を測定してゐる．兩性の測定に於ける現れ方は荷重狀況及び時間的相互關係によるもので更に嚴密に相互の關係を明かにするには彈性波の傳播速度及び振動減衰の分散を明かにすればよい．後章に 1，2 斯る點に就き實驗結果を基として論ず．以下靜的荷重實驗に於ける數式を述べる．

試料の裝入程度，其の他種々の狀況により異るも外荷重による扭り力率は試料抗力と (9) 式で示す如く釣合ふと假定す．（(7) 式參照）

$$a\theta'+K=M=PD' \quad \cdots\cdots(9)$$

但し，θ：內部圓筒に固定せる反射鏡の回轉角（第 1，2，圖參照）にて扭り變形量に比例す．K：は試料及び荷重に及び應力分布等による抗力にて θ に比例する項以外のものを示す，最も單純の場合には $(k\theta)$ と置く．M：P は有効荷重，D' は圓筒 (P) の半徑を示すものである（I 章第 2 圖參照）．

上式を用ひ實驗結果を考察するに實驗裝置により屢〻述べた樣に其の意義全く異るものである，今假りに $K=k\theta$ と置けば解として

$$\theta=\frac{M}{k}\left(1-e^{-\frac{k}{a}t}\right) \quad \cdots\cdots(10)$$

を得るも (10) 式は Voigt 物質の一つの特性を實測せるもので任意の荷重による扭り力率を與へた場合 Maxwell 物質に於て常に成立せず，故に本實驗裝置による如き場合 (10) 式は成立しない．本實驗に於ては $K=$ 常數なる範圍にて且つ (9) 式の各項の意義は (7) 式左側のものである．

以上の如く本實驗に於ける抗力の數値の取扱ひは全く粘性流の場合と同一である．卽ち粘性流の式[21]を用ひ直ちに計算する事を得．

1 m (d) 隔てたるスケール上の振れ (s) より直ちに回轉角速度

$$\dot{\theta}=\frac{d\theta}{dt}=\omega=\frac{s}{2d} \quad \cdots\cdots(11)$$

を得. (9) 式より直ちに (12), (13), (14) 式を得.

$$M-K=M'=4\pi h'\eta\left(\frac{r_a^2r_i^2}{r_a^2-r_i^2}\right)\omega_i \cdots\cdots(12)$$

$$G=r\frac{\partial\omega}{\partial r}=\frac{2r_a^2r_i^2}{r_a^2-r_i^2}\cdot\frac{1}{r^2}\omega_i \cdots\cdots(13)$$

$$G_m=\frac{\int_{r_i}^{r_a}\left(r\frac{\partial\omega}{\partial r}\right)dr}{r_a-r_i}=+\frac{2r_ar_i}{r_a-r_i^2}\omega_i \cdots\cdots(14)$$

但し r_i, r_a: 內部圓筒外部圓筒半徑 3 cm, 4 cm, r: 半徑, ω_i, η: 內部圓筒回轉角速度 (11) 式, 及び Maxwell 物質範圍に於ける粘性係數, M': 有効扭り力率近似的に實驗結果をも參照し M と等しいと置く. G, G_m; 試料內の速度傾度及び其の平均値にて一般に, 應力$=\eta G$…… の關係にある. h': 試料有限深さにて第 2 圖に說明せる h と密接な關係にあり其の關係は後述端部影響の項に述べる.

以上の如く形式的には簡單化せる數式, 實驗操作により材料の可塑性 (粘性係數) を求める事が出來た, 常に Maxwell 物質の特性である τ_i 値の他の表現である歪力消失現象をも考慮に入れつゝ實驗した, 歪力消失現象の測定し得ない場合と雖も Maxwell, Voigt 物質の意義の相違を誤らない樣注意した.

(c) 端部影響　上述 (12) 式を用ひ實驗結果を代入するに際して h' の値を明かにする必要がある. h' は I 章第 2 圖の試料深さ h に端子影響の修正項を加ふべきである. 若し本實驗の荷重, 溫度範圍に於て下記 (15) 式にて示す事が出來れば頗る簡單である.

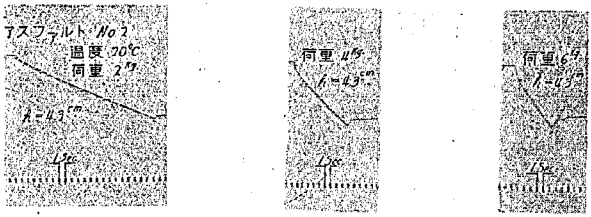
$$h+h''=h' \cdots\cdots(15)$$

h'' は修正値であるが, 常數なるや否やを吟味し其の値を定める, 先づ第 2 圖 h に 3 種の値を與へた. 第 5 圖の上部に之を示すも, 表示すれば第 1 表の如し. 試料としてはアスファルト No. 2 を使用した (アスファルトを端部修正値の如き標準試驗に使用した理由粘性係數の正規性によるもので其の詳細は後節を參照されたし) 實驗方法は全く一般の場合と同樣にて (詳しくは實驗結果の部參照) 所要の溫度 5°C, 20°C に一定時間保ち, 靜荷重 (P) を加へ變形～時間 (光點移動量 (s)～t, 卽ち回轉角 θ～t) 曲線を, 回轉ドラム上に寫した. 寫眞第 2, 第 3 は實驗番號 No. 1, No. 2 に對する, s～t 曲線である. [a] は各々溫度 20°C, [b] は溫度 5°C に對する結果である. 靜荷重は 3, 4 種用ひた卽ち……P=2; 4; 6; 8; 10 kg……を載荷した. No. 3 實驗は後述實驗結果の部に取纏めて報告する s～t 曲線 (θ～t) の形狀其の他特性に關する事は後述するも今此處に單に端

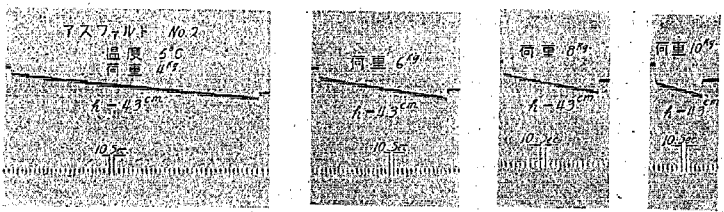
第 1 表

實驗番號	No. 1	No. 2	No. 3
h	4.3 cm	7.5 cm	9.3 cm

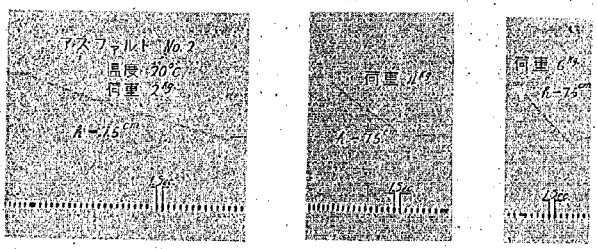
溫度　5°C, 20°C



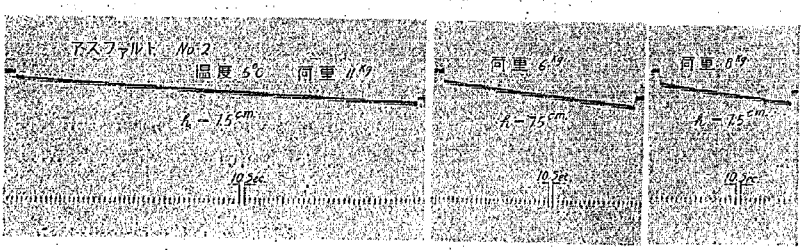
寫眞第 2 [a]



寫眞第 2 [b]



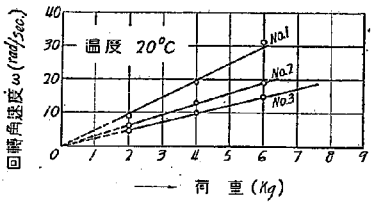
寫眞第 3 [a]



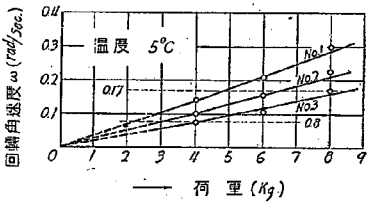
寫眞第 3 [b]

部影響 h'' を求める方法のみを記述す.

與へられた荷重 (P, 卽ち扭り力率) に對する θ～t 曲線より, 回轉角速度一定となりし $\omega\left(=\frac{d\theta}{dt}\right)$ と P の關係を求む.



第 3 圖



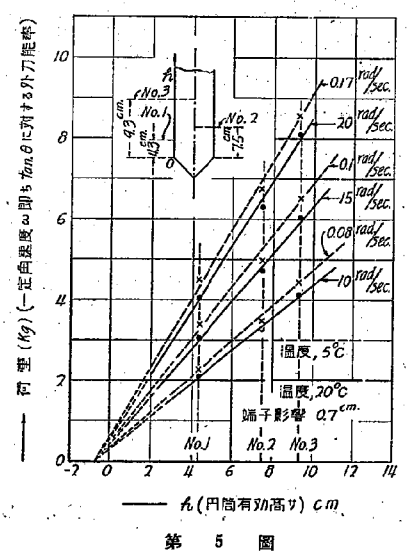
第 4 圖

第 3 圖, 第 4 圖は θ～t 曲線より求めた温度 20°C, 5°C に於ける ω(一定)～P 曲線である. 試料深さ異なる No. 1, No. 2, No. 3 の各實驗に於て, 本實驗荷重範圍に於て …ω～P 關係が全部直線的に出てゐる事が各實驗結果から判斷される. 粘性係數～荷重關係が頗る簡單になる. 端部修正値 h'' を求める爲め第 3, 第 4 圖より或る一定角速度 (ω) に對應する荷重 (P) を No. 1, No. 2, No. 3 の各場合に就き求める. 例へば

温度 20°C に對し,　　ω=20; 15; 10; rad/sec,

温度　5°C に對し,　　ω=0.17; 0.1; 0.08; rad/sec.

に對應する P を求め, 第5圖に斯く求めた P と試料深さ (h) との關係を示す. 同圖に示された實測點 ●× は夫々温度 20°C, 5°C に對するもので略ゝ直線上に來り各直線は原點 O に非らざる一點に交る. 交點は第 (15) 式の修正値 h'' を與へるもので本實驗により h''=0.7 cm を得. 以上の 3 種の試料深さ h の異る實驗より本研究の温度荷重範圍に於てアスファルトに就ては全く (12) 式の條件を滿足する狀態が成り立つ事を明かにすると同時に端部修正値 h'' を一義的に定める事が出來た. 以下諸實驗に於ては (15) 式の代りに (15′) 式で與へられる h' を用ふ.



第 5 圖

$$h+0.7\ \text{cm}=h' \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (15')$$

(d) 試料　本研究の試料とし現今道路鋪裝用材として使用されつゝあるものに就き即ち各種硬度のアスファルト 3 種, 稍ゝ硬質のタール 1 種に就

き其の特性を調べた．アスファルトは製造者に於て針度 40; 100; 150; と稱せるものなれども本實驗後測定せしに第2表の如き値を得た，タールは八幡製鐵所製のものにて第3表の如きものである．各試料は硬さ順に No. 1; No. 2; No. 3 (以上アスファルト) No. 4 ……と稱へる事とした．

第 2 表　試料アスファルト，針度表

針　度	34	68	144	>300
本研究試料番號	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4

第 3 表　試料タール表

比重	軟化點	引火點	燃燒點	エングラー粘度數
1.215	25°C	133°C	148°C	80°C: 28.8, 100°C: 7.7, 120°C: 3.2,

III. 實驗結果に就て

〔1〕 一般的事項

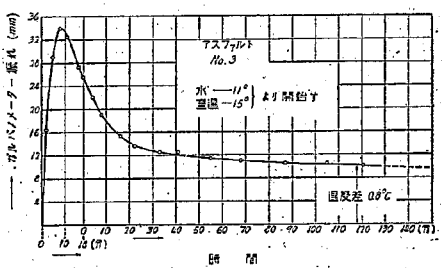
(a) 實驗條件　第 II 章〔2〕節 (d) 項の 4 種の試料に就き II 章〔2〕節の裝置，操作により實驗し，光點移動量 (s)～時間關係より回轉角速度 (ω)～荷重 (P) 關係を求め Maxwell 物質としての可塑性即ち粘性係數 (η) を求めたものである．實驗條件下記の如し．

溫度；　−5°C～30°C の範圍に於て 5°C 置きに變ず

荷重；　扭り力率を與ふ荷重とし有効荷重を P=2; 4; 6; 8; kg と變ず

試料有効深 h'；　各實驗毎の裝入深さ h に 0.7 を加ふ ((15′) 式)

アスファルトは一般に溫度に對する感應性頗る大なれば恒溫水槽は特に注意し常に ±0.1°C 以上の精度に溫度を一定に保つ．然るにアスファルトは溫度擴散率 0.001～0.0008 (C.G.S.) 程度[22]なれば試料が一定の溫度に達するには可なり長時間を要す，本研究に於ては各實驗毎に銅～コンスタンタン熱電對を用ひ一端を恒溫槽内に他端を試料内可及的内部圓筒に近く尖端を挿入し，ガルバノメーターの振れよりアスファルト試料内の溫度狀況を推測した．第 6 圖は其の一例を示すものである．總ての場合全く類似の傾向を示す，第 6 圖は室溫度 15°C の時，恒溫水槽

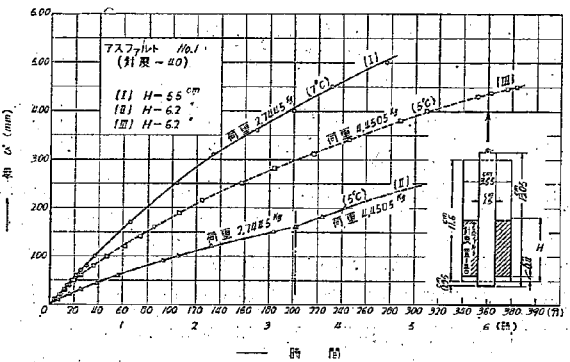


第　6　圖

22) 島田八郎；アスファルト及混和物の溫度擴散率に關する研究 (未發表)

を約 10 分を費し 11°C に下げし時一旦ガルバノメーターは溫度差に應じ振れ更に內部アスファルトの溫度低下するに從ひ振れの減少する有樣を示す．遂に溫度差零に到るべきであるが事實相當小なる溫度差以下は低下するに非常なる時間を要す．通常水槽所要溫度に達してより 3 時間後に實驗を開始した．試料溫度は恒溫水槽溫度と 0.8°～0.4°C 程度の差を有す．0.8°C は最も惡き場合で通常 0.5°C 以下であつた．

(b) **試驗圓筒壁に於ける滑り**　上述 (a) 項に實驗條件特に溫度に關する事を述べたが，更に重要な事は同心圓間に裝入された試料の眞鍮製圓筒の壁に於ける滑りの有無である．第 II 章〔2〕節 (14) 式は滑りの無き事を假定したものであるから一應實驗的に確めを



第　7　圖

く事が望しい．今內部の見得る爲め內徑 3.65 cm，高さ 11.6 cm の硝子製圓筒を用ひ內部に直徑 1.5 cm の眞鍮製圓棒を挿入し一定の溫度に保ちつゝ圓棒を引擧げ變形量を調べ，特にアスファルトとの接觸部の狀況を吟味した．第 7 圖は其の試驗結果を示すものでアスファルトは最も硬きものを用ひ溫度 5°C とし約 4 kg で引上げた．伸び～時間の關係は約 6 時間繼續實驗によるも伸び速度は漸次減少する傾向を示し本研究の場合と，異るも今此問題に深く立入らない事とする．兎に角アスファルトと各容器壁の接觸面の間に滑りの全く無き事を確めた．

〔2〕 **實驗結果，特に變形～時間 (δ～t) の關係**

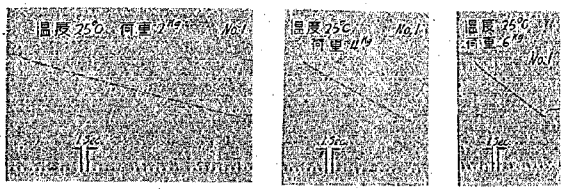
第 II 章〔2〕節に述べた如く本章〔1〕節 (a) に示せる各溫度，荷重（タールの場合のみ荷重 1 kg, 1.5 kg をも用ひた）の下に光點移動量～時間 (δ～t) を回轉ドラム上ブロマイドにとる．試料は第 II 章〔2〕節に說明せしものにて裝入深さ h は第 4 表に示す如し．

第 4 表　各實驗に於ける
試料深さ h

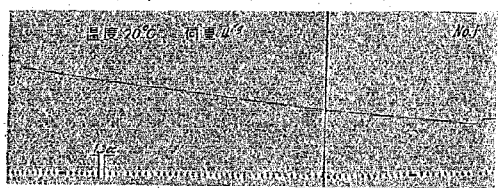
試料番號		h (cm)
アスファルト	No. 1	8.6
	No. 2	9.3
	No. 3	10.0
タール	No. 4	10.6

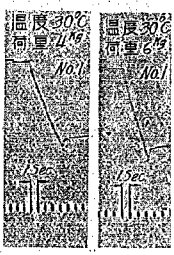
但し有効高さは之に 0.7 cm を加ふ

今便宜上試料番號を以て實驗番號をも兼ねしむる事とする．寫眞第 4; 5; 6; 7;はアスファルト No. 1; No. 2; No. 3; タール No. 4 に對する光點移動を示すもので縦軸は移動量横軸は時間を示し，圖示曲線の無數の小目盛に刻めるは 1 mm の移動に相當す．實驗溫度，荷重は寫眞内に記入して置いた．數多き故下記の様分類しをく．

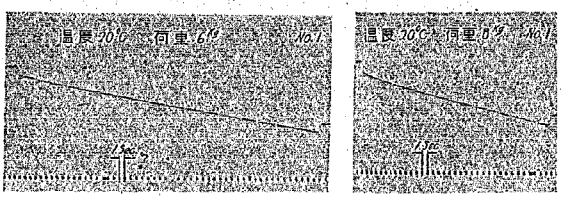


寫眞第 4 [b]

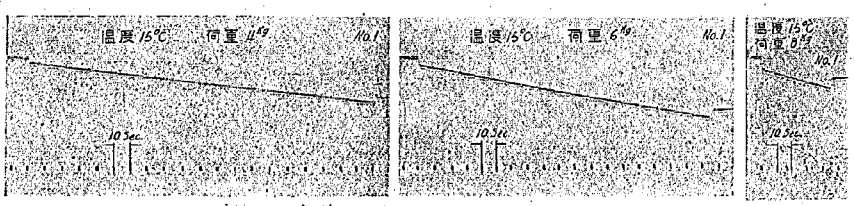




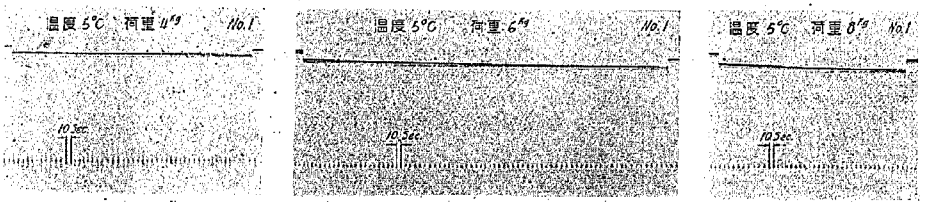
寫眞第 4 [a]



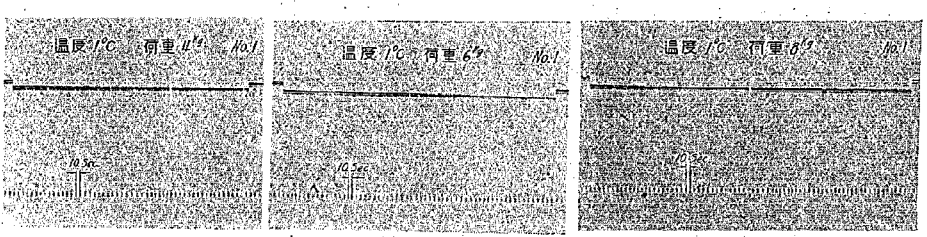
寫眞第 4 [c]



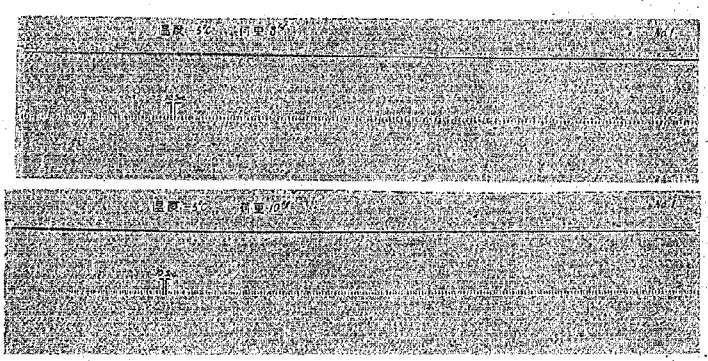
寫眞第 4 [d]



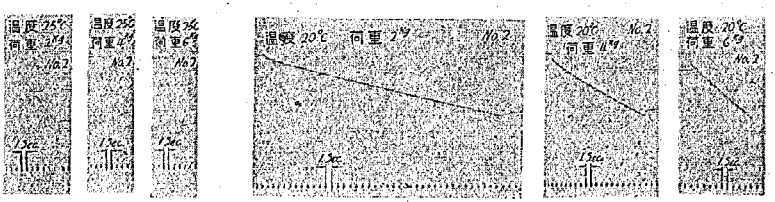
寫眞第 4 [e]



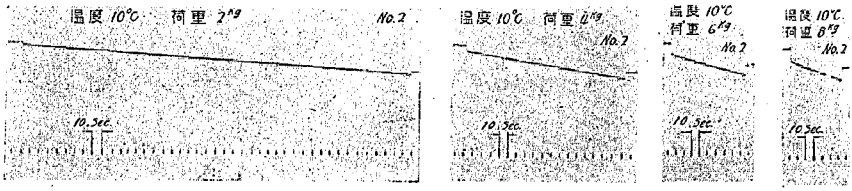
寫眞第 4 [f]



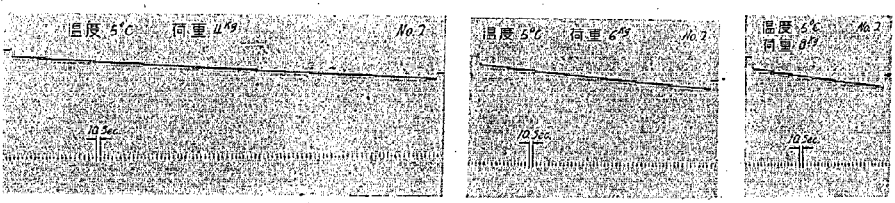
寫眞第 4 [g]



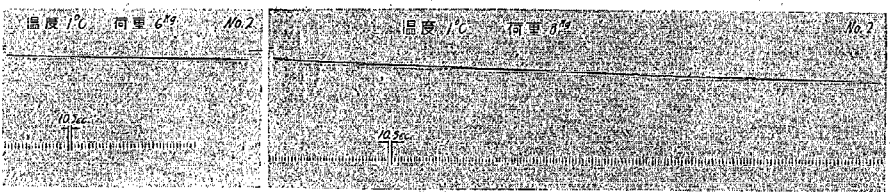
寫眞第 5 [a]　　寫眞第 5 [b]



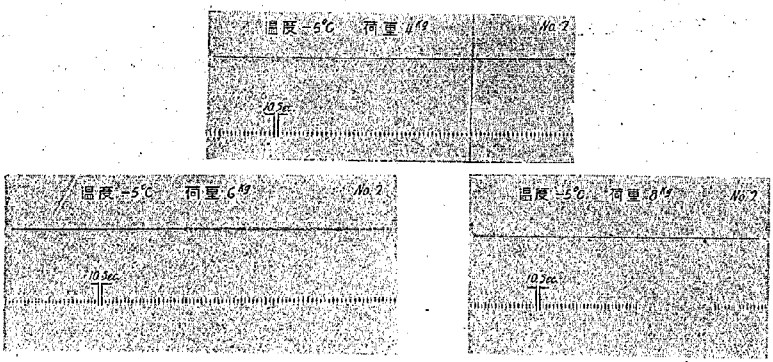
寫眞第 5 [c]



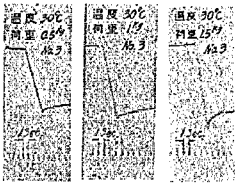
寫眞第 5 [d]



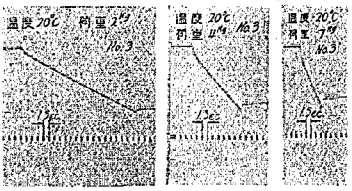
寫眞第 5 [e]



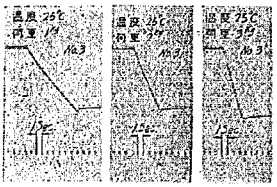
寫眞第 5 [f]



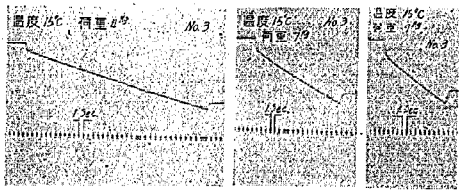
寫眞第 6 [a]



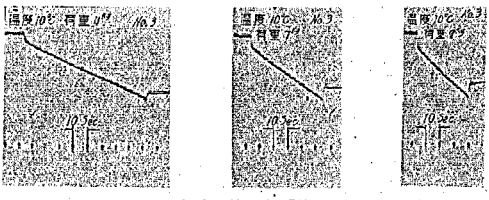
寫眞第 6 [c]



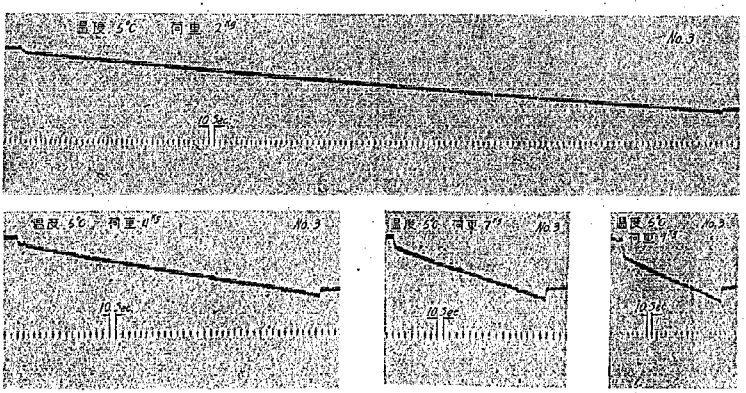
寫眞第 6 [b]



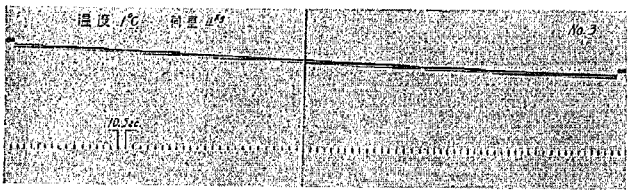
寫眞第 6 [d]

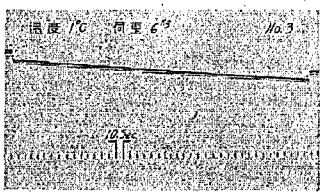


寫眞第 6 [e]

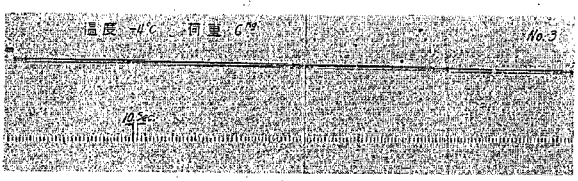


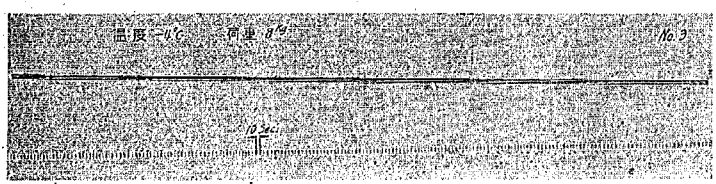
寫眞第 6 [f]



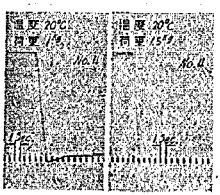


寫眞第 6 [g]

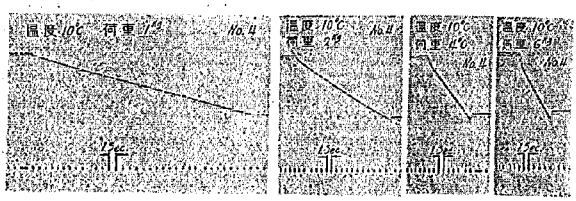




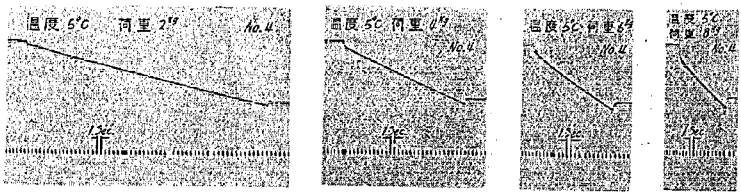
寫眞第 6 [h]



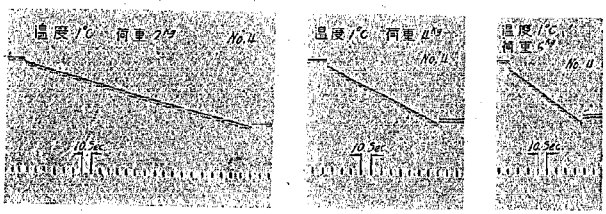
寫眞第 7 [a]



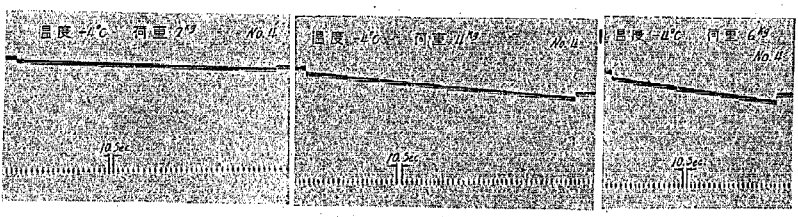
寫眞第 7 [b]



寫眞第 7 [c]

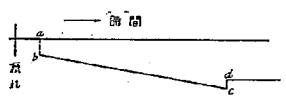


寫眞第 7 [d]



寫眞第 7 [e]

寫眞 [a]…[g] 等は各温度毎に取纏めた．温度及び荷重は各寫眞を參照されん事を希望す．以上の θ～t 關係は總て全く同じ傾向を示せるもので主要部分は直線と見做し得，温度荷重に拘らず第8圖の如き簡單な形式に從つてゐる．振れ (θ) は，寫眞中載荷初期極く僅少時曲線をなすもの一二あるも，大多數は時間と共に直線的に増大せるもので載荷と同時に急激に ab の振れを生ず，此部分は實驗裝置に伴ふ彈性的變形と試料の有する彈性的變形* の合計を示すもので ab の振れは荷重に略ゝ比例してゐる (*後節に詳論し彈性係數をも推定する) ab に續く振れ bc 部は上述の如く直線で，變形が c 點に進みし時荷重を取去れば急激に振れは戻り cd 部を示す．cd 部も ab 部と同じ樣に大體荷重に比例してゐるが ab に比較し少い．此點

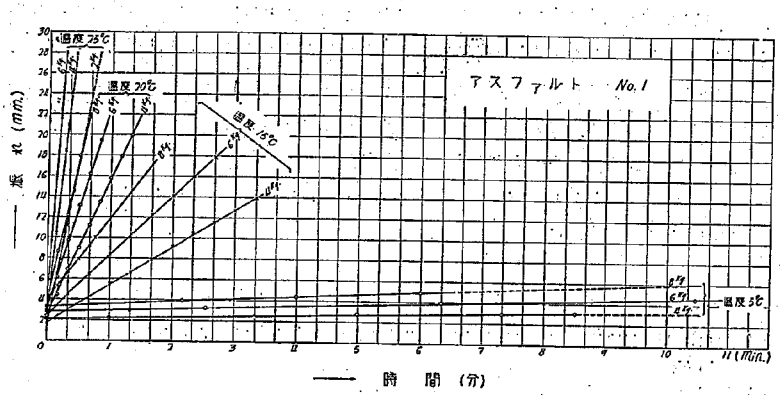


第 8 圖

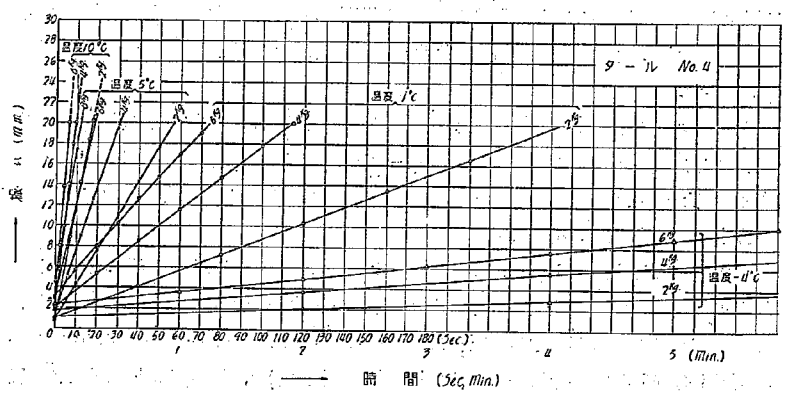
は彈性的變形の歪力消失現象に關聯せるものと推測するも其の關係を量的に明瞭にする事が出來なかつた．本節に於ては第 II 章〔2〕節及び本章〔1〕節に從ひ bc 部のみの變形を考察した．

アスファルト に於ては又荷重を繰返し加へる時其の變形に對する抗力卽ち粘性係數も其の都度相當異るもので，其の影響を可及的に除かねばならない，本實驗は每回一旦軟化點附近まで徐々に溫度を上昇せしめ更に徐々に冷却し所要の溫度とし實驗せしもので，斯くて履歷的影響を除去する事を得た．

$\omega\sim t$ 關係は上述寫眞第 4; 5; 6; 7; より明かであるが溫度及び荷重と變形との關係を總括的に明瞭にする爲め今或る試料に對する結果の一纏めにせしものを示す．各試料に就き試みたが此處には試料中最も硬きアスファルト No. 1; 及びタール No. 4; の場合卽ち寫眞第 4, 第 7 の全關係を夫々第 9 圖，第 10 圖に示す，但し第 9 圖に於ては溫度 1°C, −5°C は變形量僅少に過ぎ 30°C は過大に過ぎ三者の變形は記入を省略した．試料 No. 4 は軟質の爲め本實驗裝置では 10°C 以上に於て實驗出來ず，第 10 圖も 10°C まで記入してある．斯くの如く常に荷重に對し處女狀態を保ちつゝ實驗すれば第 9, 10 圖に明かなる如く $\theta\sim t$ 關係は可なり溫度，荷重に對し規則的に變化してゐる事が分る．他の 2 種のものも全く同樣である．以上實驗より得たる $\theta\sim t$ 關係より道路舖裝用アスファルトの靜的荷重に對する力學的特性の重要なるものを明かにする事が出來た，以下詳細に述べる．



第 9 圖



第 10 圖

〔3〕 可塑性 (粘性係數) の正規性

本研究の實驗方法の論說更に上述〔2〕節の $\theta \sim t$ 關係を考察するに試料の Maxwell 物質としての粘性係數の研究を對照とせる事明かであるが，アスファルト類の粘性係數 (η 又は τ_1) が其の應力分布狀況により異るか，卽ち η が物質の常數であるか 應力等其の荷重による函數で示し得るかを明かにする必要がある．アスファルトの斯る構造粘性 (structure viscosity) の有無は實用上より見るも靜荷重の程度に應じ見掛上の抗力の變化の有無を示すもので頗る重要な事項である．一方理論的方面より見るも材料の本質に關連し重要な資料を呈供するものである．著者は鋪裝用瀝青乳劑に就き此種特性に關し詳論[23]した，アスファルト，タールに就き斯る點に關する B. Manning[24]の研究あるも詳しき原論文に接しをらず詳細不明であるが，タールは粘性正規的であるがアスファルトは反つて構造粘性を示すと述べてゐる．然るに特に粘性正規性に關し述べてゐないが，Taxler[25], Umstätter[26] はアスファルトの實驗結果の取扱ひにその正規性を假定してゐる．斯る狀態であるから總ての試料に就き詳細に吟味した．

---

23) 島田八郎: 道路鋪裝用瀝青乳劑に關する基本的研究 (第 2 報), (第 3 報) 土木試驗所報告第 29, 30 號

24) B. Manning; 前揭 (13)

25) C.U. Pittman, C.N. Traxler etc.: 前揭 (14)

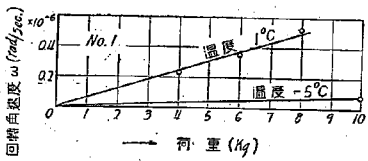
26) H. Umstätter: 前揭 (10)

先づ上記〔2〕節に得た $\theta \sim t$ 關係をもととし第8圖の曲線中 bc 部に相當する部分より回轉角速度 $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ を求め，各試料各溫度に於ける ω～荷重 (P) 關係を求めた．

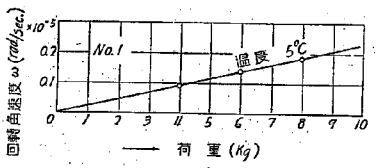
第 11 圖, [a], [b], [c], [d]…No. 1 試料
第 12 圖. [a], [b], [c]……No. 2 試料
第 13 圖, [a], [b], [c]……No. 3 試料
第 14 圖, [a], [b], [c]……No. 4 試料

に對する $\omega \sim P$ 關係である，各實驗の溫度は圖中に記入した，實測點は○點にて示す．圖面の意味は明瞭なれば之を省略するも○點は實驗の誤差範圍に於て全部原點を通る直線上にある．

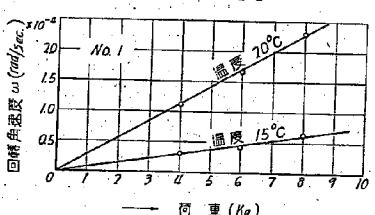
此直線關係よりして本研究範圍の溫度荷重に對して $\omega \propto P$ の成立ち，從つて第



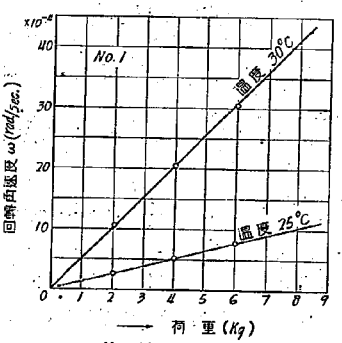
第 11 圖 [a]



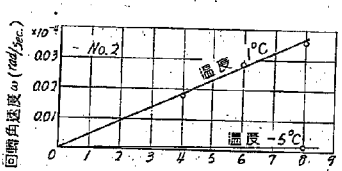
第 11 圖 [b]



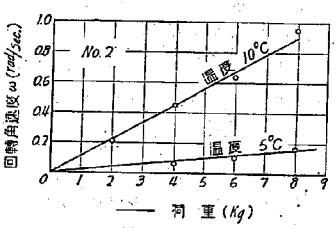
第 11 圖 [c]



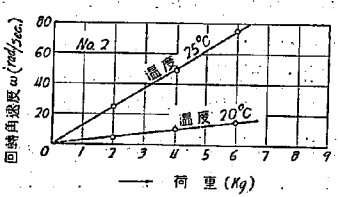
第 11 圖 [d]



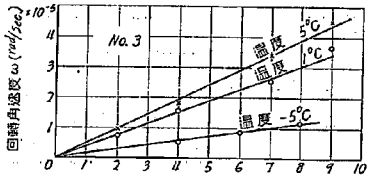
第 12 圖 [a]



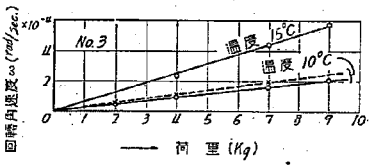
第 12 圖 [b]



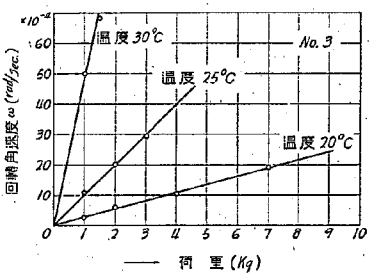
第 12 圖 [c]



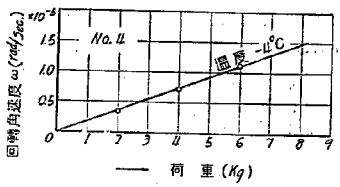
第 13 圖 [a]



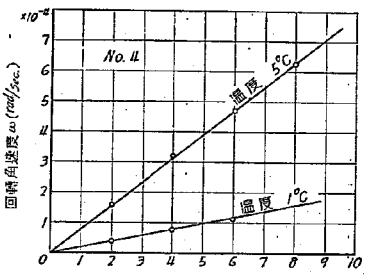
第 13 圖 [b]



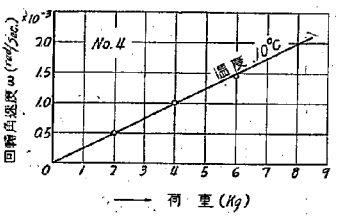
第 13 圖 [c]



第 14 圖 [a]



第 14 圖 [b]



第 14 圖 [c]

II 章 (7) 式の實數式 $\eta\tilde{\sigma}=\tilde{\varepsilon}\cdots$ と比較するに (13) 式により試料内の速度傾度略ぼ一定なる爲め，アスファルトの粘性は應力に拘らず物質常數とし與へられる事が明かとなつた．卽ちアスファルトは可塑性(粘性)に關しては正規性である．上記 Umstätter 等の假定と一致してゐる．

斯かる正規性が明かとなつた以上II章(12)を其の儘適用し粘性係數 (η) を求め得．第 11 圖～14 圖等より一義的に求める事が出來る．(12) 式の h', r_a, r_i 等の値は既に第 III 章〔2〕節第 4 表，II 章〔2〕節 (a) に述べた．第 5 表は斯くして得た粘性係數 (η) 表である，η はアスファルトにても試料により非常に異り殊に溫度に對する感應度の頗る大なる事を知る．次節に溫度と η との關係を詳細に研究せん．

第 5 表

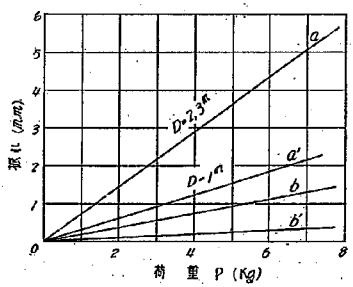
（道路鋪裝用アスファルト及びタール可塑性（粘性係數）一覽表 η C.G.S. dyne sec/cm^2）

試料番號＼温度	−5°C	1°C	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
アスファルト No. 1	2.53×10^{11}	3.27×10^{10}	8.91×10^{9}	—	2.61×10^{8}	7.15×10^{7}	1.58×10^{7}	3.95×10^{6}
アスファルト No. 2	1.30×10^{11}	8.68×10^{9}	1.89×10^{9}	3.57×10^{8}	—	1.60×10^{7}	3.25×10^{6}	—
アスファルト No. 3	—	—	4.68×10^{8}	7.76×10^{7}	2.84×10^{7}	6.61×10^{6}	1.92×10^{6}	3.69×10^{5}
タール No. 4	9.06×10^{8} (−4°C)	8.53×10^{7}	2.14×10^{7}	6.78×10^{6}	—	—	—	—

第 I 章にアスファルトの針度に關し少し述べたが，今粘性の正規性を明かにする事が出來た．兩者の比較値を求める場合實測方法の意義を考察するに便となつた．本研究開始の當初アスファルトは相當著しい構造的粘性を持つものと推測してゐたが全く豫期しない正規性を實驗荷重範圍で得た．此點は一方粘性係數の絶對値は小であるが著しい構造性をもつ瀝青乳劑と對比する時頗る興味深く感ぜられ，實用使用者も研究者も深き注意を拂ふべきである．

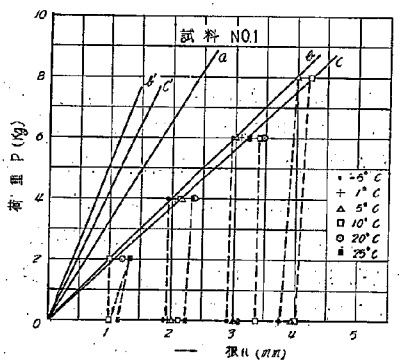
〔4〕 靜的實驗による彈性率

本章第〔2〕節第 8 圖の一般 $\theta\sim t$ 關係の載荷と同時に發生する振れ ab に相當する變形中より實驗裝置の彈性的變形を ab 部より引去る事を要す．本實驗は最初 $\theta\sim t$ 實驗を行ふ際に第 2 圖 M 反射鏡の外に內部圓筒 C_2 の上端にも他の反射鏡を取附け兩者の振れの差異を求むべきであつたが，圓筒 C_1 との空隙僅少にて測定不可能であつた．稍〻正確を缺くも簡便法を用ひ圓筒 C_2 に固定せる圓棒（直徑 15 mm）の振れとし，該圓棒のボス部に他の一つの反射鏡（M'）を著け C_2 部の一端を旋盤のチヤックにて水平に固定し II 章〔2〕節に說明せし載荷方法により純然たる扭り力率を加へ，2 つの反射鏡（M, M'）による光點の振れを夫々讀取つた．反射鏡ランプスケール距離 $D=2.33$ m である．荷重 P, 2.72 kg; 6.85 kg とし，振れは M, M' に對し夫々 2 mm, 5 mm 及び 0.4 mm, 1.3 mm を得た．2 分載荷後完全に元に戻るから裝置の部分の彈性的變形は完全と見做し得．圓筒 C_2 の一端を固定して扭り力率を加へても，裝置細長き形狀なれば僅の載荷の不正にても撓みを生ず，斯かる影響無き事を次ぎの如く明かにした．卽ち反射鏡 M の固著せる端の中心に旋盤の "うしろ中心" を

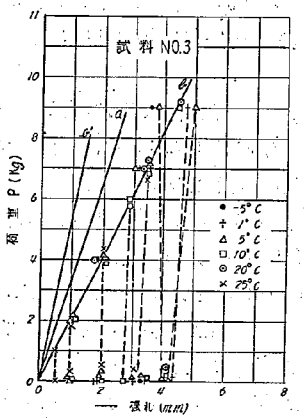


第 15 圖

當て M 位置の撓みを全く除き實驗するも全く同じ振れ (θ) を得た．第 15 圖は實測點を示すもので (a), (b) は M, M' 反射鏡による振れ (θ)～P の直線關係式で (a'), (b') は上記距離 $D=2.33$ mm を他のアスファルト實驗の場合と同一に $D=1.00$ m に對し換算せるものである．載荷及び取外しは衝撃を避け靜に試みたが手動式であつた事等に原因されてか無衝撃で行ふ事困難にて各〻の實驗に於て稍〻不正確であつたが寫眞第 4, 5, 6, 7 等より第 8 圖の ab, cd 部に相當するものを得た，その內試料 No. 1, No. 3 に對するもの〻結果を圖示する．第 16 圖，第 17 圖は求めた振れ～荷重關係である．第 16 圖に就き說明するに，點 ●, ＋, △, ■ 等は −5°C, 25°C に於ける實驗結果の ab (第 8 圖) 振れと P 荷重の關係にて略〻原點を通る眞線上に分布してゐる，唯溫度差相當あるも振れ～P の關係が誤差の範圍程度で同一になつた事は注目すべき事で更に精度大なる實驗を試み確める事を要する問題である．更に荷重を取去る時の振れの戻りも略〻荷重に比例するもので同



第　16　圖



第　17　圖

圖横軸上 $(P=0$ として$)$ に之を示す如く最初の變形より小である．歪力消失現象と關連し頗る重要なものである．ob, oc 直線は振れ～荷重の直線範圍を示す．oa は〔2〕節に述べた如く，彈性變形中測定器具の部分によるもので，第 15 圖 oa' に相當するものである，ob', oc' 直線は $(ob-oa)$ $(oc-oa)$ を示すもので該直線の傾きを以て彈性係數を推測する事が出來る．第 17 圖は全く同樣の關係を試料 No. 3 に就き示せるものである．第 16, 17 圖より彈性係數を求める時の比例常數は (12) 式を用ひ，回轉角速度 (ω_i) の代りに扭り角歪を粘性係數 η の代りに剛性率 (N) を用ふ，試料深さ h' 其の他に關しては全く同樣に考ふ．Poisson 比 (σ) は測定せざりしも $=0.45$ 位と假定しヤング彈性率 (E) をも $E=$

$2(1+\sigma)N$ にて求めをく，第 6 表は斯くして求めたものゝ表である．

アスファルトは後に述べるが II 章〔2〕節 (b) に述べた Maxwell 物質としての歪力消失時間常數 τ_1 略ゝ零に近く，Voigt 物質としての靜的實驗より靜的荷重による彈性係數を，實測する事は出來ない．此點は石岩，水硝子等の靜的實驗と大いに異るものである．

第 6 表　道路鋪裝用アスファルトの靜的彈性係數
(溫度 −5°～25°C)

試料＼係數	N; dyne/cm^2	E; dyne/cm^2
No. 1	1.08×10^7	3.11×10^7
No. 3	1.01×10^7	2.90×10^7

上述の如く求めた彈性係數は後節動的荷重による實驗結果と比較對照すべきである．通常アスファルトは簡單に彈性なく可塑物質であると稱して居るのは，彈性無き事を意味せず時間常數 τ_1 の非常に小なる事を示すものである．

〔5〕 可塑性 (粘性係數) と溫度との關係

著者[27]は瀝青乳劑粘性係數の研究に於て，物質の粘性係數と溫度との關係に就き詳細に其の基本的特性を明かにした．其の際粘性係數 η と溫度との關係式に 2 つの代表的のものを得た，

$$\eta=Be^{A/T} \qquad \eta=BTe^{A/T}$$

前者は液體的組織を，後者は固體的組織を有する場合の關係式である．理論的考察實驗的結果に就き論じた．本研究のアスファルト，タール類に關する溫度に關する研究は第 II 章〔1〕節に述べた各種研究に斷片的に述べられてゐるが溫度範圍が攝氏 30°C 以上のものにて，其の內比較的組織的の研究である，Umstätter,[28] Pittman & Traxler[29] の研究も斯かる溫度範圍である，且つ粘性係數 η と溫度關係式も Rechatelier[30] 又は A. N. Andare[31] 式類似のものが多い．今其の詳細は省略するも第 5 表の如き相當廣範圍に變る粘性係數と溫度との關係を明かにする事は理論上，實用上必要である．

道路鋪裝用アスファルトは實驗溫度範圍に於ても第 5 表の如く η (C. G. S. poise) は 2.53×10^{11}～3.69×15^5 の範圍に變つてゐる，單一式で粘性係數～溫度關係を示す事は頗る困難のこと思ふも以下述べる如く溫度との關係を考察し二三重要な結果を得た．

第 5 表より粘性係數 η の對數 $\log\eta$ に絕對溫度 ($t+273^\circ=T$) との關係を求める爲め

27) 島田八郎：道路鋪裝用瀝青乳劑に關する基本的研究 (第 3 報) 土木試驗所報告第 31 號
28) H. Umstätter：前揭 (10).
29) C. U. Pittman, C. N. Traxler etc. 前揭 (14).
30) H. Le Chatelier：Sur la Viscosité du Vérre. Compt. rendus, 179, 1517, 1924,
31) E. N. Da C. Andrade：A Theory of the Viscosity of Liquids, Part I. Phil. Mag., vol. 17, No. 112, 497, 1934, Part II, Vol. 17, No. 113, 698, 1934.

第 7; 8; 9; 10 表を得. 各表は試料 No. 1; No. 2; No. 3; No. 4; に對するもので, $\log\eta$, $(\log\eta-\log T)$ が表示してある.

第 7 表 (アスファルト粘性係數 η～溫度表) No. 1

t	T	$1/T$	$\log T$	$\log\eta$	$\log\eta-\log T$
−5°	268°	3.73×10^{-3}	2.428	11.4099	8.981
1°	274°	3.65×10^{-3}	2.437	10.5145	8.077
5°	278°	3.59×10^{-3}	2.444	9.9498	7.5058
10°	288°	3.47×10^{-3}	2.459	8.4166	5.9576
20°	293°	3.41×10^{-3}	2.467	7.8540	5.387
25°	298°	3.35×10^{-3}	2.474	7.1972	4.723
30°	303°	3.30×10^{-3}	2.481	6.5969	4.1159

第 8 表 (同上) No. 2.

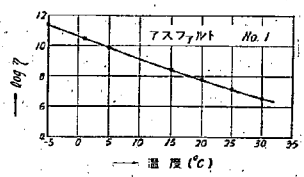
t	$\log\eta$	$\log\eta-\log T$
−5°	11.114	8.686
1°	9.94	7.500
5°	9.28	6.832
10°	8.55	6.10
20°	7.20	4.74
25°	6.51	4.04

第 9 表 (同上) No. 3.

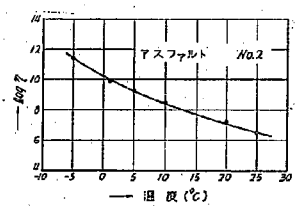
t	$\log\eta$	$\log\eta-\log T$
5°	8.67	6.13
10°	7.89	5.46
15°	7.45	4.99
20°	6.81	4.35
25°	6.28	3.809
30°	5.56	3.086

第 10 表 (タール粘性係數 η～溫度表) No. 4

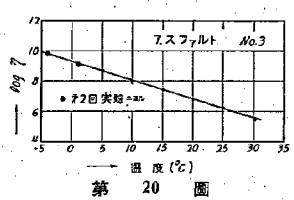
t	$\log\eta$	$\log\eta-\log T$	$\log\log\eta$	$\log(\log\eta-\log T)$
−4°	8.95727	6.52757	0.95192	0.81371
1°	7.9311	5.4934	0.89933	0.73981
5°	7.3298	4.8858	0.86320	0.68886
10°	6.8318	4.3798	0.83448	0.64137



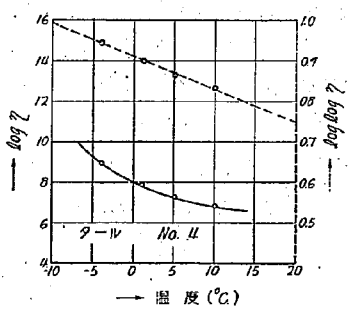
第 18 圖



第 19 圖



第 20 圖



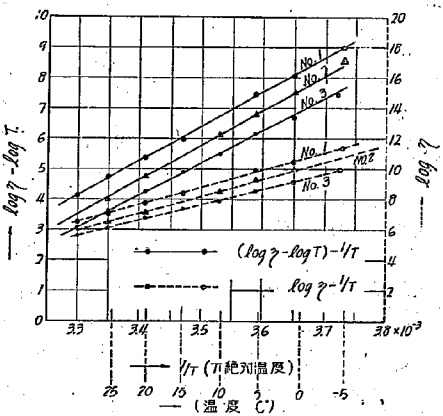
第 21 圖

先づ第 7～10 表より $\log\eta$～溫度 (t) の關係を求める．第 18; 19; 20; 21 圖は試料 No. 1; No. 2; No. 3; No. 4; に對する $\log\eta$～t 關係を示す全部平滑な曲線上にあり且つ略〻直線に近きも上方に稍〻凹である．特に No. 4 タールに對するものは彎曲大である．

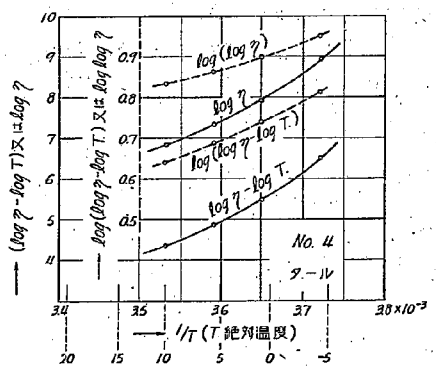
$\log\eta$～t 關係より兩者に下記の關係が成立つ樣である．

$$\left.\begin{array}{ll}\text{アスファルト；} & \log\eta=A-Bt. \\ \text{タール；} & \log\log\eta=A-Bt.\end{array}\right\}\quad\cdots\cdots(17)$$

タールに對しては第 21 圖點線部より明かなる如く $\log\log\eta$ が t (溫度) と直線的の關係にある如く見ゆ．(17) 式の如く表示するも元來 $\log\eta$～t 關係は上方凹形の傾向を示してゐるから更に進んで適切な形式を考察してみる．瀝青乳劑の場合と全く同樣に絕對溫度 (T) との關係を求めてみる．上述の第 7 表～10 表より $\log\eta$～$1/T$ 關係，$(\log\eta-\log T)$～$1/T$ 關係を求む．第 22 圖，第 23 圖は，アスファルト，タールに對する上記の關係を示すものである．第 22 圖を見るに實驗結果はアスファルト 3 種に於て $\log\eta$～$1/T$，$(\log\eta-\log T)$～$1/T$ 共に直線の上にある．卽ち實驗結果は少くとも 2 種の形式で示し得，2 式の優劣を定める事は出來ないが，本章〔3〕節にアスファルトの粘性係數の正規性を明かにした．一方瀝青乳劑に於ける研究による速度傾度無關係粘性係數 η_∞，エングラー粘性係數 η_E が夫々 $e^{A/T}$，$Te^{A/T}$ にて示される



第 22 圖



第 23 圖

事を知つた[32]兩者を比較するに，アスファルトの粘性係數は本實驗範圍で 10^{11}～10^{3} の程度であり，乳劑の η_∞ は同溫度範圍で 1～0.1 程度であり，絕對値は兩者差異頗る大であるが，アスファルトの力學的特性は特に粘性の正規性に關して，乳劑の η_∞ と全く同一であるから，アスファルト可塑性（粘性係數）も Be^{AT}, BTe^{AT} の內前者をとる方妥當である．

$$\eta = Be^{AT} \quad \cdots\cdots (18)$$

今 (18) 式にて示し得るものとして，第 22 圖より (18) 式の常數 A, B を各試料に就き計算す，第 11 表に之を示す．$\eta = BTe^{AT}$ も第 22 圖に示す樣形式的には正しきも上述の如く (18) 式で之を示す事とする．タールに就ては種々 η～t の關係を闡明せんと試みたが (18) 式の樣な式では示す事出來ない．常數 A が溫度の函數で，溫度の上昇に伴ひ η は (18) 式に示すより減少度が少い．斯くタールが (18) 式に從はないのはアスファルトと其の組織の異なる爲めである元來 (18) 式は分子格子の機構を簡單に假定せるものであるが著者は電媒恒數の實驗[33]を行つた時アスファルトに比しタールは電媒恒數大（アスファルト，タール電媒恒數夫々 = 2.0; 2.9）にて分子雙極能率が大であつた．斯かる分子の活力 (activity) の爲め溫度により相互關係が影響を受け從つて，粘性の溫度による關係がアスファルトに於ける場合よりタールの場合感應性が大で A に其の傾向が表れてゐると考へ得．實驗式としては (17) 式

第 11 表 （アスファルト粘性係數）$\eta = Be^{AT}$

常數 / 試料	B	A
No. 1	1.018×10^{-32}	1.137×10^{4}
No. 2	2.703×10^{-31}	1.11×10^{4}
No. 3	6.494×10^{-28}	1.01×10^{4}

$$\log\log\eta = A - Bt \quad \cdots\cdots (17)'$$

が最も適してゐる樣である．

以上の如く道路鋪裝用アスファルト，タールは履歷により非常に影響を蒙り且つ溫度による感應度も頗る大であるが可塑性（粘性係數）と溫度との關係を明かにする事が出來た．

IV. 結　　論

以上第 I 章より；第 III 章の研究より道路鋪裝用アスファルト等の力學的特性の研究に於ける基本的性狀を明かにし，材料力學上の特性としての Maxwell 物質，Voigt 物質の意義と實驗觀測値との關係を明かにし，靜的荷重動的荷重實驗の區別，必要性を詳細に論じ特に靜的荷重狀態の研究を行ひ，靜荷重に對する性狀より見たるアスファルト類の力學的特性を明かにする事が出來た．以下二三重要な結果を列擧すれば下記の如し，

32) 島田八郎：道路鋪裝用瀝靑乳劑に關する基本的研究（第 3 報）．
33) 島田八郎：タール乳劑に關する研究（第 2 報）

(1) 道路鋪裝用アスファルト類の荷重に對する抗力を分析し實驗方法により測定される2種の特性に就き考察し，卽ち Maxwell 物質及 Voigt 物質としての抗力を別個に求める必要ある事を明かにす.

(2) 鋪裝用材料として上記特性中前者の力學的特性を明かにする爲め靜荷重實驗を行ふ.

(3) 各種靜荷重實驗裝置の意義を吟味し鋪裝上に於ける靜荷重の性狀に等しき條件を與ふ (Maxwell 物質としての) 本實驗裝置の意義を明かにした.

(4) 本研究は總て恒溫の下に扭り力率に對する粘性抗力を求む.

(5) 靜荷重下に於ける可塑 (粘性係數) 性を，溫度範圍 −5°C～35°C に於て，硬中軟質 3 種のアスファルト，タールに付き測定し，粘性係數として大略 10^{11}～10^{6} (C.G.S. poise) の値 を得. 載荷扭り力率は 3, 4 種變じた.

(6) 實驗溫度，扭り力率範圍に於て，アスファルト，タール共に粘性に就き完全なる正規性を示し，少しも異常性を示さず.

(7) Maxwell 物質としての可塑性 (η) は求め得たが Maxwell 歪力消失現象 (Relaxation) は少しも認められず，時間常數 $\tau_1=0$ と推論される.

(8) 靜的本實驗に於ては Voigt 物質としての固體粘性に基因する現象は現れない.

(9) アスファルト針度 P のものに對し下記の如き粘性係數 $\eta_{25°C}$ (C.G.S. poise), 25°C, を得.

P	34°	68°	144°	>300 (タール)
$\eta_{25°C}$	1.58×10^{7}	3.25×10^{6}	1.92×10^{6}	

(10) 變形～時間の關係の彈性的變形部よりアスファルトの靜的荷重扭り力率により剛性係數 N, (ポアソン比を假定し) ヤング彈性率を得.

試料針度 P	34°	144°
剛性率 N; dynes/cm²	1.08×10^{7}	3.11×10^{7}
ヤング彈性率 E; dynes/cm²	1.01×10^{7}	2.9×10^{7}

(11) 可塑性 (粘性係數) η と溫度 (t°C) との關係を考察し，アスファルトに於ては形式的には $\eta=Be^{A/T}$ 又は $\eta=TBe^{A/T}$ にて示し得る事を明かにし一方力學的粘性正規性を考慮に入れ $\eta=Be^{A/T}$ を採る. ($T=t+273$) タールに於ては溫度に對する感應度アスファルトより大にて上式 A は溫度の函數となるも形式的には，$\log\log\eta=A-Bt$… 式にて示し得る事を明かにす.

以上の如く鋪裝用アスファルトに靜的扭り力率を加へた場合に於ける最も主要なる可塑的特性を，繰返し荷重材料疲勞の現象を除き，實用上必要な溫度荷重範圍に於て明にした.

且つ靜荷重に對する彈性的特性をも明かにし，靜的荷重に對するアスファルトの性狀を材料力學的に論ずる事が出來た．

更に鋪裝材として明かにすべきは第Ⅰ章に述べし如く動荷重下に於ける性狀特に自己振動狀態に於ける抗力彈性的特性である．斯かる場合Ⅰ章，II 章〔1〕に述べし如く Voigt 物質としての固體粘性を呈するは勿論時間的關係により上述研究せし可塑性粘性をも伴ふものである．斯かる振動狀態に關するものは章を更めて論ず．

以上の外第Ⅰ章に述べた理由により續章として水硝子に關する實驗結果をも併せて報告する．靜荷重に就きアスファルトの性狀と比較し，頗る重要な結果を與ふ．

V. アスファルトと水硝子の可塑性より見たる差異に就て

〔1〕 一般的考察竝に試料

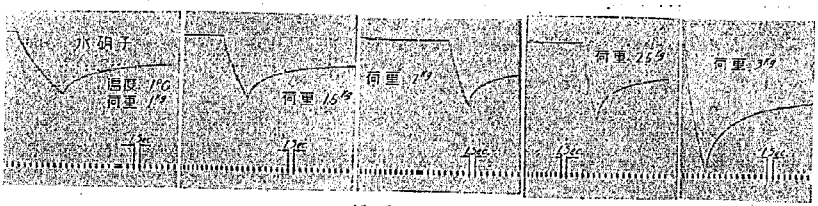
最初第 II 章アスファルトの實驗に際し II 章〔2〕節 (c) の試料裝入に於ける端部影響 (h'') を定める時卽ち測定器のカリブレーションの際アスファルトの粘性正規性不明なれば同じ程度の高粘性物として水硝子を選擇し標準物質として使用せんとした．最初 M. P. Volarovich, D. M. Tolstoi[34] の K_2SiO_3, Na_2SiO_3 等の粘性（但し溫度は高いが）の正規性なる報告により之を用ひた．特に純粹の物を使用せず，市販の硅酸ソーダを使用した．純粹なるものは分子式 $Na_2O.3SiO_2$，であるが本實驗使用のものは比重；25° 1.707 水分 44.32% 硅酸 37.04% アルカリ其の他 18.64%（西川技師測定）の程度にて相當不純物を混入してゐる．斯かる爲めか實驗結果は豫期と全く相反しアスファルトの場合とは全く異る力學的特性を示した．例へば (1) 見掛上構造粘性の如き現象が著しく現れた，(2) Maxwell 物質の一つの特性である歪力消失現象が著しく明瞭に現れ (8) 式 $\tilde{\sigma}=\frac{\tilde{\varepsilon}_0}{\beta_0}e^{-t/\tau_1}$ に於ける歪力消失常數 (τ_1) を求める事が出來た……詳細は以下節に分ち論ずるも斯くの如く顯著なる特性を示した，本報告のアスファルトの力學的特性とは一見關係なく考へられるも兩者の特性の差異は互に理解を助けアスファルトの靜的荷重下の性狀を知る上に必要である，且つ土木材料の一部として使用されつゝある現狀なれば取纏めて報告す．

〔2〕 實驗方法竝に結果

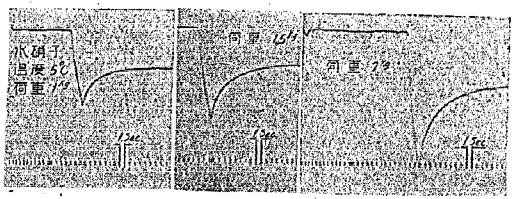
本實驗方法は全く第 II 章〔2〕節と同樣である，試料は第 25 圖に示す如く試料深さ $h=7.0$ cm まで入れ，溫度は 1°C, 5°C, 10°C の 3 種とし，第 1 圖，2 圖の回筒 (P) に對する捩り力率用荷重とし，$P=1$; 1.5; 2; 4 kg …の 3 種を加ふ．寫眞第 8; 9; 10 は各溫

34) M. P. Volarovich, D. M. Tolstoi: The Viscoisity of the Binary Systems, $Na_2B_4O_7-B_2O_3$ and $Na_2BO_2-NaPO_3$ in the fused State., J. of Soc. Glasstechnol., Vol. 18, No. 71, 1934, Sept., p. 201.

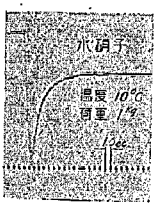
度に對する變形による光點移動 (s)～時間 (t) 即ち回轉角 (θ)～t の實測曲線で回轉ドラム上のブロマイドに寫せしものである．全體の傾向は第 III 章〔2〕節アスファルトの場合



寫眞第 8

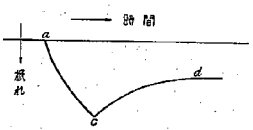


寫眞第 9



寫眞第 10

の寫眞第 4～7 と全く異るものである．寫眞は光點を 1000 mm 距離にあるドラム上に寫せしもので曲線を切れる小刻みは 1 mm 振れを示す．總て第 24 圖の如き振れを與へてゐる，第 8 圖と相對照すれば其の力學的特性の全く異る事が分る．即ち第 24 圖によるに扭り力率を加ふと同時に a 點より連續的に振れ (變形 θ) が發生し，ac の如く曲線をなし徐々に增加す，c 點は荷重を取去る時にて c より cd に從つて非常に多く戻る．第 8 圖と第 24 圖とを對比すれば第 12 表の如きものを得．



第 24 圖

第 12 表

第 24 (水硝子)	第 8 圖 (アスファルト)
a 點…(a より連續的に振れを增す ab なし.	(a より急激に彈性的變化あり，ab 存在す.
abc 範圍…(b 點なく ac 間は曲線に從ひ振れを增す)	(bc は直線的に振れを增す)
c 以上…(c より變形量を多く戻す cd は ac 類似の曲線をなす.	(ab よりは稍小なれども略ゝ同じ程度の彈性戻りあり)
c 停止時間…(停止時間と cd 戻り量の間に密接な關係がある)	(停止時間と cd 戻り量の關係少し)

〔3〕 理論的考察

(a) 變形 (θ)～時間 (t) の關係　第 24 圖の θ～t 關係を見るに若し材料に Maxwell 物質としての粘性抵抗のみ働くとすれば形式的に考察して變形の各位置に於て粘性係數一定でなく瀝青乳劑[35]の粘性研究に於ける様に構造粘性とも見ゆるも，乳劑の場合の回轉圓筒法による實驗とは試料内の運動狀況を異にしてゐる．第 II 章〔2〕節 (9) 式 $(a\dot{\theta}+K=M)$ の Kに $k\theta$ とおく，實驗方法はアスファルトの場合と同一靜的方法であるが物質の特性により Voigt 物質としての抵抗も著しく現れ卽ち Maxwell-Voigt 物質としての特性を示し，載荷開始に近き時間に於ては (10) 式 $\theta=\frac{M}{k}(1-e^{-\frac{k}{a}t})$… の特性が著しい．例へば寫眞上振れ 20 mm (1000 mm 距離に於て) に至れば本實驗方法の本來の原理により第 II 章〔2〕節 (b) に述べた (4) 式 Maxwell 物質の第 2 項 $\frac{1}{\tau_1}\int\sigma\,dt$ の影響が著しく顯れて來ると解すべきである．第 24 圖 ac 曲線部は後に述べる如く扭りの實驗にてよく述べられてゐる様な Voigt 物質として遂に平衡狀態に達するものと異るものである．同じ實驗方法によるも第 8 圖 (アスファルトの特性) 第 24 圖 (水硝子の特性) の 2 種の典型的變形～時間關係を示すは物質の τ_1 の値によるものである，卽ち

(A) アスファルト型；τ_1 値極度に小なる場合．
(B) 水硝子型；　τ_1 値測定し得る程度の有限なる場合

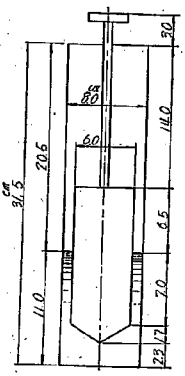
の如く主として本實驗方法にては $\frac{1}{\tau_1}\int\sigma\,dt$ の項として其の特性を判斷する．第 24 圖 ac 部をみるに $\frac{1}{\tau_1}\int\sigma\,dt$ の影響は τ_1 の有限なる爲め極めて徐々に加算され最初は Voigt 物質の特性より進み Maxwell～Voigt 範圍に移り，遂に Maxwell 物質の可塑性變形のみとなる．今物質の歪による硬化等なきものとすれば第 24 圖 ac の $t=0$ の極限の場合は第 II 章〔2〕節 (10) 式より得た結果を適用する事が出來る．同 (10) 式より，

$$\frac{d\theta}{dt}=\frac{M}{a}e^{-\frac{k}{a}t} \quad \cdots\cdots(19)$$

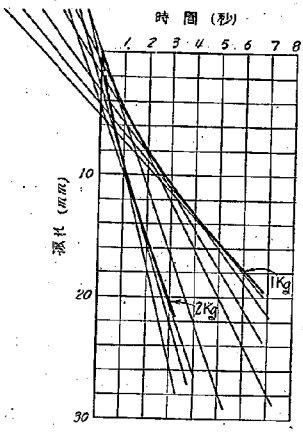
$$(\dot{\theta})_0=\omega_0=\frac{M}{a} \quad \cdots\cdots(20)$$

(19), (20) を得．$(\dot{\theta})_0$ よりして Voigt 物質としての粘性係數を a より II 章 (12) 式の常數を用ひ計算する事が出來る．(19) 式で示す様完全なる Voigt 物質では回轉速度 $\dot{\theta}(\omega)$ の對數 $ln\,\omega$ と時間 t とは直線的になるべきである．今寫眞第 8, 9, 10 等より變形中の角速度を求め得．第 26 圖は其の內溫度 1°C に對するもの〻荷重 P=1 kg, 2 kg による寫眞第8を特に擴大して得たる θ～t 曲線にて該曲線に切する直線群を引き切點より時間 (t)

35) 島田八郎：道路鋪裝用タール乳劑に關する研究 (第 2 報及第 3 報)．

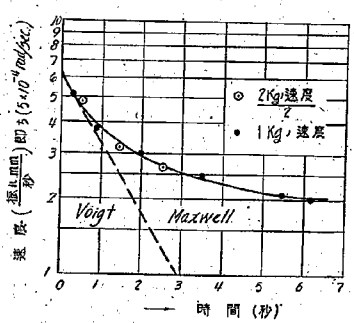


第 25 圖

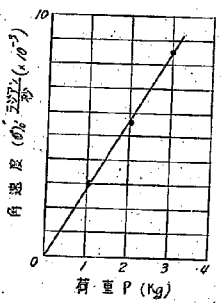


第 26 圖

及び對應する角速度 ($\dot{\theta}$) の關係を求め得. 第 27 圖は斯くして求めた $\dot{\theta}$～t 關係である. ⊙ 點は 2kg に對するもので實驗値を 2 分し記入した • 點は荷重 1kg に對するものである. •, ⊙ 點は全く同一の平滑な曲線の上にあり $\dot{\theta}$ は徐々に變じて, 5, 6 秒にて一定値に達してゐる. 第 27 圖より 2 つの重要な結論を得.



第 27 圖



第 28 圖

i) 荷重 1kg 相當變形, 及び速度 (ω) は一定にて正規性を示し構造性と考へる事は不適當である.

ii) $t=0$ に於ける $\dot{\theta}_0(=\omega)$ の値として約 3.0×10^{-3} rad/sec. を得.

(i), (ii) の結果は更に全く別に獨立に寫眞第 8 より $t=0$ に於ける $(\dot{\theta})_0$ を測り確めた. 第 28 圖は荷重 $P=1$ kg; 2 kg; 3 kg; に對する値で, $(\dot{\theta})_0$～P 關係は直線的であり $P=1$ kg

に對應し $(\dot{\theta})_0=2.9\times10^{-3}$ rad/sec を得, (i), (ii) の信賴し得る事を更に確めた.

今 $(\dot{\theta})_0=2.9\times10^{-3}$ rad/sec……に對し (19) 式より對數をとり

$$ln\,\theta-ln\left(\frac{M'}{a}\right)=-\frac{k}{a}t \quad\cdots\cdots(21)$$

とおき第 26 圖より $ln\,\dot{\theta}=0$, $t=2.9'$ を得,

$$\frac{k}{a}=2.02 \quad\cdots\cdots(22)$$

更に (20) 式より荷重による捩り力率 M 及び $(\dot{\theta})_0$ 値より a を得, 一方試料深さ $h=7.0$ cm とし第 II 章〔2〕節に述べた如く, 有効深さ $h'=7.7$ cm に對し (12) 式の常數を用ひ, a に相當した粘性係數を求む. 卽ち… 4.38×10^5 (C.G.S) …を得. 此の値は本實驗結果の理論的考察により Voigt 物質としての固體粘性にて第 II 章 (2), (6) 式の記號によれば γ にて示されるものである. (22) 式より更に, γ に對應し剛性係數 (N) 更にポアソン比を假定する事により, ヤング彈性率 (E) を得. 固體粘性に對する Maxwell 物質としての粘性係數 (η) は後節に述ぶるも今取纏め第 13 表に示す.

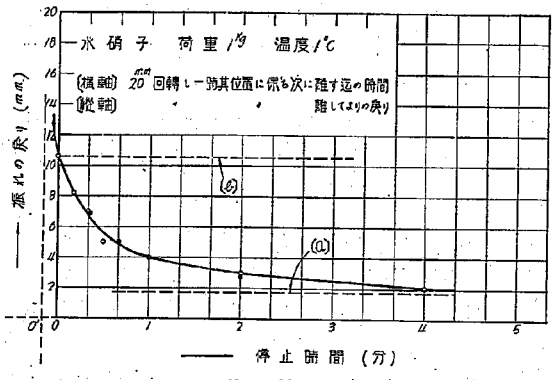
第 13 表 Maxwell～Voigt 物質としての水硝子特性表

剛性率 N:	8.85×10^5 (C.G.S.)	靜荷重による實驗
ヤング彈性率 E:	2.56×10^5 (ポアソン比 0.45 と假定す)	
固體粘性 γ:	4.38×10^5 (C.G.S.)	
可塑粘性 η:	11.7×10^5 ,,	

斯くの如く水硝子は歪消失時間常數 (τ_1) が有限の値を有する事によりアスファルトとは異る性狀を示すもので兩者比較對照すれば得る所多し, 水硝子に於て τ_1 の有限なる事は一方歪力消失現象直接の實驗よりも之を推定する事を得.

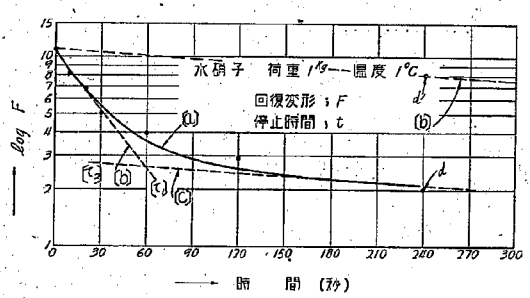
(b) 歪力消失現象 本章〔2〕節の實驗結果を見るも第 24 圖の如く, 荷重を取去れば c 點の戻り著しく〔3〕節 (a) によるも水硝子は歪力消失時間定數 (τ_1) の有限なる事を知る. 本節では直接歪力消失現象を測定し時間定數 τ_1 の値を求めたものである.

卽ち最初〔2〕節の實驗操作中に於て, 振れ 20 mm に達せし時急激に荷重を取外すと同時に回轉を固定し一定時間停止狀態を續け, 固定を解く, 斯くして停止時間と停止時間後の戻り量との關係を求むるに第 29 圖に示す如くなる. 橫軸は停止時間を, 縱軸は振れ 20 mm に對する戻りを示すものである. 載荷後振れ 20 mm に至るまで 8 秒を經過す. 同圖 0′0 は 8″ 秒を示す同圖より明かなる如く停止後直ちに測定すれば戻りは 11mm もあり, 1min 後なれば 4 mm に減少し更に 4 min. にも至れば戻りは略〻一定値に近く, 卽ち戻り能力は時間と共に著しく減少し來る事を示す. II 章〔2〕(1) 式 (6) 式より考察するに, $\dot{\tilde{\sigma}}=\frac{1}{\beta_0}\dot{\tilde{\varepsilon}}-\frac{1}{\tau_1}\tilde{\sigma}$, …(1) $\frac{\tau_1}{\beta_0}=\eta$…(6) 但し, $\left|\frac{1}{\beta_0}\right|=E$ 彈性率を示すとす, 今 (1) 式が停止操作開始後の物質



第　29　圖

內に成立つとする，時間 (t) を停止開始より計る．$\tilde{\varepsilon}_0$=一定，τ_1=一定として解けば (8) 式と同樣の解 $\tilde{\sigma}=\left(\frac{1}{\beta_0}\tilde{\varepsilon}_0\right)e^{-t/\tau_1}\cdots\cdots$ を得．歪力消失現象が (1) 式に從ふとするも實驗の事實を說明する爲め今の場合，$\left(\frac{\tilde{\varepsilon}_0}{\beta_0}\right)$ を如何にとるべきかは相當注意すべき事柄である．上



第　30　圖

式による $\tilde{\sigma}$ に戻り量が比例するものとし假りに F と置き，$F=F_0e^{-t/\tau_1}$ の式に就き戻り量 F と停止時間 t の關係を考察す．第 29 圖より $\log F$～時間 (t) の關係を求む，第 30 圖中・點は之を示すもので $\log F$ は t に直線的關係はなく，〔a〕曲線に從つてゐる同曲線に沿つて切線を求め τ_1 の變り方を吟味するに τ_1 は漸次增大し遂に或る一定値に近く事を知る．今停止時間 0 秒，4 分前後に於ける τ_1 を求むるに切線〔b〕，〔c〕の傾きを測定すればよい，卽ち

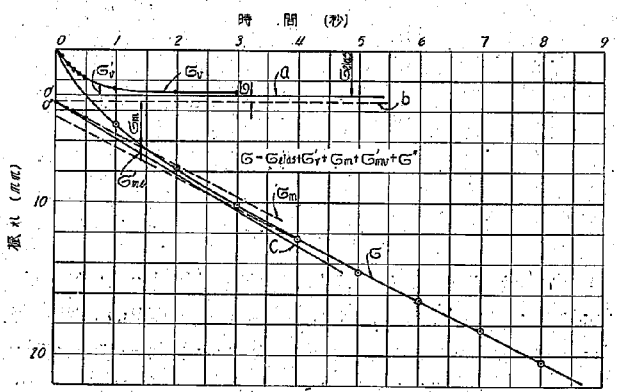
$$0\text{ 秒；}\ \tau_1=[\tau_1]=43.6''\qquad 4\text{ 分；}\ \tau_1=[\tau_2]=710''\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(24)$$

を得．一方 Maxwell 物質の特長としては $\tau_1=0$ 液體にて τ_1 の增大に伴ひ彈性的となる

$\tau_1=\infty$ の極限は完全彈性體を示すも，τ_1 が歪力消失現象中常に常數であるとしての場合である．第 30 圖の如く形式的に τ_1 の可變の場合，若し $[\tau_2]=710''$ の狀態が歪力消失現象全般に成立つとすれば第 30 圖 "o" d 點は d' 點に來る事となる．其れ故今の場合 τ_1 の增大は硬化と考へられない．單に可變歪力消失時間常數 τ_1 を以て彈性度を測る場合必ず τ_1 以外の他の量例へば其の時間に於ける變形の絕對値をも同時に考慮に入れる必要がある．第 30 圖に示す如く τ_1 の停止時間と共に增す事は第 II 章 (2) 式の $\frac{1}{\tau_1}\int\sigma\,dt$ に於ける場合と混同せざる樣注意を要す．卽ち上述實驗の如く第 24 圖 c 點で運動を停止せし場合に於ける常數 τ_1 と變形繼續中に於ける常數 τ_1 とは必ずしも同一と判斷する事は出來ない水硝子の場合は後者に於て τ_1 一定にて上記の値より小である．後述の如く實驗的に求める事は困難である．

以上の研究により水硝子に於ける Maxwell 物質としての有限の歪力消失現象を明かにする事が出來，且つ變形進行停止中に於ける歪力消失時間定數 τ_1 の可變性をも明かにした．變形進行中に於ける定數 τ_1 を以下考察す．

(c) **可塑性範圍 (Maxwell's Domain) に於ける歪力消失現象**　本節 (a) の變形 (δ) ～時間 (t) 關係に就き考察し，載荷開始狀態に近き Voigt 物質範圍を主とし論じ二三重要な係數を求めた．上述固體粘性係數 (γ) と關連し Maxwell 物質範圍に於ける可塑係數



第　31　圖

を求む；寫眞第 8，中溫度 1°C，荷重 1 kg の場合を擴大し第 31 圖に示す．曲線 ⑤ は振れ～時間の實測點 ⊙ を平滑な曲線で連ねたものである．二三記號を說明する．

$o'a$ 直線：　第 8 表剛性率 (N) より計算せる彈性的變形部に相當するもの．

$o''b$ 直線： 上記變形に實驗裝置の彈性特性による變形 ($\mathfrak{S}''$) を加算せし振れ (第 31 圖參照).

$\mathfrak{S}''$: 實驗裝置彈性變形による振れ.

$\mathfrak{S}_v$: 本章本節 (a) 等に說明せる Voigt 物質としての變形による振れ.

$\mathfrak{S}_v=\mathfrak{S}_{elas}-\mathfrak{S}_v'$ にて $\mathfrak{S}_{elas}$ は $o'a$ にて與へられ, $\mathfrak{S}_v'$ は修正値.

$\mathfrak{S}_m$: Maxwell 物質としての變形によるものにて, t の大なる値に對する σ に竝行す, 最初 $o''c$ 直線に竝行すると假定するも Maxwell 物質範圍の變形に於ても Voigt 物質特性存在する場合には圖示の如くなる.

$o''c$ 直線： 理想的 Maxwell 物質變形～時間關係.

$\mathfrak{S}'_{mv}$: Maxwell 物質範圍に於ける Voigt 物性による修正値.

を示すものとすれば下記 (23) 式の成立つ事は第 31 圖より明かである,

$$\mathfrak{S}=\mathfrak{S}_{elas}-\mathfrak{S}_v'+\mathfrak{S}_m+\mathfrak{S}'_{mv}+\mathfrak{S}'' \cdots\cdots(23)$$

(23) 式の各變形の意義は第 II 章 〔2〕 節及び本章 〔3〕 節 (a) 等により明かなれば說明を略すも, 第 31 圖より $\mathfrak{S}$ の t の增大に伴ひ Maxwell 物質範圍に入る事を知る. 卽ち II 章 (4) 式の意味に於ける歪力消失時間常數 τ_1 (一定値) の存在する事を明かにし得. $\mathfrak{S}_v=\mathfrak{S}_{elas}-\mathfrak{S}_v'$ は上記 (a) に於ける如く固體粘性係數 γ 及び剛性率を與へるものである.

$\mathfrak{S}_m$～時間 (t) 關係より回轉角速度として $\dot{\theta}=1.09\times10^{-3}$ rad/sec を得, 從つて II 章 (12) 式の常數等を用ひ可塑粘性係數 (η) を得.

$$\eta=11.7\times10^5 \text{ (C.G.S.) (1°C)} \cdots\cdots(25)$$

若し假りに本節 (b) の Voigt 物質としての剛性率 $N=8.8\times10^5$ (dyne/cm^2) を適用すれば II 章 (6) 式 $\tau_1/\beta_0=\eta$ 卽ち今の場合 $\tau_1=\eta/N$ にて

$$\tau_1=1.32'' \cdots\cdots(26)$$

を得. 斯く (b) 項に求めし變形停止の場合の τ_1…(24) 式と頗る値を異にす. 今斯る粘性係數 η と通常の剛性率より計算される τ_1 にて歪力消失時間常數を示す事は妥當を缺くものである卽ち (12) 式の $\frac{1}{\tau_1}\int\tilde{\sigma}dt$ 項の τ_1 は (b) 項歪力消失現象より (24) 式の如く求めたものなる事を要する事と考ふ. 若し $\tau_1=\eta/N$ にて示すとすれば同じ狀態に於ける η, N の測定値を用ふべきである; 以上の如く時間常數 τ_1 も物質の變形狀態等により異るものであり, 殊に τ_1 の常數可變の場合は重要な特性を示すものである. 將來一層深く研究し其の眞相を明明すべきものである.

本實驗裝置による靜荷重下に於ける水硝子の性狀を明かにする事を得た. 以下其結果を 〔4〕 節に要約す.

〔4〕要約

水硝子を實驗裝置のキャリブレーションに使用せんと試みし事は目的を達する事能はざりしが水硝子の靜的扭り力率の下に於ける特性より，アスファルトの場合と種々比較對照し，一般物性の力學的性質の重要な Maxwell 物質，Voigt 物質としての性質を，アスファルト，水硝子にて直接に比較し，兩者の關係を明瞭にする事が出來た二三主要な結果を列擧す．

(1) 水硝子は其の變形に就き正規性である．(荷重と直線的關係にある事)．

(2) 水硝子はアスファルトに比し，Voigt 物質にて本實驗に於て其の特性を明瞭に示す．

(3) 變形 (θ)～時間 (t) 關係は Voigt→Maxwell-Voigt→Maxwell 物質範圍に移動す．

(4) アスファルトの靜荷重實驗としての意義を第 III 章の檢討に附加して明瞭にする事を得，鋪裝用材の靜荷重下に於ける實驗として最も合理的なる事を更に明かにす．

(5) 靜的荷重下溫度 1°C に於ける水硝子の固體粘性係數 (Voigt) γ，粘性係數 (Maxwell) η，剛性率 (N) を得．(1°C) $\gamma=4.38\times10^6$ (C.G.S.)，$\eta=11.7\times10^5$ (C.G.S.)，$N=8.8\times10^5$ (C.G.S.) 從つて $\tau_1=\eta/N=1.32''$，$\tau_2=\gamma/N=0.45''$ を得るも上記 τ_1, τ_2 値は (6) 項により妥當を缺く．

(6) アスファルト歪力消失時間常數 $\tau_1=0$ と推論され水硝子の歪力消失時間常數は (5) 項の τ_1 に非らずして變形戻り量と停止時間の關係より推測し (24) 式の如く $\tau_1=43.6''\sim710''$ の範圍に停止時間の增大と相伴ふ事を明かにす．

(7) 歪力消失時間常數として單に $\tau_1=\eta/N$ より定義する事は少くともアスファルトに於て適用する事は出來ない．

(8) アスファルトの如き $\tau_1=0$ に近き物質の Voigt 物質としての固體粘性は斯る靜的實驗にては求むる事が出來ない．是非動的荷重による實驗によらねばならない．

以上の如く水硝子の靜的實驗はアスファルト類の靜的荷重に於ける實驗の意義及び其の際現れる性狀を明かにする上に必要なる資料を提供した．

VI. 動的荷重による實驗的研究 (其の 1)

〔1〕概說

第 I 章及び第 II 章〔2〕節に道路鋪裝用材料としてのアスファルト等の力學的性狀を明かにするには振動中の各種彈性的の係數を明かにすべきを述べ，其の實驗方法の種別等を鋪裝工學の立場より又物性物理學の立場より分類し論じた．其の際 2 種の抵抗性即ち固體粘性係數，及び粘性係數の意義及び測定方法を詳論し靜荷重實驗結果より第 III 章，第 V 章〔4〕節に述べた如くアスファルトの如き歪力消失現象の著しいものには ($\tau_1=0$) 特に動的實驗の必要なる事を力說した．

鋪裝工學上第一に必要なる特性はアスファルト類にて形成された路面等の振動狀態に於ける彈性的特性と減衰作用とである．高速度（從つて振動數の大なる場合をも意味す）衝撃力に對する强制振動狀態も重要であるが先づ路面の自己振動に於ける性狀を明かにする必要がある．

卽ち第 II 章〔1〕節の分類に從へば Voigt 物質としての 2 つの特性係數（$1/\beta$, γ, 一般に複素數にて實數部は彈性係數，固體粘性係數に相應するもの）を自己振動數（f）及び應力（又は歪）の振幅の函數として測定し明かにする事が必要である．

靜的荷重下に於ける彈性係數は第 III 章〔4〕節に測定する事を得たが未だアスファルトに關する振動法による彈性的研究は無い．

一方材料の立場より見るも實用上よりするも振動狀態により彈性的特性が如何に變るかを理論的に考察し，アスファルトの實驗値と比較對照する事を要す．一般材料實驗に於て靜的彈性係數（E_s）は振動狀態に於ける彈性係數（E_k）との間には必ず $E_k > E_s$ の關係あるものとされてゐる．之れ後述の如く Voigt 物質として振動の際に於ける特長である．日下部博士の岩石の實驗，J.Eccles 及び J.H.C. Thompson[36] のゴムの實驗，妹澤博士の金屬材料 2，3 の實驗[37]其の他等多くの研究は斯る結果を示してゐる．

固體粘性係數（γ）も振動數により著しく變るもので未だ實驗的に確實な結果には達してゐないが金屬に於ける Hettwer[38] の非振動法による $\gamma = 7.5 \times 10^{15}$ (8°C) (C.G.S.) 低振動法による Iokibe 及び Sakai[39] による $\gamma = 25.8 \times 10^{8}$ 35°C (C.G.S.)，超振動法による Quimby[40] の $\gamma = 1650$, 20°C. (C.G.S.) を見るも，著者瀝青乳劑の粘性係數[41]に述べし靜的範圍內の影響の外 Voigt 物質としての振動數による影響を多く蒙つてゐる，其の他 W. Philippoff[42] の研究等をみるも其の傾向が分る．斯く振動狀況により減衰作用著しく異る

36) J.C. Eccles, J.H.C. Thompson: An Investigation of the Visco-elastic Properties of Rubber, Proc. Royl. Soc., 1935, 148 A, 171.

37) K. Sezawa, K. Kubo: Measurement of solid Viscosity of Metals thro' flexural Vibration of a Bar Apparatus, 1934, 東大航研 89 號 7 卷 8 册 昭和八年.

38) F. Hettwer: Ueber die innere Reibung einigere Metalle, Wien Ber., II (a), 1934, 15, 1925.

39) Iokibe, Sakai: The Effect of Temp. on the Modulus of Rigidity and on the Viscosity of solid Metals. Phil. Mag., Vol 42. 1921, 115

40) S.L. Quimby: On the experimental Determination of Viscosity of vibrating Solids, Phys. Rev., 25, 1925, 559.

41) 島田八郎: 道路鋪裝用瀝青乳劑に關する研究（第 3 報）前揭.

42) W. Philpoff: Dynamische Untersuchungen an Kolloidensystemen I; Grundlagen und Methode zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Lösungen hochmolekularer organischer Verbingdungen.
II; Messungen der dynamischen Zähigkeit von Zellitlösung u. Aufstellung einer Dispersionsformel, Phy. Zst., 35, 1934, Nr. 22, s. 900.

もので此點も更に明かにすべきである.

斯く振動中の彈性特性に關しては研究すべき多くの問題あるも，鋪裝材料の斯かる特性の研究は少く單に碎石等との混合物に對し例へば壓縮試驗[43]により靜的彈性の傾向を研究せる程度にて最近 F.I. Meister[44]は地震計原理による振動發生器，同受信器を使用し路面の衝撃に對する傳播に關する實驗を發表したが，單一試料片に非ざる事と 第 I 章，第 II 章〔1〕節の論說によるに彈性波の研究に屬するもので本研究とは目的を異にせるものである.

以上の如き現狀なれば本報はアスファルト の振動中の彈性性狀を研究する第一階程とし簡單な壓縮力による自己振動狀態に於ける彈性に關し研究を行つたものである.

理論的考察と共にアスファルト の力學的特性に關する研究の視野を明かにする事が出來た. 先づ實驗裝置より記述す.

〔2〕實驗裝置

(a) **實驗方法の選擇** 〔1〕節の如き目的に從ひ振動狀態に於ける彈性特性の實驗的方法としては撓み振動扭り振動による場合が多い，特に減衰現象を伴ふ場合に H. Holzer[45]，武藤[46] の撓み振動に於ける各種の影響を考慮に入れた研究，電磁的に縱振動を與へつゝ彈性率 (E) を測定せし E. G. James, R. M. Dawies[47]の實驗的研究，W. Klein[48]の電磁的撓み振動，其の他妹澤氏[49] の金屬の自己振動による撓み振動の實驗的研究等がある. 斯かる撓み扭り振動にて且つ，第 I 章に述べた如く工學的振動程度の振幅の下にて實驗する事はアスファルトの如きMaxwell 物質としての特性の著しく自重によつても變形する如き場合，上記の一般金屬其の他所謂固體の實驗方法を其の儘使用する事は出來ない. 卽ち第 I 章，第 II 章の Maxwell-Voigt 物質として兩性の顯著の場合の研究としては特種な實驗方法が必要である，ゼラチン程度の 彈性率を有する 物質に於ける 實驗的研究としては

43) Die mechanische Prüfung von Asphalt, Asphalt u. Teer., H. 21, 1934,

44) F.I. Meister: Untersuchungen über das elastische Verhalten einer teergebundenen Schotterstrasse, Der Strassenbau, 20. J., Nr. 51, 1935, 211.

45) Heinrich Holzer: Biegungeerscheinungen mit Berücksichtigung der Stabmasse und der äusseren und inneren Reibung. Zst. f. angew. Math. u. Mech., Bd. 8, H. 4, 1928. S. 273

46) Muto, K: ,, ,, Bd. 10, 1930, S. 346

47) E.G. Fames, R.M. Dawies: A Study of an electrically mainted vibrating Reed and its Application the Determination of Young's Modulus. Phil. Mag., 1934, Dec. 1053.

48) W. Klein: Die Messung der Baustoffdämpfung durch Ausfnahme der Resonanzkurve, Ingenieur-Archiv, V. Bd. 1934, S. 1.

49) 妹澤克惟: 前揭 (37).

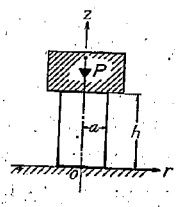
E. Ma delung, S. Flügge[50]; B. Gutenberg, H. Schlechtweg[51]; W. Philippoff[52] 等のものあるもアスファルトは溫度によつては可なり大なる抗力を有し且つ不透明物體であるから上記何れの方法も使用する事が出來ない.

それ故第一階程の試驗とし通常壓縮試驗に使用される如き圓壔を用ひ, 急激に且つ速度零にて荷重を加へ載荷に續く圓壔自己振動の狀態に於て, 彈性的性狀を實驗的に研究した. 實驗方法原理は簡單なれども一方實施に際し頗る困難ありしも直接に振動中に於ける彈性係數を求め且つ減衰傾向をも明かにする事が出來た.

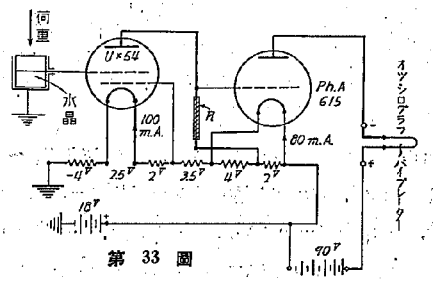
(b) **ピエゾ水晶による實驗**　供試體は直徑約 2 cm, 高さ 2 cm の圓壔を試料より作り約 10°C に 4 時間以上保ち手早く之れをピエゾ水晶の上に置き試料下部とピエゾ部上部を幅 1 mm の環にて固定し試料の上方に空所無き様荷重 (P) を保持し急激に速度 (v) =0 の條件の下に該荷重(P)を供試體に加ふ. 試料は斯かる條件の下に自己振動をなす. 試料は振幅を減少しつゝ遂に停止す, 勿論此の際 Maxwell 物質としての可塑性も作用するものであるが本報告は其の內 Voigt 物質の特性の見地より論じた, 此點に尙研究の餘地がある.

本振動の際荷重 P の下面とピエゾ水晶上面とは常に相離れる事なく振動す. 此の際供試體下面は振動各狀況に應じ, 應力をピエゾ水晶に壓縮力として傳ふ, ピエゾ水晶は壓縮力により上下面に電荷 $\pm(q)$ を生ずる如く結晶軸に應じて切斷せるもの 2 枚 $-q$ 面を組合せ使用す. 第 32 圖は供試體と荷重の關係を簡單に示せるもので圖示の如く自明なれば說明を略す.

第 33 圖は測定器の原理を示すものである, 電氣的增幅率其の他電氣回路に關する事は全部省略するも全體の操作のみ說明す.



第 32 圖



第 33 圖

50) E. Madelung, S. Flügge: Ueber Visko-elastizität, Ann. d. Physik, 5, Folge, Bd. 22, H. 2, 1935.

51) B. Gutenberg, H. Schlechtweg: Viskosität und innere Reibung fester Körper. Physikal. Zst., 31, J., Nr. 16, S. 744.

52) W. Philippoff: 前揭 (42).

使用器：　電磁オッシログラフ（横河製作所製），同バイブレター，
H 號；自己振動周期 1/1000 秒．ピエゾ水晶壓力器（横河製作所製）

眞空管：　UX～54, Ph. A, 615 號.

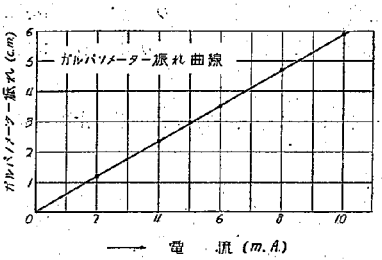
電　池：　B 電池，90 V．A 電池，18 V にて適當の電氣抵抗を配置し第 33 圖の如き電壓配置を得.

上述說明せる如く 2 枚の水晶片の間隙に荷重により生じた荷電は其の電氣容量に應じた電壓を眞空管 UX～54 のグットに及ぼし，從つて電位差の變化を來し從つて UX～54 出力を變ず，更に眞空管 Ph. A 615 により增幅された出力を外部に送る，今直ちに電磁オッシログラフ H 號バイブレーターに連結し其の振れを回轉ドラム上に寫す．實驗中アース，電氣漏れ等困難あるも水晶に加はる應壓力 (f)，又發生電荷 (q) とオッシログラフにて測定される振れ (d) の間にある直線的關係の成立つ範圍を利用す．卽ち

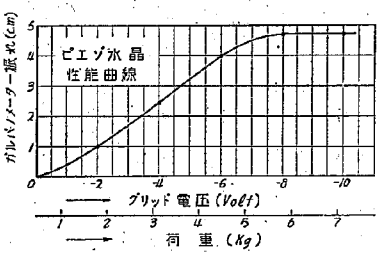
$$q=K_1 f\,,\quad d=K_2 q\,,\quad d=K_1 K_2 f \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (27)$$

の關係で比例數 K_1K_2 の常數なる範圍を定める，今便宜上 (27) 式の q, f は試料面積等の全體に對する總和を示すものとする.

K は通常一定とされてゐるが今 (27) 式の最後の關係の係數 K_1, K_2 の常數範圍を特に調べる，第 34 圖は使用バイブレター振れ (d) と電流 (i) の關係にて當然直線的に正しい.



第 34 圖

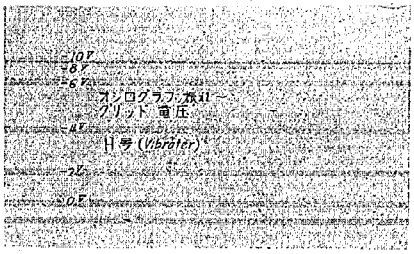


第 35 圖

第 35 圖はバイブレター振れ (d)～と，眞空管 UX～54 のグリッドに加へし電位差の關係を示すもので，ピエゾ水晶の "リード" に－電位 (－V) を與へし時の性能曲線を示すもので，(－2V)～(－6V) の間で直線的である．寫眞第 11 は直接求めた回轉ドラム上に寫せし振れ (d) と加電壓 (－V) との關係を示す，第 35 圖は寫眞第 11 より求めたものである，($K_1 K_2$) 係數を定めるには一方ピエゾ・水晶に加へた壓縮力との關係を明かにする必要がある．載荷裝置として高田技師[53] 使用のものを拜借し，ピエゾ水晶に荷重 (P) を加へ

53)　高田昭：東京山手赤土の彈性的地質に關する試驗（其の一），內土試報第 20 號.

つゝバイブレーター振れ (d) を求めた，P～d の關係は全く ($-V$)～d の關係と一致した．卽ち，荷重 P; 約 2 kg～5 kg の範圍にて振れ (d) ～荷重 (P) 關係の直線的なる事を知る．卽ち (27) 式の各比例定數の常數なる事を明かにす．以上の "カリブレーション" によりピエゾ水晶に加はる壓力に對しては:—



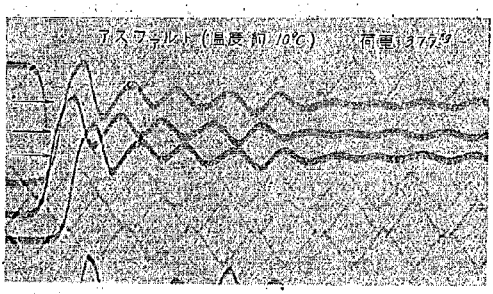
寫眞第 11

1.～5 kg 位，振れ (d) に對しては;—

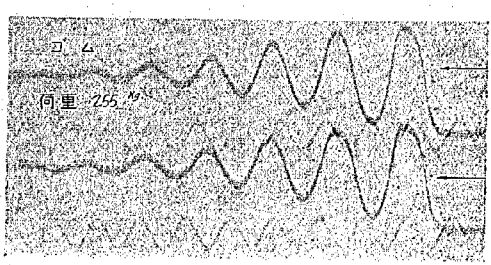
1 cm～4 cm 範圍…… に於ては振れ變化は荷重變化と直線的關係にある事を明かにす．實驗狀態に應じ適當な電氣容量を入れ常に振れ (d) ～荷重 (P) の關係に於て本バイブレーター回路にては 振れ (d) 1 cm～4 cm の範圍に調節し使用すれば可なる事を知る．

〔3〕 實驗結果

實驗は回轉ドラム上に寫せる振れ (d) と時間的經過との關係である，橫軸に時間座標をとり 50 ∽ 交流波形を畫く，縱軸は振れを示すものでピエゾ水晶に加はる壓力を示す．試料としてはアスファルトの外，ゴムを全く同形に仕上げ用ひた．アスファルトは溫度に對する感應度頗る大なるも特に恒溫室內で行はず (b) に述べし如く行ふ．實驗條件下記の如し．



寫眞第 12



寫眞第 13

アスファルト;

荷重 P=3.77 kg

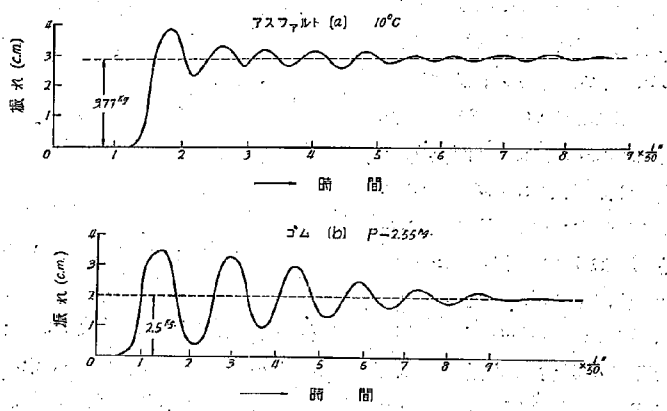
(溫度約 10°C)

ゴム;

荷重 P=2.55 kg

(溫度，室溫約 20°C)

各實驗は 3，4 回試みたものである．寫眞第 12，第 13 はアスファルト，ゴムの場合の振れ (d) ～時間 (t) 曲線のド



第　36　圖

ラム上に寫せるものである．各圖實驗曲線は全部同じ傾向の曲線を示すもので減衰振動を示してゐる，載荷開始と同時に靜荷より大なる振幅を示し漸次減衰を示してゐる、多くの實驗より代表的のものを求めると第 36 圖〔a〕〔b〕の如き者を得，今振動現象停止せし時の振幅を 36 圖〔a〕〔b〕より求れば

アスファルト；2.95 cm　　ゴム；2.0 cm

にて一方第 35 圖 振れ (d) ～荷重 (P) 曲線より判斷するも約 2.5 kg, 3.60 kg 程度に相當し實驗の正しき事を示す．本實驗は單に電磁的に荷重を零速度にて加へしも未だ裝置に不充分の點あり，常に正しき減衰曲線を示さず大體寫眞第 12, 第 13 程度の精確さで實驗を行つた．且つ，室内で行ひし爲め試料の固體粘性の外，取付け部に於ける勢力散逸其の他空氣の抵抗の加算せるものが減衰作用に附加されてゐる，第 36 圖〔a〕〔b〕より見る

第　14　表

アスファルト，ゴム減衰振動 1 週期表 $\left(\times\frac{1}{500}\text{秒}\right)$

波番號	1	2	3	4	5	6	7	平均
アスファルト實驗	8.2	8.2	7.4	7.5	8.3	8.2	8.3	8.0
ゴ　ム　〃	16.	15.5	15.	14.5	14.5	15.	15.	15.

に週期は各波長に正確に一定ならざるも上記第14表の程度の偏差にて下記の計算には平均値をとる．

以上の如く本實驗により，直壓縮振動實驗に於けるアスファルト，ゴムの 振動週期を測定することを得た．

〔4〕 振動法による彈性特性の算定.

(a) 一般論　第 II, 第 III 章に靜荷動によるアスファルトの性狀を明かにし第 V 章水硝子に於ける研究と比較對照し I 章, II 章〔2〕節 (b) に於ける抗力より見たる分類中主として Maxwell 物質の常數を理論的實驗的に明かにした, 屢〻述べし如く振動現象中の Voigt 物質の常數を明かにする本章實驗結果を考察せん爲めに, Maxwell, Voigt, Maxwell–Voigt の 3 種の物質が角速度 (ω) の運動狀態にある場合應力 $\tilde{\sigma}$, 歪 $\tilde{\varepsilon}$ の關係が如何になるやを考察する, 記號の證明は第 II 章〔2〕節〔b〕と同じにて一般の場合常に複素數を示す.

Maxwell 物質;　$$\dot{\tilde{\sigma}}=\frac{1}{\beta}\dot{\tilde{\varepsilon}}-\frac{1}{\tau_1}\tilde{\sigma} \quad \cdots\cdots(1)'$$

Voigt 物質;　$$\tilde{\sigma}=\frac{1}{\beta}(\tilde{\varepsilon}+\tau_2\dot{\tilde{\varepsilon}}) \quad \cdots\cdots(5)$$

$$=\frac{1}{\beta}\tilde{\varepsilon}+\gamma\dot{\tilde{\varepsilon}} \quad \cdots\cdots(2)$$

Maxwell–Voigt 物質;　$$\dot{\tilde{\sigma}}=\frac{1}{\beta}\left(\dot{\tilde{\varepsilon}}-\frac{1}{\eta}\tilde{\sigma}\right)+\gamma\ddot{\tilde{\varepsilon}} \cdots\cdots(3)$$

$$\eta=\frac{\tau_1}{\beta}, \qquad \gamma=\frac{\tau_2}{\beta} \quad \cdots\cdots(6)$$

の各式の變數が總て $e^{-i\omega t}$ を含むとする. $i=\sqrt{-1}$, ω: 回轉角速度にて, $\omega=2\pi f$, $=\frac{2\pi}{p}$ ……(28), f: 振動數　p: 週期

とすれば (1)', (2) (3) 式は下記 (29) (30) (31) 式となる.

Maxwell 物質　$$\frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{\sigma}}=\beta=\beta_0\left(1+\frac{i}{\tau_1\omega}\right) \quad \cdots\cdots(29)$$

Voigt 物質　$$\frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{\sigma}}=\beta=\beta_0\left(\frac{1}{1-i\omega\tau_2}\right)=\beta_0\frac{1+i\omega\tau_2}{1+\omega^2\tau_2^2} \quad \cdots\cdots(30)$$

Maxwell–Voigt 物質

$$\frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{\sigma}}=\beta=\beta_0\frac{1+\frac{i}{\omega\tau_1}}{1-i\omega\tau_2}=\beta_0\left\{\frac{\left(1-\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)}{1+\omega^2\tau_2^2}+i\frac{\left(\frac{1}{\omega\tau_1}+\omega\tau_2\right)}{1+\omega^2\tau_2^2}\right\} \quad \cdots\cdots(31)$$

一般に彈性波等の速度は複素數彈性率 $\left(\frac{1}{\beta}\right)$ により左右され, 今 ρ=密度とすれば (32) 式にて與へられる.

$$\text{彈性波速度} \propto\sqrt{\frac{\text{彈性率}}{\rho}} \qquad \propto\sqrt{\frac{1}{\beta\rho}} \quad \cdots\cdots(32)$$

(29)～(31) 式により振動現象中の彈性率の絶對値 (E_K) と靜的彈性率 $E_S=\left(\frac{1}{\beta_0}\right)$ の關係, 固體粘性係數 (γ), 可塑 (粘性係數) η 等一般力學的特性を示す係數の分散性が與へられる. 本研究は裝置の關係上粘性係數等の分散性は論ぜず E_K, E_S の關係のみを考察す. 上式より複素數の絶對値を求むれば (33), (34), (35) 式の如き關係を得,

$$E_K=E_S\cdot\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{1}{\tau_1\omega}\right)^2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(33)$$

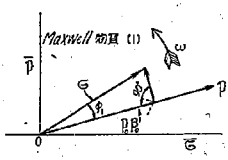
$$E_K=E_S\sqrt{1+(\tau_2\omega)^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(34)$$

$$E_K=E_S\cdot\frac{1}{1+\omega^2\tau_2^2}\sqrt{\left(1-\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^2+\left(\frac{1}{\omega\tau_1}+\omega\tau_2\right)^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(35)$$

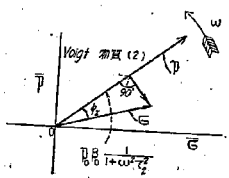
上式の關係は後節實驗結果より彈性係數算定の際使用するも振動狀態に於て,

Voigt 物質にては $E_K>E_S$, Maxwell 物質にては $E_K<E_S$

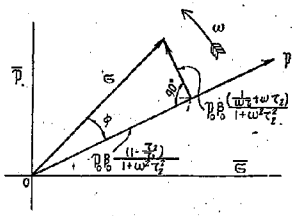
となる. 斯る事は應力～歪曲線を求むるも明かに知ることが出來る. 兩種物質共に彈性履歷曲線を描くものである.



第 37 圖 [a]*



第 37 圖 [b]*



第 37 圖 [c]*

第 37 圖 [a] [b] [c] は週期的振動に於ける應力 $\bar{\sigma}(\mathfrak{P})$ 歪 $\bar{\varepsilon}(\mathfrak{S})$ 關係を回轉ベクトル式に示せるもので $\mathfrak{P}$, $\mathfrak{S}$ は $\mathfrak{P}$, $\mathfrak{S}$……ベクトルの有効成分を示すもので直角坐標の x, y 軸成分に相當す. 斯る記號によれば $\mathfrak{P}$, $\mathfrak{S}$ 相互間の相差 (ϕ) は容易に求めらる, 下記 (36) (37) (38) 式を得.

$$\tan\phi_1=\frac{1}{\tau_1\omega}, \quad \sin\phi_1=\frac{1}{\sqrt{(\tau_1\omega)^2+1}}, \quad \cos\phi_1=\frac{\omega\tau_1}{\sqrt{(\tau_1\omega)^2+1}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(36)$$

$$\tan\phi_2=\omega\tau_2, \quad \sin\phi_2=\frac{\omega\tau_2}{\sqrt{1+(\omega\tau_2)^2}}, \quad \cos\phi_2=\frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau_2)^2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(37)$$

$$\tan\phi_3=\frac{\left(\frac{1}{\omega\tau_1}+\omega\tau_2\right)}{1-\frac{\tau_2}{\tau_1}}=\frac{1+\omega^2\tau_1\tau_2}{\omega(\tau_1-\tau_2)}, \quad \sin\phi_3=\frac{1+\omega^2\tau_1\tau_2}{\sqrt{\omega^2(\tau_1-\tau_2)^2+(1+\omega^2\tau_1\tau_2)^2}}$$

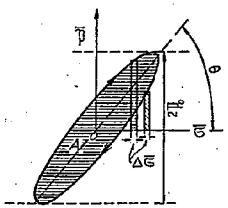
$$\cos\phi_3=\frac{\omega(\tau_1-\tau_2)}{\sqrt{\omega^2(\tau_1-\tau_2)^2+(1+\omega^2\tau_1\tau_2)^2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(38)$$

* 第 37 圖, 第 38 圖の記號は應力歪 $\bar{\sigma}$, $\bar{\varepsilon}$ の代りにベクトク記號として $\mathfrak{P}$, $\mathfrak{S}$…… を, 其の絕對値として $\mathfrak{P}_0$, $\mathfrak{S}_0$…… を, 有効成分として $\mathfrak{P}$, $\mathfrak{S}$,……: を使用す, 論說に於ても便宜上同樣記號を用ふ.

應力 $\mathfrak{P}$, 歪 $\mathfrak{S}$ の相差角 (ϕ) を知れば一履歴中に試料の爲す仕事の量即ち，1サイクル毎に消費されるエネルギーを計算する事が出來る．第 38 圖は履歴曲線を示すもので，1 サイクル毎の上記消費エネルギー (A) は直ちに求め得，即ち (第 38 圖參照)*

$$A/1\text{サイクル}=\int_0^p \mathfrak{P}\,d\mathfrak{S} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(39)$$

積分上限は週期 (p) である．(39) 式の實數部は下記に示す如くなる．



第 38 圖

$$d\mathfrak{S}=-i\omega|\mathfrak{S}|\,dt=-i\omega\mathfrak{S}_0\cdot dt$$

$$\therefore\quad A=\int_0^p|\mathfrak{S}|\sin(\omega t+\phi)|\,\mathfrak{P}|\cos(\omega t)\,dt$$

$$=\frac{\omega\mathfrak{S}_0\mathfrak{P}_0}{2}\int_0^p\{\sin(2\omega t+\phi)+\sin\phi\}dt=\pi\mathfrak{S}_0\cdot\mathfrak{P}_0\sin\phi \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(40)$$

(40) 式に上式 (36), (37), (38) 式の ϕ を代入すれば各物質に於ける A を求め得．

Maxwell 物質：　$\mathfrak{S}_0=\mathfrak{P}_0\cdot\beta_0\sqrt{\tau_1^2\omega^2+1}\cdot\dfrac{1}{\tau_1\omega}$

$$A=\pi\mathfrak{P}_0^2\frac{\beta_0}{\tau_1\omega} \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(41)$$

Voigt 物質：　$\mathfrak{S}_0=\mathfrak{P}_0\beta_0\dfrac{1}{\sqrt{1+\tau_2^2\omega^2}}$

$$A=\pi\mathfrak{P}_0^2\beta_0\frac{\tau_2\omega}{1+\tau_2^2\omega^2} \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(42)$$

Maxwell–Voigt 物質：　$\mathfrak{S}_0^2=\mathfrak{P}_0^2\beta_0^2\dfrac{\left(1-\dfrac{\tau_2}{\tau_1}\right)^2+\left(\dfrac{1}{\omega\tau_1}+\omega\tau_2\right)^2}{(1+\omega^2\tau_2^2)^2}$

---

* 第 38 圖 の彈性履歴曲線ループの $\mathfrak{S}$ 軸に對する傾き θ は容易に求め得るも參考の爲め附記すれば次ぎの如し，ループ上任意の一點の座標を $\mathfrak{S}$, $\mathfrak{P}$ とし $\mathfrak{P}$, $\mathfrak{S}$ の絶對値を $\mathfrak{P}_0$, $\mathfrak{S}_0$ とすれば

$$\mathfrak{S}=\mathfrak{S}_0\cos\omega t,\qquad \mathfrak{P}=\mathfrak{P}_0\cos(\omega t+\phi) \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

t を消去すれば　$\left(\dfrac{\mathfrak{P}_0}{\mathfrak{S}_0}\right)^2(\mathfrak{S})^2\cos^2\phi-2\dfrac{\mathfrak{P}_0}{\mathfrak{S}_0}\mathfrak{S}\mathfrak{P}\cos\phi+(\mathfrak{P})^2=(\mathfrak{P}_0)^2\sin^2\phi$ ……(2)

(2) 式は楕圓を示し，第 38 圖の傾き θ は (3) 式で與へられること明かである．

$$\tan 2\theta=\frac{2\dfrac{\mathfrak{P}_0}{\mathfrak{S}_0}\cos\phi}{\dfrac{\mathfrak{P}_0^2}{\mathfrak{S}_0^2}-1} \quad\cdots\cdots(3)$$

(3) 式を (3) 種の物質に適用すれば (4) 式の如くなる，

$$\left.\begin{aligned}&\text{Maxwell 物質：}\quad 2\theta=\tan^{-1}a(\tau_1\omega)^2\\&\text{Voigt 物質：}\quad 2\theta=\tan^{-1}\frac{2}{(\tau_2\omega)^2}\\&\text{Maxwell–Voigt 物質：}\quad 2\theta=\tan^{-1}\frac{2\omega^2(\tau_1-\tau_2)^2}{(1+\omega^2\tau_1\tau_2)^2}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(4)$$

$$A=\pi\mathfrak{H}_0^2\beta_0\frac{1+\omega^2\tau_1\tau_2}{\tau_1\omega_1}\cdot\frac{1}{1+\tau_2^2\omega_2^2}\quad\cdots\cdots(43)$$

斯くの如く振動數 $f\left(=\frac{\omega}{2\pi}\right)$ に應じ彈性ヒステリシス損失は異るもので Maxwell 物質にては (τ_1, ω) の減少するに伴ひ A は增大するが Voigt 物質にては (τ_2, ω) の增加に伴ひ A は一旦增し後減少する，從つて强制振動の場合は勿論，自己振動の場合界限條件により種々異るも（後述參照）振動數 (f) に應じ上述せる傾向の減衰作用がある．斯かる强制振動の場合，自己振動中の減衰に關する研究は重要なものなれども，本研究に於ては主として彈性係數に關する事柄を實驗的に闡明し，減衰振動の一例として本實驗の場合を後に計算する．上述の如く振動中に於ける彈性係數，各種の抗力を明かにする事を得，アスファルトの如き Maxwell 物質の性狀大なるものが Voigt 物質としての振動をなす場合如何に基本的研究の必要なるかを明かに理解することが出來た．

（b） 本實驗に於ける特性 〔2〕節〔3〕節に說明せる如き實驗條件に從ふ算式を下記の如く求め得．〔2〕節 (a) 第 32 圖により說明す．アスファルトは第 III 章說明せし如く歪力消失時間常數 $\tau_1=0$ なれども振動狀態にては Voigt 物質の性狀を呈す $(E_K>E_e)$ 其れ故 (a) (2) 式に從ふ．

荷重質量：P，供試體半徑：a，高さ：h，ζ：z 軸方向變位，ρ：密度，γ：Voigt 物質の（固體）粘性係數，γ'：空氣等による抵抗係數，$\tilde{\sigma}$：應力，$\tilde{\varepsilon}$：歪…… とすれば下記の如き關係式が成立つ，

$$\left.\begin{aligned}&\rho\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2}=\frac{\partial\tilde{\sigma}}{\partial z}+\gamma'\frac{\partial\zeta}{\partial t}\\&\tilde{\sigma}=\frac{1}{\beta}(\tilde{\varepsilon}+\tau_2\dot{\tilde{\varepsilon}}),\ \text{實數をとれば}\quad E\frac{\partial\zeta}{\partial z}+\gamma\frac{\partial^2\zeta}{\partial z\partial t}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(44)$$

但し茲に云ふ $\zeta, \tilde{\sigma}, \tilde{\varepsilon}$ 等は供試體の斷面積に對する平均値を示すもので斷面各點の各種の應力歪の成分との關係は 2，3 の假定の下に求め得るも今之を述べるを略し單に平均値を扱ふ．(44) 式より (45) 式を得．

$$\rho\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2}=E\frac{\partial^2\zeta}{\partial z^2}+\gamma\frac{\partial^3\zeta}{\partial z^2\partial t}+\gamma'\frac{\partial\zeta}{\partial t}\quad\cdots\cdots(45)$$

$$\rho\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2}=E\frac{\partial^2\zeta}{\partial z^2}+\gamma\frac{\partial^3\zeta}{\partial z^2\partial t}\quad\cdots\cdots(45)'$$

今〔2〕節に述べた實驗にては空氣抵抗を明瞭に區別し求むる事困難なれば式の上にては省略し (45)′ 式を解く事とする．

$\zeta=Ae^{i(fz-\omega t}$ …と置く，A：常數，f：波長係數，$\frac{2\pi}{f}=\lambda$ 波長，にて境界條件より定まるものである，ω：複素數回轉角速度，$i=\sqrt{-1}$ ……を示し，$\zeta=u(z).\ \phi(t)$……の如く規

準函數で表し得る場合とす，(45)′ 式より振動條件及び解を得，即ち

$$\omega^2\rho-\gamma f^2\omega+Ef^2=0$$

振動發生條件：　$\gamma^2f^4-4\rho Ef^2<0$　即ち

$$\gamma=E\tau_2 \quad \therefore \quad \left(\frac{E}{\rho}\right)\tau_2^2-\frac{4\pi^2}{f}<0$$

$$v_e=\sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \therefore \quad \pi v_e\tau_2<\frac{2\pi}{f}<\lambda \qquad \cdots\cdots(46)$$

且つ　$\omega=\dfrac{\gamma f^2}{2\rho}\pm i\sqrt{\dfrac{Ef^2}{\rho}-\left(\dfrac{\gamma f^2}{2\rho}\right)^2}$

$$\therefore \quad \zeta=Ae^{-\frac{\gamma f^2}{2\rho}t}\cdot e^{ifz}\cdot e^{\pm i\sqrt{\frac{Ef^2}{\rho}-\left(\frac{\gamma f^2}{2\rho}\right)^2}\cdot t} \qquad \cdots\cdots(47)$$

式を見るに完全彈性體は Voigt 物質の $\tau_2=0$ の極限であり τ_2 增大すれば遂に振動停止するに至る．今の場合求める解は上記 ζ の實數部をとればよい．

$$\therefore \quad \zeta=Ae^{-\frac{\gamma f^2t}{2\rho}}\cos\left\{\sqrt{\frac{Ef^2}{\rho}-\left(\frac{\gamma f^2}{2\rho}\right)^2}\times t\right\}\cdot(c_1\sin fz+c_2\cos fz) \qquad \cdots\cdots(48)$$

今基本振動のみを取扱ふ，常數 f, c_1, c_2 等は境界條件 (49) 式により定まる即ち

$$\left.\begin{array}{ll}(1) & z=0: \quad \zeta=0\\ (2) & z=h: \quad \displaystyle\int^S E\left(\frac{\partial\zeta}{\partial z}\right)ds=-P\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2}\\ & \displaystyle E\frac{\partial\zeta}{\partial z}=-\frac{P}{\pi a^3}\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2}=-P_0\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2}\end{array}\right\} \qquad \cdots\cdots(49)$$

但し，S は供試體斷面積を示す，今近似的に計算するに一般に f は小なる數にて運動が非振動でなければ (48) 式 cos の變數の第 2 項を省略し (49) 式の條件より f を下記 (50) 式の如く求め得，

$$\cot fh=(fh)\frac{P_0}{\rho h} \qquad \cdots\cdots(50)$$

(50) 式より求めた f を (48) 式に代入し變位 ζ を求め得，〔2〕節に述べしピエゾ水晶にて測定される壓力は $\int^S E\left(\dfrac{\partial\zeta}{\partial z}\right)_{z=0}dS$…… に應ずものである．以下主に週期を考慮に入れ計算する，先づ (50) 式の h, P_0, ρ 等を本實驗に使用した供試體及び實驗條件より表示すれば第 15 表の如きものを得，

第　15　表

	h (高さ)	a (半徑)	ρ 密度	P'	P_0	$\dfrac{P_0}{\rho h}$
アスファルト	1.9 cm	0.9 cm	1	3.77 kg	1.22×10^3gr	0.794×10^3
ゴム	1.9 cm	0.95 cm	0.92	2.55 kg	0.91×10^3gr	0.598×10^3

(50) 式により (fh) 即ち f, を求むれば，〔3〕節實驗の週期 (p) より彈性率を求め得．即ち

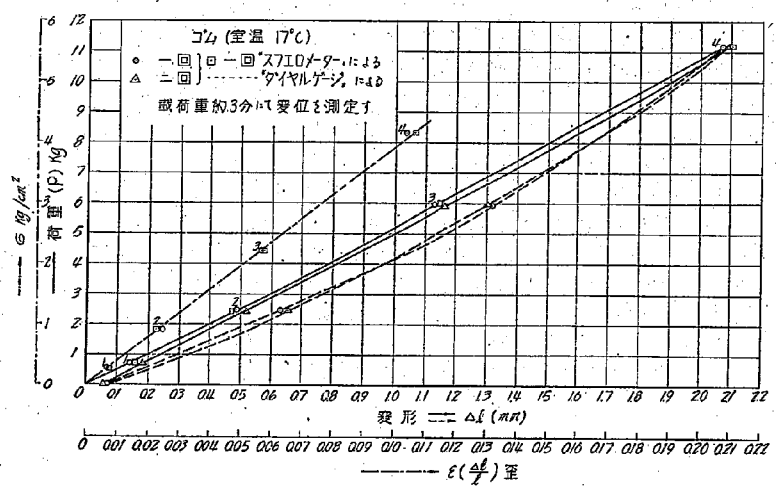
第 16 表

	fh (度)	fh (ラヂアン)	f	p	E dyne/cm²
アスファルト	2°2′	0.0355	0.019	8/500″	4.28×10^{8}
ゴ ム	2°20′	0.041	0.020	15/500″	8.9×10^{7}

$E=\frac{4\pi^2\rho}{f^2p^2}$ 此等の數値を第 16 表に示す．一方斯る壓縮試驗に於ては軸方の壓縮に伴ひ半徑方向の膨張變形あり，運動勢力增大するものにて週期は理想的の場合より增大し，從つて彈性率は小さく測定されるる，今の場合可なり試料扁平にて斯る影響大なりと想像されるる，假りに週期の增大率を $1:1+\frac{i\sigma\pi^2r^2}{4h^2}$ (但し σ: ポアソン比，r: 半徑，h: 高さ，i=1 基本振動の場合)……とし供試體の條件を入るれば約 1:1.06 程度となる，今其の影響を省略した．

第 16 表に求めた彈性率 E は振動狀態に於けるもので (33), (34) 式の記號によれば E_k を示す　アスファルト　E_k: 4.28×10^{8} dyn/cm² 振動週期 8/500″
ゴ ム　E_k: 8.9×10^{7} dyne/cm² 振動週期 15/500″

* ゴムの靜荷重による彈性率は下記の如く測定した。第 III 章 [2] 節 (b) のオツシログラフ振れ～荷重試驗に使用せし裝置により荷重～變形關係を求む．圖示の如き曲線となる．載荷後約 3 分毎に變形を測り更に載荷したものである．變形は，ダイヤルゲーヂ，と スフェロメーターを使用した，最初第 1 回荷重に於ける變形より彈性率 E_0 を算定した．



第 39 圖

然るに靜的荷重によるアスファルト，ゴムの彈性率 E_s は第 III 章〔4〕節により下の如し

$$\begin{cases}\text{アスファルト} & E_s: 3\times10^7\ \text{dyne/cm}^2\ \text{靜的實驗}\\ \text{ゴ　　ム}^* & E_s: 3.8\times10^7\ \text{dyne/cm}^2\ \text{靜的實驗}\end{cases}$$

本章〔1〕節に述べし如く $E_k>E_s$ ……にて (33) (34) 式と比較すれば Voigt 物質と假定せるアスファルトの性狀の正しきを知る．斯くの如くして振動中の彈性率を求める事が出來た．更に (34) 式よりアスファルト，ゴムの Voigt 物質として時間常數 τ_2 を計算する．但し $\tau_2=0$ は完全彈性體の場合を示し材料特性中重要なものである．(34) 式中 ω に $\frac{2\pi}{p}$ を代入し計算す．

$$\begin{cases}\text{アスファルト}: & \tau_2=3.68\times10^{-2}(\text{秒}),\ \gamma=11\times10^5\ \text{dyne sec/cm}^2\ (\text{溫度約 }10°\text{C})\\ \text{ゴ　　ム}: & \tau_2=1.06\times10^{-2}(\text{秒}),\ \gamma=4.04\times10^5\ \text{dyne sec/cm}^2\ (\text{室溫})\end{cases}$$

一般に振動現象に於て (47) 式の減衰項 $e^{\frac{-\gamma t^2}{2\rho}t}$ は重要なもので工作物の振動，衝撃力傳播等に常に考慮に入れられてゐる．上式に下記の如き週期 (p) の關係 $p=2\pi\frac{1}{\sqrt{E/\rho}}$ を代入すれば (51) 式を得．即ち

$$\propto e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\gamma}{E}\right)\cdot f^2\cdot\frac{4\pi^2}{p^2}\cdot t} \propto e^{-\frac{1}{2}(\tau_2)f^2\cdot\frac{4\pi^2}{p^2}t} \quad \cdots\cdots(51)$$

(51) 式により減衰振動に於ける τ_2 の意義明かである．Voigt 材としての振動中に於ける $\tau_2\left(=\frac{\gamma}{E}\right)$ が各種の材料で測定されてゐる．金屬材料としては實驗比較的容易の爲め〔2〕節に述べた如く多くの研究あるも，土木建築材料に就き斯る研究は僅少にて著者寡聞の爲めか 2, 3 地震振動に於ける圓柱振動より $\tau_2\left(=\frac{\gamma}{E}\right)$[54] を算定されしものあるのみである．斯る方面の研究はアスファルトのみならず土木建築材料全般にわたり必要である．ゴムに就ては J. Eccle[55] の實驗あるも

$$E_s=1.19\times10^7\ (\text{C.G.S.}) \qquad 1.30\times10^7\ (\text{C.G.S.})$$

の 2 種のゴムにて減衰より先づ τ_2 を求めしものにて時間常數 τ_2

$$\tau_2=28\times10^{-4}\ (\text{秒}) \qquad \tau_2=6\times10^{-4}\ (\text{秒})$$

……を得てゐるが後述第 17 表と比較するに又他の材料と比較するに可なり減衰性小さきものであつた．著者の實驗は上述の如く $\tau_2=1.06\times10^{-2}$ (秒) 程度である J. Eccles の結果とは可なり異つてゐる (空氣抵抗をも含む) 第 17 表の順序よりすれば τ_2 の小なる方可ならんか．靜的實驗の結果ではあるが著者は又第 V 章に於て水硝子の Voigt 物質とし

54) 末廣恭二：On the damped transversal Vibration of prismatic Bars, 末廣論文集, 1934, P. 331.

55) J. C. Eccles：前揭 (36)　* 前頁に在る

ての特性をも求める事が出來た，即ち：$\tau_2=4.5\times10^{-1}$ 秒を得た．

今道路鋪裝用アスファルト，及び水硝子の Voigt 物質としての性狀を理解し減衰振動に於ける特性を明かにする事が出來た，一般材料學の立場より $\tau_2\left(=\frac{\gamma}{E}\right)$ の程度を洞察する爲め，2, 3 各種材料の $\tau_2\left(=\frac{\gamma}{E}\right)$ を表示する．第 17 表に示す．

第 17 表　二三重要材料の固體粘性係數 (γ), Voigt 物質時間常數 $\tau_2\left(=\frac{\gamma}{E}\right)$

材料名	固體粘性係數 $\gamma\left(\frac{\text{dyne,sec}}{\text{cm}^2}\right)$	彈性率 $E\left(\frac{\text{dyne}}{\text{cm}^2}\right)$	時間定數 $\tau_2=\frac{\gamma}{E}$(sec)	實驗者及び方法
鐵	5×10^8	20.5×10^{11}	2.5×10^{-4}	本多博士[56]捩り振動法
銅	1.0×10^7	—	0.28×10^{-4}	妹澤博士[57]撓み振動法
眞鍮	1.35×10^7	—	0.19×10^{-4}	妹澤博士[57]撓み振動法
デュラルミン	0.75×10^7	—	0.13×10^{-4}	妹澤博士[57]撓み振動法
アルミニューム	0.65×10^7	—	0.09×10^{-4}	妹澤博士[57]撓み振動法
煉瓦，コンクリート構造物	—	—	$1.85\sim4.28\times10^{-3}$	末廣，谷口，田中館博士[58]爆突構造物の振動減衰率より求む
道路鋪裝用アスファルト (約10°C)	11×10^5	$\begin{cases}3\times10^7(E_s)\\4.28\times10^8(E_k)\end{cases}$	3.7×10^{-2}	島田　圓壔壓縮振動法
ゴム (27～17°C)	4.04×10^5	$\begin{cases}3.8\times10^7(E_s)\\8.9\times10^7(E_k)\end{cases}$	1.06×10^{-2}	島田　圓壔壓縮振動法
水硝子 (1°C)	4.38×10^5	$8.85\times10^5(E_s)$	4.5×10^{-1}	島田　靜荷重法

第 17 表によれば鋪裝材料用のアスファルトは振動現象に對し相當大なる減衰作用を呈することが分る．ゴムは更に其の作用の大なる事が分り，水硝子に至れば τ_2 增大し漸次 Voigt 物質の彈性振動特性を失ふに至る．金屬材料より此等の値を列擧する事により相互の關係が明かになつた．Voigt 物質としてアスファルトの斯く振動減衰作用のコンクリート等に比し大なる事は鋪裝工學上重要な特性の一つである．

〔5〕 要約

本章に於てはアスファルト類の如き道路鋪裝用材に於ては振動中の彈性的特性を明かにする必要を述べ，一般物質の彈性的特性の振動數による影響を考察し，Maxwell, Voigt Maxwell-Voigt 物質に於ける此等の特性を明かにし，履歷損失等を述べ一方直壓縮振動實驗を供試料自己振動週期の下に行ひ，結果を各種の式に適用しアスファルトの振動性狀に

56) K. Honda, S. Konno: On the Determination of the Coeff. of normal Viscosity of Metals, Phil. Mag. vol. 42, p. 115, 1921.

57) 妹澤克惟: 前揭 (37).

58) 末廣恭二: 前揭 (54).

關する有要なる 2, 3 の結論を得．鋪裝上に於ける振動減衰を支配する物質常數をも定め所謂乘心地の意義を鋪裝材の固體粘性係數 (γ) と彈性係數 (E) の比により比較考察し，斯る見地より見たる鋪裝材としてのアスファルトの位置を明かにした．今本章に試み得た 2, 3 の結果及び主要なる事項を列擧すれば下記の如くなる．

(1) 振動狀態に於ける各種材料の性狀式を吟味す．

(2) 實驗法として直壓縮自己振動を用ひ，ピエゾ水晶により壓力を電荷に變じオッシログラフを使用し彈性的性狀を研究す．

(3) 振動狀態に於ける彈性率 (E_k) と靜荷重による彈性率 (E_s) との差異を明かにし，$E_k > E_s$ と振動數 (f) との關係式の內 Voigt 物質に關する式 $E_k = E_s\sqrt{1+(\tau_2\omega)^2}$ を鋪裝用アスファルトの實驗結果に適用した．

(4) アスファルト，ゴムの振動狀態に於ける彈性率 E_k: 4.28×10^8 dyne/cm^2, $E_k = 8.9\times10^7$ dyne/cm^2 を得．

(5) アスファルト，ゴムの E_k, E_s 彈性係數及び振動週期の關係より固體粘性係數 (γ) 及び Voigt 物質時間定數 $\tau_2\left(=\frac{\gamma}{E}\right)$ を求む．

アスファルト　$\gamma = 11\times10^5$ dyne sec/cm^2　$\tau_2 = 3.7\times10^{-2}$ 秒

ゴム　$\gamma = 4.04\times10^5$ dyne sec/cm^2　$\tau_2 = 1.06\times10^{-2}$ 秒

(6) 時間定數 τ_2 の一般減衰振動現象に對する意義よりして各種材料の τ_2 値に就き考察し相互關係を明かにす．

(7) 以上の如く Voigt 物質としての道路用アスファルトの力學的特性を明かにす．

(8) 將來アスファルト類の力學的研究に對する指針を得．

以上の如く振動中のアスファルトの性狀を明かにした．本研究はアスファルトに對し溫度關係稍々明確を缺くが第一段階として試みたもので將來此の點を明かにしたい．更にアスファルトの如き所謂可塑性物質の力學的性狀を明かにするには，基本的研究の必要なる理由を明かし，アスファルトのゴム，コンクリートに對し如何なる位置にあるかを減衰振動上明かにした．其の他水硝子の Voigt 物質としての性狀をも明にし附記する事が出來た．

VII. I 章～VI 章の結論

本報告は道路鋪裝用アスファルトの各種力學的特性を明かにせんと試みたものであるがアスファルトは一般金屬材料等に比し彈性的性質の不完全なる爲め研究に多くの困難を伴ふものである．斯る見地より先づ鋪裝材として研究を要すべき重要なる部門に就き分類し，荷重狀態を 1) 靜的荷重 2) 動的荷重 に 2 分し主として工學的立場より彈性的特性を研

究した．アスファルトの力學的特性の研究に關し物質を Maxwell, Voigt, Maxwell-Voigt の3物質に分類し各特性が實驗上如何に表れるやを吟味した．研究の結論は各部門の結論第 IV 章, V 章〔4〕節, VI 章〔5〕節に詳細に要約記述せし故，今再び繰返す事を避けるも 2, 3 の點に就き簡單に述べる．水硝子に關する靜荷重による實驗結果をも報告し，可塑性物質の特性を明かにする上に重要なる結果を得た．卽ち靜的實驗に於て Maxwell-Voigt 物質の特性を得，更に動的振動に於ける Voigt 物質時間定數 τ_2 の比較に重要な結果を得た．

アスファルトに關しては靜的荷重下に於ける Maxwell 物質としての可塑粘性係數の各種の特性，歪力消失現象に關する事柄，更に彈性係數をも測定する事を得，Maxwell 物質としての特性を明かにする事を得た．一方振動狀態に於ける彈性的特性を研究し Voigt 物質としての彈性率 (E_k)，固體粘性係數 (γ) をも得，減衰振動に於ける重要なる材料の定數 $\tau_2\left(=\frac{\gamma}{E}\right)$ を明かにし，アスファルト以外の物質に就てもゴム，水硝子の斯かる特性を測定し相互の關係を一層鮮明する事を得た．

詳細の結論は各章結論を參照されん事を希望するも以上の各章の研究によりアスファルトが靜的及び動的荷重に對し如何なる力學的性狀を呈するやを明かにする事を得，鋪裝材料としてのアスファルトの位置を力學的特性より明かにする事を得た．一方本研究により將來鋪裝工學的立場よりするも純然たる材料學的立場よりするも如何なる方向の研究が此種材料に對して必要であるかをも推論し一つの新しき視野を展開せしむる事を得た．

〔附記〕 本研究に當り所長物部博士を始め所員の御指導御援助に俟つ所多し，一方本研究實驗及び整理に關しては山本仁雄君の努力による所頗る多し茲に錄して深く感謝する次第である．

停止波に就て

横田周平

内容梗概

水路に於て射流より常流に移行する過渡的部分に現はれる停止波に就き解析的にその存在を證明せんと試みたものである．水力學的に嚴密な證明は非常に困難なるを以て二三の概念的に承認し得る假定を設け計算を簡單ならしめ求め得た波長と實驗室に於ける實際の波長とを比較して大體一致した結果を得た．

目　次

I 停止波 …… (1)
〔1〕 停止波 …… (1)
〔2〕 停止波の實例 …… (1)
II 計　算 …… (2)
〔1〕 基礎方程式 …… (2)
〔2〕 假　定 …… (3)
〔3〕 解　法 …… (4)
〔4〕 變數の置換 …… (5)
〔5〕 積　分 …… (6)
〔6〕 波　長 …… (7)
〔7〕 實驗水路に於ける停止波 …… (7)
〔8〕 補正計算 …… (9)
〔9〕 數値計算 …… (11)
III 結　論 …… (12)

I. 停　止　波

〔1〕 停　止　波

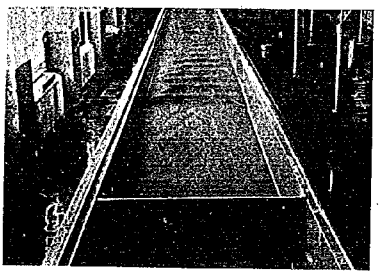
停止波は定流に現はれる一種の波で波形は進行波或は定常波と異なり空間に固定して時間的に變化せず水分子は固定せる波形に從つて振動しつゝ流下するものである．射流より常流への過渡的現象の一例として跳水現象があるが此れは水路下流に何等かの障害を設け背水の影響を與へた場合に起るものであつて一樣な矩形水路に何等障害なき場合には射流と常流との間に停止波を生じ波形は全勢力が限界水深に相應する最小全勢力に近づくまで續くものである．

〔2〕 停止波の實例

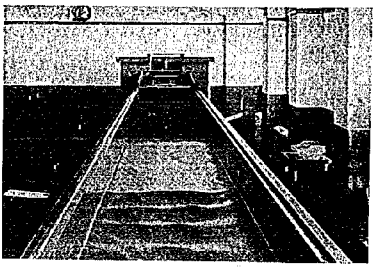
一般の河川に於ても急流部にあつては屢〻停止波の存在を見受けるが底の不均一或は粗度の大なる爲に形は不規則で波の數も數個を出でない．然しながら實驗室に於ては簡單に

明瞭な停止波を數多く得る事が出來る.

第 1 圖は本試驗所赤羽分所に於ける 80 cm 鋼製水路に於ける停止波の寫眞であり第 2 圖はその水路中心の縱斷面圖である. 波の位置, 波長, 波高等は流量及び間隙の一定なる限り決して移動或は變化しない. 卽ち定流である. 水路下端に高さ約 2 cm の障壁を設けた場合には第 3 圖に示す如き跳水現象が得られる.

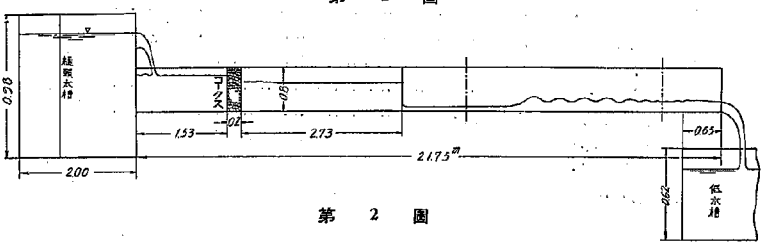


[A] 上流より寫す

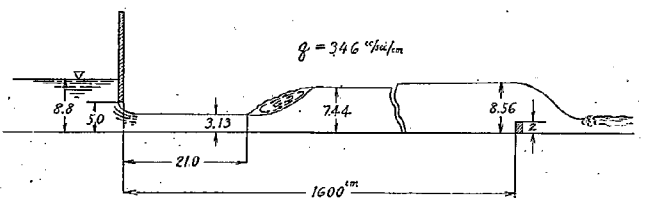


[B] 下流より寫す

第 1 圖



第 2 圖



第 3 圖

II. 計　　算

〔1〕 基礎方程式

$$\frac{1}{2}(u_\eta^2+v_\eta^2)+g\eta+\frac{p}{\rho}=\text{定數} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

$$\int_0^y u_\eta d\eta = q = 定数 \cdots\cdots (2)$$

u_η: 底より η なる高さの水分子の水平流速

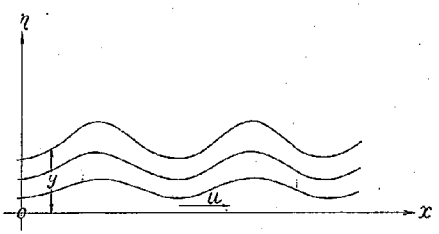
v_η: 底より η なる高さの水分子の鉛直流速

η: 底より鉛直上向に取る距離

y: 底より水面までの高さ

q: 單位幅當りの流量

g: 重力の加速度



第　4　圖

(1) 式は運動方程式であり，定流なるに依り Bernoulli の定理に從ひ各流線に付き成立する．(2) 式は連續方程式であり，同時に流量の一定なる事を表はす．

〔2〕 假　定

(1), (2) の基礎方程式より一般的に解く事は非常に困難なるを以て次の如き假定を設け計算を簡單にする．

u_η は η に無關係と假定する．即ち或る斷面に於ける水平流速を u とすれば

$$u_\eta = u$$

水面に於ける水分子の鉛直流速 v_y はその斷面の平均鉛直流速 v に近きものと假定する．

即ち　　$$v_y \fallingdotseq v = \frac{1}{y}\int_0^y v_\eta d\eta$$

水分子の鉛直加速度を無視すれば

$$\frac{p}{\rho} = g(y-\eta)$$

$$\therefore\quad g\eta + \frac{p}{\rho} = gy$$

實際の場合にあつては鉛直加速度を無視し得ざる爲に壓力水頭に對し後節に述べる如く補正を要するも數式の取扱は同一なるを以て，先づ簡單なる場合の解を求める．以上の假定より (1), (2) の方程式を平均流速に對する式に變換すれば

$$\frac{1}{2g}(u^2+v^2) + y = H \quad \cdots\cdots (1')$$

$$uy = q \cdots\cdots (2')$$

(1′) 式は一般の勢力線式 $H = y + \frac{u^2}{2g}$ に鉛直流速に對する流速水頭 $\frac{v^2}{2g}$ を加へたものである．

實際の波形は內部摩擦，水路の粗度等に依る勢力損失の爲減衰するも以下の所論に於ては損失を無視し勢力線の高さ H は各斷面に於て不變と假定する．

〔3〕 解 法

前節 (1′), (2′) 式に於て u, v, y は夫々 x のみの函數である. (2′) 式を x につき微分すれば

$$u\frac{dy}{dx}+y\frac{du}{dx}=v_y+y\frac{du}{dx}=0.$$

假定に依り $v_y \fallingdotseq v$

$$\therefore\ v \fallingdotseq -y\frac{du}{dx}$$

又 (2′) 式より $u=\frac{q}{y}$

$$\therefore\ \frac{du}{dx}=-\frac{q}{y^2}\frac{dy}{dx}$$

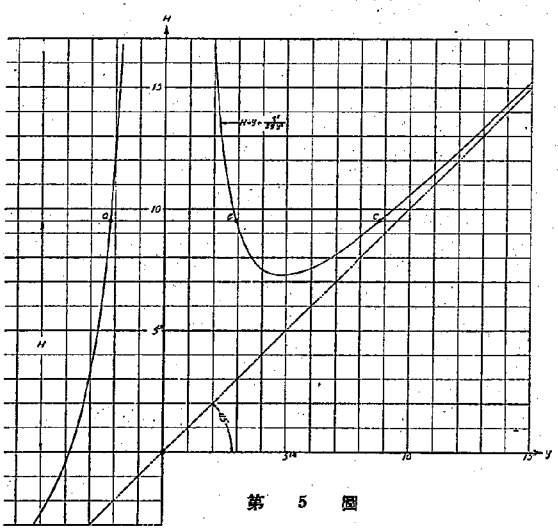
$$\therefore\ v \fallingdotseq \frac{q}{y}\frac{dy}{dx} \quad \cdots\cdots(3)$$

此等の値を (1′) 式に代入すれば

$$\frac{q^2}{2gy^2}\left\{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right\}+y=H$$

或は

$$\int\frac{dx}{\sqrt{\frac{q^2}{2g}}}=\int\frac{dy}{\sqrt{-y^3+Hy^2-\frac{q^2}{2g}}} \quad \cdots\cdots(4)$$



第 5 圖

根號内の三次方程式を零と置きたるものは勢力線式であり此の三根を a, b c とすれば第 5 圖に於ける 3 點 a, b, c に相當する. b は射流水深, c は常流水深を表はす.

從つて (4) 式右邊の分母を因數分解すれば

$$\int\frac{dx}{\sqrt{\frac{q^2}{2g}}}=\int\frac{dy}{\sqrt{-(y-a)(y-b)(y-c)}}\quad\cdots\cdots(5)$$

但し $\qquad a<0,\quad c>b>0$

(4), (5) 式の右邊は適當に變數を變換する事に依り第一種楕圓積分に歸する事が出來る. 從つて y, u, v は x の楕圓函數として表はし得る.

〔4〕 變數の置換

$$y=\frac{P+Qt}{1+t},\quad\cdots\cdots(6)$$

$$\therefore\quad dy=\frac{Q-P}{(1+t)^2}dt\qquad\text{と置けば}$$

$$\int\frac{(Q-P)dt}{\sqrt{-(1+t)\{(P-a)+(Q-a)t\}\{(P-b)+(Q-b)t\}\{(P-c)+(Q-c)t\}}}$$

$$=\int\frac{(Q-P)dt}{\sqrt{-\{(P-a)+(P+Q-2a)t+(Q-a)t^2\}\{(P-b)(P-c)+[(Q-b)(P-c)+(P-b)(Q-c)]t+(Q-b)(Q-c)t^2\}}}$$

t の係數を零ならしむる如き P, Q の値を求むれば

$$P+Q-2a=0,\qquad (Q-b)(P-c)+(P-b)(Q-c)=0$$

卽ち $\qquad P=a+\sqrt{(b-a)(c-a)},\qquad Q=a-\sqrt{(b-a)(c-a)}$

此の値を上式に代入すれば

$$\int\frac{-2dt}{\left(\sqrt{c-a}+\sqrt{b-a}\right)\sqrt{(1-t^2)\left\{\left(\frac{\sqrt{c-a}-\sqrt{b-a}}{\sqrt{c-a}+\sqrt{b-a}}\right)^2-t^2\right\}}}$$

$1>k=\dfrac{\sqrt{c-a}-\sqrt{b-a}}{\sqrt{c-a}+\sqrt{b-a}}>0$ と置き $t=kw$ と置換すれば

$$\int\frac{dx}{\sqrt{\frac{q^2}{2g}}}=\frac{-2}{\sqrt{c-a}+\sqrt{b-a}}\int\frac{dw}{\sqrt{(1-k^2w^2)(1-w^2)}}\quad\cdots\cdots(7)$$

(6) 式に P, Q, t の値を代入すれば置換式は

$$y=\frac{P+Qkw}{1+kw}=\frac{\{a+\sqrt{(b-a)(c-a)}\}+\{a-\sqrt{(b-a)(c-a)}\}\dfrac{\sqrt{c-a}-\sqrt{b-a}}{\sqrt{c-a}+\sqrt{b-a}}w}{1+\dfrac{\sqrt{c-a}-\sqrt{b-a}}{\sqrt{c-a}+\sqrt{b-a}}w}\quad\cdots(8)$$

となり　　$y=b$ に對し $w=1$

$y=c$ に對し $w=-1$　　を得る.

卽ち射流水深 b, 及び常流水深 c の間を往復すると見做される停止波の各狀態は (7) 式の楕圓積分に於て $w=-1$, $w=1$ の間で表はされる.

〔5〕 積 分

第 4 圖に於けるが如く射流水深 b に相等する箇所を原點に選べば (4), (7) より

$$\int_0^x \frac{dx}{\sqrt{\frac{q^2}{2g}}}=\int_b^y \frac{dy}{\sqrt{-y^3+Hy^2-\frac{q^2}{2g}}}=\frac{-2}{\sqrt{c-a}+\sqrt{b-a}}\int_1^w \frac{dw}{\sqrt{(1-k^2w^2)(1-w^2)}}$$

$$\frac{2q}{\sqrt{2g}(\sqrt{c-a}+\sqrt{b-a})}=A$$

$$\int_0^1 \frac{dw}{\sqrt{(1-k^2w^2)(1-w^2)}}=K$$

と置けば

$$\frac{x}{A}=\int_0^w \frac{dw}{\sqrt{(1-k^2w^2)(1-w^2)}}-\int_0^1 \frac{dw}{\sqrt{(1-k^2w^2)(1-w^2)}}$$

$$=\int_0^w \frac{dw}{\sqrt{(1-k^2w^2)(1-w^2)}}-K$$

或は　　$$\int_0^w \frac{dw}{\sqrt{(1-k^2w^2)(1-w^2)}}=\frac{x}{A}+K$$

Gudermann に依る楕圓函數を導入すれば

$$w=sn\left(\frac{x}{A}+K\right) \quad \cdots\cdots(9)$$

(9) 式を (8) 式に代入すれば y を x の函數として求め得た事となる.

卽ち　　$$y=\frac{P+Qk\,sn\left(\frac{x}{A}+K\right)}{1+k\,sn\left(\frac{x}{A}+K\right)} \quad \cdots\cdots(10)$$

從つて　　$$u=q\frac{1+k\,sn\left(\frac{x}{A}+K\right)}{P+Q\,k\,sn\left(\frac{x}{A}+K\right)} \quad \cdots\cdots(11)$$

$$v=\frac{qk(P-Q)cn\left(\frac{x}{A}+K\right)dn\left(\frac{x}{A}+K\right)}{A\left\{1+k\,sn\left(\frac{x}{A}+K\right)\right\}\left\{P+Q\,k\,sn\left(\frac{x}{A}+K\right)\right\}} \quad \cdots\cdots(12)$$

但し　　$sn^2x+cn^2x=1$,　　$dn^2x+k^2sn^2x=1$

$$\frac{d}{dx}sn\,x=cn\,x\,dn\,x$$

〔6〕 波 長

以上で方程式 (1′), (2′) は解かれた事となる. $sn(x, k)$; $cn(x, k)$; $dn(x, k)$ は夫々實數及び虚數の 2 種の周期を有する周期函數であり, 實周期は $4K$; $4K$; $2K$ である. 從つて (10) 乃至 (12) 式より停止波の波長として次式を得.

$$\lambda = 4AK \quad \cdots\cdots (13)$$

但し

$$A=\frac{2q}{\sqrt{2g}(\sqrt{c-a}+\sqrt{b-a})}$$

$$K=\int_0^1 \frac{dw}{\sqrt{(1-k^2w^2)(1-w^2)}}=\int_0^{\pi/2}\frac{d\phi}{\sqrt{1-k^2\sin^2\phi}}$$

$$=\frac{\pi}{2}\left\{1+\left(\frac{1}{2}\right)^2k^2+\left(\frac{1\cdot3}{2\cdot4}\right)^2k^4+\left(\frac{1\cdot3\cdot5}{2\cdot4\cdot6}\right)^2k^6+\cdots\cdots\right\}$$

$$0<k=\frac{\sqrt{c-a}-\sqrt{b-a}}{\sqrt{c-a}+\sqrt{b-a}}<1$$

〔7〕 實驗水路に於ける停止波

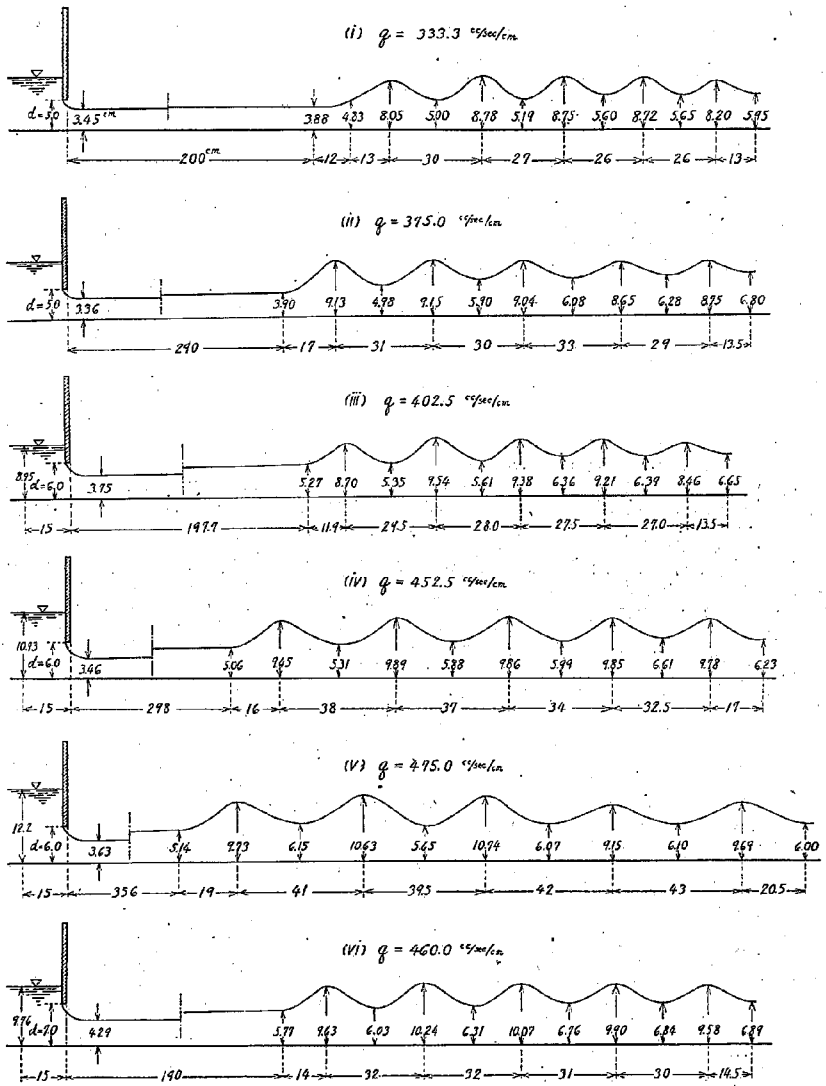
幅 80 cm, 長さ約 20 m の鋼製水路に於て 6 種の場合に就き得たる停止波の水路中心に於ける縦斷圖を示せば第 6 圖の如し.

極小水深 b', 極大水深 c', 波長 λ' の各平均値及び流量 q と此の流量に對する限界水深 y_c 間隙 d を表示すれば第 1 表の如し.

第 1 表

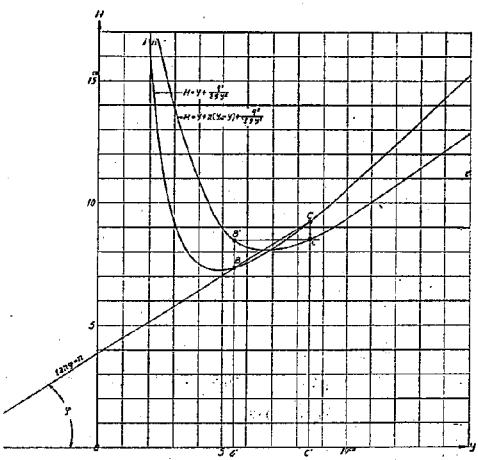
	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)	(vi)
b' cm	5.48	6.01	6.07	6.00	6.16	6.57
c' cm	8.50	8.92	9.06	9.77	9.99	9.88
λ' cm	26.20	30.30	27.80	35.00	41.30	31.30
q cc/sec/cm	333.30	375.00	402.50	452.50	475.00	460.00
y_c cm	4.76	5.24	5.49	5.93	6.13	6.00
d cm	5.00	5.00	6.00	6.00	6.00	7.00

第 6 圖及び第 1 表より歸納せられる停止波の一般的性質に就ては結論に於て述べる事とし本節に於ては極小水深 b' が常に限界水深より大であつて b', c' の値は前述の勢力線式 $H=y+\frac{q^2}{2gy^2}$ に於ける射流及び常流の兩水深と見做し得ない事に着目する. 定流に於ては各斷面の全勢力は一定なるべきである. 然るに實際の極小, 極大兩水深に相當する全勢力水頭は上述勢力線に依れば第 7 圖に於て $b'B$, $c'C$ で表はされ極小水深 b' に相等する全勢力は c' のそれに比して非常に小である.


(i) q = 333.3 c.c/sec/cm
d=3.0
3.45 cm
3.88 4.33 8.05 5.00 8.78 5.19 8.75 5.60 8.72 5.65 8.20 5.95
200 cm
12 13 30 27 26 26 13
(ii) q = 375.0 c.c/sec/cm
d=3.0
3.36
3.90 9.13 4.98 9.15 5.30 9.04 6.08 8.65 6.28 8.75 6.80
240
17 31 30 33 29 13.5
(iii) q = 402.5 c.c/sec/cm
8.95
d=6.0
3.75
5.27 8.70 5.35 9.54 5.61 9.38 6.36 9.21 6.39 8.46 6.65
15
197.7
11.9 24.5 28.0 27.5 27.0 13.5
(iv) q = 452.5 c.c/sec/cm
10.93
d=6.0
3.46
5.06 9.45 5.31 9.89 5.58 9.86 5.99 9.85 6.61 9.78 6.23
15
298
16 38 37 34 32.5 17
(V) q = 495.0 c.c/sec/cm
12.2
d=6.0
3.63
5.14 9.73 6.15 10.63 5.65 10.94 6.07 9.15 6.40 9.69 6.00
15
356
19 41 39.5 42 43 20.5
(VI) q = 460.0 c.c/sec/cm
9.76
d=7.0
4.29
5.71 9.63 6.03 10.24 6.31 10.07 6.76 9.90 6.84 9.58 6.89
15
190
14 32 32 31 30 14.5

第 6 圖

流量 q は堰により測定し水面の高さは水面測定器により測定せるものであり，従つて極小，極大雨水深に於ける流速水頭は相等正確なるものと見做し得る．其故に上述の誤謬は主として水分子の鉛直加速度を無視し位置水頭及び壓力水頭の和を等速定流の場合の如く底より水面までの高さ y に等しと假定せる事に基くものである．



第 7 圖

〔8〕 補正計算

本節に於ては水分子の鉛直加速度を考慮し停止波の場合に適應し得べき勢力線の近似式を導き，此れに依りて實際の極小，極大雨水深より波長を求むべき計算式を算出する．

各水分子の徑路を追跡すれば第4圖に示せる如くであつて略ゝ正弦曲線と假定し得．

卽ち
$$\eta = B + C\sin 2\pi\frac{x}{\lambda} \quad \cdots\cdots(14)$$

時間に就き微分し

$$v_\eta = \frac{d\eta}{dx}\frac{dx}{dt} = 2\pi C\frac{u}{\lambda}\cos 2\pi\frac{x}{\lambda} \quad \cdots\cdots(15)$$

$$\frac{dv_\eta}{dt} = -4\pi^2 C\frac{u^2}{\lambda^2}\sin 2\pi\frac{x}{\lambda} + 2\pi C\frac{u}{\lambda}\frac{du}{dx}\cos 2\pi\frac{x}{\lambda} \quad \cdots\cdots(16)$$

$\frac{du}{dx}$ は非常に小であつて $\frac{u}{\lambda}$ に比して省略し得る．從つて (16) 式は次の如くなる．

$$\frac{dv_\eta}{dt} \fallingdotseq -4\pi^2 C\frac{u^2}{\lambda^2}\sin 2\pi\frac{x}{\lambda} \quad \cdots\cdots(17)$$

(14) 式より極大水深は　$x = \left(\mu + \frac{1}{4}\right)\lambda$

極小水深は　$x = \left(\mu + \frac{3}{4}\right)\lambda$

の位置にある．但し μ は零又は正負の整數である．

(15) 式より極大，極小雨水深の際に鉛直速度は零である．

(17) 式より水分子の鉛直加速度は極大水深の際に極小値を，極小水深の際に極大値を採る．換言すれば極大水深に於ては水分子は鉛直下向きに $4\pi^2C\frac{n^2}{\lambda^2}$ なる加速度を受ける．即ち表面に近き水分子は底に近き水分子の爲に下向の力を受ける．逆に表面に近き水分子は底に近き水分子に重力に抗して上向の力を與へてゐる事となる．從つて底部に於ける壓力水頭は y より小である．從つて極大水深に於ける位置水頭及び壓力水頭の和の平均値は水面の高さ y より小でなければならない．同樣の推論により極小水深に於ては位置水頭及び壓力水頭の和の平均値は y より大である．

以上の所論より勢力線式 (1′) を次の如く簡單に補正する．

$$\frac{1}{2g}(u^2+v^2)+y+u(y_m-y)=H \quad \cdots\cdots(18)$$

極大，極小兩水深の中間に位置水頭及び壓力水頭の和の平均値が水面の高さ y に等しき點が存在する．此の水面の高さを y_m とする．n は 1 より小なる正數である．n は極大，極小兩水深に於ける全勢力が相等しい事より求められる．y_m は H の値を射流より停止波に移る直前の射流水深より算定する事に依り求められる．即ち (18) 式に於て $y=b'$, c' に於て夫々 $u=\frac{q}{b'}$, $\frac{q}{c'}$; $v=0$ なるを以て

$$\left.\begin{aligned}\frac{q^2}{2gb'^2}+b'+u(y_m-b')&=H\\ \frac{q^2}{2gc'^2}+c'+u(y_m-c')&=H\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(19)$$

(19) 式より　$$u=1-\frac{q^2}{2g}\frac{b'+c'}{b'^2c'^2} \quad \cdots\cdots(20)$$

$$\left.\begin{aligned}y_m&=\frac{1}{n}\left\{H-(1-n)b'-\frac{q^2}{2gb'^2}\right\}\\ &=\frac{1}{n}\left\{H-(1-n)c'-\frac{q^2}{2gc'^2}\right\}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(21)$$

(1′) 式の代りに (18) 式を用ひ (18), (2′) 式を解けば (4) 式と同樣に

$$\int\frac{dx}{\sqrt{\frac{q^3}{2g(1-n)}}}=\int\frac{dy}{\sqrt{-y^3+\frac{H-ny_m}{1-n}y^2-\frac{q^2}{2g(1-n)}}} \quad \cdots\cdots(22)$$

(22) 式右邊根號内の y に關する三次式に $y=b'$, $y=c'$ として代入すれば (19) 式に依り零となる．即ち b' c' は三次方程式

$$-y^3+\frac{H-ny_m}{1-n}y^2-\frac{q^2}{2g(1-n)}=0$$

の二根である．

他の一根を a' とすれば　$$-a'=b'+c'-\frac{H-ny_m}{1-n}$$

(21) 式より　$$\frac{H-ny_m}{1-n}=b'+\frac{q^2}{2g(1-n)b'^2}$$

$$=c'+\frac{q^2}{2g(1-n)c'^2}$$

(20) 式より

$$\frac{q^2}{2g(1-n)}=\frac{b'^2c'^2}{b'+c'}$$

$$\therefore\quad -a'=\frac{b'c'}{b'+c'}>0 \qquad \cdots\cdots(23)$$

從つて (22) 式は (5) 式と同樣な形に導かれる.

$$\int\frac{dx}{\sqrt{\frac{q^2}{2g(1-n)}}}=\int\frac{dy}{\sqrt{-(y-a')(y-b')(y-c')}} \qquad \cdots\cdots(24)$$

(24) 式を解けば y, u, v に對し (10), (11), (12) の各式と全然同形の解を得る. 波長は (13) 式と同樣に

$$\lambda=4AK$$

但し
$$A=\frac{2q}{\sqrt{2g(1-n)}(\sqrt{c'-a'}+\sqrt{b'-a'})}$$

或は (19) 式の n の値を代入して

$$A=\frac{2b'c'}{\sqrt{b'+c'}(\sqrt{c'-a'}+\sqrt{b'-a'})} \qquad \cdots\cdots(25)$$

$$K=\frac{\pi}{2}\left\{1+\left(\frac{1}{2}\right)^2k^2+\left(\frac{1\cdot3}{2\cdot4}\right)^2k^4+\cdots\cdots\right\} \qquad \cdots\cdots(26)$$

$$0<k=\frac{\sqrt{c'-a'}-\sqrt{b'-a'}}{\sqrt{c'-a'}+\sqrt{b'-a'}}<1 \qquad \cdots\cdots(27)$$

〔9〕 數値計算

A, K は (25), (26), (27) 式により a', b', c' に依り表はされ a' は (23) 式により b', c' より得らる. 從つて波長は極小極大兩水深より直ちに求められる. 第 1 表に於ける b', c' の値を用ひ第 6 圖に示す 6 種の場合につき a', k, A, K, λ を計算すれば第 2 表に示す如くなる.

第 2 表

	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)	(vi)
a' cm	−3.330	−3.590	−3.630	−3.720	−3.810	−3.950
k	0.054	0.066	0.067	0.083	0.067	0.069
K	1.577	1.578	1.578	1.582	1.578	1.578
A cm	3.750	4.140	4.240	4.360	4.460	4.590
λ cm	23.700	26.100	26.800	27.600	28.200	29.000
λ' cm	26.200	30.300	27.800	35.000	41.300	31.300

λ は計算値, λ' は實測値である.

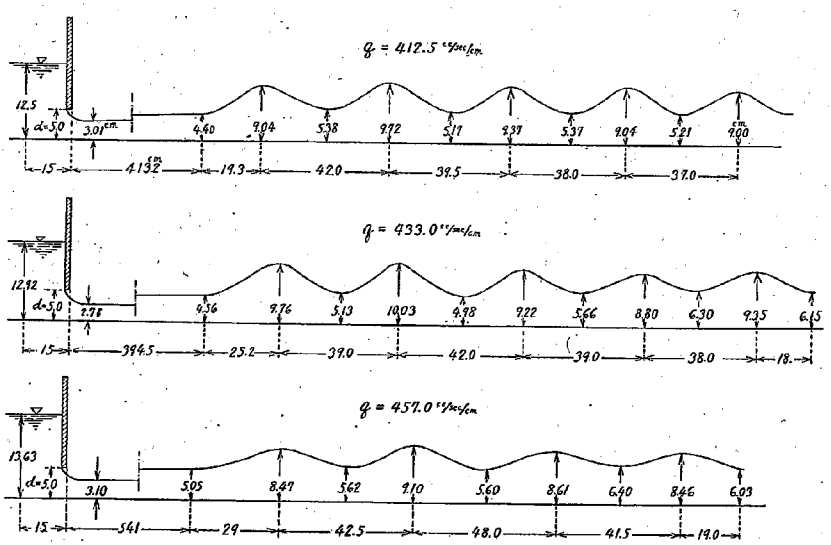
第 2 表に於て直ちに明らかなる如く k の値は常に 0.1 より小である故 K の値は $\pi/2$ に近く實際に k を算出する事なく $K \fallingdotseq 1.58$ と假定する事が出來る．從つて波長は次式で與へられる．

$$\lambda = 4KA = 6.32A$$

又第 2 表 (ii), (iv), (v) の場合に於ける波長の計算値は實際の値と相當懸隔があるが此等の場合は第 6 圖に見る如く全て (i), (iii), (vi) の場合に比較して射流部が長く最初の數個の波長は大であるが次第に短縮し計算値に接近してゐる．(第 8 圖參照) 一定流量に對し間隙を出來るだけ大きく取り射流部を短縮し波形を齊一にした場合に波長は最小で計算値と略ゝ一致する．

III. 結　　論

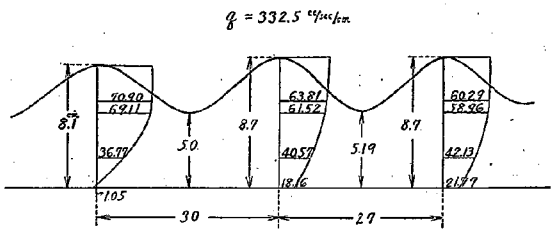
射流より停止波に移る過程は跳水現象と類似してゐるが後者にあつては下流に障壁等を設け强制的に水面を上昇せしめてゐるに反し停止波は一定の流量に對し間隙 d 及び水路の粗度に關する固有の現象である．第 6 圖及び第 8 圖に示す如く，d を不變とし流量を增加すれば射流部の長さが次第に增大し波形は不均一となり波長は最初大であつて次第に短縮される．



第 8 圖

射流より停止波に移る過程は次の如く説明する事が出來る．最初速度分布の一樣な射流は水路の粗度の爲底部は次第に減速され從つて除々に速度分布の變化による水深增大と粗度及び內部摩擦に起因する勢力損失に相等する水深增大を來す．速度分布の變化は流體の內部抵抗の爲一定の限度があると推定し得る．其故に底部が甚だしく減速される時は平均速度は急に減小し水深は增大する．然しながら第5圖の勢力線圖に見る如く射流部に於ては水深の僅かな增大は大なる勢力損失を伴なはなければならないが此の場合除々に水深を增加せしめるだけ勢力を消耗し得ない爲に餘分の勢力は表面の水分子を重力に抗して鉛直方向に跳ね上げるに使用される．此の際流體の連續性は彈條と同樣の作用を及ぼし一旦跳ね上げられた表面に近き水分子は再び引き下げられるが平衡の狀態を通り過ぎる爲に再び跳ね上げられる．

極小水深に於ける水平速度は略ゝ均一であるが極大水深に於ては假定と反し底部の流速は非常に小であり，第9圖に示す如く明瞭に渦を認められる所もある．波頂は上下に相當



第　9　圖

變動し猶表面渦を生ずる場合もあり流速を正確に測定し得なかつたが大體圖の如く分布するものと認められた．

射流部の長さは跳水現象にあつては背水の影響に因つて左右されるも停止波の場合は流量及び間隙を一定とすれば水路の粗度のみの函數と見做し得るを以て實驗室に於ける粗度測定の最も有力な手がかりの一つと思はれる．

補正せる勢力線式 (18)

$$\frac{1}{2g}(u^2+v^2)+y+n(y_m-y)=H$$

に於ける n, y_m の値の範圍を實際の場合に就き (20), (21) 式に依り求むれば

$$n \fallingdotseq 0.6, \qquad y_m \fallingdotseq 1.15\, y_0$$

但し y_0 は限界水深を表はす．此等の値を最初より假定すれば H 及び q を與へられて一般的に極大，極小兩水深及び波長を算出する事が出來る．

土木試驗所出版圖書

報告

第一號	路面及勾配が馬車運送に及ぼす影響に就ての研究中間報告 瀝青質材料竝瀝青質混合物に關する研究第一報	大正十四年三月發行
第二號	瀝青質材料針度に就て	大正十五年一月發行
第三號	「ヴァイアログ」に依る路面凹凸測定．瀝青混合物に關する研究．「アスファルト」合材混合の際に於ける「アスファルト」の粘度に就て	同　二月發行
*第四號	急硬セメントに關する試驗報告	同　五月發行
*第五號	簡易鋪裝に關する試驗報告	昭和二年三月發行
*第六號	混凝土及鐵筋混凝土抗扭力試驗報告	同　五月發行
*第七號	八幡製鐵所副產部製品，瀝青質材料，瀝青質鋪裝，「セメント」類及揮發油に對する「アスファルト」の可溶率等に關する試驗成績	同　七月發行
*第八號	瀝青質材料標準試驗方法．石材類標準試驗方法	同　十月發行
*第九號	急硬性「セメント」に關する試驗．「ソリデチット」の耐壓强度に關する試驗．「ブロック」に關する試驗．高知縣黑瀨川產砂に關する試驗．多摩川產砂利及砂に關する調査．石材類試驗成績	同　十一月發行
*第十號	路面構造の運輸經濟に及ぼす影響に就て（第一） 道路橋振動試驗	昭和三年三月發行
*第十一號	瀝青滲透ブロック試驗成績．鋪裝工事用サーフエス・ヒーターの碎石に及ぼす影響に關する試驗．常願寺川產砂に關する試驗	同　七月發行
*第十二號	アスファルト・ブロック試驗成績．各種アスファルト・ブロック比較試驗成績．石油アスファルトとコール・タール・ピッチとの混合物に關する試驗．瓦斯瓦及骸炭瓦タール及ピッチに關する試驗成績．コール・タール・ピッチ中の純瀝青に就て．大氣中に於けるアスファルト・セメントの變化．石炭瓦斯のアスファルト・セメントに及ぼす影響．標準砂モルタルの强度に及ぼす火山灰及石粉の影響	昭和四年一月發行
第十三號	ポートランドセメント混凝土鋪裝の磨耗試驗．橋梁用敷板强度試驗．鐵底橋鐵材の腐蝕に關する調査．鋪裝用鑄鐵ブロック磨耗試驗	同　五月發行
*第十四號	瀝青乳劑及ピチユマルス鋪裝に關する試驗 瀝青滲透ブロックに關する試驗 瀝青質材料の滲透性に關する試驗 瀝青質材料の粘度及膨脹係數に關する試驗	同　十二月發行
*第十五號	北上川降開式轉動堰模型試驗．電氣鎔接法による鐵筋の接合　現場打混凝土の耐壓試驗報告	昭和五年二月發行
*第十六號	路面の構造の運輸經濟に及ぼす影響に就て（第二） 瀝青滲透ブロック鋪裝試驗．工事用石材試驗成績	同　五月發行
*第十七號	路面構造の運輸經濟に及ぼす影響に就て（第三）	同　五月發行

*第十八號	混凝土鋪裝の粗骨材別磨耗比較試驗．鋪裝混凝土工に及ぼす氣象作用の影響竝に之に應ずる設計及工法に就て(一)．鬼怒川上流改修工事用角礫凝灰岩砂利及砂に關する試驗．鐵筋混凝土道路橋設計資料．各種土木工事用材料試驗成績	昭和五年十月發行
*第十九號	路面構造の運輸經濟に及ぼす影響竝に之に基く道路設計の基本に關する研究（第四）	同　十一月發行
第二十號	東京山手赤土の彈性的性質に關する試驗(一)．基礎の沈下量算定法(一)．岩淵水門に關する水理試驗．單鉸拱橋模型試驗．國道鐵筋混凝土丁桁橋標準設計案	昭和六年六月發行
第二十一號	背水曲線の一般的解法．單鉸拱の振動に關する理論竝に實驗混凝土鋪裝の縱目に關する試驗．河水のポルトランド・セメントに及ぼす影響．標準砂モルタルの强度に及ぼす石粉の影響．瀝青乳劑試驗成績	同　十二月發行
第二十二號	地震時土壓の實驗的研究．混凝土鋪裝繼目用エラスタイト試驗．高田馬場試驗鋪裝の路床土質に關する試驗．基礎の沈下量算定法(第二)．新土壓計算圖表．	昭和七年五月發行
第二十三號	簡易鋪裝に關する實地比較試驗．鋼矢板試驗．大和川筋並ノ瀨地方に關する調査（第一）	同　七月發行
第二十四號	道路の背向曲線の設計に就て．阻柱に關する試驗．乳劑の粘度に就て．府縣道鐵筋コンクリート丁桁橋標準設計案．碎石の磨損率に關する一試驗．三陸津浪調査報告．本邦產鋪裝用石材（附錄）．	昭和八年六月發行
*第二十五號	本邦鋪裝用タールの性質に就て．橫溢流堤流量試驗．擁壁の安定增大に關する一提案及之に關する試驗．砂利層の支持力に關する試驗（第一報）．鋼矢板試驗（續）．エタニット・パイプ試驗．	同　十一月發行
第二十六號	地震に因る動水壓を考慮せる重力堰堤の斷面決定法．田中村調節池溢流堤に關する水理試驗．瀝青鋪裝切取試驗體の性質．道路鋪裝用瀝青乳劑の性狀に關する基本的研究（第1報）．自動車の路面に及ぼす衝擊に關する研究(其一)	昭和九年三月發行
第二十七號	道路用骨材の性質に及ぼす粒子形狀の影響に就て．津浪の災害輕減に關する模型試驗．津浪の變形の理論．三陸津浪調査報告(追加)．自動車の路面に及ぼす衝擊に關する研究(其の二)．瀝青透入マカダムに關する試驗(第一報)	同　六月發行
第二十八號	地震動による土堰堤の變形．鋲着鋼引張試驗用小型驗片．國產瀝青乳劑試驗成績．骨材及び類似材料の靱性に關する研究．鐵筋コンクリート無鉸拱の經濟的並に耐震的設計(1)	同　十月發行
第二十九號	矢板擁壁の控板に作用する力に關する試驗．瀝青繼目材試驗成績．南洋材カボール並にターペンタインの物理的諸性質に關する試驗．道路鋪裝用瀝青乳劑の性狀に關する基本的研究（第2報）阪神地方沿岸風水害調査報告．	同　十二月發行
第三十號	道路鋪裝用瀝青乳劑の性狀に關する基本的研究（第3報）．鏡口狀河口に於ける水流に就て．下關海峽の潮流に關する模型試驗．基礎版の基本的研究(第1報)．溢流堤下游洗掘防止に關する一試驗．國道鋲結鈑桁橋標準設計案	昭和十年四月發行
第三十一號	土砂の安定强度試驗．本邦鋪裝用タールの性質（其の II）．道路鋪裝用タール乳劑に關する研究（第1報）．擁壁裏込の土壓輕減の効果に關する試驗．浦戸港々口の潮流に關する試驗（第1報）．	同　八月發行

第三十二號 本邦道路橋の重量．道路鋪裝用タール乳劑に關する研究．河川彎曲部に於ける水流に就て．タールとアスファルトとの混合物の鋪裝材としての性質．タール鋪裝と水稻の發育との關係．ポートランドセメントの凝結後に於ける溶解物の *PH* に就て．王泊堰堤の湯水の溫度及水素イオン濃度． 昭和十年十一月發行

其他

本邦道路橋輯覽	大正十四年十二月發行
本邦道路橋輯覽(增補)	昭和三年三月發行
第六回國際道路會議に關する報告書	昭和七年四月發行
土木工事用材料標準試驗方法	昭和七年十二月發行
本邦道路橋輯覽第三輯	昭和十年十一月發行

(*印は殘部なし)

昭和十一年三月二十日　印刷
昭和十一年三月二十五日　發行

內務省土木試驗所
東京市本鄕區駒込上富士前町二十六番地
電話大塚(86)(自3101番 至3103番)
印刷者　井上源之丞
東京市本所區厩橋一丁目二十七番地ノ二
印刷所　出版印刷株式會社本所分工場
東京市本所區厩橋一丁目二十七番地ノ二