

中國科學院水利部水利科學研究院

研究報告

4

大浦閘地基沉降分析研究報告

水利出版社

1958年1月

大浦閘地基沉降分析研究报告

汪開韶 易宏义

提 要

本报告对于曾經預压加固的大浦閘海淤地基的沉降分析方法采用了特殊的处理。这个处理主要以預压时地基沉降的观测記錄为依据，而并不以室内土工試驗为依据，因为在分析中曾發現室内土工試驗数据常不能完全反映出地基的預压效应，这可能与土样的扰动有关。同时本文对于数种不同的通用于天然地基的沉降分析方法的適用性亦作了比較和研究，这部分的研究主要以預压期的地基沉降为验证对象。

研究結果認為，对所研究的地基而言，在作地基沉降分析时應該考慮到土層的側向变形。同时，在作地基中应力分布的估算时，土可作为各向同性的完全彈性体看。但是土的泊桑比 μ 值远不是一个常数，它將随应力条件和固結程度而变，所以在分析时必须注意选择适当的 μ 值。

本文并且指出为了滿足現代改進的地基沉降分析方法的要求，新的土工試驗技術应当相应地改進和發展，同时，現場考查和沉降观测工作亦应繼續更加重視。

導 言

大浦閘的地基是一个受过預压处理的地基，在沉降特性方面有其特殊的情况，所以在分析方法上，亦要适应于这个特殊情况。

本稿对于分析方法的选择是根据下面三个原則决定的：

- 一、分析方法必須要有适当的理論和經驗根据；
- 二、分析方法必須要在已有的資料和数据的基础上是可行的，同时又能尽量發揮已有資料和数据的作用；
- 三、分析方法必須要考慮到預压处理后，地基的特殊性質。

所以在分析中，曾將大浦閘地基的沉降分为兩個階段。在預压期地基的沉降分析，主要是根据地層鑽探和土工試驗資料進行比較計算的；在預压处理后建筑物地基的沉降分析，主要是利用在預压期以及建閘后的实际沉降（和回彈）观测記錄为依据。

地基在預压荷重下的沉降分析中，曾对下列分析方法進行了比較：

在穩定沉降量分析方面有：

- 一、單向压縮法；
- 二、三向变形压縮法；

三、三向形变和單向压缩法；

四、經驗公式法。

在沉降時間过程分析方面有：

一、單向压缩法；

二、三向形变和單向压缩法；

三、經驗公式法。

对于預压处理后地基在建筑物荷重下的沉降分析，曾試用了下面兩個方法：

一、簡單半对数近似估算法；

二、三向形变和單向压缩半对数近似估算法；

此外，也用了經驗公式法作为比較。

(一) 大浦閘地基及其处理情况

大浦閘是一个以排澇、擋潮为主并兼顧通航的水閘，在1955年建成的，其結構布置見第1圖。

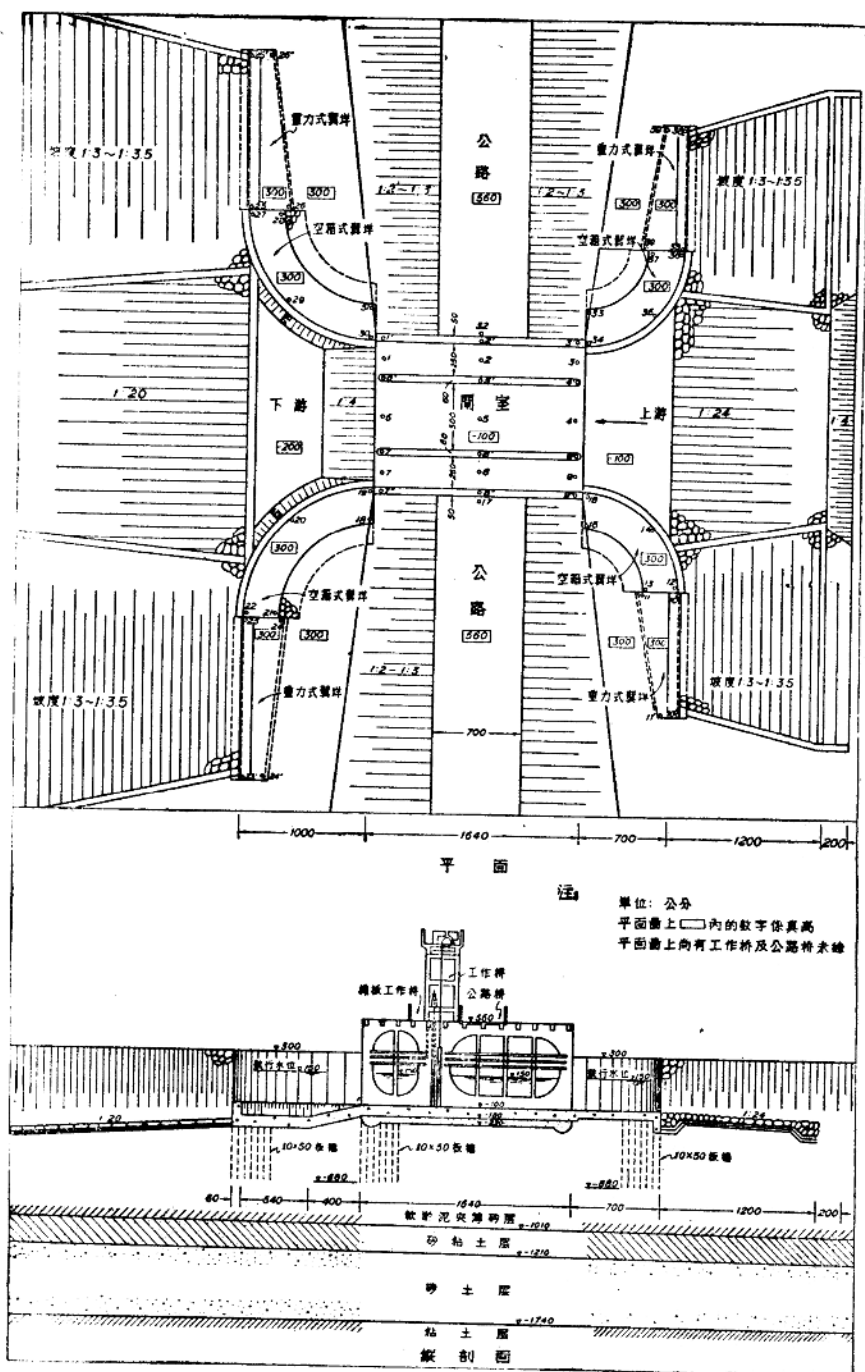
該閘是在江苏北部濱海地区的海洋沉積土上建造的。土層情况及其平均物理力学性指标，系根据1955年12月大浦閘工务所編印的“大浦閘工程初步总结”中的記載，如第1表⁽¹⁾。

第1表 大浦閘地基土的平均物理力学性指标

标 (公尺)	高	+3.0(地面)~-10.1	-10.1~-12.1	-12.1~-17.4	-17.4 以下
土層厚度(公尺)		13.1	2.0	5.3	
粘土成分(%)		38~77	20		
土的分类		粘土(軟淤泥)	砂 粘 土	砂 土	粘 土
含水量(%)		60	24		
容重(噸/公尺 ³)		1.65	2.04		
孔隙比		1.63	0.65		
流性限度(%)		61	30		
塑性限度(%)		22	15		
塑性指数(%)		39	15		
稠度		0.98	0.60		
标准貫入击数		< 1	14	21	16
抗压强度(公斤/公分 ²)		0.31	0.71		
压缩系数(公分 ² /公斤)		0.12			
快剪凝聚力(公斤/公分 ²)		0.14			
快剪內摩擦角		1°20'			

因为从地面(标高+3.0公尺)以下，至标高-10.1公尺厚約13.1公尺的高压縮性軟淤泥中，無論在滑动問題或沉降問題上，都不能滿足工程上的要求，必須進行人工加固处理。这里采用了砂井預压和部分換沙的措施。

預压处理情况：先將通过閘室区域的高約2公尺的老擋潮堤一段削去，使与地面相平。然后在閘基区域内的軟淤泥層中加打沙井。井距2.0公尺，成三角点排列，在



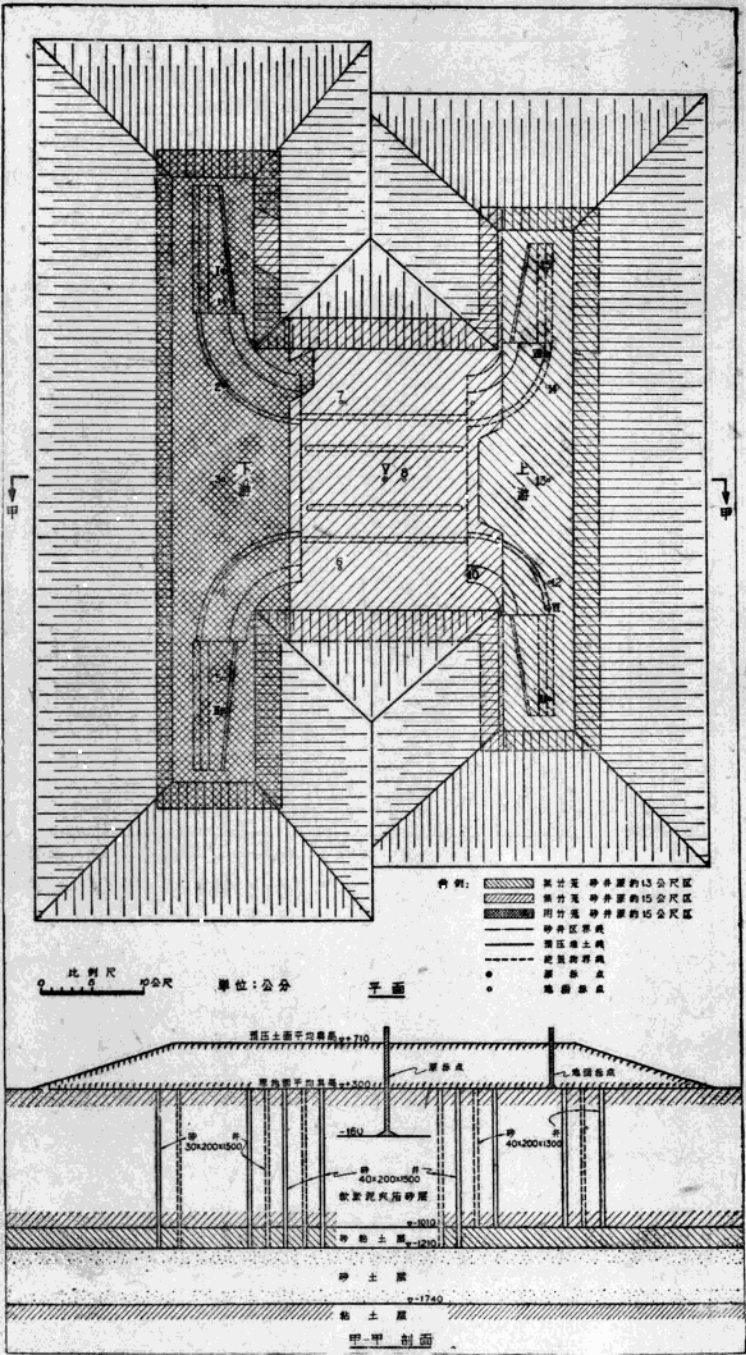
第1圖 大浦閘結構及沉降观测标点布置圖

閘室部分井徑為 40 公分，深 15 公尺，穿入下臥砂層；閘室上游部分（老擋潮堤以內）井徑亦為 40 公分，深 13 公尺，未穿入下臥砂層；閘室下游部分（老擋潮堤以外）井中填砂曾用竹籠捆扎，故有效井徑僅有 30 公分，深 15 公尺，與下臥砂層貫通。砂井上端用砂溝聯通以利排水。砂井系統布置好后，即在地面上堆土預壓。堆土分三期填加，總高約為 4 公尺多，在地面上的平均壓力為 6.5 噸/公尺²。堆土預壓時間約為 4 至 5 個月。砂井及堆土布置見第 2 圖。

地基換砂情況：閘室底板下，從標高 -1.8 至 -2.3 公尺處，換填黃砂層 0.5 公尺。上游空心翼牆基礎下換砂

亦為 0.5 公尺，下游則為 1.5 公尺。重力翼牆基礎下的換砂最厚處亦達 1.5 公尺。

此外，為了減小對地基的壓力，在施工中曾在閘牆後改填煤碴，並在重力翼牆中



第 2 圖 預壓堆土和砂井以及沉降觀測標點布置圖

砌入直徑 1.0 公尺的混凝土管，以減輕牆身重量。

(二) 沉降觀測

大浦閘地基的沉降觀測工作，從打砂井、堆土預壓時起即已由大浦閘工務所開始進行，在建閘過程中以及建閘完成后，此項工作均未間斷，現仍由大浦閘工程管理所繼續進行中。

打砂井時的地面升降情況，曾用臨時木樁標點觀測，其中六個未被損壞的臨時標點的觀測結果見第 2 表。

第 2 表 打砂井期間臨時標點觀測記錄 (標高以公尺計)

施測日期	臨 1	臨 2	臨 3	臨 4	臨 5	臨 6	備 注
1954年12月28日	3.179	3.186	3.206	3.246	3.211	3.215	未打砂井前所測
1955年1月2日	3.191	3.207	3.225	3.261	3.221	3.221	砂井打至標點附近二排時所測
1955年2月4日	3.185	3.237	3.227	3.297	3.252	3.247	砂井打過標點二排時所測
1955年3月2日	3.127	3.173	3.169	3.229	3.192	3.192	預壓開始時所測

所以在打砂井時，地面曾先有隆起，平均約為 34 公厘。繼之則下沉，到開始堆土預壓時止，平均下沉量約為 61 公厘，較原來地面標高降落平均約 27 公厘。

堆土預壓期間的觀測標點有四組：

第一組為深標點 7 個，埋設在地面以下標高 -1.6 公尺處，分布在閘基區域內：閘室下游 2 個，編號深 I、深 II；閘室部分 3 個，編號深 III、深 IV、深 V；閘室上游 2 個，編號深 VI、深 VII。

第二組為地面標點 15 個，標高 +3.0 公尺；閘室下游 5 個，編號木 1 至木 5；閘室部分 5 個，編號木 6 至木 10；閘室上游 5 個，編號木 11 至木 15。

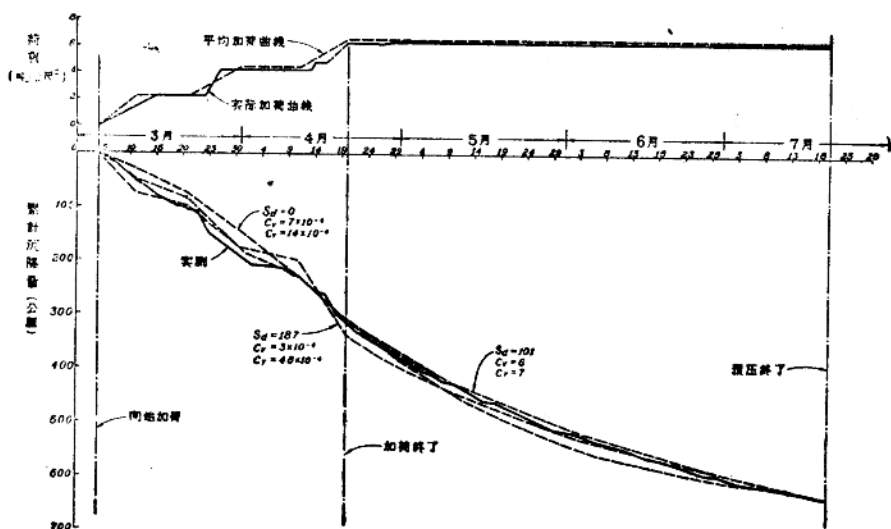
第三組為地面暗標 15 個，設在地面標點近旁，目的在開挖堆土後，校核地面標點的沉降數值。

第四組標點 28 個，設在預壓堆土區外圍地面，目的在觀測堆土預壓過程中，坡腳處是否有隆起和水平移動情況，以判斷加土速率和數量。

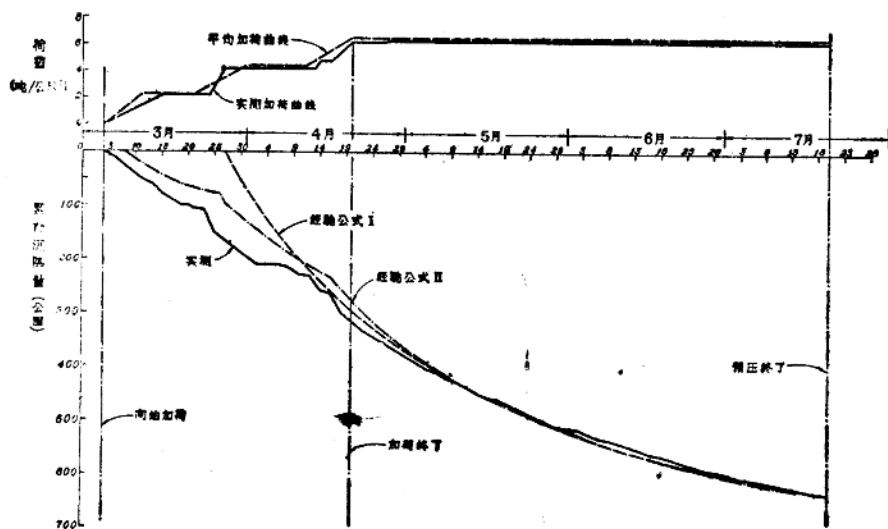
第一、二兩組標點為預壓時期地基沉降的主要觀測標點，其布置情況見第 2 圖，部分標點 (木 8、深 V、木 12、深 VI、木 14、深 VII、木 1、深 I、木 5、深 II) 的記錄見第 3 圖。在預壓終了時，上述各標點的沉降量如第 3 表。

第 3 表 預壓終了時 (1955年7月20日) 各標點的沉降量 (以公厘計)

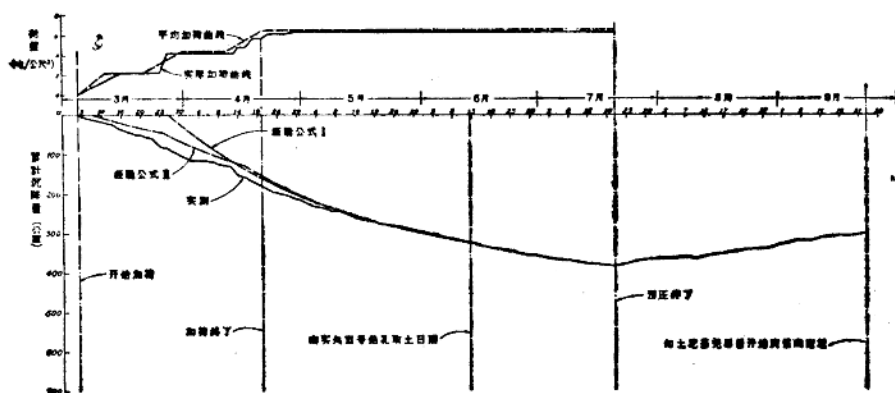
閘室下游	標 點	木 1	木 2	木 3	木 4	木 5	深 I	深 II	
	沉 降 量	681	808	750	694	675	413	486	
閘室部分	標 點	木 6	木 7	木 8	木 9	木 10	深 III	深 IV	深 V
	沉 降 量	595	609	634	679	717	406	365	386
閘室上游	標 點	木 11	木 12	木 13	木 14	木 15	深 VI	深 VII	
	沉 降 量	469	715	701	646	694	510	498	



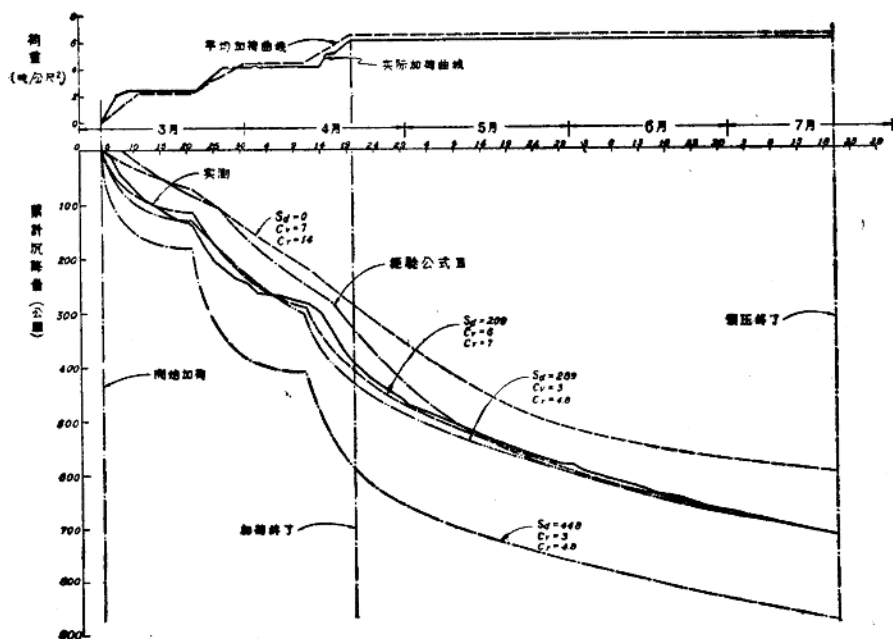
第3.1圖(甲) 預压期标点木8处的沉降过程曲线



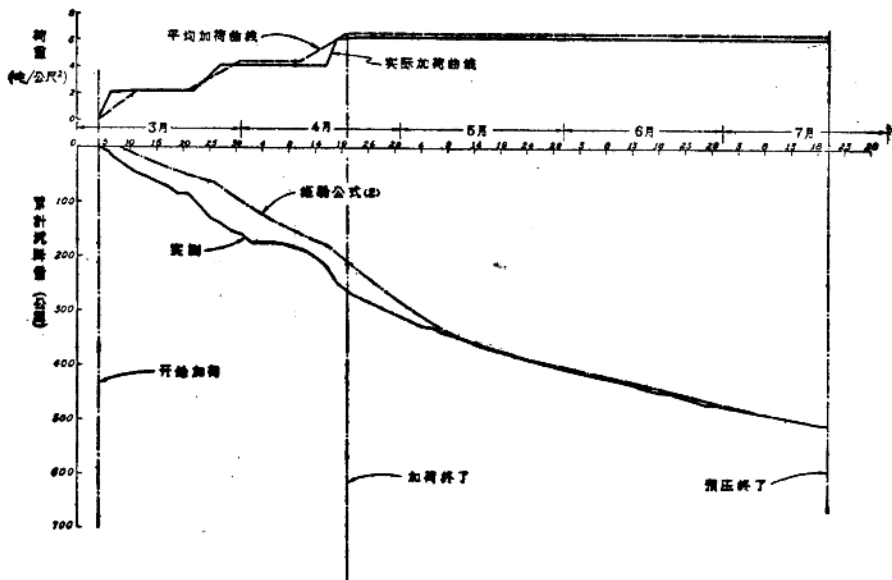
第3.1圖(乙) 預压期标点木8处的沉降过程曲线



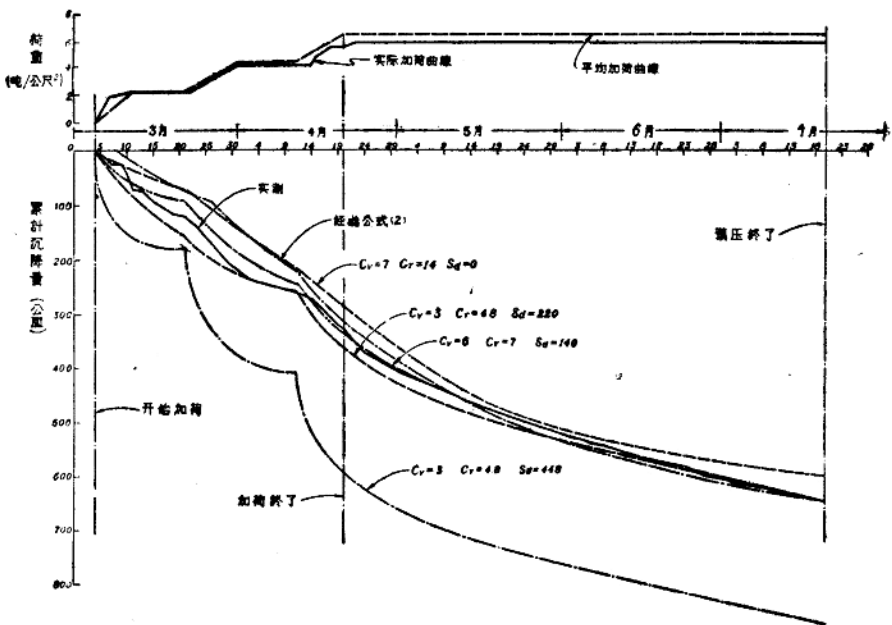
第3.2圖 預壓期標點深V處的沉降過程曲綫



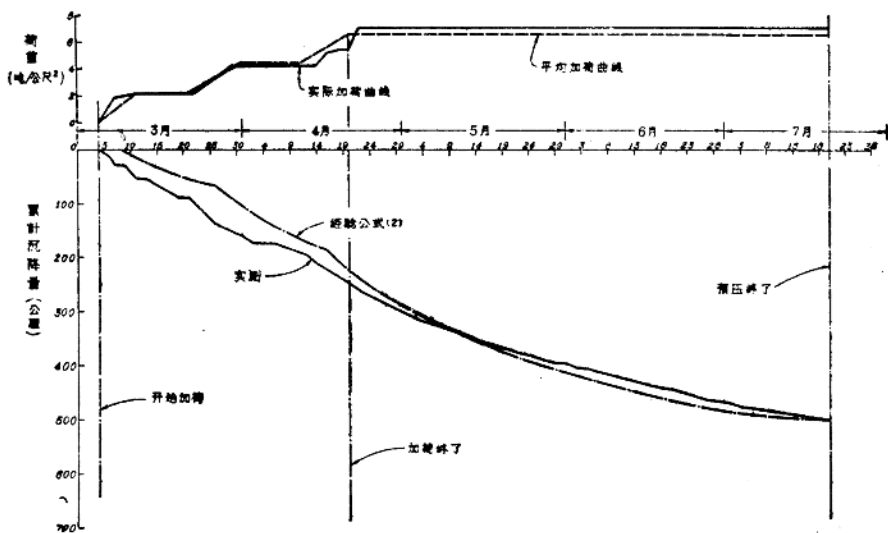
第3.3圖 預壓期標點木12處的沉降過程曲綫



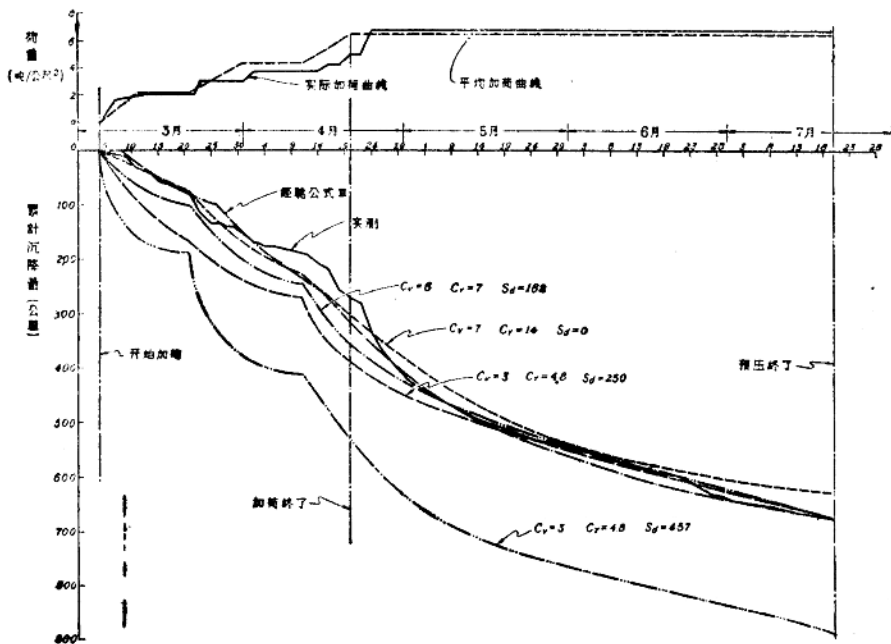
第3.4圖 预压期标点深VI处的沉降过程曲线



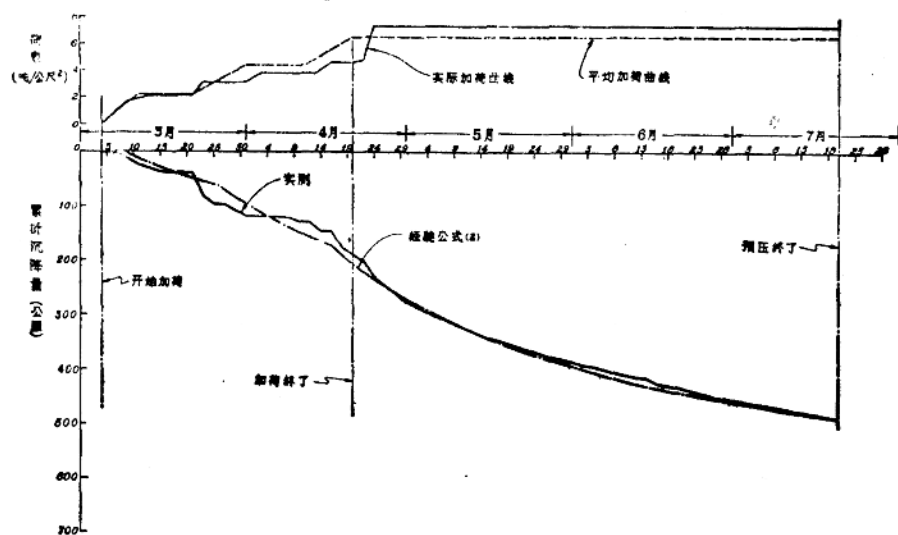
第3.5圖 预压期标点木14处的沉降过程曲线



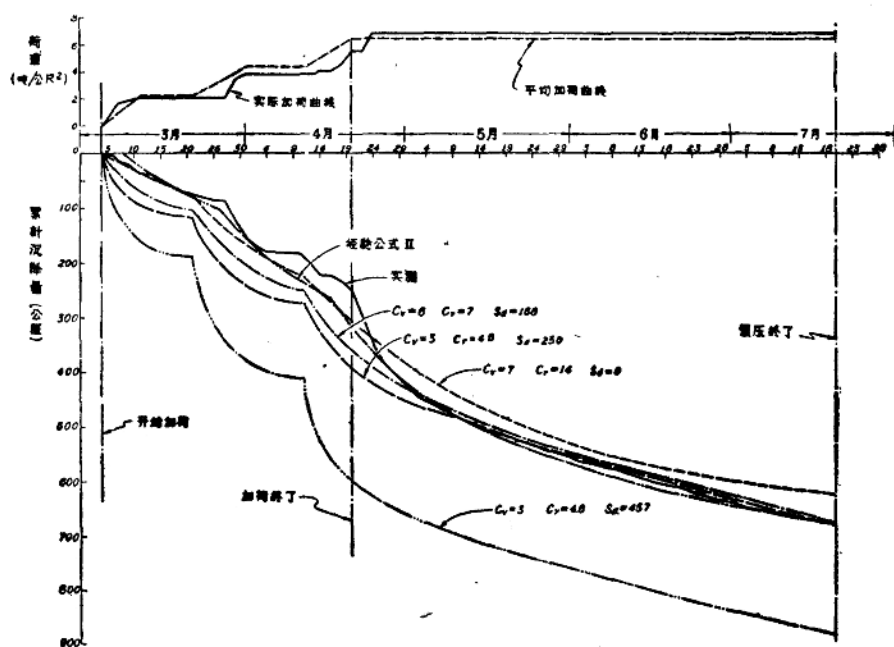
第 3.6 圖 预压期标点深Ⅶ处的沉降过程曲线



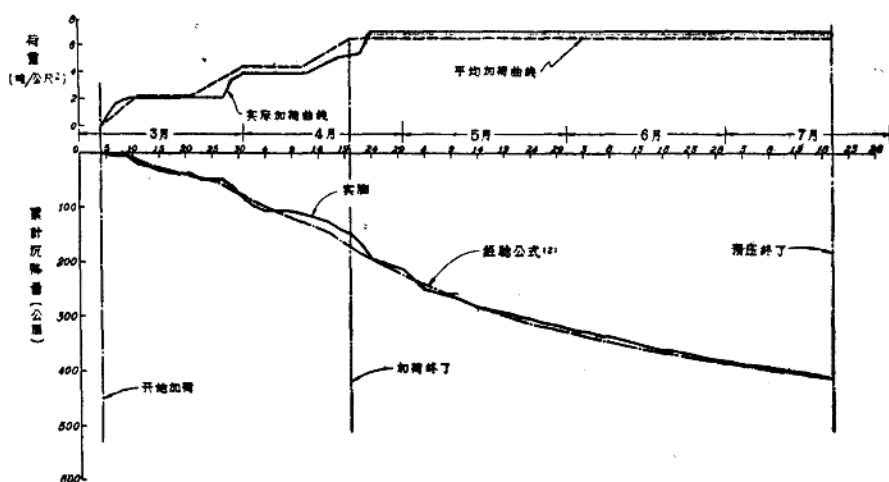
第 3.7 圖 预压期标点木 5 处的沉降过程曲线



第3.8圖 預壓期標點深Ⅱ處的沉降過程曲綫



第3.9圖 預壓期標點木1處的沉降過程曲綫



第3.10圖 預壓期標點深I處的沉降過程曲綫

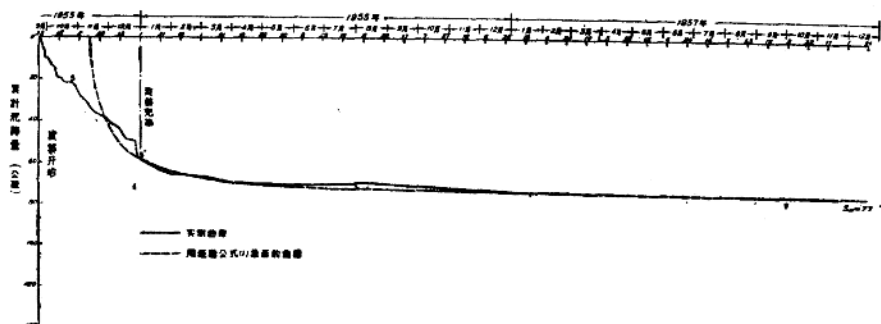
深標點的記錄在开挖閘塘時仍繼續進行，一直維持到開始澆筑閘基底板，此時（1955年9月下旬）這7個標點的回彈量如第4表。

第4表 开挖閘塘后底板澆筑开始时（1955年9月下旬）深標點回彈量（以公厘計）

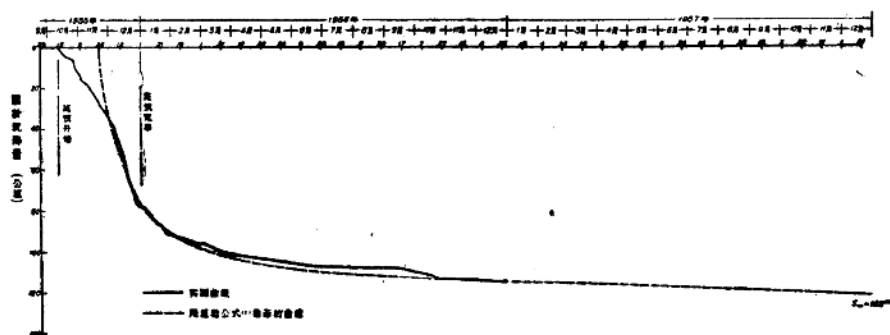
標 點	深 I	深 II	深 III	深 IV	深 V	深 VI	深 VII
回 彈 量	83	97	77	70	86	124	132

注：標點深I、深II、深VI、深VII的回彈量曾受附近打板樁時振動影響。

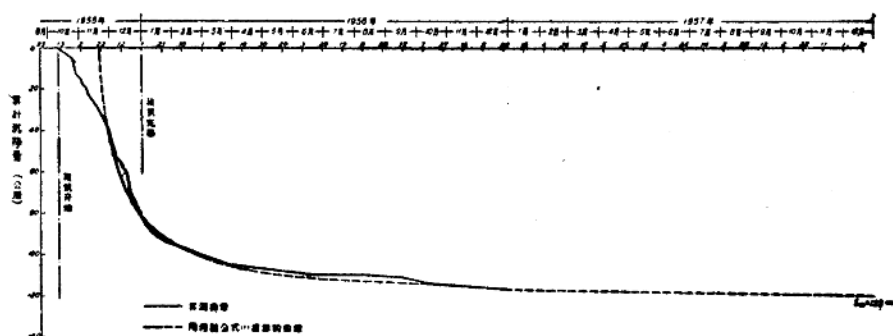
建築物的沉降觀測，從底板澆筑時起即行開始。在觀測過程中，某些觀測點的位置曾有變動。例如閘室的沉降觀測點，原來設置在閘室地板上，共有9個標點（編號1至9），但在閘室進水后，即改在閘牆和閘墩頂上觀測，共有12個標點（編號1至9和7''至9''）。到目前為止，經常保持記錄的標點尚有40個，其布置情況見第1圖。部分標點（5、5'、10'、38'、23'、25'、13、37、21、28）的記錄見第4圖。



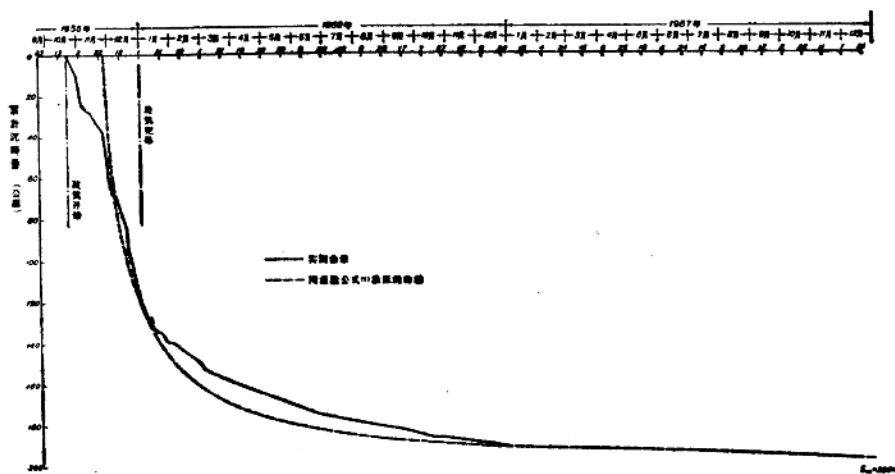
第4.1圖 建閘后標點5.5'處的沉降過程曲綫



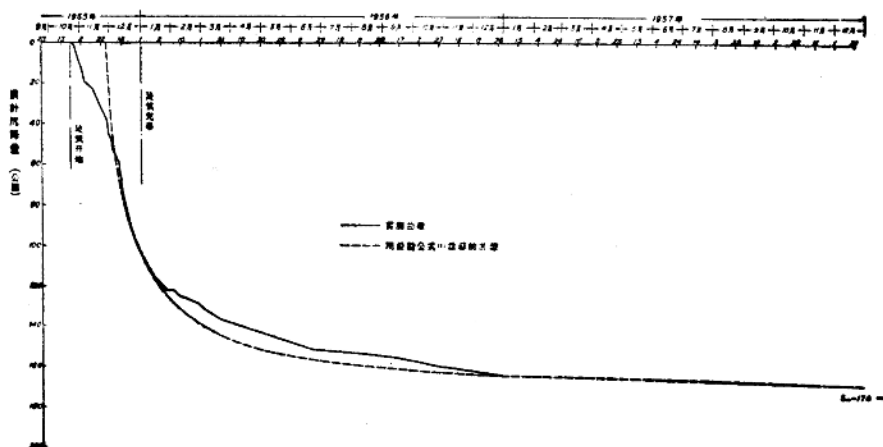
第 4.2 圖 建開后标点 10' 处的沉降过程曲线



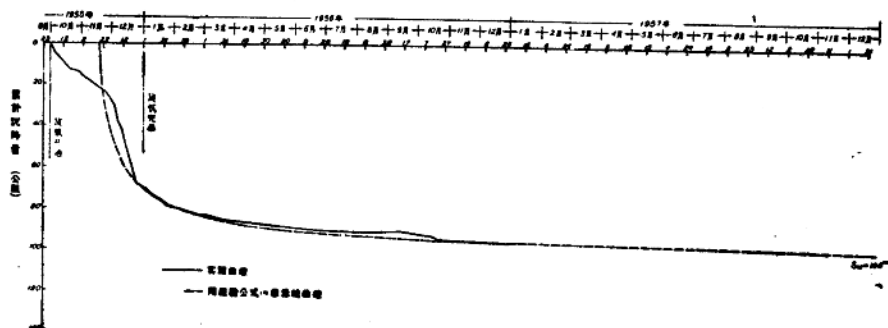
第 4.3 圖 建開后标点 38' 处的沉降过程曲线



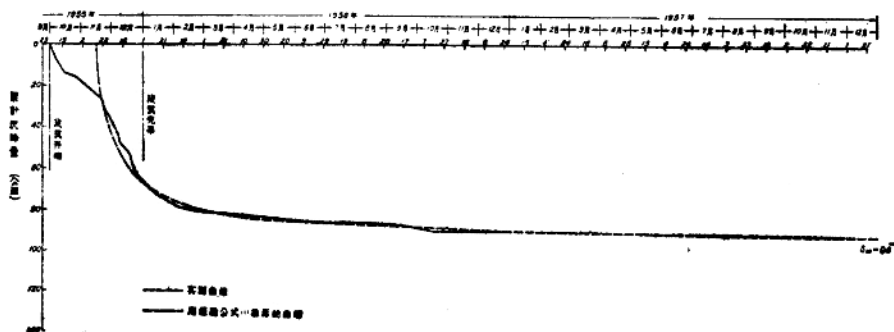
第 4.4 圖 建開后标点 23' 处的沉降过程曲线



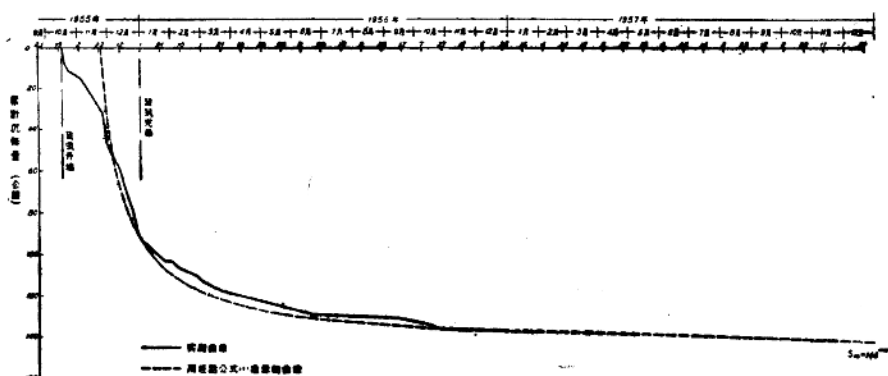
第 4.5 圖 建開后标点 25' 处的沉降过程曲綫



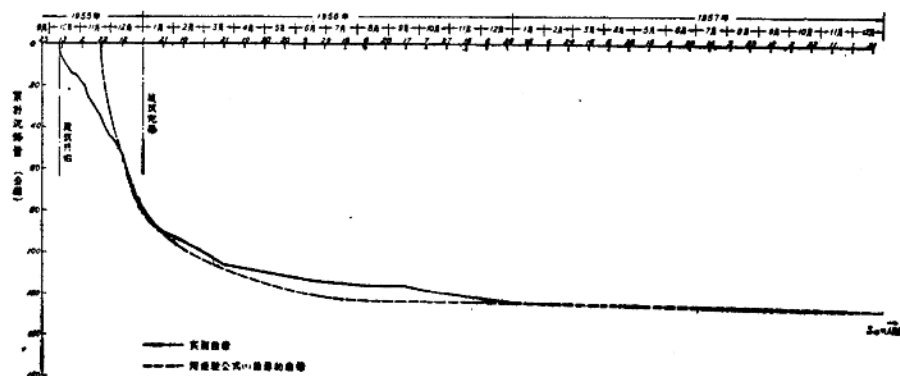
第 4.6 圖 建開后标点 13 处的沉降过程曲綫



第 4.7 圖 建開后标点 37 处的沉降过程曲綫



第4.8圖 建閘后标点21处的沉降过程曲线



第4.9圖 建閘后标点28处的沉降过程曲线

上述各标点在建閘完工时(1955年12月29日),建造后一年(1956年12月30日)和最近的实测沉降数值見第5表。

(三)地基沉降分析原理和方法

(甲)地基中应力估算

在任何垂直綫上地基中的应力可分为兩部分計算:一部分是垂直綫上土体的自重应力;一部分是附加荷重所產生的应力。

在垂綫 OZ (參閱第5圖)上,土体自重垂直方向的应力为

$$\sigma'_z = \int_0^z \gamma dz$$

第5表 大涌閘在連閘完工時、建造一年後和最近實測沉降記錄（沉降量以公厘計）

標 點			沉 降 量			標 點			沉 降 量			
部 位	編號	建閘完工時 1955年 12月29日	建閘一年後 1956年 12月30日	最近記錄 1957年 1月31日	部 位	編號	建閘完工時 1955年 12月29日	建閘一年後 1956年 12月30日	最近記錄 1957年 1月31日			
左	開 室	開 墩	9'	48	62	63	右	開 墩	4'	48	61	61
			8'	59		81			5'	58	74	78
			7'	65	86	90			6'	63	82	84
		開 牆	9"	50	67	68		開 牆	3'	51	64	65
			8"	65	86	90			2'	57	74	76
			7"	71	94	98			1'	64	83	84
	空 箱 式 翼 牆	上 游	12	57	77	80	空 箱 式 翼 牆	上 游	34	35	48	51
			13	68	95	98			33	61	83	86
			14	28	41	43			35	29	38	40
			15	56	82	85			37	67	90	92
			16	33	51	54			36	56	74	77
			下 游	22	66	109			113	下 游	30	36
21		90		137	141	31	55	89	93			
20		33		55	60	29	34	58	62			
18		57		96	100	28	78	124	128			
19		32		57	61	27	56	98	102			
重 力 式 翼 牆		上 游		10'	78	115	118	重 力 式 翼 牆	上 游		38	57
			10	55	75	78	38'			80	117	120
	下 游	23'	117	192	194	下 游	25		57	99	103	
		23	65	115	121		25'		101	165	167	

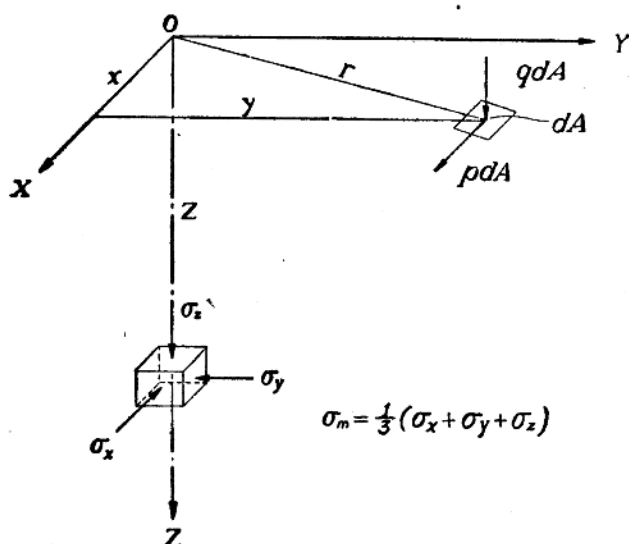
式中 z = 深度；

γ = 土的自重，干燥部分用干土重，潮湿部分用湿土重，在地下水位以下部分用浮土重。

同时，土体自重深度 z 处作用在垂直和水平方向的三个互相垂直应力的平均值为：

$$\sigma'_m = \frac{1}{3} \frac{1+\mu}{1-\mu} \sigma'_z$$

式中 μ = 土的泊桑比。



第5圖 地基中应力坐标圖

关于附加的垂直荷重在地基中所产生的应力, 这里以格列费斯 (Griffith) 和弗勒立希 (Fröhlich) 的公式⁽²⁾ 为依据, 得

$$\sigma_z'' = \int_0^A \frac{\nu}{2\pi(r^2+z^2)} \left(\frac{z}{\sqrt{r^2+z^2}} \right)^\nu q dA$$

$$\sigma_m'' = \int_0^A \frac{\nu(1+\mu)}{9\pi(r^2+z^2)} \left(\frac{z}{\sqrt{r^2+z^2}} \right)^{\nu-2} q dA$$

式中 ν = 集中因数, 在均一的完全弹性地基中等于 3, 在天然地基中, 由于土质不同, ν 值的变化范围在 3 与 6 之间;

r = 荷重着力点与垂线 OZ 的水平距离;

q = 附加垂直荷重强度;

A = 附加荷重水平面积。

关于水平荷重的类似公式⁽³⁾ 为:

$$\sigma_z'' = \int_0^A \frac{\nu(\nu-2)}{2\pi(r^2+z^2)} \frac{x}{\sqrt{r^2+z^2}} \left(\frac{z}{\sqrt{r^2+z^2}} \right)^{\nu-1} p dA$$

$$\sigma_m'' = - \int_0^A \frac{\nu(\nu-2)(1+\mu)}{9\pi(r^2+z^2)} \frac{x}{\sqrt{r^2+z^2}} \left(\frac{z}{\sqrt{r^2+z^2}} \right)^{\nu-3} p dA$$

式中 p = 附加水平荷重强度、方向与坐标轴 X 同。

所以地基中 OZ 垂线上的总应力应为:

$$\sigma_z = \sigma_z' + \sigma_z'' + \sigma_z'''$$

$$\sigma_m = \sigma_m' + \sigma_m'' + \sigma_m'''$$

(乙) 预压期地基沉降估算

1. 沉降量的估算:

在正常情况下, 地基的稳定沉降量一般可以根据土工试验资料估算, 主要有三种方法:

(1) 单向压缩法:

单向压缩法中只考虑地基土层有垂直方向的压缩, 而没有水平方向的侧向变形。这样产生的地基沉降量, 主要由于土层在荷重下发生体积变化所致, 可用下式计算:

$$S_s = \sum \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \cdot \Delta h$$

式中 e_1 = 土层中原有的稳定孔隙比;

e_2 = 荷重增加后土层的稳定孔隙比;

Δh = 土层分层厚度。

本方法所需要的计算数据是从原状土样的固结试验中得到的, 主要是垂直压力与土的孔隙比间的关系曲线。

(2) 三向变形压缩法