

# 地中壁体コンクリートの強度発現性状

W. F. 研究グループ

## Compressive Strength of Cast-in-situ Reinforced Concrete Diaphragm Wall

W. F. Research Group

### Abstract

This part gives the results of investigations on compressive strength and curing conditions of WALL FOUNDATION concrete. 1) Strength of concrete: both experimental and field work showed extremely high strengths and the rate of specimens passing the design strength requirements exceeded 98%. 2) Influence of difference in curing conditions: it was found that concrete cured underground could be expected to show higher strengths than concrete standard-cured in water or cured in open air. 3) Difference in strength depending on location inside pile: there were slightly large differences in the vertical direction and between the middle portion and end portions of the wall, but mean strength was distinctly on the safe side. 4) Curing conditions of underground wall concrete: studies of concrete temperatures underground showed these temperatures to be advantageous for concrete. The measurements of temperature distribution were compared with theoretical values.

### 概要

実験工事のうち、地中壁体コンクリートの強度発現性状、および養生条件についての調査結果を示した。イ) コンクリートの強度：実験工事、および現場工事における調査結果では、極めて大き目の強度が得られ、設計強度に対する合格率は98%以上となった。ロ) 養生条件の違いが及ぼす影響：地中養生したものの強度は、標準水中養生、または屋外養生したものに比して、高い強度を期待できることがわかった。ハ) 壁体中の位置による強度差：深さ方向、中央部と端部との間にやや大き目の強度差が認められたが、平均強度が極めて安全側にあり、問題とならなかった。ニ) 地中壁体コンクリートの養生条件：地中のコンクリート温度を中心に調査した結果、地上よりも有利な養生温度となることが判った。なお、温度分布の理論計算を行ない、実測値と比較、検討してみた。

## 1. 地中壁体コンクリートの圧縮強度

### 1.1. まえがき

連続地下壁工法では、ベントナイト泥水とコンクリートを置換させて打設するため、コンクリート強度がベントナイト泥水によって影響されると考えられる。

本実験では、地中壁コンクリートの品質を、強度の面から調査する目的で、コンクリート壁体から抜取った供試体ならびに標準水中養生、屋外放置養生の供試体について強度試験を行い、地上の一般構造用コンクリートの強度と比較・検討を行ったものである。

### 1.2. 調査方法および経過

試験の対象としたものは、WALL-FOUNDATION試験工事における7例の他に、4つの現場調査例を加えた計11例である。各調査とも施工後の壁体から、水

調査 種別	実地場所	設計強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	日 ス ラ ン ク (cm)	W/C比 容積上	S/A (%)	セメント (kg)	水 (ℓ)	砂 (kg)	砂利 (kg)	出和剤
a	O 現場	210	18	62.0	42.0	313	194	790	1056	なし
b	D および F 現場		21	58.9	42.8	350	206	770	1081	なし
c	大林組技研内 試験工場		21	57.7	45.7	344	184	813	979	ウイソゾール
d	T 現場	240	17	48.5	43.5	390	175	762	1006	ウイソゾール
e	大林組技研内 試験工場	315	21	47.5	40.3	425	187	687	1030	ウイソゾール No.5 L

表一1 トレミーコンクリートの調合例

平或いは鉛直にコンクリート・コアを抜取り、切断・成型ののち強度試験を行った。特に壁体の載荷試験を実施した No. 4~6壁については、鉛直に約15cm貫通するコアを採取した。ただし、強度試験実施時のコンクリートの材令は、壁体を掘起した後にサンプリングをしている関係上かなりの長期材令となった。なお、工事に使用したコンクリートの調合比は表一1に示す

調査例	調査種別	設計強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	機合 (円)	試験個数 (n)	平均強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	標準偏差 (kg/cm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)	正規偏差	設計強度に対する不良率 (%)
試験工事No.4壁	c	210	9	44	313	49	15.6	2.10	1.8
2. " No.5 "	c	210	9.5	50	296	41	13.7	2.10	1.8
3. " No.6 "	c	210	9	48	378	50	13.1	3.38	0.0
4. " No.9 "	e	315	8	21	464	34	7.3	4.38	0.0
5. " No.10 "	e	315	8.5	21	509	38	7.5	5.11	0.0
6. " No.11 "	c	210	8	3	349	28	8.0	4.96	0.0
7. " No.12 "	c	210	8.5	4	336	27	8.0	4.67	0.0
8. T 現場	d	240	32~34	33	385	49	12.7	3.57	0.2
9. D "	b	210	3~4	28	342	23	6.7	5.74	0.0
10. F "	b	210	7	8	306	36	11.8	2.67	0.4
11. O "	a	210	12~13	42	337	41	12.2	3.10	0.1

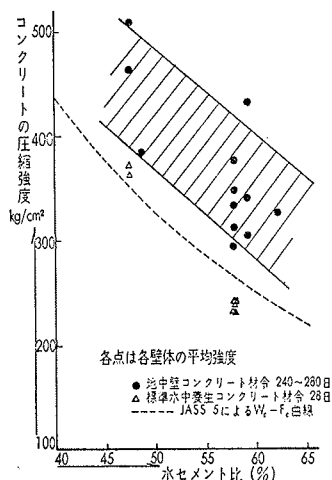
表一 地中壁体コンクリート強度の調査結果一覧

とおりである。

### 1.3. 試験結果と考察

#### 1.3.1. 強度試験結果の概要

地中壁体コンクリートの強度発現について、調査結果を総合すると、非常に高い強度が得られていることが先ず指摘される。表一2は、11カ所の調査結果の一覧を示しているが、それによれば、いずれも設計基準強度に対し、極めて大きな強度が得られ、設計強度に対する合格率は98%以上となった。これは、JASS5のコンクリート品質管理規準と比較して、相当安全側の値である。次に、強度の測定値と水セメント比との関係をプロットしたところ図一を得た。図中の点線は、JASS5による水セメント比と調査強度の関係を示している。これから判るように、実際のコンクリート強度は、目標調査強度を大幅に上回っている。その理由の一つとして長期材令強度であることが考えられるが、ここでは、むしろ良好な養生条件の効果によるところのほうが大いと思われた。



図一 水セメント比と圧縮強度の関係

1.3.2. 養生条件の違いが強度に及ぼす影響 同じ壁体に打設したコンクリートを異なる条件で養生し、同じ材令で試験したときの強度比較を図二に示した。

それによれば、地中養生したものの強度は、標準水中養生したものや屋外養生したものより、いずれも高い強度を示した。屋外養生コンクリートは、地上の一般構造物のコンクリートに相当するわけであるから、

このことは、地中壁コンクリートの方が一般構造物用コンクリートよりもむしろ良好な強度発現が得られることを示している。

また、標準水中養生供試体よりも、常に地中養生コンクリートの方が高い強度を示したことは、地中壁コンクリートの品質管理法として通常の標準水中養生供試体による管理を実施すれば、安全側の管理となることを示している。

これは、地中壁体から逐一コアシリンダーを抜取って強度管理を行う必要はないことが考えられる。

1.3.3. 壁体中の位置による強度差の有無 地中壁体コンクリートの良好な強度発現が、壁体中のすべての部位について言えるかが問題となる。図一3~4に深さ方向の強度分布の例を、また、図一4に、壁体中心部と周辺部との強度差の側を示した。深さ方向を上位、中位、下位の3つの水準に分けて、8つの壁体の深さ方向の強度差の検定を行い、表3の分散分析を得た。

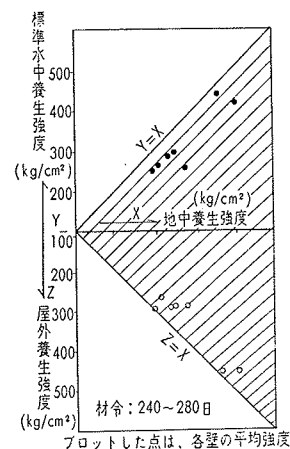
また、図一4に示された、中心部と端部との強度の差検定をして、表一4の結果を得た。これらより、深さ方向の強度差、および中心部と端部の強度差の双方とも、5%の水準で有意となり、高度の有意差ではないが、若干の強度差のあることが判った。しかし、一方、平均強度の発現率が高いので、このようなバラツキが生じて、設計基準強度に対する合格率には、顕著な影響を及ぼしてはいない。

要因	変動	自由度	不偏分散	分散比	F(0.05)	F(0.01)		
因子(深さ方向の強度差)	S <sub>A</sub>	253	φ <sub>A</sub>	2	V <sub>A</sub> 127	V <sub>A</sub> /V <sub>E</sub> 4.4	3.47	5.78
誤差 E	S <sub>E</sub>	612	φ <sub>E</sub>	21	V <sub>E</sub> 29			
計	S	865	φ	23				

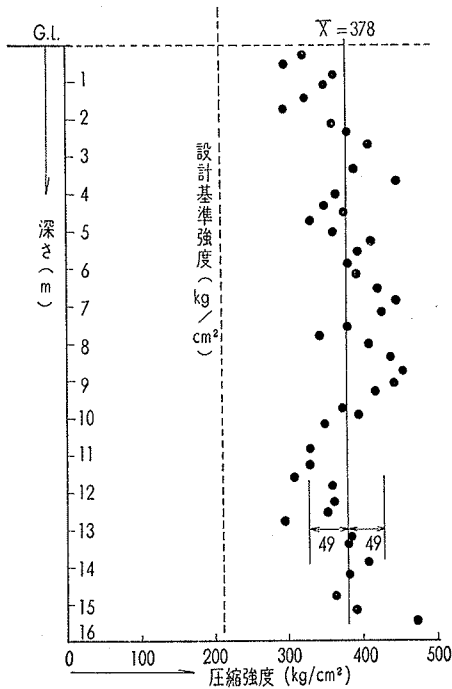
表一3 深さ方向の強度差の分散分析表

要因	変動	自由度	不偏分散	分散比	F(0.05)	F(0.01)		
因子(中心部と端部)	S <sub>A</sub>	309	φ <sub>A</sub>	2	V <sub>A</sub> 154.5	V <sub>A</sub> /V <sub>E</sub> 3.7	3.23	5.18
誤差 E	S <sub>E</sub>	1610	φ <sub>E</sub>	39	V <sub>E</sub> 41.3			
計	S	1919	φ	41				

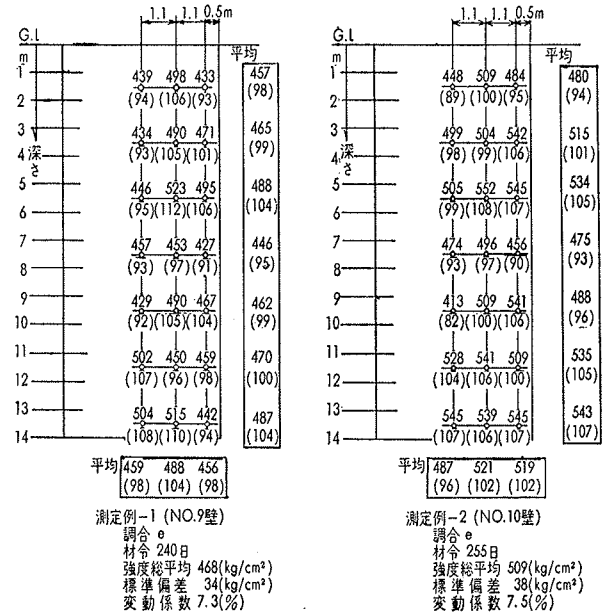
表一4 中心部と端部との強度差の分散分析表



図二 養生の相違による強度発現の違い



図一三 鉛直方向の強度分布 (No. 6 壁の場合)



図一四 壁体中の位置による強度分布  
〔 ( ) 内は、平均値に対する指数〕

## 2. 地中壁体コンクリートの養生条件

### 2.1. まえがき

地中壁体コンクリートの養生は、地上で打設するコンクリートの養生に比べ、次の点が異なる。即ち、

- (イ) 地中は、恒温多湿である。
- (ロ) 水和熱が蓄積しやすい。
- (ハ) 自重および周辺土圧によって圧密される。

下記のような方法で地中で打設したコンクリートの養生条件を、養生温度を中心に実態調査を行なった。

### 2.2. 調査方法および経過

温度測定の対象は、地中壁コンクリートの温度変化であるが、参考のために、施工現場の地温、実施調査の断熱温度上昇を測定した。断熱温度上昇試験は、大林組技研式試験法に拠った。コンクリートの調査は、WALL-FOUNDATION 試験工事にて採用した2種類のもので、各々表一1に示した通りである。温度測定をした壁体の寸法は、5.5 m × 16 m × 0.6 m (No. 9壁) および 2.2 m × 16 m × 0.6 m (No. 12壁) であり、壁厚に関しては、マスコンクリートとは言い難い寸法であるが、掘削機械の種類によって支配される標準的な寸法である。壁体の温度測定は鉄筋かご組立て時に設置した銅コンスタン型熱電対によって行い、自動打点式記録計にて記録させた。

更に、測定した温度変化とコンクリートの強度発現との関係をより明確にするために、実験室において実測値に近い温度で、コンクリートシリンダーを強制加

調査の種類	W/C (強度上) (%)	S/A (%)	セメント	水	砂	砂利	混和剤
e	47.5	40.3	425	187	687	1030	ボズリス Na5L
c	57.7	45.7	344	184	813	979	ワインゾール

表一五 コンクリートの調査表

熱養生し、各材令毎の強度変化を調べた。

### 2.3. 結果とその考察

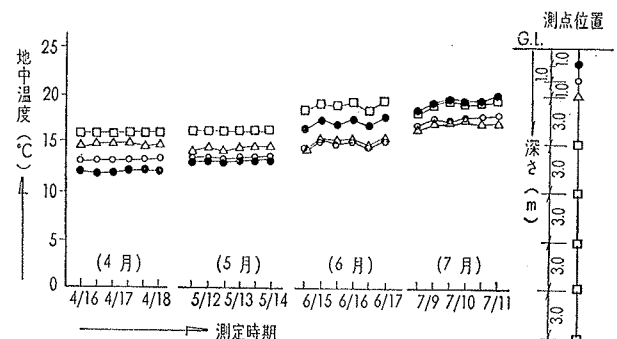
#### 2.3.1. 地温の測定

当施工現場における地温の昭和47年4月～7月に於

試験体 No.	断熱温度上昇(°C)		
	1回目	2回目	平均
9	53.0	51.7	52.4
12	41.1	43.0	42.1

表一六 断熱温度測定結果

ける測定結果は、図一5に示したとおりである。それによれば、地表面より6m以下の深さの地温は、ほぼ一定温度であることがわかる。



図一五 地温の測定

ただ、表面に近い部分が、若干外気温の影響を受けやすいのは、当現場の地下水位が低い（GL-20m以下）ことにもよる。壁体の大半の部分に接触する地盤の温度は、16～20℃の範囲の値であった。この値は、施工現場がかわっても、それほど大きくは、変わらないものと考えられる。

**2.3.2. 断熱温度上昇** 表一5に示した調合の断熱温度上昇試験の結果を、表一6および図一6に示した。地中壁体コンクリートは、水中コンクリートに準ずるものとの考えから、比較的セメントの使用量が多く、通常350kg/m<sup>3</sup>以上のセメントが使われている。その結果、コンクリートの潜在的な発熱総量も大となり、断熱温度上昇値もかなり大きな値となった。

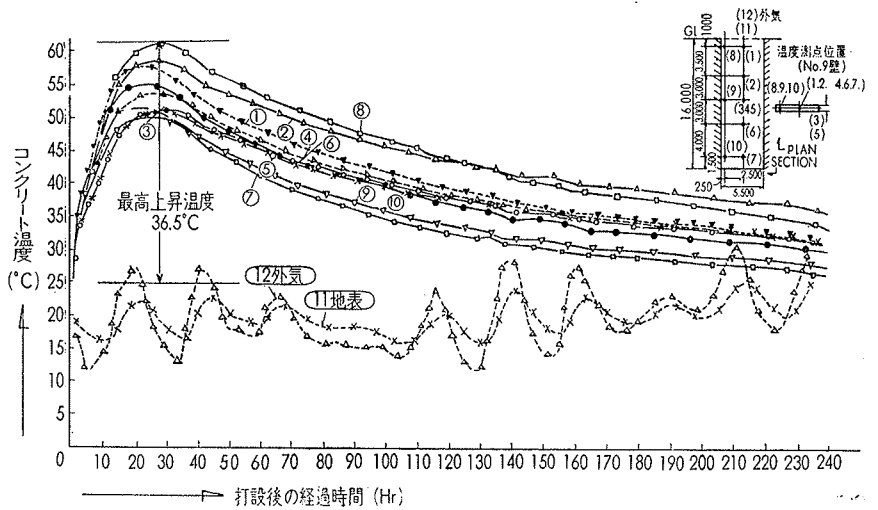
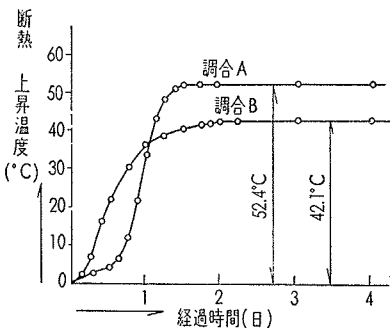
**2.3.3. 地中壁体コンクリートの温度測定** 試験工事に採用した2種類の調合について、コンクリート温度の経時的な変化を測定し、図一7、8、および表一7の結果を得た。測定的位置は、図中に示したとおりである。

その結果、コンクリートの最高温度は、No. 9 壁で 61.5℃、No. 12 壁で54.0℃を示した。どれだけの最高温度となるかは、単位セメント量、練上りコンクリート温度、壁厚などによって異なるが、少なく見積っても40～50℃には達するであろう。

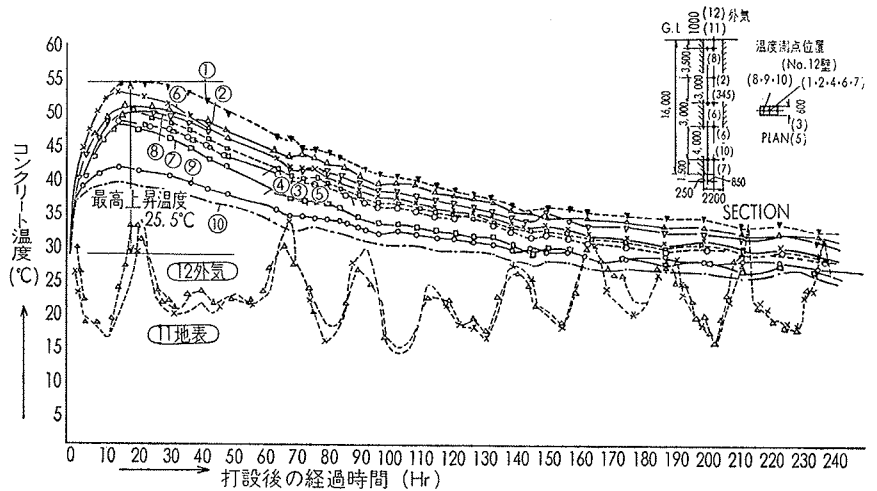
更に地上の養生と較べて特徴があるのは、最高温度に到達後の放熱が非常に緩慢で、かなり長時間にわたって高温を保っている点である。図一7および図一8からもわかるように、コンクリート打設後2週間以降でも20℃以上の養生温度を維持している。

**2.3.4. 温度履歴の再現試験**

図一6 コンクリートの断熱温度上昇試験 (大林式試験法による2回の平均値)



図一7 地中壁体コンクリート温度の測定例 (その1)



図一8 地中壁体コンクリート温度の測定例 (その2)

地中壁体コンクリートの養生温度が高いことは明確になったが、それがコンクリ

試験体 No.	調合	打設時期	最高温度 上昇(°C)	外気温(°C)	
				最低	最高
9	e	47 6月1日	36.5	12	31
12	c	47 6月10日	25.5	17	33.5

表一7 No. 9, 12 壁体の温度測定結果  
ート強度の発現と如何に対応しているかは明確ではない。そこで、実験室において壁体の温度履歴に近似させて、テストピースを水中加熱させ、各材令毎に強度を調べたところ、表一8のような結果を得た。

それによれば、加熱養生を施した供試体は、材令7日で材令3カ月強度の約8割の強度に達することが判った。これは、標準水中養生および屋外養生した供試体よりも、強度発現がかなり早い。これから地中壁コンクリートの初期強度がかなり大きいことを類推しうる。

養生材令	1日	3日	7日	4W	3ヵ月
標準水中養生	16	40	63	97	100
加熱養生	17	48	79	96	100
屋外養生	16	31	43	74	86

標準水中養生3ヵ月を100としたときの指数

表一 各種材令における養生の異なるコンクリートの強度比較

2.4. 経時温度分布理論解析

2.4.1. 計算式の誘導 2次元不定常の熱伝導微分方程式は次式で示される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + \frac{a}{\lambda} \cdot h \quad \dots\dots (2.1)$$

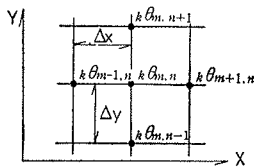
$\theta$  : 温度     $x, y$  : 位置     $h$  : 水和熱の発熱量  
 $t$  : 時間     $a$  : 熱拡散率     $\lambda$  : 熱伝導率

厳密な演算をおこなうと、膨大な計算となるために、微分方程式(2.1)式を、差分方程式に置き換えて数値計算による近似解を求める。

基本方程式は次の様にあらわされる。

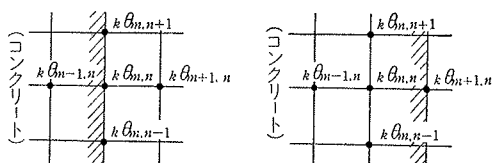
$$\frac{k_{+1}\theta_{m,n} - k\theta_{m,n}}{\Delta t} = a \cdot \left( \frac{k\theta_{m+1,n} + k\theta_{m-1,n} - 2 \cdot k\theta_{m,n} + k\theta_{m,n+1} + k\theta_{m,n-1} - 2 \cdot k\theta_{m,n}}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{k_{+1}H - kH}{\Delta t} \quad \dots\dots (2.2)$$

コンクリートと土との境界部分は、熱定数が異なるため、基本方程式(2.2)式をそのまま使用することはできない。そこで仮想温度分布という考え方を取り入れる<sup>2)</sup>。つまり、コンクリートを境界線から1刻みだけ



図一 格点温度

外側に延長して考えた場合の位置(m+1, n)のコンクリート温度( $k\theta_{m+1,n}$ )'を、仮想温度と定義すると、境界における熱流は等しいという条件から、仮想温度が次のように導かれる。



図一 境界の格点温度

$$(k\theta_{m+1,n})' = \frac{2 \cdot \lambda_s}{\lambda_c} (k\theta_{m+1,n} - k\theta_{m,n}) + k\theta_{m-1,n} \quad \dots\dots (2.3)$$

コンクリート仮想温度が得られると、境界線上の各点も、(2.2)式を使用することができる。

2.4.2. 初期条件 第1項で述べた方法を使って、No. 9 壁について時間の各変化におけるコンクリート温度分布の計算をおこない、実測値と比較して検討を加える。

計算のための各定数は、実測値から次の様に決定する。

打設時コンクリート温度	25.1°C
コンクリート比熱	0.240
コンクリート比重	2340 kg/m <sup>3</sup>
土中温度	19.0°C
土の比熱	0.440
土の比重	2000 kg/m <sup>3</sup>

2.4.3. 熱伝導率 コンクリートと、地盤の熱伝導率については実測を試みていないため、次の様に推定値を求める。

まず地盤の熱伝導率は、GL-7m まで含水比115% 関東ローム層、GL-7~15mまでは砂礫層であるところから、湿潤状態の砂質ロームの熱伝導率 1.76kcal/m・h・°Cを採用する<sup>3)</sup>。

壁体コンクリートが深さ方向に深ければ充分圧密されていることが考えられるため、振動コンクリートの熱伝導率1.97kcal/m・h・°Cを採用する。

なお、これらの熱伝導率の推定値の正当性を検討するため、地盤とコンクリートの熱伝導率の値を種々変化させて計算を行い、実測値と比較してみたところ、上記の仮定値で充分近似した値が得られることがわかった。

2.4.4. 実測値との比較 図一11は上記の如き条件のもとにコンクリート打設後12日間の各経過時間ごとの各位置の温度分布を求めたものである。温度実測は打設開始後7時間目から行ったものである。

図一11から計算値を実測値と比較してみると、最高温度に達する時間帯や経時温度分布グラフの傾向性から、計算値と実測値はほぼ近似していると思われる。

初期時間について言えば、計算値の方が温度の立上がりが遅いが、最高温度は55°C以上となり大きな値を示している。長時間になると逆に実測した方が大きな値を示す。このことは、コンクリートの熱伝導率は実際は硬化とともにその値は変化していくことが考えられるが解析に際しては時間の経過に関係なく一定値をもつとして計算していることが幾分、実測値との食い

違いを生じた一つの原因と思われる。

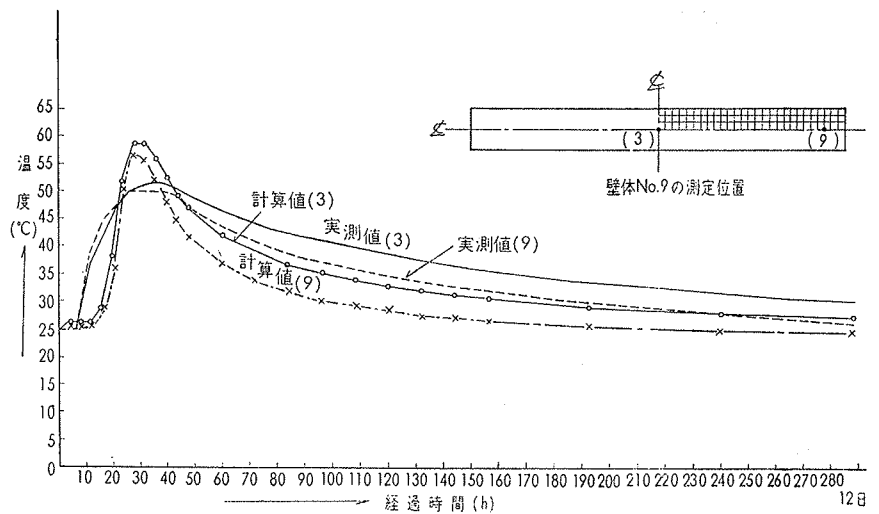
なお、28日までの温度分布を解析で求めたところ、20°C以上の温度を保持しており、計算値が実測値より一般的に低い値を示すところから、実際のコンクリートも充分20°C以上の温度で養生されていることが考えられる。

2.5. あとがき

地中壁体コンクリートの養生条件、特に養生温度は地上のコンクリートよりも、有利となることが多いことがわかった。これは地中壁体コンクリートの強度発現が良好なことを裏付けるものである。

参考文献

- 1) 高橋, 中島: 「コンクリートの水和熱による断熱温度上昇測定方法について」 日本建築学会論文報



図一11 壁体No. 9の温度測定値と計算値の比較

告集号外, Oct. 1967

- 2) 前田: 「二次元不定常熱伝導問題の有限差方程式に依る解法」 建築学会大会論文集, April, 1942
- 3) 渡辺要著: 「建築計画原論(II)」

〔文責 小柳光生〕