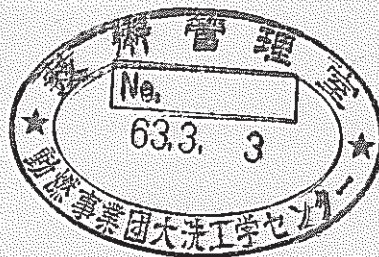


高温時におけるパーライトコンクリートの断熱性能について

コンクリート構造体温度分布測定試験



1987年12月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N9410 87-168
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

高温時におけるパーライトコンクリートの断熱性能について コンクリート構造体温度分布測定試験

佐々木和一* 姫野 嘉昭* 森川 智*

要 旨

FBR原子炉建物内では、一次冷却材バウンダリからの設計基準ナトリウム漏洩事故が起こった場合、漏洩ナトリウムを特定の部屋に集め、そこで周囲に放熱させつつナトリウムを凍結させて事故を終息に至らしめるよう設計されている。

本試験では、このナトリウム貯留部の基礎版（床）コンクリートを対象に、①コンクリート類の試験前後の熱物性値測定試験と、②通常の床と支持構造物のある床を模擬した部分工学試験体による漏洩ナトリウムから床コンクリートへの熱伝導に関する試験を行った。

この結果、前者では高い精度の熱物性値を得、後者については得たデータを基に熱伝導解析コードとの比較検討を行い、解析コードの保守性を検証した。

Test of Thermal Conduction Across the Steel Liner,
Perlite Concrete and Structural Concrete
Complex in the FBR Plant.

Kazuichi Sasaki*, Yosiaki Himeno*
Satoshi Morikawa*

Abstract

In the event of a design basis sodium leak accident in the reactor building of the FBRs, the leaked sodium is collected and stored in a sodium storage room until the accident comes to an end.

By placing the emphasis on the heat release characteristics of the sodium storage room, the following tests were performed.

- (1) Determination of thermal properties of materials for the floor of the room; perlite concrete, structural concrete, etc.
- (2) Partial engineering tests of heat conduction from a hot sodium to structural concrete simulating the accident conditions of the floor.

In the former tests, the reliable data of the thermal properties were obtained. In the latter tests, transient temperature distributions were obtained. Comparison of these distributions with the calculated results of the code indicated that the code gives conservative results.

* FBR Plant Safety Engineering Section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC.

目 次

要 旨	i
Abstract	ii
目 次	1
List of Tables	3
List of Figures	5
List of Photographs	7
緒 論	8
目 的	9
第1章 コンクリート構造体熱伝導試験	10
1. 1 試験体	10
(1) 試験体製作に当たって留意した点	10
(2) 基本構造	11
(3) コンクリート等の施工	11
1. 2 試験方法	13
(1) ライナ加熱方法	13
(2) ベント水量測定法	13
(3) 試験およびデータ収録方法	13
1. 3 試験結果とその考察	14
(1) モデルA試験体内部温度分布	14
(2) モデルB試験体内部温度分布	15
(3) コンクリート放出水量	15
(4) ライナ裏面圧力	16
(5) まとめ	16
第2章 物性値測定試験	18
2. 1 供試体と測定方法	18
(1) 供試体	18
(2) 熱伝導率の測定	18

(3) グラウト材の熱拡散率測定	19
(4) 含水率の測定	19
(5) 圧縮強度と静弾性係数の測定	19
2. 2 パーライトコンクリートの熱物性	20
(1) 熱伝導率	20
(2) 含水率	20
(3) 圧縮強度と静弾性係数	20
2. 3 構造コンクリートの熱物性	21
(1) 熱伝導率	21
(2) 含水率	21
(3) 圧縮強度と静弾性係数	21
2. 4 グラウトの熱物性	23
(1) 熱伝導率	23
(2) 含水率	23
(3) 熱拡散率	23
第3章 まとめと結論	24
謝 辞	26
参考文献	27

List of Tables

- Table 1 : 構造コンクリートの使用材料および調合条件
Composition and Mixing Conditions of Structural Concrete.
- Table 2 : 打設時の構造コンクリート試験結果
Physical Properties of Structural Concrete after Mixing.
- Table 3 : グラウト材の配合条件
Composition of Grout.
- Table 4 : パーライトコンクリートの使用材料および調合条件
Composition and Mixing Conditions of Perlite Concrete.
- Table 5 : 練り上り時パーライトコンクリート試験結果
Properties of Perlite Concrete after Mixing.
- Table 6 : 各コンクリートの養生期間
Construction Records of Test Models A and B.
- Table 7 : モデルA、B試験；コンクリート放出水量
Released Water from Concrete in Test Models A and B.
- Table 8 : モデルA、B試験体；パーライトコンクリートの未熟履歴供試体の
含水率測定結果
Record of Water Loss of Perlite Concrete Determined with Test
Pieces Prepared at the Time of Constructing Test Models A and B.
- Table 9 : モデルA、B試験体；パーライトコンクリートの熟履歴供試体の
含水率測定結果
Post-Test Water Content of Perlite Concrete Determined with
Test Pieces Sampled from Test Models A and B.
- Table 10 : モデルA、B試験体；構造コンクリートの未熟履歴供試体の
含水率測定結果
Record of Water Loss of Structural Concrete Determined with
Test Pieces Prepared at the Time of Constructing Test Models
A and B.

Table 11 : モデルA, B試験体; 構造コンクリートの熟履歴供試体の
含水率測定結果

Post-Test Water Content of Structural Concrete Determined with
Test Pieces Sampled from Test Models A and B.

Table 12 : モデルB試験体; グラウトの未熟履歴供試体の含水率測定結果

Record of Water Loss of Grout Determined with Test Pieces
Prepared at the Time of Constructing Test Model B.

Table 13 : モデルB試験体; グラウトの熟履歴供試体の含水率測定結果

Post-Test Water Content of Grout Determined with Test Pieces
Sampled from Test Model B.

List of Figures

- Fig. 1 : 「もんじゅ」ナトリウム防護設備概略図
Schematic of Sodium Fire Mitigation System in MONJU.
- Fig. 2 : モデルB試験体；概略図
Schematic of Model B.
- Fig. 3 : モデルA試験体；熱電対配置図
Locations of Thermocouple in Model A.
- Fig. 4 : モデルB試験体；熱電対配置図
Locations of Thermocouple in Model B.
- Fig. 5 : ナトリウム漏洩事故時のナトリウム貯留を模擬した熱履歴
Code Calculated Temperature History of Stored Sodium on Liner
Following a Design Basis Sodium Leak Accident.
- Fig. 6 : モデルA試験；ライナ裏面温度の時間変化
Temperature Record of Liner in Test Model A During Test.
- Fig. 7 : モデルA試験；試験体内部の深さ方向温度分布の時間変化と
解析結果の比較
Change of Vertical Temperature Profile in Perlite and Structural
Concrete of Test Model A During Test and their Comparison with
Code Predictions.
- Fig. 8 : モデルA試験；試験体内部の深さ方向温度の時間変化と
解析結果の比較
Transient Temperature Changes at Various Locations in the Test
Model A During Test and their Comparison with Code Predictions.
- Fig. 9 : モデルB試験；ライナ裏面温度の時間変化
Temperature Record of Liner in Test Model B During Test.
- Fig. 10 : モデルB試験；試験体内部の175℃を超える深さ方向温度の時間変化
Time History of Region where Concrete Temperatures Exceede
175 °C in Test Model B.

- Fig. 11 : モデルB試験 ; F I N A S解析結果
Calculated Results by FINAS for Model B Test.
- Fig. 12 : グラウト材熱拡散率測定用供試体
Test Specimen of Grout for Determining Its Thermal Diffusivity.
- Fig. 13 : 熱線法による熱伝導率測定結果
Thermal Conductivities of Structural Concrete, Grout, and
Perlite Concrete Determinet by Hot Wire Method.
- Fig. 14 : 構造コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係
Relation between Compressive Strength and Static Modulus
of Elasticity Determinet for Structural Concrete.
- Fig. 15 : グラウト材熱拡散率測定結果
Thermal Diffusivity of Grout Determinet by Method of
Periodic Thermal Wave.

List of Photographs

- Photo 1 : モデルA試験体 ; 鉄筋および熱電対取付け状況
Arrangement of Reinforcement and Thermocouples in Model A.
- Photo 2 : モデルA試験体 ; 構造コンクリート打設後状況
Examination of Structural Concrete after Pouring in Model A.
- Photo 3 : モデルB試験体 ; グラウト充填状況
Pouring of Grout in Model B.
- Photo 4 : モデルB試験体 ; パーライトコンクリート打設完了後状況
After Pouring Perlite Concrete for Model B.
- Photo 5 : パーライトコンクリート側部断熱材充填状況
Insulator Located at the Side of Perlite Concrete.
- Photo 6 : モデルA, B試験体 ; 試験体完成状態
Overview of Models A and B.
- Photo 7 : ライナ加熱設備据付状態
Liner Heating System.
- Photo 8 : 水冷却器、凝縮水計量ポット据付状態
Water Condenser and Condensed Water Measuring Pot.
- Photo 9 : 迅速熱伝導率計による熱伝導率測定状況
Measurement of Thermal Conductivity on Quick Thermal
Conductivity Meter.
- Photo 10 : グラウト材熱拡散係数測定用供試体
Test Specimen of Grout for Thermal Diffusivity Test.
- Photo 11 : 含水率測定状況
Measurement of Water Content.
- Photo 12 : 圧縮強度および静弾性係数測定状況
Measurement of Compressive Strength and Static Modulus
of Elasticity.

結 論

高速増殖炉では、ナトリウムの化学的特質を考慮した種々の設計上の対策が施されている。ナトリウム漏洩事故対策もその一つで、原子炉建物については、各部屋のコンクリート壁を気密性の高い鋼製ライナで覆い、雰囲気の不活性にすることによって事故の際の漏洩ナトリウムの燃焼を防止している。また、漏洩ナトリウムについては、Fig. 1 に示すように特定の部屋又はセル（以下、これらをナトリウム貯留部と呼ぶ）に集め、そこで周囲に放熱させつつ凍結させて事故を終息に至らしめるよう設計される。

今、ナトリウム貯留部に着目すると、その構造は原型炉に採用されている矩形セル型と大型炉などで検討中のセルライナ・ガードベッセー体型などが有る。ただ、いずれの場合も事故の際には液体ナトリウムが貯留されるため、貯留ナトリウムが長時間に渡って周囲コンクリートへ及ぼす熱的影響を正確に評価することが重要となる。

貯留ナトリウムから周囲構造コンクリートへの熱伝導は、ライナ～構造コンクリート間のパーライトコンクリート等の断熱物質と、ライナ固定用の多数のボルトおよび機器固定用の支持脚等の高熱伝導物質を介して行われる。一方、受熱側の構造コンクリートは、実際には相当高い温度までその力学的強度を期待することができるが、あまり高い温度領域では原子炉設計用のデータが未整備である。そこで、適切な安全裕度を確保しつつ合理的な設計を進めるためには、このコンクリート温度変化を正確に解析評価し、変化幅を整備されたデータ範囲内にとどめる必要がある。

従来、このような目的のコンクリート温度評価には熱伝導解析コードを用いてきた。ここでは、原子炉建物の広範囲に渡る温度解析を合理的に行うため、断熱物質やコンクリートの熱物性変化、放出遊離水の蒸発や凝縮、ボルトおよび脚とコンクリート間の熱抵抗などの影響を各部分の熱物性に保守的な値を用いることで結果に保守性を持たせるようになってきた。本研究では、このような解析手法の妥当性と保守性を検証するために、コンクリート類の正確な熱物性を測定すると共に、代表的なナトリウム貯留部の床構造の部分工学試験体（部分モックアップ）による熱伝導試験を行った。

目的

原子炉建物内のナトリウム貯留部の床構造に着目して、次の諸点を明らかにすることが本研究の目的である。

- (1) コンクリートに対する事故時の熱的影響を評価する上で重要な因子となるコンクリート類の熱物性について、信頼性の高いデータを得る。
- (2) 部分工学試験体を用いた熱伝導試験から、コンクリート放出遊離水、構成物質相互間の熱抵抗などの影響を明らかにすると共に、熱伝導コードを使用した解析評価手法の妥当性を確認する。

第 1 章 コンクリート構造体熱伝導試験

1. 1 試験体

(1) 試験体製作に当たって留意した点

製作したのは2体で、1体は通常の床を模擬（以下、モデルAと呼ぶ）し、他の1体はコンクリート中に埋込んだ機器固定用の支持脚付近を模擬（以下、モデルBと呼ぶ）した。試験体の製作にあたっては、熱伝導を支配する下記の条件を「もんじゅ」設計と同一とした。

- ① ライナの材質および板厚。
- ② パーライトコンクリートの組成、厚みおよび施工方法。
- ③ 構造コンクリートの組成とその養生方法。
- ④ 構造コンクリート内部の鉄筋の寸法および配列。
- ⑤ 機器固定用の支持脚等の材質および埋め込み深さ。

ただし、試験体の水平方向の大きさと構造コンクリート全体の厚みについては下記の考え方に基づいて寸法の縮尺を行った。

① 試験体水平方向の大きさ

事故時のナトリウム貯留部における貯留ナトリウムから床コンクリートに向かう熱伝導は、垂直方向下方へのそれが支配的である。そこで、試験体水平方向の1辺の大きさはライナ固定ボルトの敷設幅である約1.5 mとし、側面からの放熱防止のために側壁の外表面に厚さ200 mmの断熱材を施工した。尚、モデルB試験体の支持脚近傍は3次元熱伝導となるが、各コンクリートの熱伝導率が小さいことから、その影響の範囲は限られる。

② 試験体の厚み

実際のプラントでは、構造コンクリートの垂直方向の厚みが5～10 mにもなる。ただ、構造コンクリートは熱伝導率および熱拡散率が小さいことから、実際に大きな温度の影響を受ける範囲は、その上端からせいぜい1 m未満である。そこで、試験体の高さを2.5 mとした。また、試験で保守側の結果を得るために試験体下面にも厚さ150 mmの断熱材を施工した。

(2) 基本構造

モデルA試験体は、上端から下部に向けてライナ～パーライトコンクリート～構造コンクリートの順に製作した。モデルB試験体は構造コンクリート上部中央に機器固定用の支持脚を設置し、その下の構造コンクリートとの間に無収縮モルタル（以下、グラウトと呼ぶ。）を100mm充填した。その他の形状、構造はモデルA試験体と同様である。Fig. 2にモデルBの概略構造を示す。

次に試験体の特徴を述べる。鋼製である外枠は、内部のコンクリートと比べるとその熱伝導率が10倍以上も大きく、これが垂直方向下方に位置する各コンクリートへの大きな熱伝導バイパスとなり得る。そこで、上端から500mm下方の位置をフランジ構造とし、そこに断熱性が良く、吸水性の極端に小さなエポキシベークライト板を挟み込み、この熱伝導径路を遮断した。さらに、ライナについては、その外枠との接合部にアスベストパッキンを使用した類似な断熱構造とし、より完全な熱伝導径路の遮断措置を取った。構造コンクリート内に埋込んだ配筋（材質：SD40、外径： ϕ 38mm、配筋ピッチ：250mm、2段）と外枠との間の接触部にも断熱措置を施した。また、温度測定用の熱電対（JIS-K-0.75級、非接地型、 ϕ 2.4mm）は、試験体の温度勾配が大きくなるコンクリート上部には密に、軸対象となる部位については水平方向の一方向を重点的に測定するように配置し、またそれらのシースと外枠の貫通部はテフロンパッキンで断熱措置を施した。モデルA試験体の熱電対設置位置をFig. 3に、モデルB試験体の熱電対設置位置をFig. 4に示す。Photo 1にモデルA試験体の鉄筋および熱電対の取付け状況の写真を示す。

(3) コンクリート等の施工

モデルA試験体は構造コンクリート～パーライトコンクリート～ライナの順で、モデルB試験体は構造コンクリート～支持脚部～グラウト～パーライトコンクリート～ライナの順で製作した。それぞれのポイントとなる施工方法について述べる。

まず、構造コンクリートについては外枠内に配筋および熱電対を設置した後、Table 1に示す使用材料および調合条件で構造コンクリートを練り、スランプ、空気量が所定の値であることを確認した後、流動化剤を規定量投入し、再度スランプ、空気量を確認してから外枠内に流し込んだ。施工時の構造コンクリートの試験検査結果をTable 2に示す。また、施工時に採取した強度管理用供試体による材令28日強度は全て設計基準

強度である 240 kg/cm^2 以上を上回っている。Photo 2 にモデル A 試験体の構造コンクリートの打設後状況を示す。

モデル B 試験体では、構造コンクリートに 28 日の養生期間を与えた後に、支持脚に相当する鋼製のソールプレートと構造コンクリートの間に Table 3 のグラウトを施工した。Photo 3 にグラウト材充填状況を示す。

次のパーライトコンクリートの施工については、構造コンクリート打設後、モデル A 試験体に 37 日、モデル B 試験体に 43 日（グラウトの養生期間を含む。）の養生期間を与えた後に、Table 4 に示す組成のものを施工した。パーライトコンクリートの上表面にはコンクリート放出水排出溝を設けた。パーライトコンクリート生比重は、Table 5 に示す通りである。Photo 4 にパーライトコンクリート打設後状況を示す。

最後のライナ（材質 SM 4 1 B、板厚：6 mm）は、裏面の必要箇所に熱電対を取りつけた後にパーライトコンクリートの上面に固定した。側面からの放熱防止は、パーライトコンクリートと側板との間に断熱材（ロックウール）を充填することによって行った。Photo 5 に断熱材充填状況を、Photo 6 にモデル A、B 試験体完成状態を示す。

1. 2 試験方法

(1) ライナ加熱方法

想定した実プラントでの事故の際には、Fig. 5 に示すライナ温度履歴のようにライナ温度は室温に近い状態から漏洩ナトリウムとの接触開始と共に急激な上昇を開始し、一定時間後の最高温度を経ると貯留ナトリウムの周囲コンクリートへの放熱によって、温度は穏やかな低下傾向をたどる。このライナ温度履歴を模擬するため、試験体上端にライナ加熱装置を設置した。このライナ加熱装置により、事故初期の急激な温度上昇をガスバーナによる急速加熱で、ライナが最高温度に到達した後の穏やかな温度低下は相対的に発熱量の少ない電気ヒータで加熱制御する。Photo 7 にライナ加熱装置据付状態の写真を示す。

今回の試験では、ライナの温度境界条件の変化を240時間に渡って模擬した。

(2) ベント水量測定法

パーライトコンクリートおよび構造コンクリートの温度上昇に伴う全放出水量の測定は、Fig. 2 に見られるベント管を用いて放出水を凝縮水ポットに回収して行った。

Photo 8 に水冷却器および凝縮水ポット据付状態の写真を示す。ベント管の口径は、パーライトコンクリート部からの放出水量をPNC所有のCONTAINコード⁽¹⁾で、また試験体全体からの放出水量を日立製作所所有のHISLACコードで解析して決定した。この他、ライナの裏面圧力測定用の圧力測定ラインをベント管と同様な取り出し方法で取り付けた。

(3) 試験およびデータ収録方法

試験は、Table 6 に示す養生期間の後に行い、試験時の試験体各部温度、放出水量およびライナ裏面圧力は、10秒間隔でミニコンピュータ(YHP-1000システム)に収録した。

1. 3 試験結果とその考察

(1) モデルA試験体内部温度分布

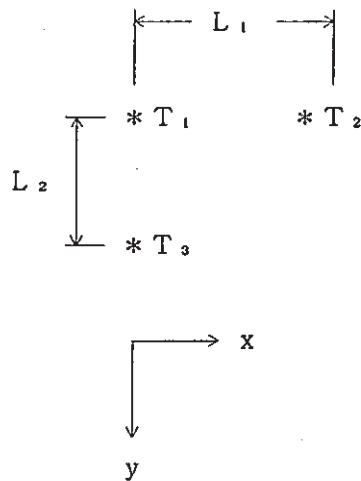
モデルA試験体で得たライナ裏面温度の時間変化をFig. 6に示す。この図から、ライナ水平方向端部の⑤と⑥は中央部の①～④より低く、試験体の周囲雰囲気への放熱のあることが分かる。このような放熱の熱流束 Q_x は、次式から求められる。

$$Q_x = \lambda_c \frac{(T_1 - T_2)}{L_1} \dots (1)$$

ここで λ_c : コンクリートの熱伝導率
(kcal/mh℃)

一方、コンクリートの下方に向かう熱流束 Q_y は

$$Q_y = \lambda_c \frac{(T_1 - T_3)}{L_2} \dots (2)$$



構造コンクリート中について、これらの熱流束を求め、周方向の熱流束の全熱流束に対する相対的な大きさを検討するために、ライナから100mm下の位置の Q_x 、 Q_y を(1)式、(2)式に実測の温度を代入して求めた。その結果、試験体中央部における周方向への放熱熱流束 Q_x は、同部分の温度が最高値を示した試験開始30時間の時で全熱流束の約4.5%であった。これより、周方向の放熱熱流束 Q_x の温度分布に与える影響は小さいと判断した。

次に、試験体内部の深さ方向の温度分布の時間変化と解析結果の比較をFig. 7に、試験体内部の深さ方向の温度時間変化と解析結果の比較をFig. 8に示す。初期のコンクリート内部温度は、試験時が約15℃で、解析では20℃と相違しているため、試験で得た値を以下の式で補正した。

$$T = T_{MAX} + \{(T_{MAX} - T_0) \times a\} + (T_k - T_0) \dots (3)$$

ここで T : 解析時のベースに合わせた時のコンクリート温度

T_{MAX} : 試験時のコンクリートピーク温度

T_0 : 試験体初期コンクリート温度

T_k : 解析時の初期コンクリート温度

a : 試験体横方向への熱の逃げ

Fig. 7から、初期のライナ温度の高い時は、パーライトコンクリートの断熱機能で構造コンクリート温度はさほど上昇していない。試験では最高温度到達後にライナ温度を降下させ始めているが、Fig. 8から構造コンクリート中の温度はこれに遅れて上昇していることが分かる。試験と解析の間には若干の相違があるが、実機評価で注目する構造コンクリートの上表面から75mmの深さの温度は約84.2℃であり、制限値の90℃を上回ってはいない。また、試験でピーク温度に達する時間が解析よりも速いのは、解析が構造コンクリートの熱伝導率に保守的な値(1.5 kcal/mh℃均一)を使用しているのに対し、試験では構造コンクリート温度がさほど上昇せず、コンクリート含水率が高いままの状態であり、熱伝導率が実機解析の値よりも高く、下方へ多くの熱を伝えたためと考える。

(2) モデルB試験体内部温度分布

モデルB試験で得たライナ温度の時間変化をFig. 9に示す。ここでもモデルA試験と同様に、ライナ水平方向端部が中央部よりも低く、周囲への放熱のあることがわかる。支持構造物であるソールプレート表面温度は(i)ソールプレート自身の熱容量が大きいこと、(ii)基礎ボルトを伝わっての軸方向熱伝導が大きいこと、等の2つの主な理由で最高約300℃までしか上昇しなかった。

次に、試験体内部の深さ方向温度の時間変化をFig. 10に示す。実機解析は、ソールプレート周辺温度を等価ボルト2次元熱伝導解析で、基礎ボルト近傍は軸対象2次元熱伝導解析で求めている。175℃以上となる深さは、前者では構造コンクリート上面から約155mmまで、後者では約195mmまでとの結果を得ている。これに対して、試験ではソールプレートの表面温度を目標値である450℃に昇温できず約300℃にとどまったため、175℃以上となる構造コンクリート内部の深さはFig. 10に示す通り、最大約155mmであった。そこで、得た試験データを用いてライナ温度が450℃均一の場合の構造コンクリート内部温度分布解析をFINAS⁽²⁾を使用して行った。その結果から、Fig. 11に示した通り、175℃以上となる構造コンクリート内部深さとして実機評価での制限距離に近い約195mmを得た。

(3) コンクリート放出水量

Fig. 2にも見られるように、パーライトコンクリートと外枠との間には、パーライトコンクリート側面からの放熱防止のため断熱材が充填してある。この断熱材の温度が試

験期間中の長い時間にわたり100℃以下となった。このためコンクリート放出水の一部がこれら断熱材に凝縮した。そこで、試験後に断熱材を回収し、その乾燥前後の重量差から断熱材中の凝縮水量を求め、この測定値とベント設備に回収された水の量から全コンクリート放出水量を決定した。この他、試験体製作時に採取したコンクリート供試体と、試験後の試験体からコアボーリングして得た供試体のそれぞれの含水率を基にした全コンクリート放出水量も推定を行った。結果をTable 7に示す。

モデルA試験体では、ベント水回収量とパーライトコンクリート供試体の含水率の試験前後の差から求めた放出水量がほぼ一致した。さらにFig. 7で示した通り、90℃以上となる領域がパーライトコンクリートだけであることから、コンクリート放出水の大部分がパーライトコンクリート部から出たものと推定した。モデルB試験体では、その製作時に準備した供試体を裸で気中養生としたために鋼製外枠で囲まれている試験体よりも脱水が進み、測定時には含水率が逆転し、このため含水率からは放出水量を決定することはできなかった。

(4) ライナ裏面圧力

ベント設備設計段階でのライナ裏面圧力は、約1000mmH₂Oであったが、試験ではモデルA試験で約38mmH₂O、モデルB試験で約29mmH₂Oと、両試験結果ともかなり低い圧力になった。理由は、試験時の放出水量が予備解析結果(約180kg)より極端に少なかったためである。また、試験開始後1時間の放出水量(凝縮水ポットで測定した放出水量)が、それぞれ約2.5kg、約2.8kgとモデルB試験の方が若干多いにもかかわらず、モデルB試験でのライナ裏面圧力が低かったのは、ソールプレートの温度が低かったため、放出蒸気温度も低く比容積が小さくなりライナ裏面圧力が上昇しなかったものと考えられる。

(5) まとめ

このように、ライナ、パーライトコンクリート、支持構造物、構造コンクリートなど物理的な特質の異なる部材で構成された複雑な構造物についても、ライナ～パーライトコンクリート、および支持構造物～構造コンクリートのそれぞれの間の熱抵抗ならびにコンクリートからの放出水などの全体の熱伝導に与える影響は無視できる程度であり、また温度分布も熱伝導解析コードによって十分な保守性を持って評価できることが明らかになった。理由は、パーライトコンクリートからの大部分の放出水が、ライナ加熱開

始後10時間前後までに完了し、それ以降のコンクリート類の熱物性が安定すること、および第2章でも述べるように、ライナからパーライトコンクリートを経由してコンクリートに至る熱伝導が、熱物性の温度依存が殆ど無いパーライトコンクリートの熱抵抗によって支配されているためである。

第 2 章 物性値測定試験

2. 1 供試体と測定方法

(1) 供試体

物性値測定試験では、2種類のテストピース、すなわち供試体を使用した。1種類は、第1章に述べた「コンクリート熱伝導試験」の試験体製作時にこれと並行して製作したテストピースであり、ここではこれを「未熟履歴供試体」と呼ぶ。他の1種類は、コンクリート熱伝導試験後の試験体からコアボーリングによって採取したテストピースであり、ここではこれを「熟履歴供試体」と呼ぶ。

(2) 熱伝導率の測定

構造コンクリート、パーライトコンクリートおよびグラウトの未熟履歴供試体（寸法 ${}^L300\text{mm}\times{}^W100\text{mm}\times{}^H50\text{mm}$ ）に対しては熱線法⁽³⁾で、これらの熟履歴供試体（寸法 $\phi 100\text{mm}\times{}^L200\text{mm}$ ）に対しては迅速熱伝導率計⁽⁴⁾で測定した。パーライトコンクリートについては、円筒法⁽⁵⁾による測定も実施した。

これらの測定方法は、熱線法と迅速熱伝導率計が非定常熱伝導から熱伝導率を、円筒法は定常熱伝導から熱伝導率を測定するものである。熱線法による熱伝導率 λ の算出には以下の式を用いた。

$$\lambda = 0.24 \times \frac{I^2 R}{4\pi} \times \frac{\log \frac{t_2}{t_1}}{\theta_2 - \theta_1} \times 3.6$$

ここで I : 熱線に流した電流値 [A]

R : 熱線の電気抵抗 [Ω/m] *1

t_1, t_2 : 熱線に通電後の時間 [min] *2

θ_2, θ_1 : t_1, t_2 における熱線の温度 [°C]

注) *1 熱線の電気抵抗は、 $\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}$ の温度における抵抗値とする。

*2 一般には $t_1 = 0.5$ 分 $t_2 = 5$ 分

迅速熱伝導率計では、特殊プローブを使用する昭和電工製迅速熱伝導率計 (QTM-D2) を使用した。Photo 9 に迅速熱伝導率計による測定状況を示す。

(3) グラウト材の熱拡散率の測定

これまで、実機で使用するグラウト材についてはその仕様決定が遅れたため熱物性の測定はなされていなかった。そこで、本試験ではFig. 12に示す形状を持った3体の供試体を特別に製作し、これらに28日以上養生期間を与えて、まず密度を測定し、次に常温～450℃の温度範囲で熱拡散率を周期的温度波法⁽⁶⁾によって測定し、得た結果から下式によって比熱を求めた。Photo 10に供試体の写真を示す。

$$C = \frac{\lambda}{a \times \rho}$$

ここで C : 比熱 [kcal/kg℃]
 a : 熱拡散率 [m²/h]
 λ : 熱伝導率 [kcal/mh℃]
 ρ : 密度 [kg/m³]

(4) 含水率の測定

構造コンクリート、パーライトコンクリートおよびグラウトの未熟履歴供試体（寸法φ100mm×^h200mm）と、熟履歴供試体（寸法φ100mm×^h200mm、ただしパーライトコンクリートは^h150mm、グラウトは^h100mm）についてJASS5NT-602「コンクリートの乾燥単位容積重量促進試験法」を準用し、これらを温度105℃に制御した乾燥炉中で一定重量となるまで乾燥させ、その重量減少量を測定し、下式から供試体の含水率を算出した。なお、一定重量とは、ここでは前日との重量差が0.5g以下となった時点を言う。Photo 11に測定状況を示す。

$$\text{含水率 (\%)} = \frac{\text{重量減少量 (g)}}{\text{供試体容積 (cc)}} \times 100$$

(5) 圧縮強度と静弾性係数の測定

含水率測定用供試体と同仕様の未熟履歴供試体および熟履歴供試体について、圧縮強度と静弾性係数（1/3 FC時のセカンドモデュラス）を圧縮試験機を使用して同時に測定した。Photo 12に測定状況を示す。

2. 2 パーライトコンクリートの熱物性

(1) 熱伝導率

未熟履歴供試体の熱線法で測定した熱伝導率は、Fig. 13に示す通り、常温～450℃の広い温度範囲で0.16～0.25 kcal/mh℃と安定した値を示した。これは、気孔の多いパーライトコンクリートが、その養生期間中に内部の余剰水分を失ったために測定時の加熱によっても新たな水放出が少なく、安定した物性を維持したためと考える。

熟履歴供試体の迅速熱伝導率計による熱伝導率は、モデルA試験体で0.16～0.21 kcal/mh℃（平均0.18 kcal/mh℃）、モデルB試験体で0.15～0.19 kcal/mh℃（平均0.18 kcal/mh℃）であった。これらの値は、本測定と並行して行われた「パーライトコンクリートの物性試験」(7) で得た0.16～0.21 kcal/mh℃（at 300℃～30℃）とも良く一致する。

(2) 含水率

未熟履歴供試体および熟履歴供試体に対する測定結果をそれぞれTable 8, Table 9に示す。前者が平均5.9 %、後者が平均2.3 %である。

(3) 圧縮強度と静弾性係数

未熟履歴供試体と熟履歴供試体で得た値を次の表に示す。

項 目	未熟履歴供試体 (kg/cm ²)	熟履歴供試体 (kg/cm ²)
圧 縮 強 度	40～70	22～33
静弾性係数	0.3～0.4 × 10 ⁵	0.12～0.18 × 10 ⁵

表から、熟履歴供試体では未熟履歴供試体よりいずれの値も約50%低下している。

2. 3 構造コンクリートの熱物性

(1) 熱伝導率

未熟履歴供試体の熱線法で測定した熱伝導率をFig. 13に示す。常温～100℃の範囲で1.26～1.53 kcal/mh℃であり、温度依存性と温度ヒステリシスがある。

熟履歴供試体で得た迅速熱伝導率計による熱伝導率は、モデルA試験体で1.52 kcal/mh℃、1.57 kcal/mh℃、1.62 kcal/mh℃、モデルB試験体で1.40 kcal/mh℃、1.45 kcal/mh℃、1.65 kcal/mh℃で、いずれもコンクリート熱伝導試験体の上面から下面になるに従ってわずかに大きな値となる傾向を示していた。このように未熟履歴供試体による値より若干高いのは、未熟履歴供試体が気中養生中に水分を失ったためと推定する。

(2) 含水率

未熟履歴供試体と熟履歴供試体で得た値をそれぞれTable 10とTable 11に示す。前者の平均が9.8 %/。であるのに対して後者の平均が15.5 %/。と高い。この原因は、すでに述べたように、前者の未熟履歴供試体はその気中養生中に内部の水分を失ったためと推定する。

(3) 圧縮強度と静弾性係数

測定結果を下に示す。

項目	未熟履歴供試体 (kg/cm ²)	熟履歴供試体 (kg/cm ²)
圧縮強度	390～460	270～440
静弾性係数	2.3～2.5 × 10 ⁵	2.7～3.1 × 10 ⁵

熟履歴供試体ではA試験体およびB試験体からのそのいずれも圧縮強度は設計基準強度である240 kg/cm²を上回っており、実機で想定している事故条件下でも満足できる強度を有することを改めて立証した。静弾性係数については、熟履歴の有無による有意な差は無い。尚、実際の測定では、コンクリート熱伝導試験体の垂直方向下部になるに従って圧縮強度、静弾性係数のいずれも大きくなる傾向があったが、これはコンクリートの自重による圧密効果によるものと考えられる。

次に、圧縮強度と静弾性係数の相互関係については、Fig. 14に示す通り、圧縮強度と静弾性係数が比例関係にある。この関係をコンクリートの品質の判定基準となる日本建

築学会のRC基準式と比較すると、未熟履歴供試体からのデータは基準式の下側に、熟履歴供試体からのデータは基準式の上側に来る。前者のデータが基準式を下回る理由も、供試体の気中養生による含水率の低下と推定する。

2. 4 グラウトの熱物性

(1) 熱伝導率

未熱履歴供試体の熱線法で測定した熱伝導率をFig. 13に示す。常温～100℃の範囲では0.74～1.22 kcal/mh℃であり、温度依存性と温度ヒステリシスがある。

熱履歴供試体に対する迅速熱伝導率計による熱伝導率の測定結果は、グラウト上面で0.68～1.12 kcal/mh℃、平均0.92 kcal/mh℃で、これは非熱履歴供試体の降温時の値0.77～0.81 kcal/mh℃ (at 300℃～20℃) よりも若干高い。これは、未熱履歴供試体に対する熱線法による測定が450℃まで測定しているのに対して、熱履歴供試体に対しては150℃前後までしか測定しておらず、後者が高い含水率で測定されたのが理由と考える。

(2) 含水率

未熱履歴供試体と熱履歴供試体の含水率をそれぞれTable 12, 13に示す。前者が平均13.7 %、後者が平均8.33 %である。

(3) 熱拡散率測定結果

測定結果をFig. 15に示す。熱伝導率と同様に、温度が高くなるに従い小さくなる傾向にあるが顕著ではない。結果から、グラウト材の比熱は常温～450℃の範囲で0.33～0.36 kcal/kg℃であった。

第3章 まとめと結論

高速増殖炉の原子炉建物内のナトリウム貯留部を対象に、事故時の漏洩ナトリウムから周囲コンクリートへの熱伝導に関する試験および解析を行った。試験では、最初にナトリウム貯留部の床構造を模擬した2体の部分工学試験体による熱伝導試験を行い、次に、試験体の解体検査を進めつつコンクリート類の熱物性を測定し、温度分布データと解析コードとの比較検討を行った。これらの結果から、次の結論を得た。

[工学試験体による熱伝導試験]

モデルA試験体（通常の床ライナを模擬）による試験では、実機評価で注目する構造コンクリート上面から75mm下部のコンクリート温度は84.2℃となり、設計の制限値90℃を越えることはなかった。

モデルB試験体（機器の支持固定脚などの埋め込み金物とその付近のライナを模擬）による熱伝導試験では、基礎ボルト近傍の175℃を超える領域が構造コンクリート上面からの深さで約195mmとなり、実機解析の制限距離に一致した。熱伝導解析コードと試験で得た温度分布ならびにその時間変化との一致は良好であった。また、これらより、ライナおよびその下部のパーライトコンクリートと構造コンクリートを含めた構造物に対するナトリウム漏洩事故時の熱影響に関する実機解析の妥当性と保守性を立証した。

[コンクリート放出水量とライナ裏面圧力]

モデルAおよびモデルB試験体からの全放出水量は、それぞれ約14.4kg、約20.9kgであった。試験後にモデルA試験体のパーライトコンクリートの含水率変化から求めた放出水量が約13.7kg、CONTAINコードによるパーライトコンクリートからの放出水量解析結果が約15.2kgとこれらの値とほぼ一致することから、殆どの放出水はパーライトコンクリートからによるものと推定した。コンクリート放出水に起因するライナ裏面圧力は、38mmH₂O未満であった。

〔コンクリート等の熱物性〕

(1)熱伝導率

グラウトと構造コンクリートはいずれも温度による含水率の変化のため、温度依存性とヒステリシスを呈した。パーライトコンクリートは450℃までの広い温度範囲で比較的安定した値を示した。

(2)グラウト材の比熱

0.33～0.36 (kcal/kg.℃) の範囲であった。

(3)含水率

試験後の各材料について、次の値を得た。

パーライトコンクリート；平均2.28 %。

グラウト；平均8.33 %。

構造コンクリート；平均15.46 %。

構造コンクリート部については熱的影響を受けた部分の僅かな含水率の低下を認めたが、その他は均一で含水率の低下は認められない。

(4)圧縮強度および静弾性係数

パーライトコンクリートの圧縮強度は、試験前に比べて約50%低下した。構造コンクリートは、設計基準強度である240 kg/cm²を上回り、また圧縮強度と静弾性係数の関係も日本建築学会のRC基準式を上回った。

謝辞

本研究の実施に当り、動燃動力炉建設運転本部機械課の関係者には多方面からの有益な助言をいただき、大洗工学センター機器開発部機器システム室の関係者にはパーライトコンクリート熱伝導率の測定で協力いただいた。これら関係者各位に感謝する。

参考文献

- (1) 動燃事業団, 「高速増殖炉研究開発の現状」, 昭和61年 P 71.
- (2) 動燃事業団, 「高速増殖炉研究開発の現状」, 昭和61年 P 51~P 53.
- (3) JIS R2618, 「耐火断熱れんがの熱線法による熱伝導率の試験方法」.
- (4) 「Shotherm Q T M 熱伝導率計」 昭和電工株式会社.
- (5) ASTM C335-79, "Standard Test Method for Steady-State Heat Transfer Properties of Horizontal Pipe Insulations."
- (6) 稲葉 一八, 町田 清 「比熱・熱拡散率の測定方法に関する実験的研究」
建材試験情報 81年7月号.
- (7) 「もんじゅ」パーライトコンクリート物性試験

SN9410 87-068 1987年 3月

Table 1 Composition and Mixing Conditions of Structural Concrete.

1	Cement	F l y a s h B
2	Admixture	AE Water Reducing Agent No. 8, 303A, AE-775 Fluidization Agent NP-10
3	Fine Aggregate	land Sand and Graywacke
4	Coarse Aggregate	Broken Ston of Graywacke
5	Maximum Size of Coarse Aggregate	2 5 mm
6	Slump	Fluidization Agent before Chage 1 2 ± 2. 5 cm Fluidization Agent after Chage 1 8 ± 2. 5 cm
7	Air Content	4 ± 1 %
8	Design Strength	2 4 0 kgf/cm ² (28days age)
9	Bulk Density	2 1 5 0 kg/m ³ not less
10	Water Cement Ratio	5 4 %
11	Sand Percentage	4 6. 3 %
12	Water Content	1 7 1 ℓ / m ³

Table 2 Physical Properties of Structural Concrete after Mixing.

Test Piece No.	Fluidization Agent before Placing				Fluidization Agent after Placing			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Slump (cm)	9.5	9.7	9.8	11.9	17.1	17.7	18.0	19.5
Air (%)	4.7	4.2	3.95	4.8	4.7	4.1	4.2	4.5
Concrete Bulk Density (kg/m ³)	2500	2308	2301	2261	2280	2298	2295	2282
Concrete Temperature (°C)	17.1	17.7	18.0	18.5	22.1	21.3	20.6	20.3

* Test Piece No 1 and No 3 Model A

Test Piece No 2 and No 4 Model B

Table 3 Composition of Grout.

1	Material	DENKA PRETASCON TYPE-M (pre-mix, 25kg/bag)
2	Water	3.9 kg
3	Mixing Content	13.0 ℓ
4	Water Cement Ratio	47.0 %
5	Target Consistency	8 ± 2 sec (J 1 4 Funnel)

Table 4 Composition and Mixing Conditions of Perlite Concrete.

1	Cement	Portland Cement
2	Admixture	AE Agent (JASS5T-401)
3	Aggregate	Particle Size : 0.15~3.5mm Bulk Density of Obsidian Perlite : 0.2kg/ℓ
4	Water	JASS 5.3.4
5	Cement Weight	440 kg/m ³
6	Perlite Weight	907.5 ℓ/m ³
7	Specific Gravity	0.8 kg/ℓ not greater
8	Water Cement Ratio	43%
9	Chage of Admixture	0.3% Cement Weight
10	Water Content	189.2 ℓ/m ³

Table 5 Proportion and Mixing Conditions of Perlite Concrete.

		Slump	Concrete	Ambient	Water	Concrete
		(cm)	Bulk Density (kg/ℓ)	Temperature (℃)	Temperature (℃)	Temperature (℃)
Test Model A	1	12.9	0.753	21.0	21.5	25.0
	2	13.6	0.750	20.5	21.0	24.5
	3	11.9	0.755	20.5	21.0	25.0
	4	11.0	0.800	20.5	21.0	25.0
	5	13.8	0.757	20.5	21.0	25.0
Test Model B	1	13.0	0.780	20.0	20.5	23.5
	2	13.3	0.761	20.0	20.5	24.0
	3	13.3	0.756	20.0	20.5	24.0
	4	14.2	0.761	20.0	20.5	24.0

Table 6 Construction Records of Test Models A and B.

(1) Model A

No.	Work Item	Date	Curing Time
1	Placing of Structural Concret	7/6/1986	—————
2	Placing of Perlite Concrete	15/7/1986	37Days after Placing of Structural Concret
3	Liner Installation	28/8/1986	81Days after Placing of Structural Concret 43Days after Placing of Perlite Concrete
4	Start of Test	25/11/1986	170Days after Placing of Structural Concret 131Days after Placing of Perlite Concrete
5	End of Test	5/12/1986	—————

(2) Model B

No.	Work Item	施工年月日	養生日数
1	Placing of Structural Concret	7/6/1986	—————
2	Chipping of Structural Concret	8/7/1986	30Days after Placing of Structural Concret
3	Placing of Grout	11/7/1986	33Days after Placing of Structural Concret
4	Placing of Perlite Concrete	21/7/1986	43Days after Placing of Structural Concret 10Days after Placing of Grout
5	Liner Installation	28/8/1986	81Days after Placing of Structural Concret 38Days after Placing of Perlite Concrete
6	Start of Test	15/12/1986	190Days after Placing of Structural Concret 146Days after Placing of Perlite Concrete 日
7	End of Test	25/12/1986	—————

Table 7 Released Water from Concrete in Test Models A and B .

	Model A	Model B
Surface Area (m ²)	2. 2 5	2. 2 5 *
Released Water Content of Condensed Water Pot (kg)	5. 6	9. 2
Released Water Content of Thermal Insulator (kg)	8. 8	1 1. 7
All Released Water Content (kg)	1 4. 4	2 0. 9
Released Water Content of Calculation (kg)	1 5. 2	————
Released Water Content at Unit Area (kg/m ²)	6. 4	1 0. 4 5

* Include of Sole Plate Surface Area (0.25 m²)

Table 8 Recode of Water Loss of Perlite Concrete Determined with Test Pieces Prepared at the Time of Constructing Test Models A and B.

(g)

Test Piece No.	A-1-1	A-2	A-3-2	B-1-1	B-2	B-3-2
Test Piece Weight	1199.3	1182.3	1168.9	1282.1	1184.2	1147.4
Water Loss after 1 Days	-64.6	—	—	-65.4	—	—
Water Loss after 2 Days	-94.9	—	—	-89.4	—	—
Water Loss after 4 Days	-102.3	—	—	-95.2	—	—
Water Loss after 5 Days	-103.3	-100.4	-95.7	-95.9	-84.0	-76.4
Water Loss after 6 Days	-104.3	-101.3	-96.2	-96.4	-84.8	-77.1
Water Loss after 7 Days	-104.6	—	—	-96.4	—	—
Water Loss after 9 Days	-104.5	-101.5	-96.2	-96.6	-85.0	-76.9
Water Loss after 11 Days	-105.0	—	-95.9	-96.9	—	-76.6
Water Loss after 14 Days	-103.6	—	—	-95.3	—	—
Water Loss after 15 Days	-103.9	-101.0	—	-95.7	-84.3	—
Water Loss after 18 Days	-104.9	—	—	-96.7	—	—
Water Loss after 19 Days	-104.8	—	—	-96.7	—	—
Water Loss after 21 Days	-104.9	—	—	-96.6	—	—
Water Loss after 26 Days	-104.9	-101.9	-96.5	-96.7	-85.2	-76.6
Water Loss after 29 Days	-105.0	—	—	-96.9	—	—
Water Loss after 33 Days	-106.1	—	—	-98.1	—	—
Water Loss after 34 Days	-106.2	-102.7	-97.6	-98.1	-86.1	-78.1
Water Loss after 41 Days	-105.8	-102.5	-97.3	-97.6	-86.0	-77.7
Water Loss after 50 Days	-105.1	-101.9	-96.9	-97.2	-85.4	-77.5
Water Loss after 58 Days	-104.8	-101.4	-96.5	-96.4	-85.0	-76.9
Percentage of Water Content (%)	6.67	6.46	6.14	6.14	5.41	4.90

Table 9 Post-Test Water Content of Perlite Concrete Determined
with Test Pieces Sampled from Test Models A and B.
(g)

Test Piece No	Model A			Model B		
	A - 1	A - 4	A - 5	B - 1	B - 2	B - 6
Test Piece Weight	664.3	689.4	542.6	725.6	706.0	741.8
Water loss after 5 Days	-17.1	—	—	—	—	—
Water loss after 8 Days	-16.7	-25.0	-18.0	-17.8	-20.0	-20.0
Water loss after 9 Days	-17.1	-25.6	-18.6	-17.7	-20.3	-20.0
Water loss after 12 Days	-17.6	—	—	-18.2	—	—
Water loss after 13 Days	-17.6	—	—	-18.6	—	—
Water loss after 15 Days	-17.1	-26.3	-19.3	-18.7	-20.7	-21.0
Water loss after 19 Days	-17.7	-25.8	-19.5	-18.9	-21.3	-21.2
Water loss after 20 Days	-17.8	-26.5	-18.8	-19.0	-21.2	-20.8
Water loss after 23 Days	-18.1	-26.4	-19.0	-19.7	-21.8	-21.0
Water loss after 27 Days	-18.5	-27.3	-19.9	-19.8	-22.0	-21.1
Water loss after 28 Days	-18.6	-27.8	-20.0	-19.9	-22.0	-22.1
Water loss after 35 Days	-18.8	-27.3	-19.9	-19.7	-21.7	-21.9
Water loss after 44 Days	-18.3	-27.2	-19.9	-19.7	-21.5	-21.6
Water loss after 52 Days	-18.0	-27.1	-19.6	-19.7	-21.4	-21.3
Percentage of Water Content (%)	1.99	2.82	2.45	2.02	2.21	2.18

Table 10 Record of Water Loss of Structural Concret Determined with Test Pieces Perpared at the Time of Constructing Test Models A and B.

(g)

Test Piece No.	1-13	1-15	2-13	2-15	3-13	3-15	4-13	4-15
Test Piece Weight	3548.7	3506.1	3547.0	3571.6	3560.0	3521.7	3541.0	3532.0
Water Loss after 1 Days	- 64.6	—	—	—	—	—	—	- 70.4
Water Loss after 2 Days	-102.5	—	—	—	—	—	—	-112.7
Water Loss after 4 Days	-144.6	—	—	—	—	—	—	-157.2
Water Loss after 5 Days	-152.9	-170.9	-176.1	-156.0	-187.6	-169.8	-154.9	-165.0
Water Loss after 6 Days	-159.5	—	—	—	—	—	—	-170.6
Water Loss after 7 Days	—	—	—	—	—	—	—	-172.4
Water Loss after 9 Days	-161.2	-181.7	-186.4	-166.9	-197.3	-180.0	-165.7	-174.6
Water Loss after 11 Days	-165.3	—	—	—	—	—	—	-176.1
Water Loss after 14 Days	-165.9	—	—	—	—	—	—	-176.6
Water Loss after 15 Days	-166.2	-184.4	-188.4	-169.9	-200.0	-182.6	-167.9	-176.8
Water Loss after 18 Days	-167.0	—	—	—	—	—	—	-177.8
Water Loss after 19 Days	-166.8	—	—	—	—	—	—	-177.7
Water Loss after 21 Days	-167.8	—	—	—	—	—	—	-178.5
Water Loss after 26 Days	-168.8	-186.4	-191.0	-171.7	-203.0	-184.3	-170.6	-179.5
Water Loss after 29 Days	-168.5	—	—	—	—	—	—	-179.2
Water Loss after 33 Days	-170.6	—	—	—	—	—	—	-181.1
Water Loss after 34 Days	-170.8	-189.1	-193.6	-174.2	-204.5	-187.1	-172.8	-181.5
Water Loss after 41 Days	-170.1	-188.3	-192.9	-173.6	-203.9	-186.3	-171.7	-180.7
Water Loss after 50 Days	-170.5	-188.4	-193.1	-174.0	-203.8	-186.8	-172.1	-181.0
Water Loss after 58 Days	-170.0	-188.2	-192.8	-173.5	-203.9	-186.3	-171.7	-180.2
Percentage of Water Content (%)	10.8	12.0	12.3	11.0	13.0	11.9	10.9	11.5
	10.8	12.0	12.3	11.0	13.0	11.9	10.9	11.5

* Test Pieces No.1 and No.3 Model A

Test Pieces No.2 and No.4 Model B

Table 11 Post-Test Water Content of Structural Concrete Determined with
Test Pieces Sampled from Test Models A and B.

(%)

Division No.	Location No.	1	2	3	4	5	6	Average
A - 1	1	—	—	—	14.6	13.5	14.0	14.0
	2	16.2	16.7	14.3	16.5	15.1	15.0	15.6
	3	16.0	15.2	15.6	—	—	—	15.6
	4	15.3	15.4	15.5	16.5	15.2	15.7	15.6
	5	—	—	—	15.2	15.2	16.0	15.5
A - 2	2	15.3	15.3	15.8	—	—	—	15.5
	4	15.9	15.5	15.7	15.5	15.7	(12.5)	15.7
	5	—	—	—	15.8	(20.6)	16.1	16.0
A - 3	2	16.2	15.5	15.5	16.0	15.8	15.5	15.8
	3	15.9	15.4	15.4	—	—	—	15.6
	4	15.2	15.0	14.5	14.5	14.4	15.2	14.8
B - 1	1	15.1	—	14.3	—	14.6	—	14.7
	2	15.0	15.3	15.6	14.8	15.5	16.2	15.4
	3	—	16.2	—	16.1	—	15.3	15.9
	4	16.2	16.3	(7.5)	15.7	15.9	15.8	16.0
	5	15.9	—	15.4	—	15.7	—	15.7
B - 2	2	—	15.2	—	15.6	—	15.7	15.5
	4	15.4	15.3	15.5	15.8	15.8	15.5	15.6
	5	16.4	—	15.0	—	14.6	—	15.3
B - 3	2	16.7	15.6	15.3	16.2	15.8	14.9	15.8
	3	—	15.1	—	15.2	—	14.7	15.0
	4	16.1	14.9	15.3	15.1	14.8	14.6	15.1

Table 12 Recode of Water Loss of Grout Determined with Test Pieces
 Prepared at the Time of Constructing Test Model B.
 (g)

Test Piece No	1	2	3
Test Piece Weight	3250.2	3290.8	3302.0
Water Loss after 1 Days	-132.1	-	-
Water Loss after 3 Days	-201.1	-	-
Water Loss after 4 Days	-263.2	-	-
Water Loss after 5 Days	-269.8	-260.3	-280.1
Water Loss after 6 Days	-274.4	-	-
Water Loss after 8 Days	-276.2	-	-
Water Loss after 10 Days	-278.5	-268.5	-289.1
Water Loss after 13 Days	-280.2	-	-
Water Loss after 14 Days	-280.9	-	-
Water Loss after 17 Days	-281.0	-271.1	-291.3
Water Loss after 18 Days	-282.0	-	-
Water Loss after 20 Days	-282.2	-	-
Water Loss after 23 Days	-283.7	-	-
Water Loss after 26 Days	-284.2	-275.0	-263.5
Water Loss after 30 Days	-285.4	-	-
Water Loss after 31 Days	-285.9	-276.1	-265.9
Water Loss after 40 Days	-285.0	-275.2	-295.5
Water Loss after 49 Days	-285.2	-275.6	-295.4
Water Loss after 57 Days	-284.7	-274.8	-295.0
Percentage of Water Content (%)	13.7	13.7	13.8

Table 13 Post-Test Water Content of Grout Determined with Test Pieces
Sampled from Test Model B.

Test Piece No	1	2	3	4
Test Piec Weight (g)	1232	1463	1372	1267
Test Piec Weight after Dryout (g)	1184	1415	1310	1215
Percentage of Water Content (%)	8.2	7.0	9.5	8.6

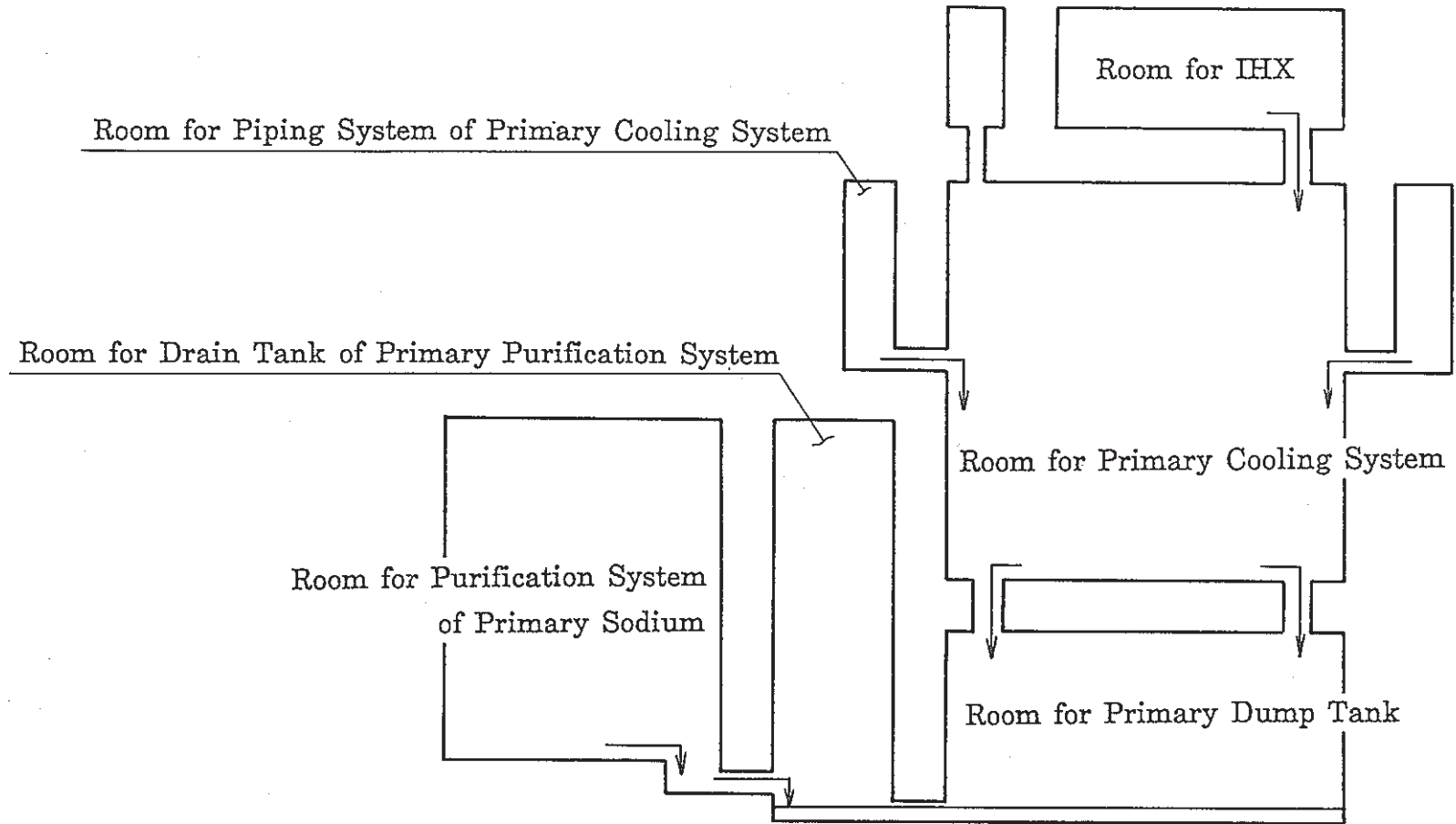


Fig.1 Schematic of Sodium Fire Mitigation System in MONJU.

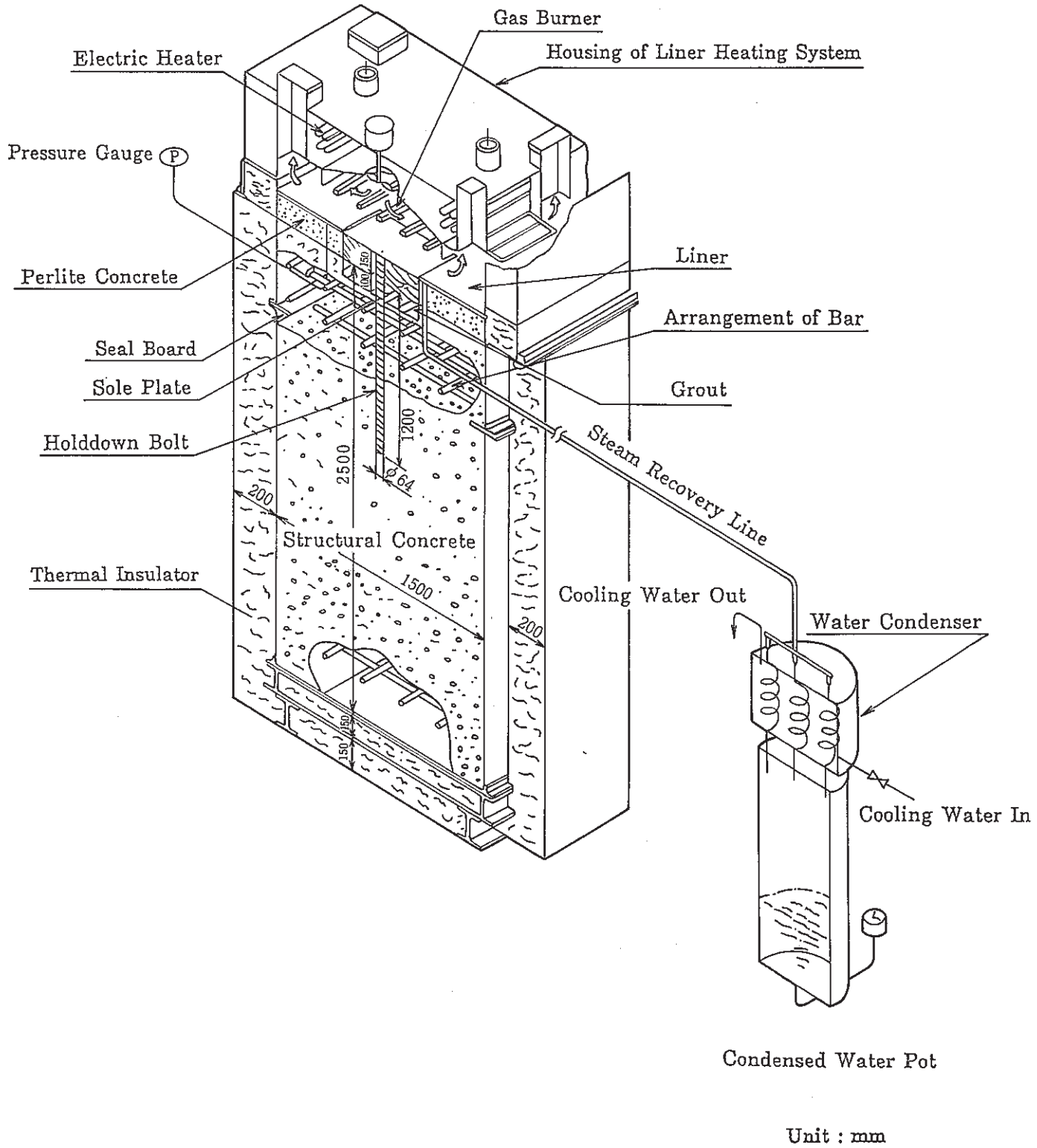
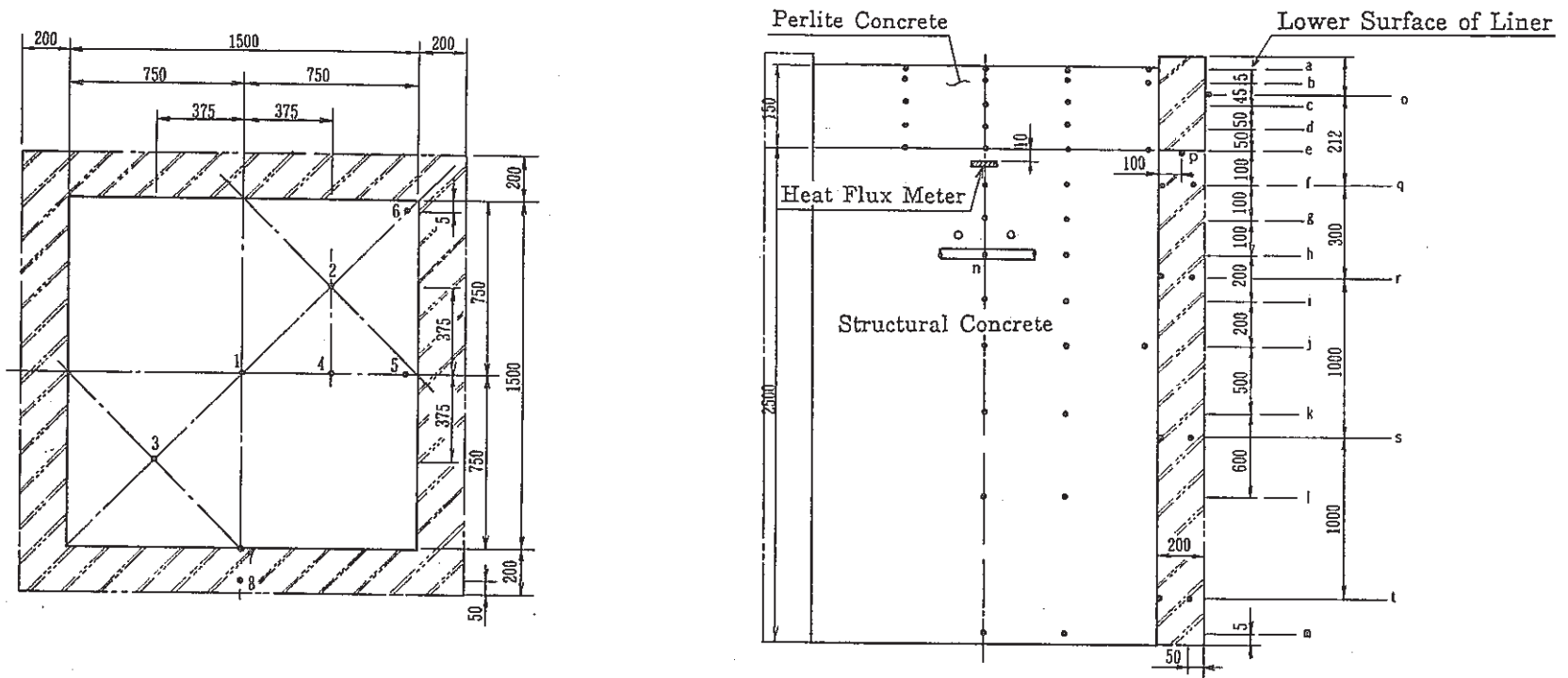


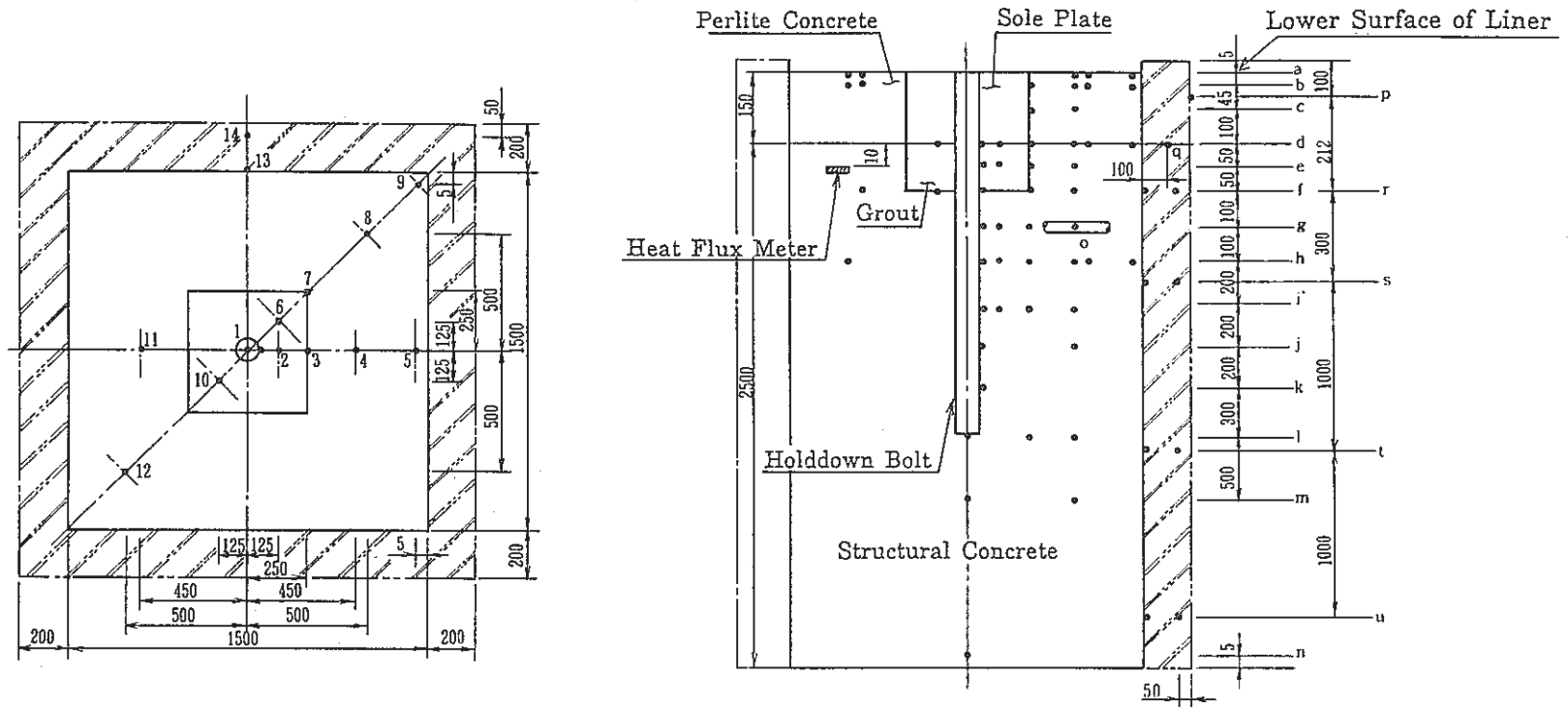
Fig.2 Schematic of Model B.



	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n
1	T1101	T1107	T1111	T1114	T1117	T1123	T1125	T1127	T1131	T1133	T1135	T1140	T1142	T1144
2	T1102	T1108	T1112	T1115	T1118	T1124	T1126	T1128	T1132	T1134	T1136	T1141	T1143	T1145
3	T1103	T1109	T1113	T1116	T1119									
4	T1104				T1120			T1129			T1137			
5	T1105	T1110			T1121			T1130			T1138			
6	T1106				T1122						T1139			

	o	p	q	r	s	t
7	T1146	T1147	T1148	T1149	T1150	T1151
8			T1152	T1153	T1154	T1155

Fig.3 Locations of Thermocouple Model A.



	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
1	T1201			T1215	T1225	T1229	T1235	T1239	T1247	T1251	T1254	T1255	T1258	T1260	T1261
2				T1216	T1226	T1230	T1236	T1240	T1248						
3		T1207	T1213	T1217	T1227	T1231	T1237	T1241	T1249	T1252		T1256			
4	T1202	T1208	T1214	T1218	T1228	T1232	T1238	T1242	T1250	T1253		T1257	T1259		T1262
5	T1203	T1209		T1219											
6				T1220											
7				T1221				T1243							
8	T1204	T1210		T1222				T1244							
9				T1223				T1245							
10				T1224		T1233									
11	T1205	T1211				T1234									
12	T1206	T1212						T1246							

	p	q	r	s	t	u
13	T1263	T1264	T1265	T1266	T1267	T1268
14			T1269	T1270	T1271	T1272

Fig.4 Locations of Thermocouple Model B.

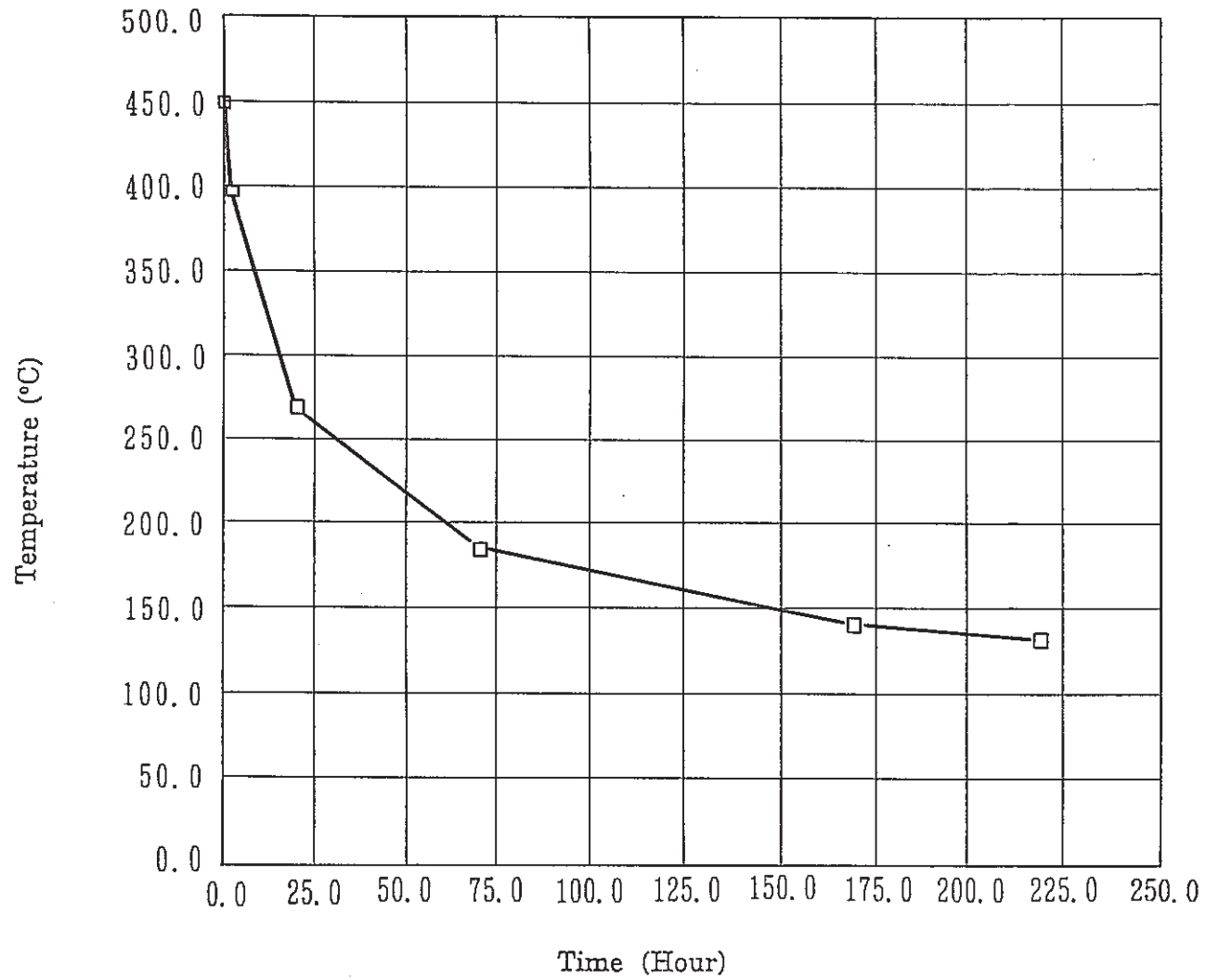


Fig.5 Code Calculated Temperature History of Stored Sodium on Liner Following a Design Basis Sodium Leak Accident.

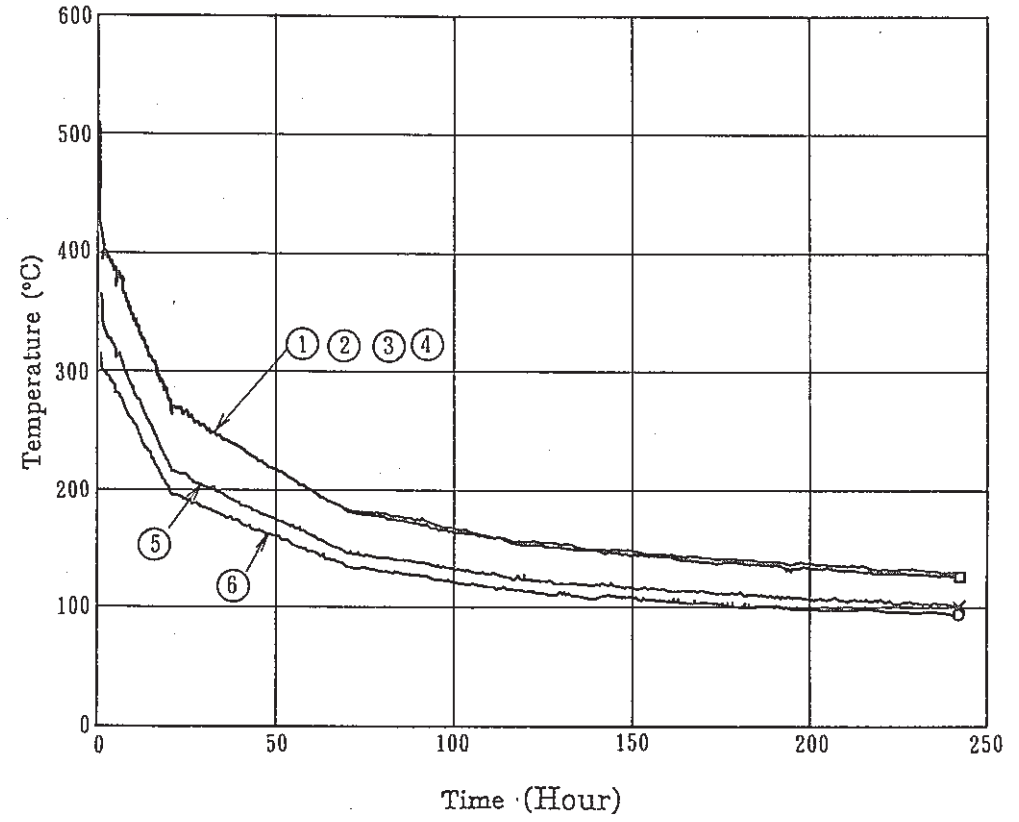
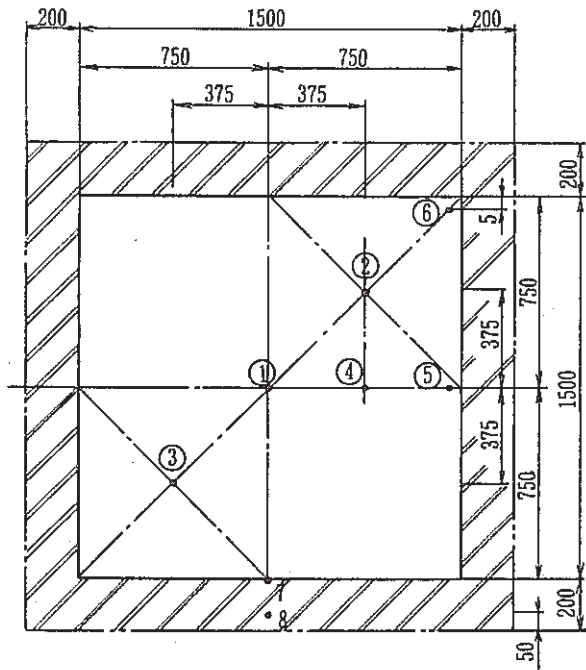


Fig.6 Temperature Record of Liner in Test Model A During Test.

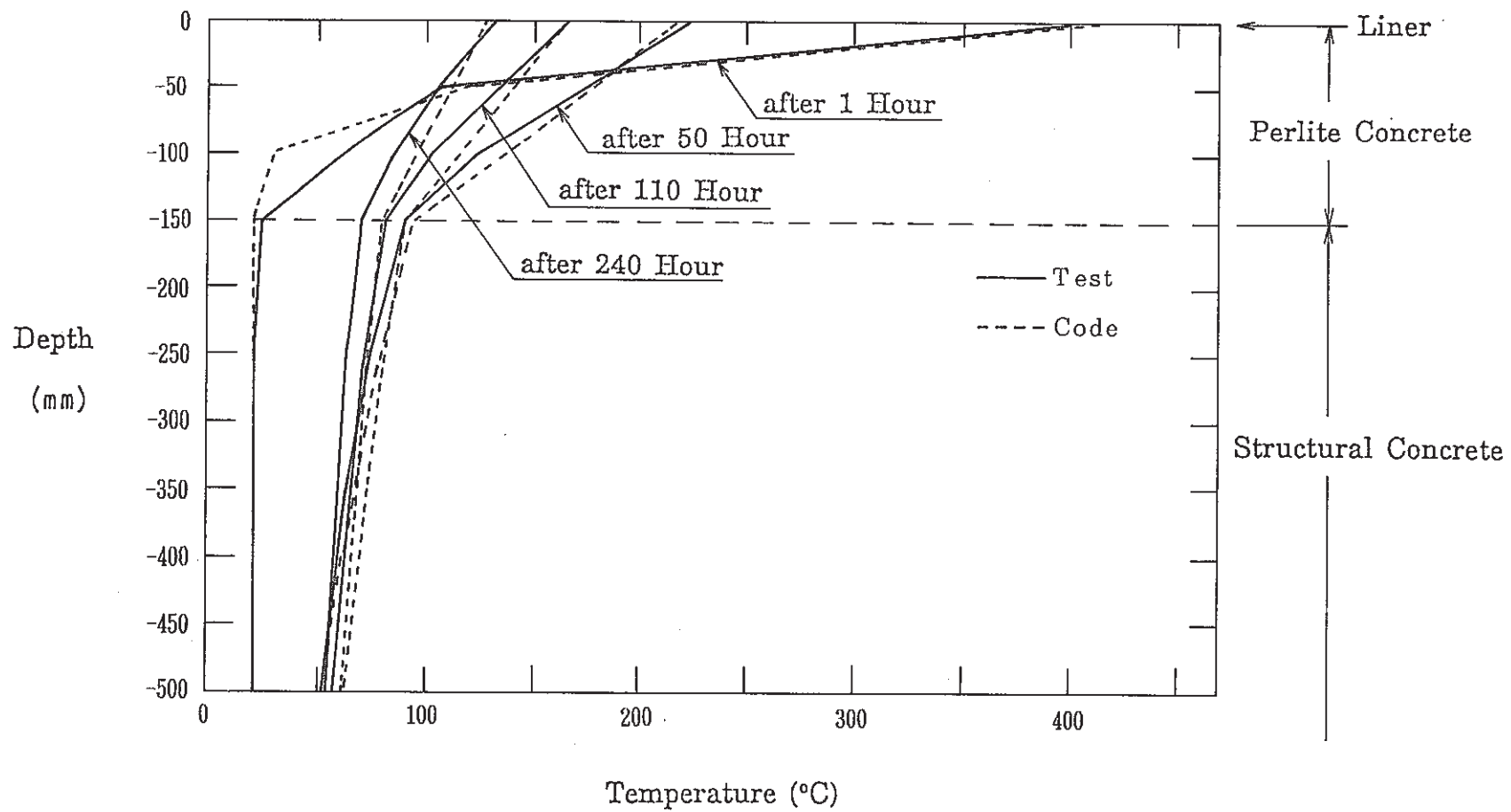


Fig.7 Change of Vertical Temperature Profile in Perlite and Structural Concrete of Test Model A During Test and their Comparison with Code Predictions.

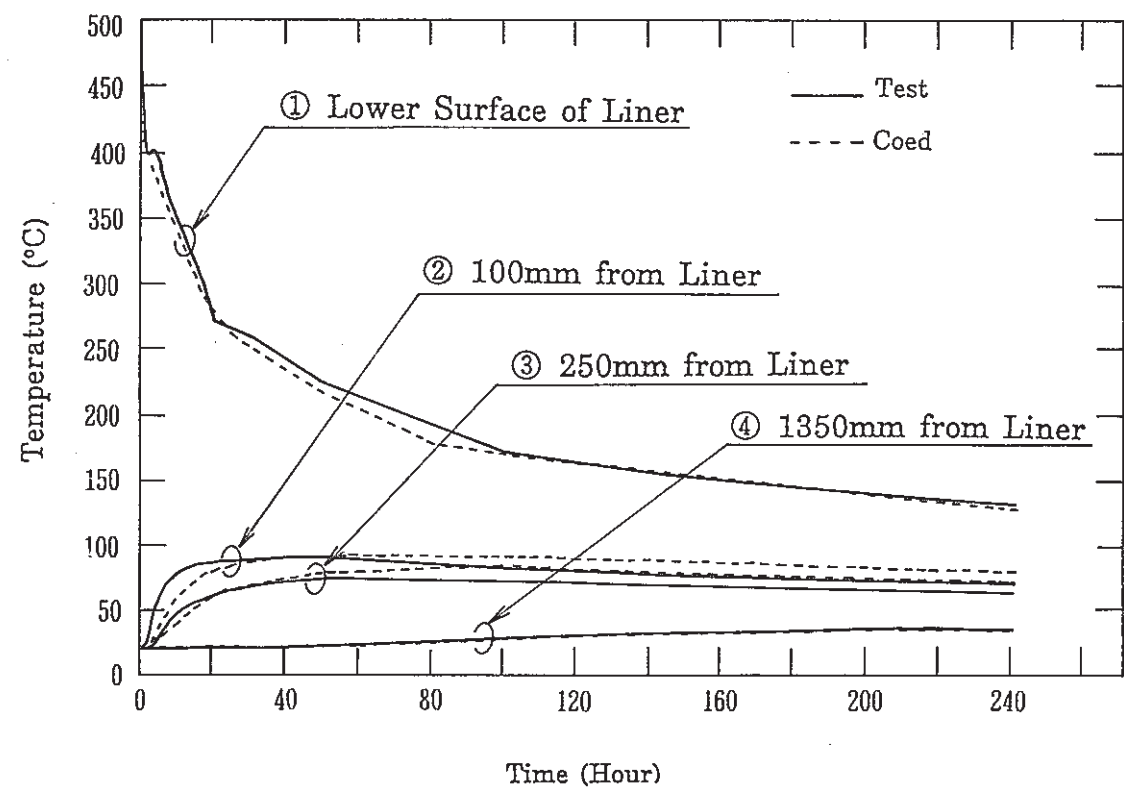
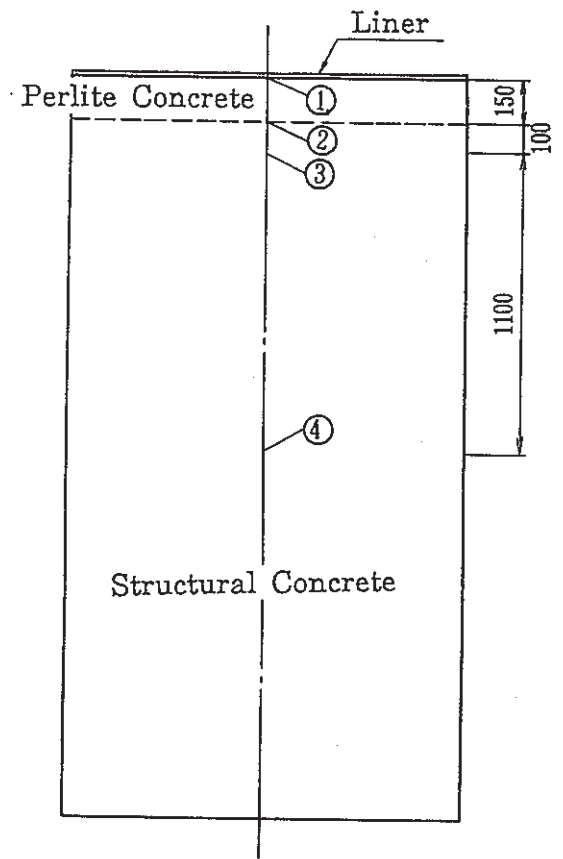


Fig.8 Transient Temperature Changes at Various Locations in the Test Model A During Test and their Comparison with Code Predictions.

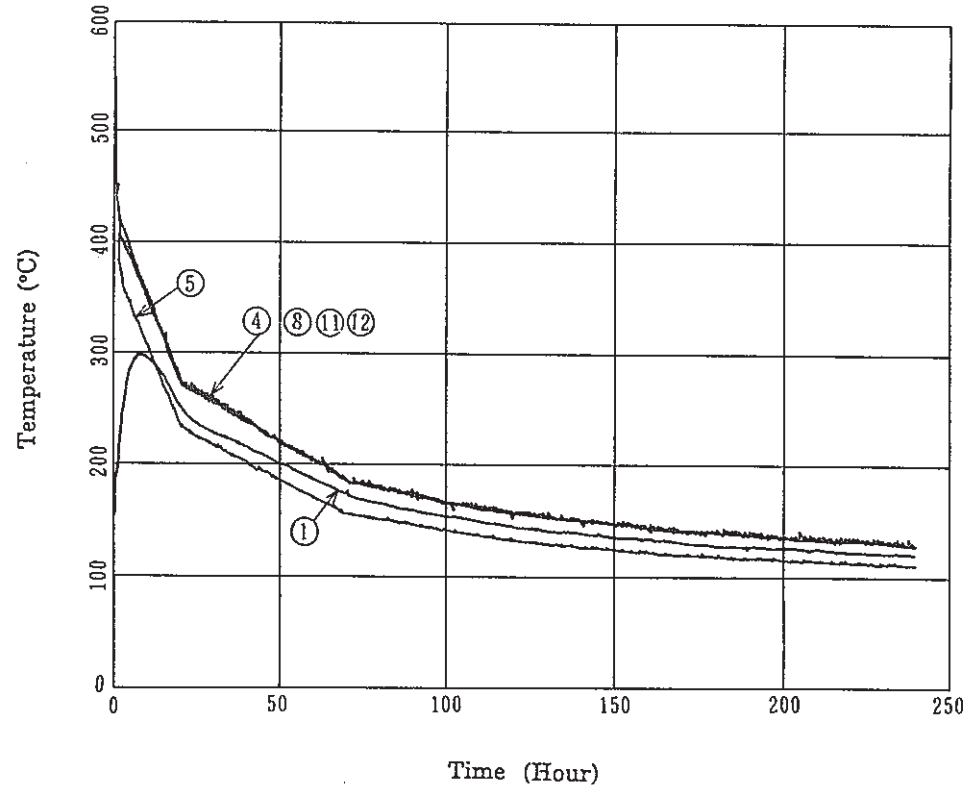
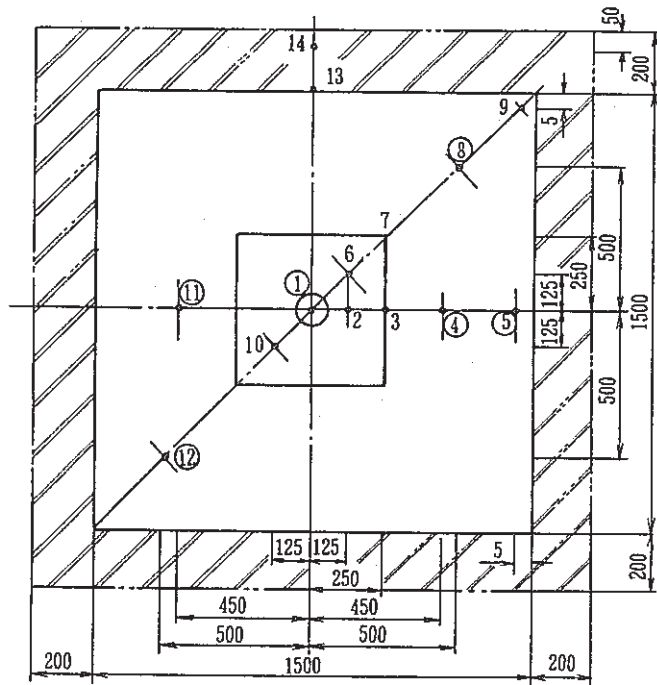
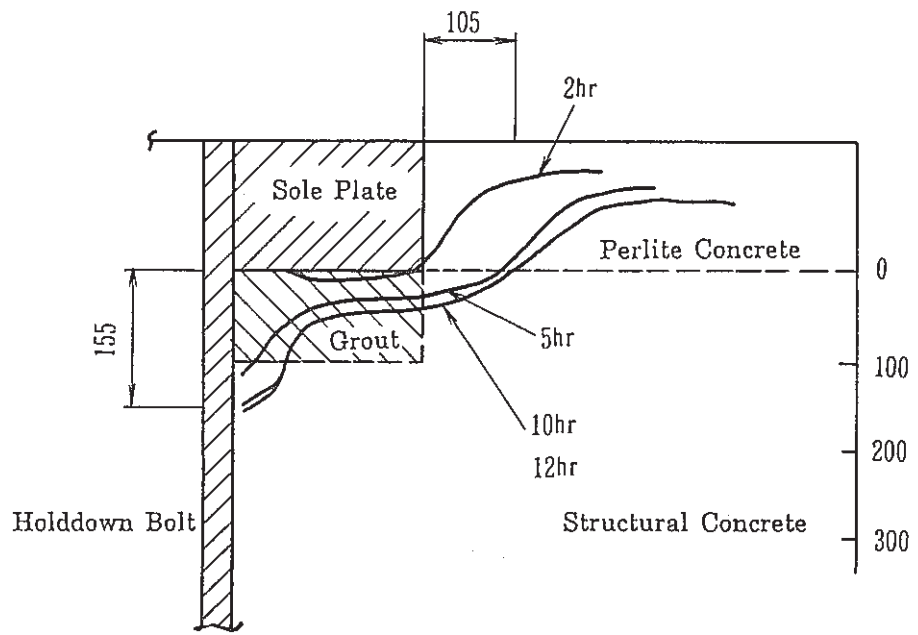
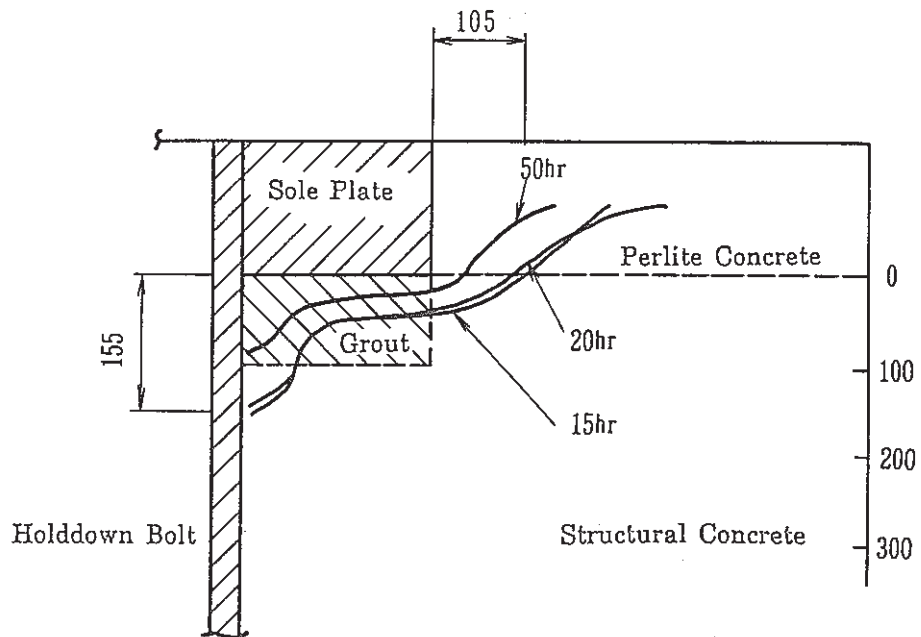


Fig.9 Temperature Record of Liner in Test Model B During Test.

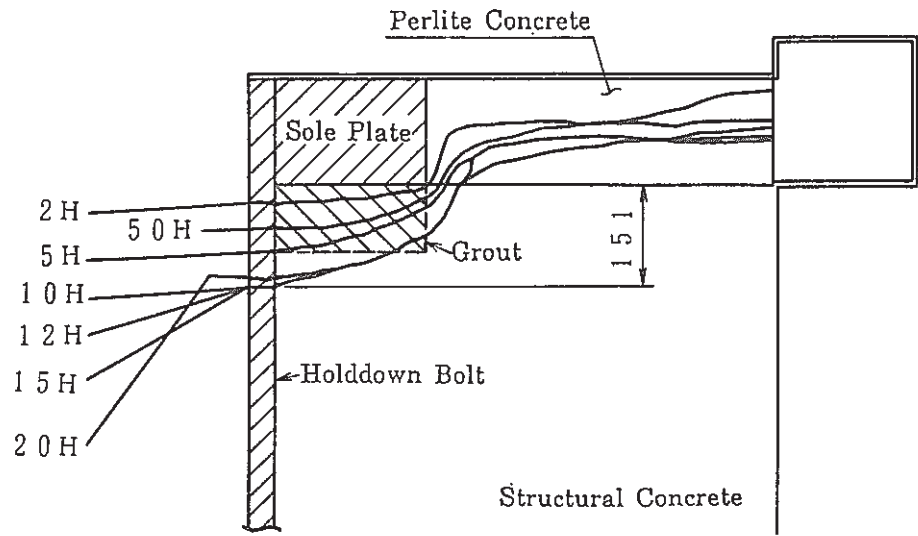


0 ~ 12 h r

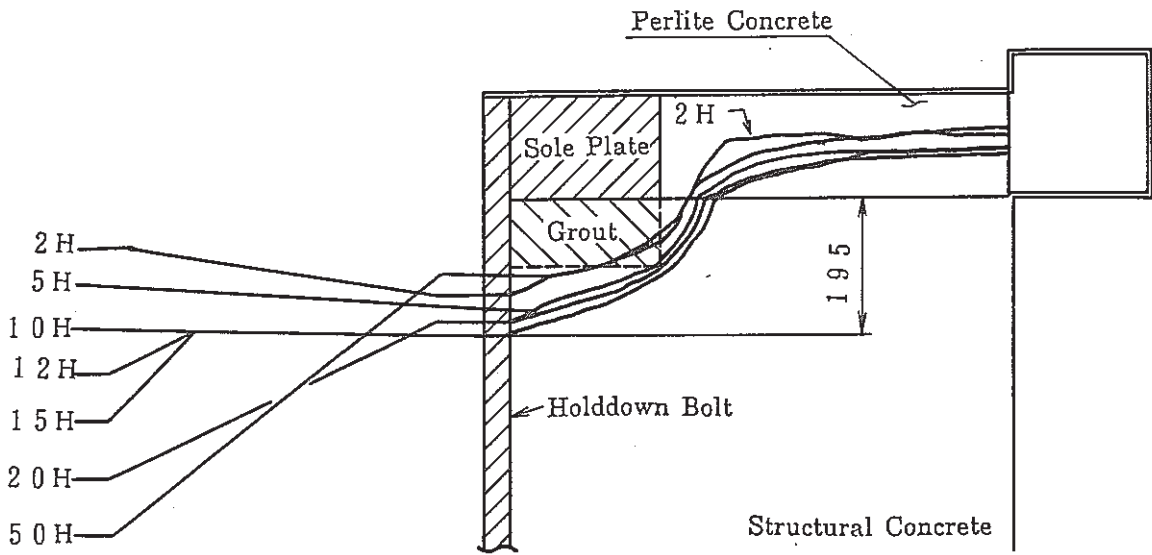


15 ~ 50 h r

Fig.10 Time History of Region where Concrete Temperatures Exceed 175 °C in Test Model B.



(1) Calculated Results by Liner Temperature History of Test Condition



(2) Calculated Results by Liner Temperature History of 450°C Homogeneity

Fig.11 Calculated Results by FINAS for Model B Test.

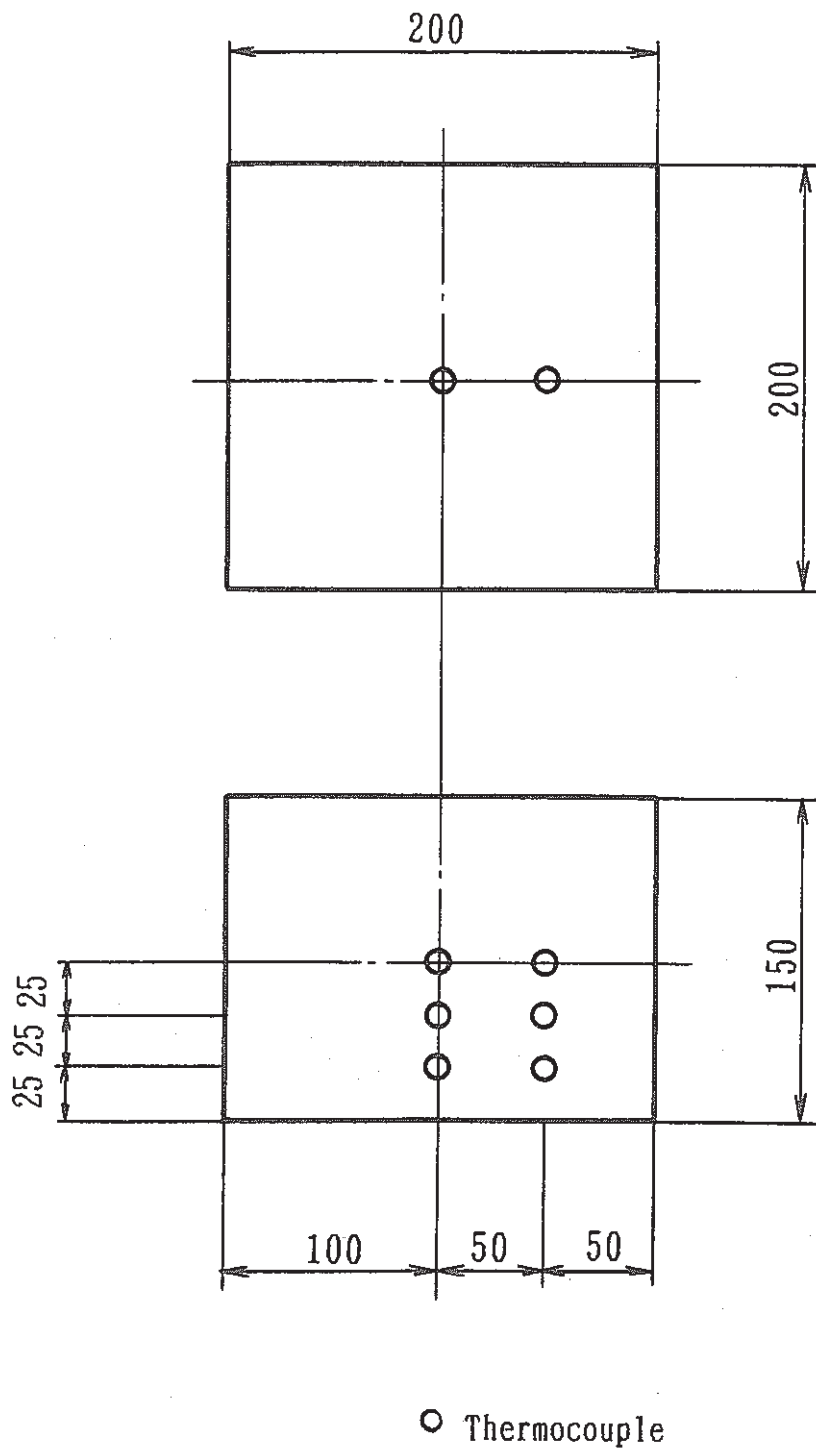


Fig.12 Test Specimen of Grout for Determining its Thermal Diffusivity.

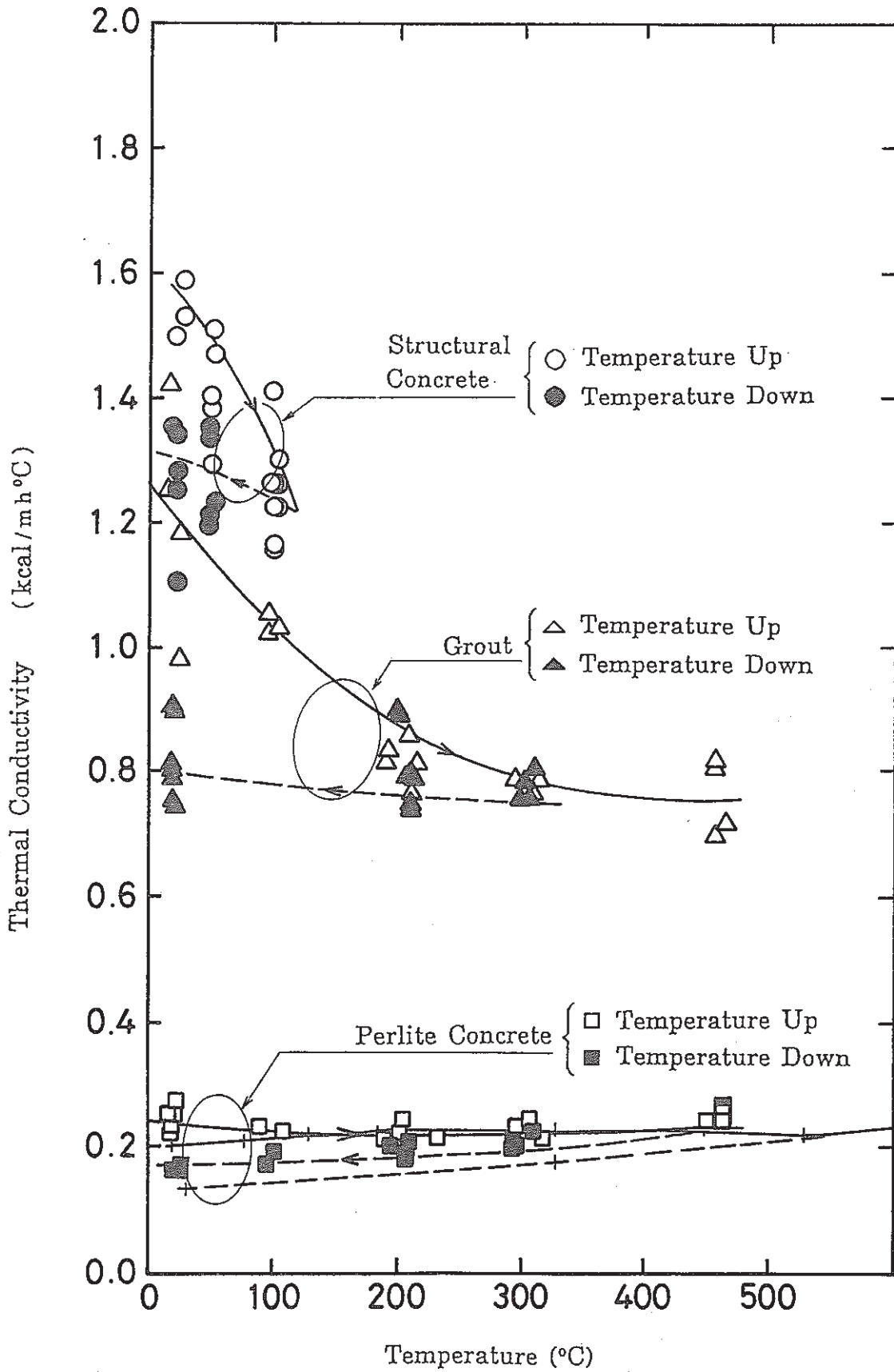


Fig.13 Thermal Conductivities of Structural Concrete, Grout, and Perlite Concrete Determined by Hot Wire Method.

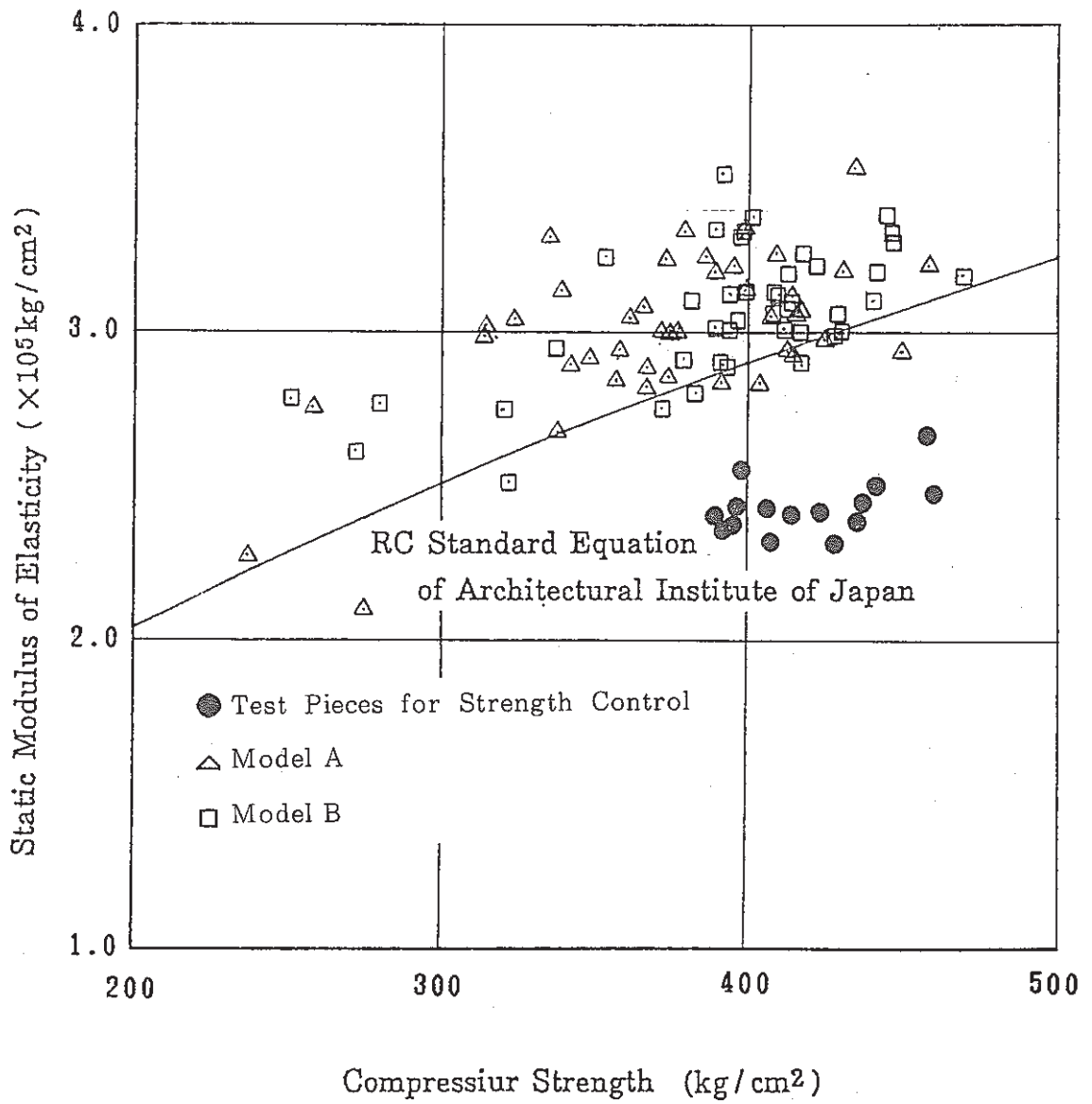


Fig.14 Relation between Compressive Strength and Static Modulus of Elasticity Determined for Structural Concrete.

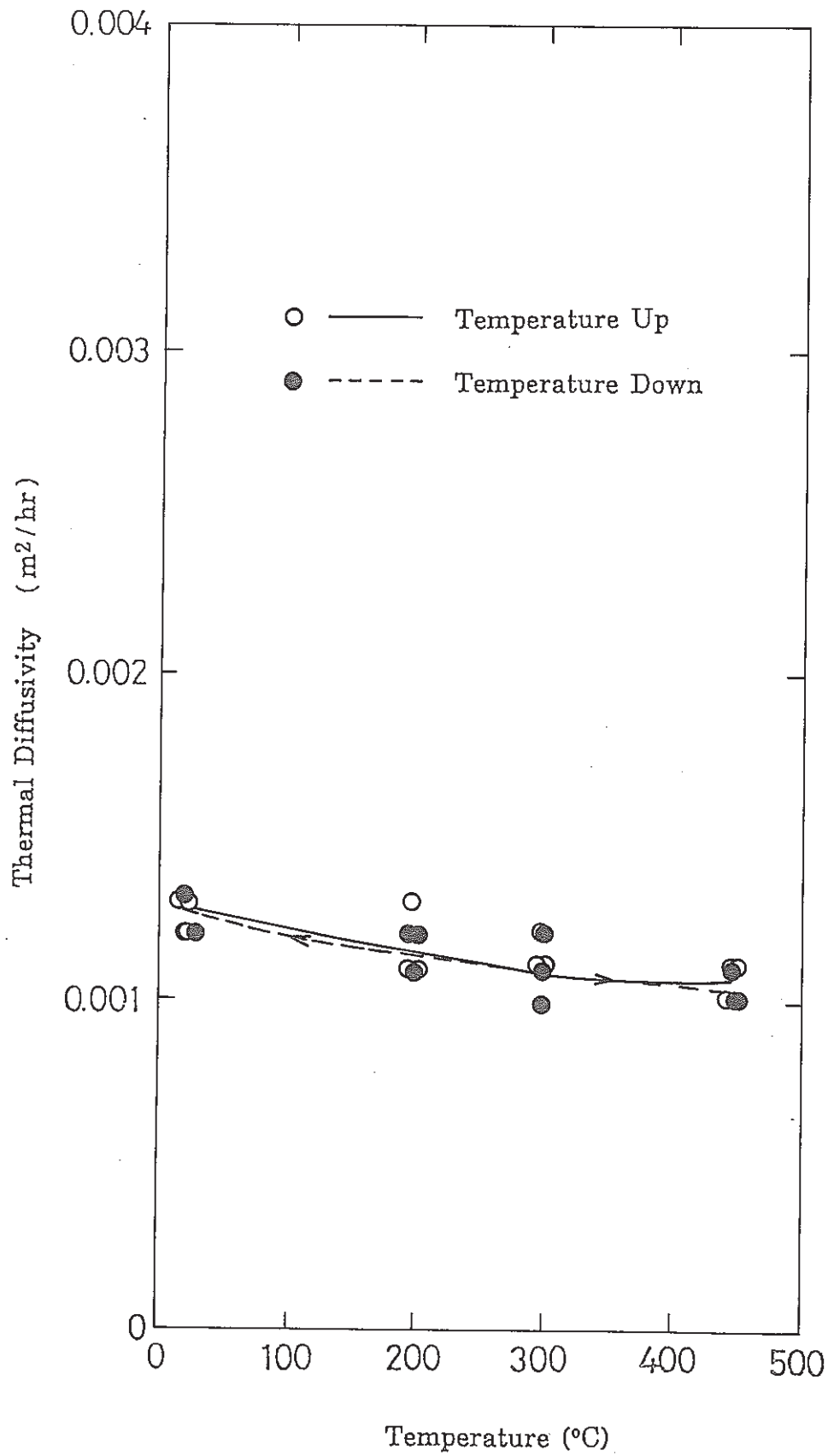


Fig.15 Thermal Diffusivity of Grout Determined by Method of Periodic Thermal Wave.

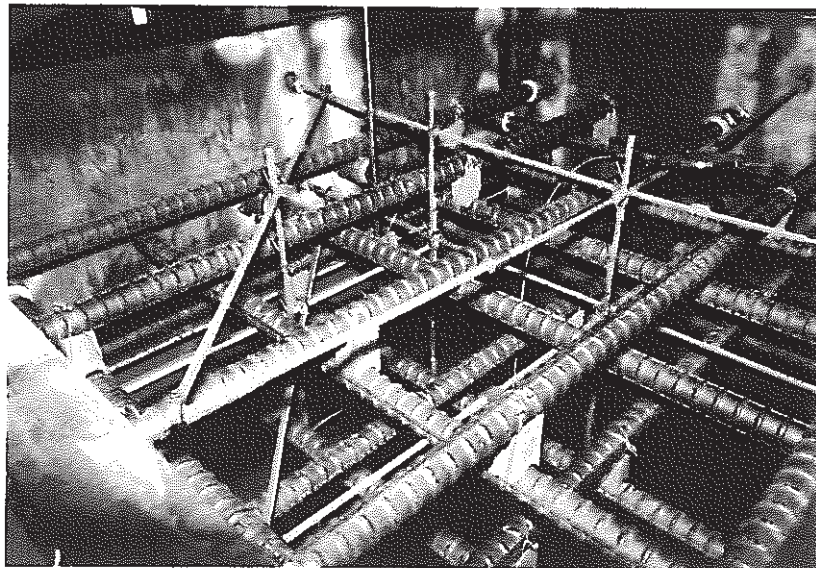


Photo 1 Arrangement of Reinforcement and Thermocouplis in Model A.

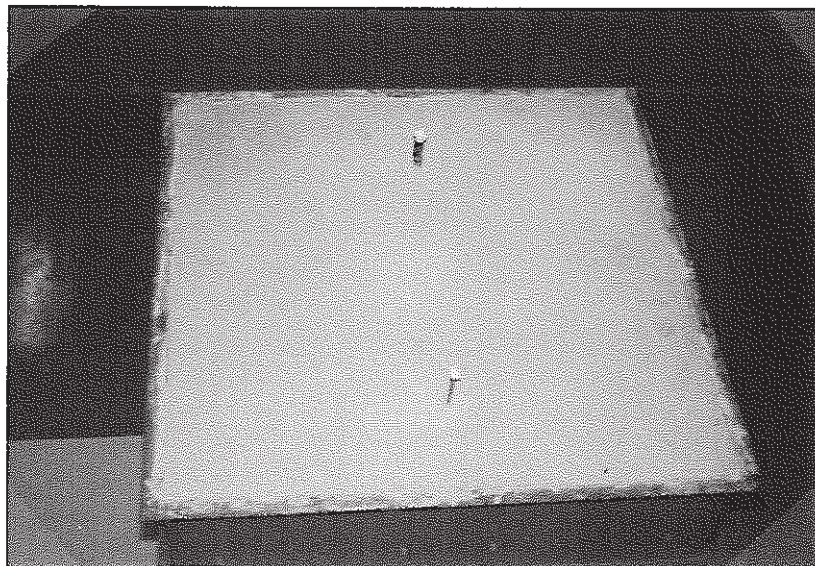


Photo 2 Examination of Structural Concrete after Pouring in Model A.

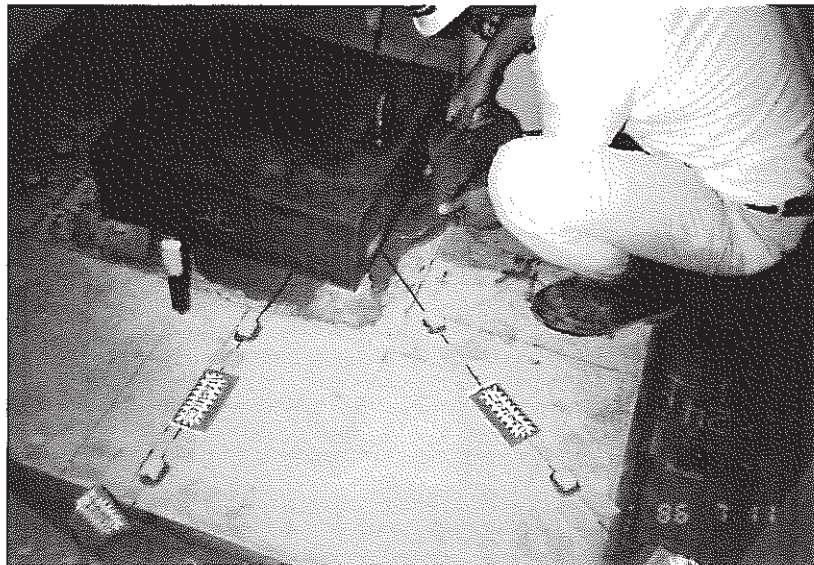


Photo 3 Pouring of Grout in Model B.

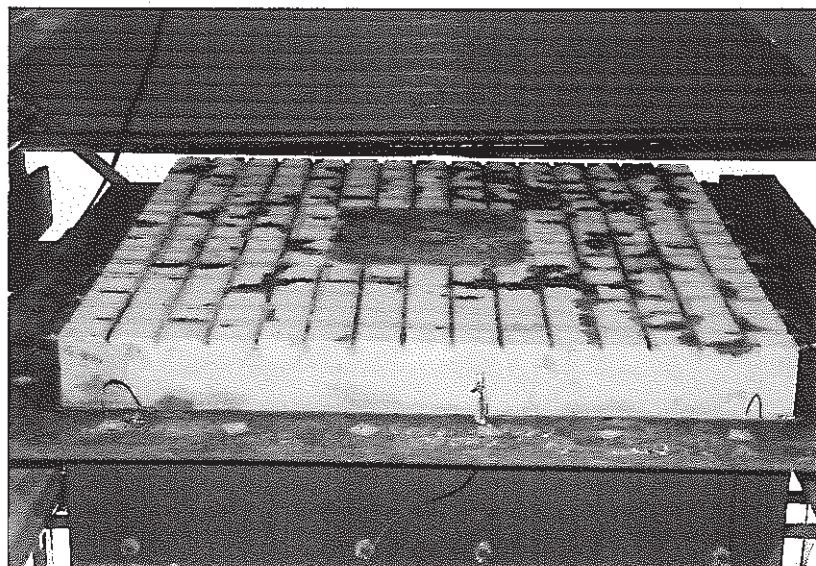


Photo 4 After Pouring Perlite Concrete for Model B.

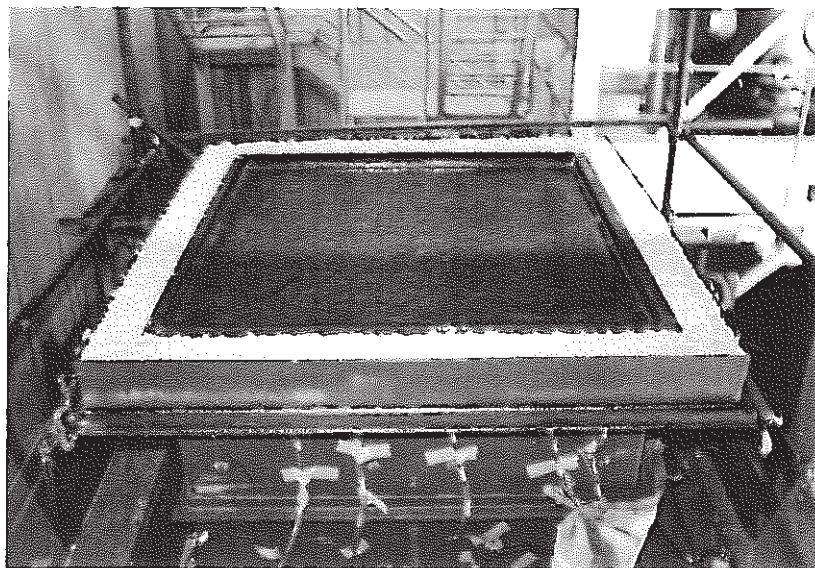


Photo 5 Insulator Located at the Side of Perlite Concrete.

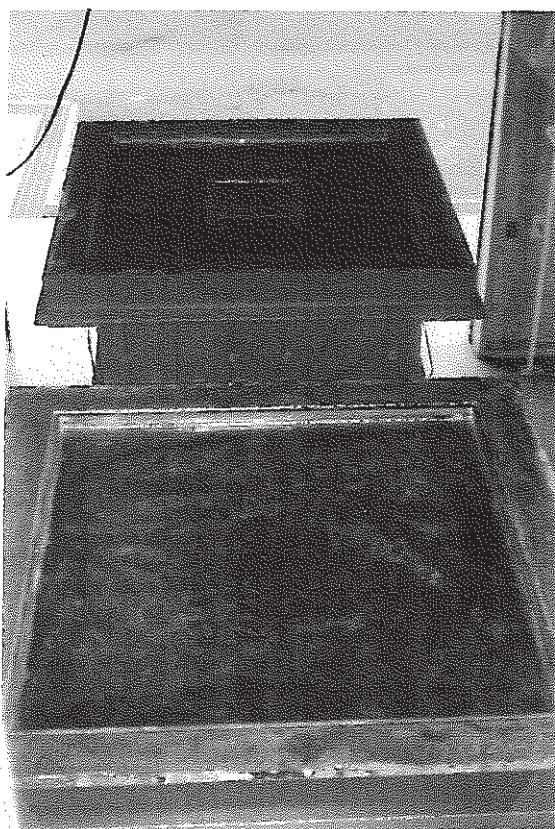


Photo 6 Overview of Models A and B.

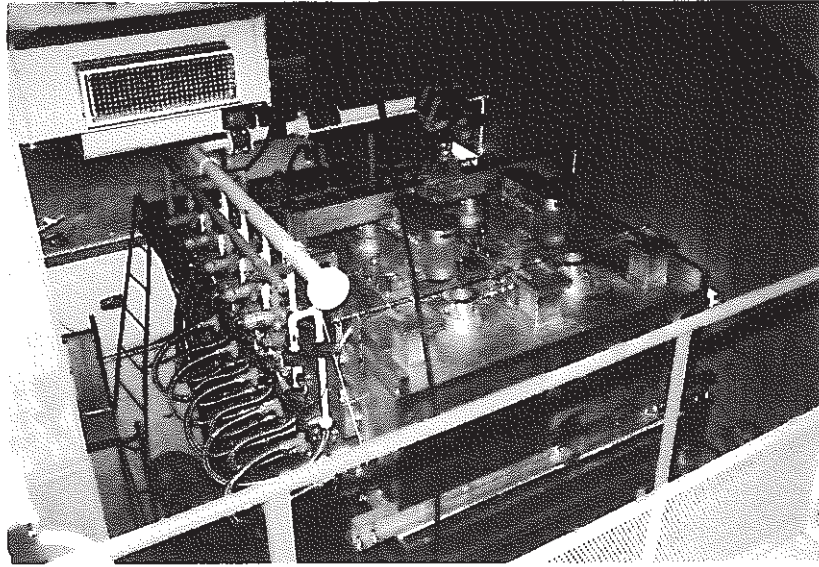


Photo 7 Liner Heating System.

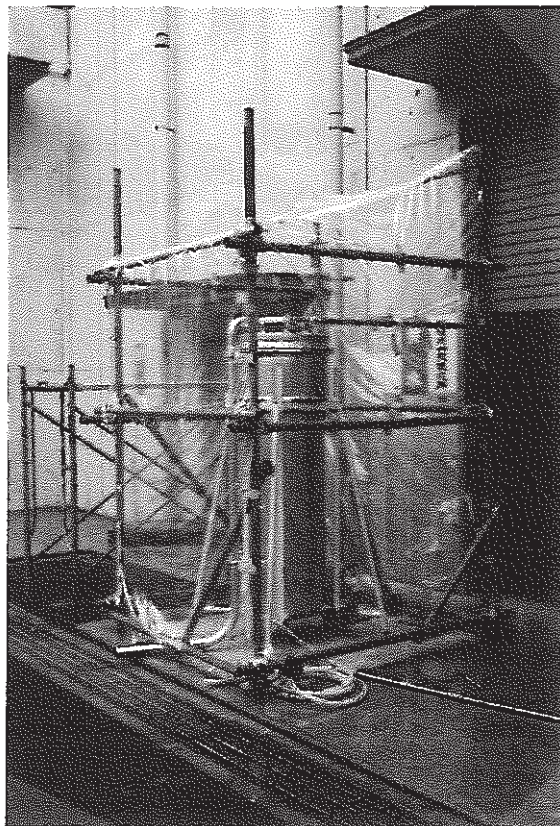


Photo 8 Water Condenser and Condensed Water Measuring Pot.

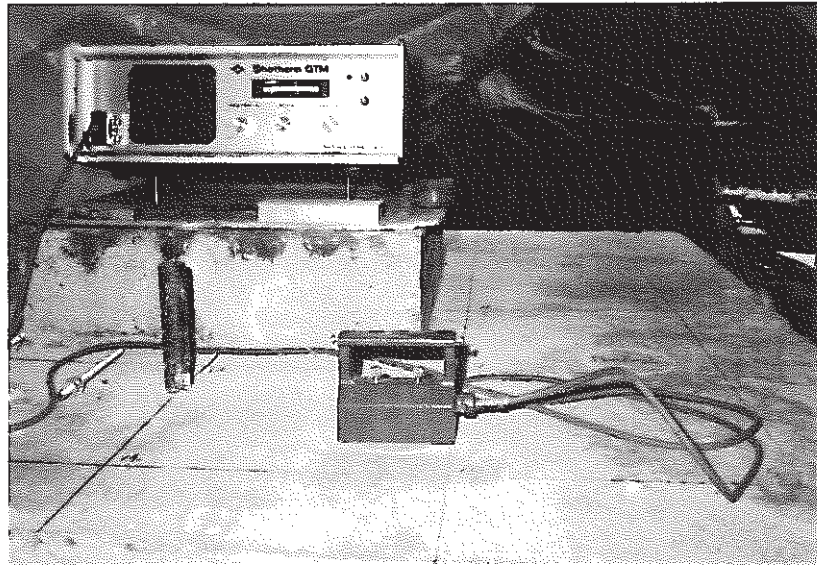


Photo 9 Measurement of Thermal Conductivity on Quick Thermal Conductivity Meter.

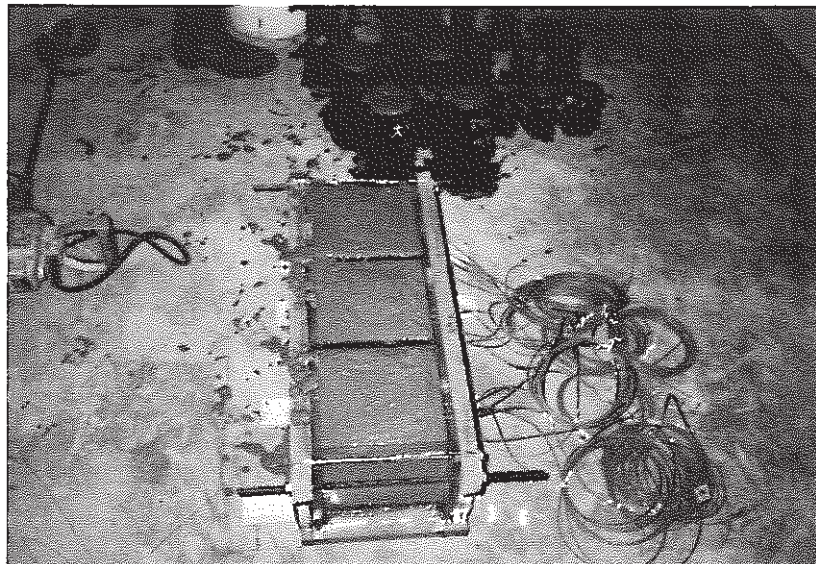


Photo 10 Test Specimen of Grout for Thermal Diffusivity Test.



Photo 11 Measurement of Water Content.

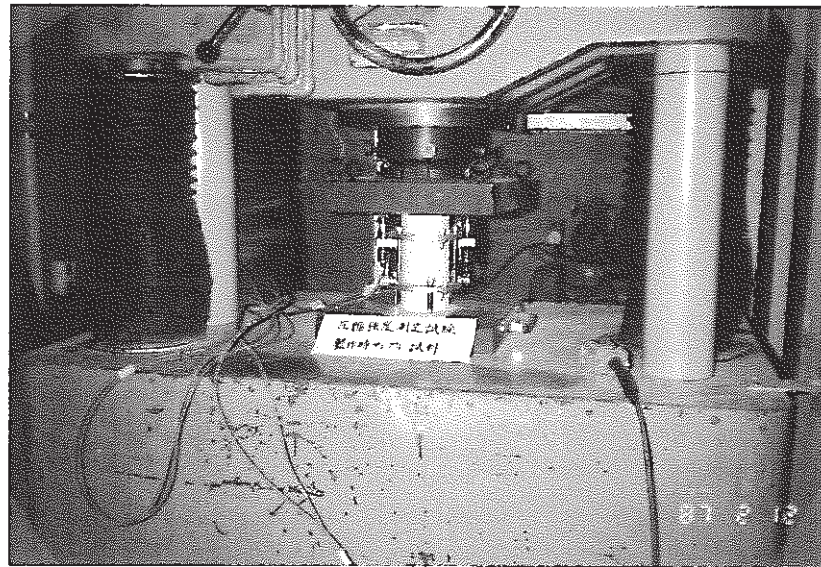


Photo 12 Measurement of Compressive Strength and Static Modulus of Elasticity.