

香港テーツケントンネルにおけるトンネルダクト天井板の設計，施工および加熱実験

Design and Construction of the Over Head Ventilation Duct Slab adopted in Tate's Cairn Tunnel in Hong Kong, and Experimental Study of Structural Behavior of the Slab against Fire Condition

鳥居 雅之* 江藤 俊行**
Masayuki Torii Toshiyuki Eto

西田 徳行*** 土橋 吉輝****
Noriyuki Nishida Yoshiteru Dobashi

要 約

香港テーツケントンネルでは，道路供用時の換気方式として半横流式の換気方式を採用し，給気ダクトを構成するトンネルダクト天井板に，アーチ形状のプレキャストコンクリートパネルを用いた。当形式によるトンネルダクト天井板は，当社で独自に立案・計画・検討・設計した過去に施工例のないトンネル内構造物であったため，①コンクリート強度，鉄筋量が妥当なものであること，②経済性・施工性・安全性に優れ，高品質であること，③長期にわたって構造的に安全であること，④トンネル内車両火災時において所要の耐力を有すること，を理論的かつ实际的に示す必要があった。

本文では，トンネルダクト天井板の，①トンネル供用時の設計検討および野外・坑内実験による理論面・実際面からの安全性の検討方法を概説し，②トンネル内車両火災時の検討方法，および実物大供試体による繰り返し加熱実験（加熱温度250℃，450℃）の方法およびその結果を記述した。

目 次

- §1. まえがき
- §2. テーツケントンネルプロジェクトの概要
- §3. OHVD SLAB の概要
- §4. OHVD SLAB の検討
- §5. 加熱実験
- §6. あとがき

§1. まえがき

香港テーツケントンネルでは，トンネルダクト天井板（OHVD SLAB=OVER HEAD VENTILATION

DUCT SLAB, 以下 OHVD SLAB と略称する)として，当社が独自に立案・計画・検討・設計したアーチ形状のプレキャストコンクリートパネルを採用した。

当 OHVD SLAB は，過去に施工例のないトンネル内構造物であったため，構造物としての安全性を以下の点に関して，理論的かつ实际的に立証する必要があった。

- ①コンクリート強度，鉄筋量が妥当であること。
- ②経済性・施工性・安全性に優れ，高品質であること。
- ③長期にわたって構造的に安定であること。
- ④トンネル内車両火災時において所要の耐力を有すること。

そこで①～③については，設計計算によって理論面からの検討を加えると共に，実物大供試体を用いた安全性・耐久性を実際に確認した。

④については，理論上の火災時の安全性について設計検討を行うと共に，設計検討の妥当性を確認するため実

*香港支店設計課

**香港支店設計課係長

***技術研究所土木技術課

****技術研究所土木技術課係長

物大供試体による加熱実験を、1990年2月、5月の合計2回にわたり香港において実施した。なお実験は香港支店設計課と技術研究所との共同で行った。

本文では、テーツケントンネルプロジェクトの概要および OHVD SLAB の基本計画、OHVD SLAB の設計法、施工法について概説し、加熱実験の方法およびその結果を報告するものである。

§ 2. テーツケントンネルプロジェクトの概要

テーツケントンネルは、香港の九龍半島南部と新界地区の新興都市(沙田)を直結する延長4.0kmの上下線トンネルであり、当社主導の民活方式により建設・運営される有料トンネルである。トンネルは基本的に当社の設計施工により1988年3月に着工し、竣工は1991年7月の予定である。

工事の推進に当たっては当プロジェクトの採算性の向上のため、工事を1日でも早く完成し、通行料としての現金収入を早期かつ長期に得ることが最重要であった。

そこでトンネルの急速施工を可能にするための一方策として、トンネル途中に2本の斜坑を設け、トンネル掘削切羽およびずり搬出路を増設し、掘削工期の短縮を図ると共に、これらの斜坑はトンネル供用時の換気用トンネルとして使用するものとした。その結果、トンネル天井部に OHVD SLAB が必要となったのである。

§ 3. OHVD SLAB の概要

3-1 OHVD SLAB の基本計画

コンサルタント(マンセル社)による OHVD SLAB

の原設計は、両端部および中央部をアンカーおよびブラケットにて支持する3点支持のフラット形状場所打ちコンクリートスラブであり(Fig.1 参照)、その施工はトンネルの覆工完成後に舗装工事と並行あるいは先行して行う計画であった。また場所打ちコンクリートであることから、コンクリート打設支保工・型枠の設置および撤去・コンクリート養生などが必要であり、これらはトンネル工事全体を通じ工程上のクリティカルアクティビティーのひとつであった。

そこで工期短縮のため、OHVD SLAB の構造および施工法を当社において再検討し、Fig.1 に示すとおりプレキャストアーチ型に変更した。

プレキャストアーチ型 OHVD SLAB を原案のフラットスラブ型 OHVD SLAB と比較すると、その構造上および施工上の長所は以下のとおりである。

- ① OHVD SLAB がフラット形状の場合に必要な吊り金具を省略できる。
- ② OHVD SLAB の応力分布が全断面において圧縮応力となるため、スラブ厚および鉄筋量を小さくできる。
- ③ OHVD SLAB に2分割のプレキャスト部材を用い、その接合部は早強無収縮グラウトを用いてトンネル内で固定する方式とすることにより、OHVD SLAB のトンネル内での養生作業を省略できる。
- ④ 幾何学的に OHVD SLAB が脱落しない形状とすることにより、OHVD SLAB 支持のため設けたトンネル覆工上の凸部(コーベル)との間にブラケットなどの接合を理論上不要とでき、結果的にトンネル覆工施工時のアンカーなどの埋め込み作業を省略できる。

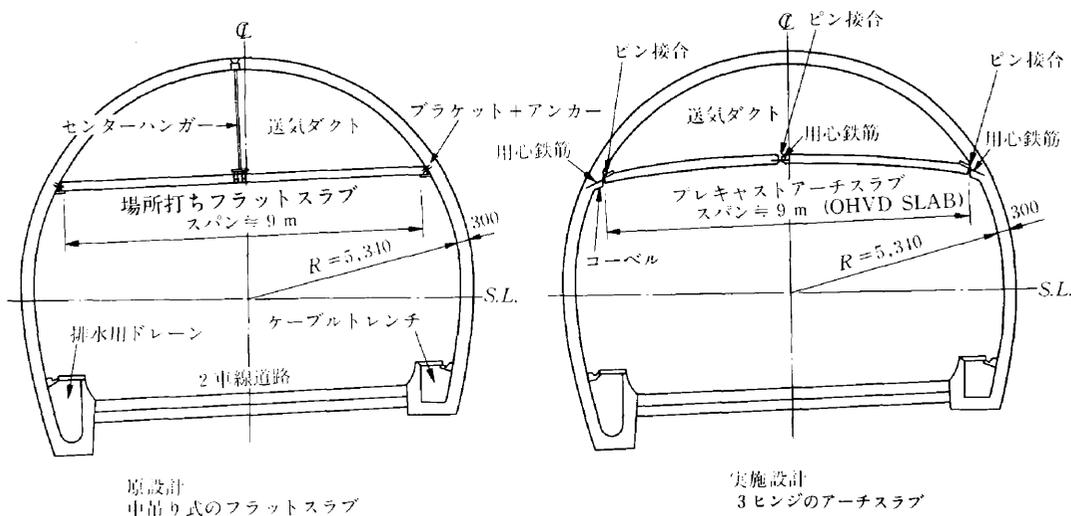


Fig.1 OHVD SLAB形状原設計・実施設計比較図

テーツケントンネルの土木構造物はすべてマンセル社により設計される契約であったが、OHVD SLABに関しては、以下の理由により当社香港支店設計課が理論付け・基本構造および一部の構造詳細の設計を実施した。

- ① OHVD SLABが当社の代案であり、過去に施工実績のない構造物であること。
- ② OHVD SLABの設計に施工面からの意図（スラブ厚低減による軽量化、および吊り金具およびブラケットの省略による施工の簡略化）を十分に反映させる必要があること。
- ③ 工程上の理由により OHVD SLABの設計に対する承認を香港政庁より一刻も早く得る必要があること。

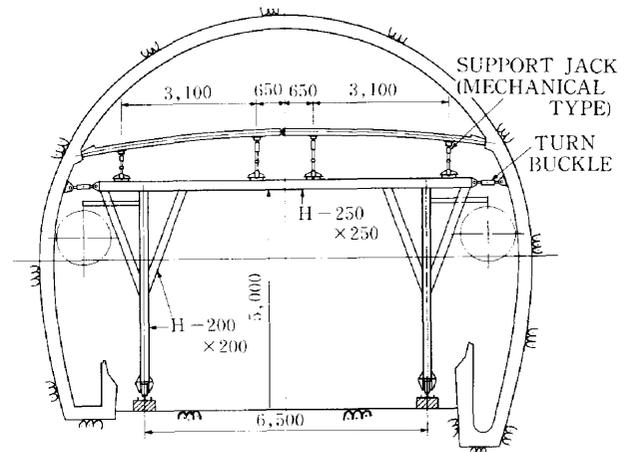


Fig.3 OHVD SLAB設置時トンネル断面図

3-2 OHVD SLABの施工法

全延長約8.0kmのトンネル全線にわたって架設するOHVD SLABパネル一枚当たりの形状は、長さ4.5m×幅2.4m×厚さ200mmとし、坑口近傍のコンクリートキャストヤードで両面型枠を縦置きにして作成した。

OHVD SLABパネルは、1.5日の養生をした後に脱型した。脱型後の吊り上げは、コンクリート供試体試験によりコンクリート強度が10MPa以上であることを確認した後にOHVD SLABパネル内に埋め込んだ吊り金具を使用して行った。OHVD SLABパネルはストックヤード内の専用の枠に立て掛けて保管し、乾燥から保護するため膜養生を施した。脱型後のOHVD SLABパネルにはすべてその側面に、番号・パネルタイプ・打設日を記録し、トンネル内に架設される時点で養生期間が最低3ヵ月となるように管理した。

OHVD SLABパネルの架設は、Fig.2に示すように改造ユニッククレーンにより、C形フックを使用して行った。ここでC形フックとは、OHVD SLABパネルのトンネル内設置のためにH形鋼を用いて作成した専用

の吊り金具であり、OHVD SLABパネル設置の際のトンネル内での微かなハンドリングを可能にするため、OHVD SLABパネル平面に垂直な方向に一点吊りすることができるよう設計されたものである。

またOHVD SLABパネルをトンネル内の所定の位置に設置するための仮支保工として、Fig.3に示すような専用の設置架台をH形鋼にて作成した。当架台は、ローラーによりレール上を移動できる構造とし、OHVD SLABパネルを支えるため、またOHVD SLABパネル位置の微調整を可能にするため、4Nos.×2列のジャッキを設置した。またジャッキのベースにローラーベアリングを取り付け、設置架台上面のプレート上(550×600)を2方向に水平移動できる構造とした。

OHVD SLABパネルを所定の位置に設置した後、アーチを形成する接合部分（コーベルとの接合部分および中央接合部分）には、仮支保工撤去後に軸圧縮力が作用するため、撤去時期を考慮の上、12時間養生後の圧縮強度=10MPaが得られるFosroc社のCONBEXTRA GP GRADE-2を使用した。トンネル縦断方向の接合部分にはFosroc社のCONBEX 100をセメントモルタル（普通ポルトランドセメント+砕砂+水）中に混入したグラウト材を使用した。

OHVD SLABパネルの架設速度は、無収縮モルタルの養生時間を勘案して片坑口当たり6組、1日合計12組とした（28.8m/日）。

以上の施工法を採用することにより、OHVD SLABは、並行して行われる他のトンネル内作業を阻害する事なく施工することができた。

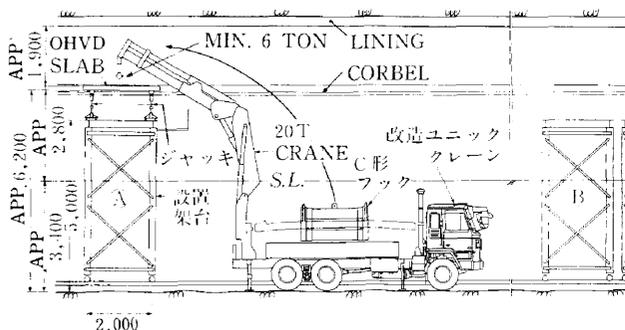


Fig.2 OHVD SLAB設置方法

§ 4. OHVD SLAB の検討

4-1 トンネル供用時の検討

(1) 終局限界状態および使用限界状態における検討

トンネル供用中の常時荷重に対する OHVD SLAB の検討は、英国のコンクリート設計基準¹⁾に基づいて終局限界状態と使用限界状態における検討を行った。

ただし、OHVD SLAB のようなアーチ部材の軸力および曲げモーメントによる座屈に対する安全性の検討方法は、上記基準¹⁾に規定されていないため、ドイツの設計基準²⁾に基づいて検討した。

検討の結果、OHVD SLAB の部材断面は文献³⁾に規定されるコンクリートスラブ部材の最小厚さおよび最小鉄筋量で所要の耐力を満足できることが判明した。

(2) OHVD SLAB の脱落に対する検討

OHVD SLAB の脱落に対する検討を行った目的は、OHVD SLAB とコーベルの間および中央接合面に鉄筋などによる接合が不要であることを理論的に証明し、施工において当該部分の鉄筋などによる接合を省略するためであり、以下の手順により検討した。

① OHVD SLAB が脱落するための条件を幾何学的に求めた。その結果 OHVD SLAB が脱落するためには、地山が後退しないかぎり、スラブの中央部を 150mm 上方へ持ち上げるか、あるいは OHVD SLAB の長さを 60mm 縮めることが必要であることが判明した。

② ①の条件を満足するような状況がトンネルの供用中には現実に起こり得ないことを示した。

しかしながら、鉄筋などを用いた結合がなされていないことに対する心理的な不安に加え、OHVD SLAB が車両通行時の振動などにより万が一落下した場合に通行車両に与える影響、さらには社会に与える影響の大きさなどを理由に香港政庁からは、OHVD SLAB とコーベルおよび中央接合部を何らかの形で連結することを設計承認の条件として要求された。そこで施工性を考慮のうえ、OHVD SLAB とコーベルとの間、および OHVD SLAB の中央接合部の合計 3 か所に脱落に対する用心鉄筋を配置した。

(3) OHVD SLAB の設置時の上げ越し量の検討

OHVD SLAB のアーチのライズはトンネル内に設置後、OHVD SLAB の弾性縮み・乾燥収縮・クリープ縮みなどによって減少する。この現象による構造形の変化はスラブの断面力に大きな影響を与えるため、その影響を正しく把握して上げ越し量を算定し、確実に施工に反映させる必要があった。

OHVD SLAB の乾燥収縮量およびクリープ量の計

算は、香港政庁内部資料である土木構造物設計マニュアル³⁾に基づいて実施したが、計算どおりの収縮が起きなかった場合、OHVD SLAB の軸線位置が設計位置を大きく逸脱してしまう恐れがあった。

そこで OHVD SLAB の設置時の上げ越し量を決定するため、それまでの設計検討仕様に基づくテストパネルを作成し、計算により求まる必要上げ越し量を加味してトンネル内に架設したテストパネルの中央部の沈下量を、3 ヶ月間にわたり計測した。Photo 1 にテストパネルの坑内架設状況を示す。

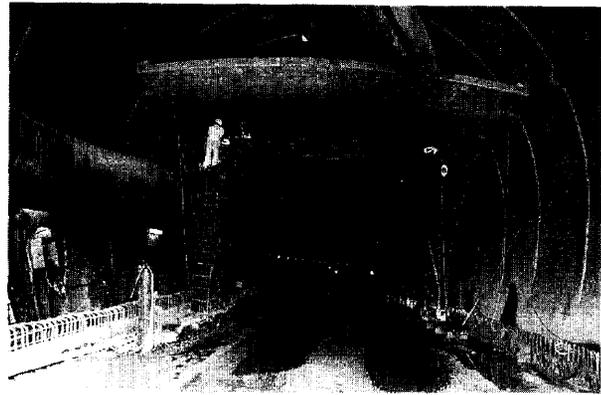


Photo 1 テストパネルの坑内架設状況

計測の結果、テストパネル中央部沈下量の実測値は、計算値とほぼ一致することが確認されたので、計算により求まる必要上げ越し量を OHVD SLAB 設置時の上げ越し量として採用した。

4-2 OHVD SLAB のトンネル内車両火災時の設計

(1) 設計条件

トンネル内車両火災時の設計火災温度、OHVD SLAB の所要耐力および火災沈静後の補修条件については、香港政庁交通局とマンセル社との協議により、以下の 2 ケースが設定された。

ZONE-1: 火災発生位置における状態

道路側温度 450°C (OHVD SLAB 下面)

換気ダクト側温度 30°C

(- " - 上面)

耐火時間 1 時間、その後も脱落しないこと
火災後の OHVD SLAB-新品に取り換える

ZONE-2: 火災発生位置からやや離れたところにおける状態

道路側温度 250°C (OHVD SLAB 下面)

換気ダクト内温度 30°C

(- " - 上面)

耐火時間1時間、その後も脱落しないこと
火災後の OHVD SLAB—継続使用する

(2) 設計断面力の算定

OHVD SLABの火災時の設計断面力は、以下の①～⑤に示す手順に従って算定した。

① 断面内温度分布の算定；

OHVD SLAB 下面 (道路側) を設計火災温度に1時間保持した後の OHVD SLAB 断面内の温度分布を、1次元非定常熱伝導解析により算定した。

② 温度荷重による OHVD SLAB 変位量の算定；

OHVD SLAB の断面内には①の解析で求めた温度分布に伴ってひずみ分布が生ずる。当ひずみ分布の算定は、コンペンセーションライン法を応用し、文献⁹⁾に基づいて鉄筋コンクリート部材用に自社開発したひずみ分布解析プログラムを用いて行った。

そして OHVD SLAB の上面と下面のひずみ量の相違による曲率の変化量および部材の伸長量を計算し、変位後の OHVD SLAB の軸線の座標を求めた。

③ OHVD SLAB の荷重による断面力の解析；

死荷重 (自重、天井板上に敷設されるケーブルなど付帯設備の重量) および活荷重 (換気による空気圧) による断面力 (M_L , N_L , S_L) は、OHVD SLAB を両端部および中央部をヒンジとする3点ヒンジ構造物として、骨組構造解析により算定した。当解析における OHVD SLAB の軸線の座標は、②の解析により求めた温度荷重による変位後の座標を用いた。また解析では、英国のコンクリート設計基準⁹⁾に基づく荷重係数を考慮した。

④ OHVD SLAB の火災時の偏心による断面力の解析；

火災温度による変位・変形後の OHVD SLAB の形状模式図は、Fig.4 に示すようになることが予想されたので、OHVD SLAB の接合部の軸力の中心線と支持点の不一致により、接合部に偏心による曲げモーメントが発生すると考えた。

偏心量は、部材軸線からケーブル反力の合力の作用点まで (Fig.5 における e) とし、合力の作用点の位置は、文献⁹⁾に示されるコンクリートの圧縮ひずみ分布の算定式より求めた圧縮応力の合力位置とした。

偏心曲げモーメント： M_e は、OHVD SLAB に作用する軸力： N_L と前述の計算により算定した偏心量とから $M_e = N_L \times e$ として求めた。

偏心曲げモーメント： M_e の大きさは、荷重により発生する最大曲げモーメント： M_L の約3倍であり、

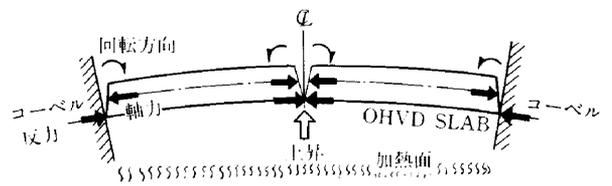


Fig.4 OHVD SLAB加熱時挙動全体模式図

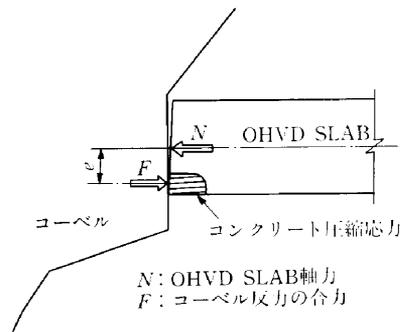


Fig.5 OHVD SLAB挙動端部模式図

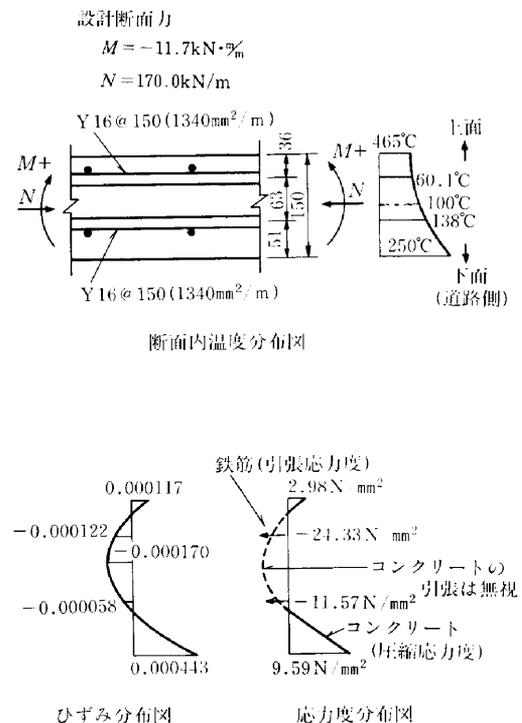


Fig.6 OHVD SLAB断面内応力度分布解析結果例

OHVD SLABの火災時の設計において支配的な断面力であった。

⑤ OHVD SLAB 火災時の設計断面力の解析；

OHVD SLABの火災時の設計断面力は、③により求めた死荷重および活荷重により引き起こされる

断面力 (M_L, N_L, S_L) と、④により求めた OHVD SLAB の熱変形・変位により生ずる偏心断面力 (M_e) を重ね合わせて求めた。

(3) 応力度照査および断面耐力の照査

曲げモーメント、軸力および温度荷重により発生するコンクリートおよび鉄筋の応力度は、前項の②で述べたひずみ分布解析プログラムを用いて求めた OHVD SLAB 断面内のひずみに、コンクリートおよび鉄筋のヤング係数を乗じて求めた。解析結果の例を Fig.6 に示す。

コンクリートおよび鉄筋の応力度の照査は、前述の方法により算定した応力度と、文献⁴⁾に基づいて材料係数および火災温度による材料強度の低減の影響を考慮した許容応力度を比較して行った。

せん断力の検討は、材料強度低減および材料係数を考慮して部材のせん断耐力を求め、設計せん断力と部材のせん断耐力を比較して安全性を確認した。

さらに OHVD SLAB の曲げモーメントと軸力による座屈に対する安全性の検討²⁾を行った。

検討の結果、トンネル供用時の検討により算定された部材断面 (最小コンクリート厚+最小鉄筋量) は、トンネル内車両火災時にも安全であることが判明した。

現在までに、高温下における鉄筋およびコンクリートの研究として材料物性の温度依存性に関する評価・研究は数多くなされている^{5)~8)}が、本構造物のような3点ヒンジによるアーチ形状の鉄筋コンクリート構造物の高温下における挙動については研究例⁹⁾が少ない。また、§4. に述べたとおり、OHVD SLAB の解析は、“構造・支承条件を2スパン3ヒンジ構造物とし、火災時の温度上昇による部材の伸張は、中央接合部分が鉛直方向に変位することにより完全に解放される”という仮定に基づいている。しかし、OHVD SLAB の両端および中央接合部分のヒンジ機構は無収縮モルタルに生じるクラックによって形成される。よってこの鉛直変位の拘束の度合によっては、コンクリート厚および鉄筋量を変更しなければならないことが予想された。そこで、香港ダイヤモンドヒル工事事務所側の旧火薬庫跡地にて、本構造物のトンネル内火災を想定した高温下における挙動把握を目的とする加熱実験を行った。

実験は、設計時の温度荷重 (250℃, 450℃…1時間保持) による部材内温度、ひずみおよび変位を計測する実物大供試体 (以下、供試体と略称) の加熱実験とコンクリートの物性試験を実施した。加熱実験は、1つの供試体で250℃を3回、450℃を1回行った。

なお、本実験に先立って予備実験を実施し、1) 計器および装置の性能確認、2) 供試体の温度分布を確認・検討した。この検討結果をもとに本実験を計画した。

(1) 加熱方法と実験装置

§ 5. 加熱実験

5-1 実験概要

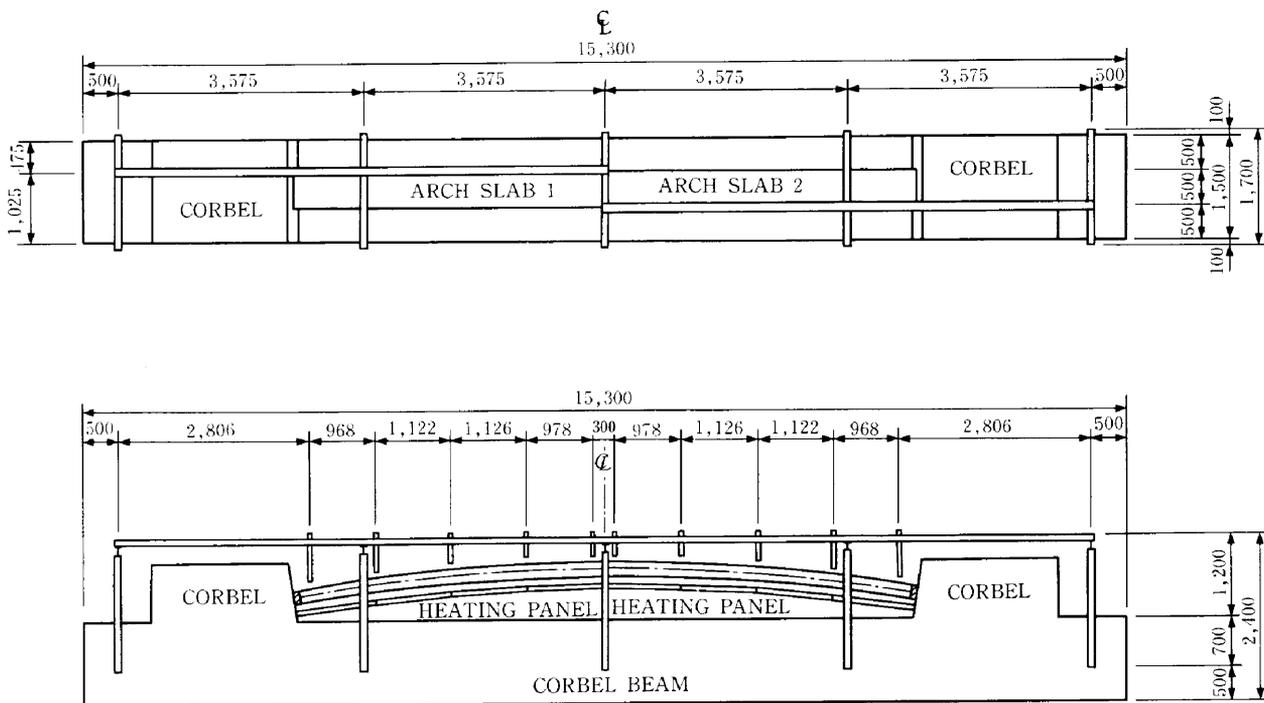


Fig.7 実験装置概略図

加熱方法は、Fig.7に示すように実験供試体直下に配置した電熱管による直接加熱とした。電熱管1本当りの容量は1kW/220Vであり、総数200本を中央ヒンジに対称な4ゾーンに分配した。電熱管の配置は、温度差が生じないように加熱面と電熱管の距離および密度をスラブの端面（コーベルとの据付け部）および中央接合部において調整した。

加熱操作手順および制御システムは、次のとおりである。①温度立上げ時は、250°Cになるまで時間短縮のためにマニュアル操作で総電熱管200本を使用する。②250°Cになった後の温度管理は、電熱管100本への電力供給を断ち、各ゾーン加熱面に配置した熱電対をセンサーとする温度コントローラと交流電力調整器で各ゾーンの電熱管への供給電力を調整し、保持温度250°Cを1時間自動制御する。③温度保持後は、電熱管への電力供給を断ち4時間程度放置する。Fig.8に加熱温度制御システムを

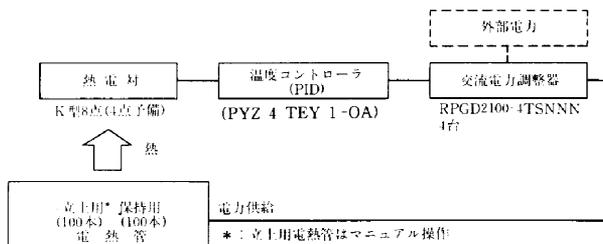


Fig.8 加熱温度の制御システム概略

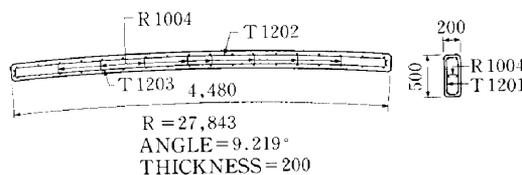


Fig.9 実験供試体の形状寸法

示す。

温度コントローラ用熱電対は、スラブ1、2の各ゾーン中央に配置した。自動制御時は、スラブ1の熱電対を使用し、スラブ2の熱電対は予備とした。なお、この熱電対は輻射熱の影響を避けるため表面から3mm内側に設置した。

(2) 供試体の仕様

供試体は、挙動把握に悪影響がないと判断した範囲で、工事で使用したOHVD SLABに対して次の点を変更した。①供試体の幅は、加熱装置の簡素化と加熱面温度の均一性を確保するために50cm(両側面に300mmのロックウール設置)とした。②OHVD SLABの上端面コーベル接合部には換気ダクト内排水路と用心鉄筋設置のためのコンクリート突起が設けられているが、解析モデルと整合させるため、これを削除した。③OHVD SLABのコンクリート打設は鋼製型枠を立てて行われるが供試体は、埋込み計器の設置を確実にするため、木製型枠を用いてスラブ内曲面を下にコンクリートを平打ちした。

供試体の形状寸法をFig.9に、コンクリート配合をTable 1に示す。

(3) 計測方法

計測システムは、Fig.10に示すとおりである。計測は、温度立上げから降下までの320分間行った。

Fig.11に計器配置図を、Table 2に、計測項目および使用計器を示す。熱電対の取付精度の確保およびコンクリートと鉄筋との熱伝導率の違いによる影響を避けるために、予め熱電対を計画位置に設置した無収縮モルタルのグラウトスティックを供試体内に配置した。

コンクリート用埋込み型ひずみ計は、断面欠損を考慮し、幅方向にそれぞれ100mmずらして部材断面の上中下の3カ所に配置した。鉄筋ゲージは、主鉄筋の上および

Table 1 コンクリート配合 (Grade 30/20, Slump 50mm)

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m³)					
				W	C	S	G		混和剤
							5-10mm	10-20mm	
20	5.0	51	32	185	360	560	285	910	0.901 m³

設計基準強度： $f_c'(28) = 30 \text{ N/mm}^2$ (150mm×150mm×150mm立方供試体強度)

セメント種類：Asano Bulk (普通ポルトランドセメント)

細骨材：Sumlac Quarry (shenzhen)産

粗骨材：Sumlac Quarry (shenzhen)産 (花崗岩の碎石)

混和剤：D88は、GRACE社製の混和剤でその特性は次のとおりである。

- 1.圧縮強度の増加
- 2.セッティングタイムの遅延
- 3.ワーカビリティ増加
- 4.収縮およびクラックの抑制

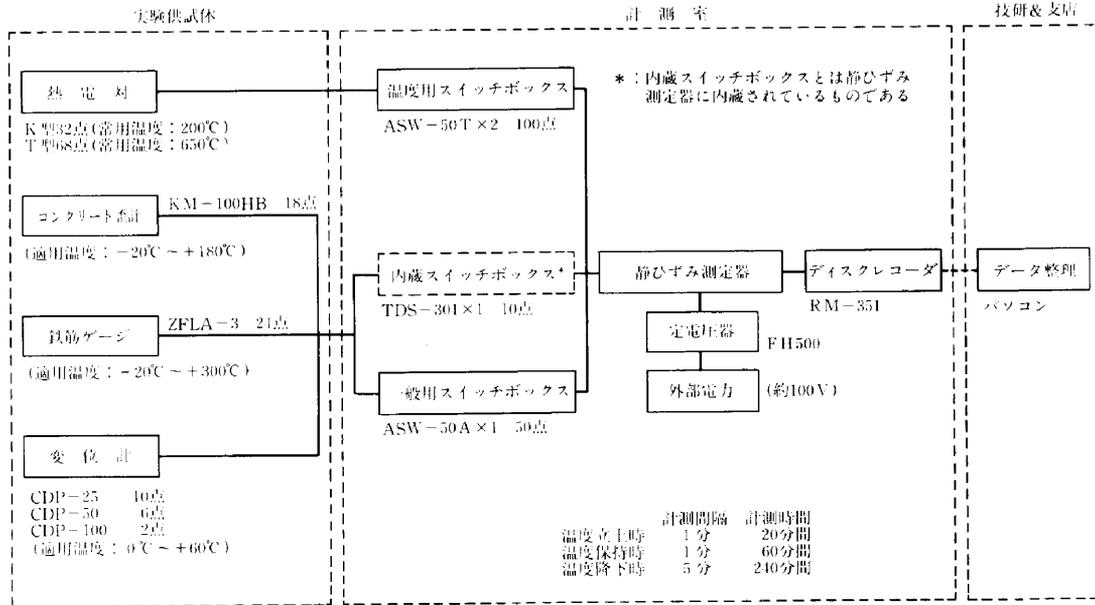


Fig.10 計測システム

Table 2 計測項目と点数および使用計器

計測項目	点数	計器名	型式	備考
温度*	100	熱電対	T,K型	
コンクリートひずみ	18	埋込型コンクリートひずみ計	KM-100HB	個別データ付
鉄筋ひずみ	24	鉄筋ゲージ	ZLFA-3	自己温度補償無
鉛直方向変位	10	変位計	CDP-25, 50, 100	
軸線方向変位	8	変位計	CDP-25	回転角算定用

*：温度計測は、高温となるコンクリート加熱面でK型熱電対、その他はT型熱電対

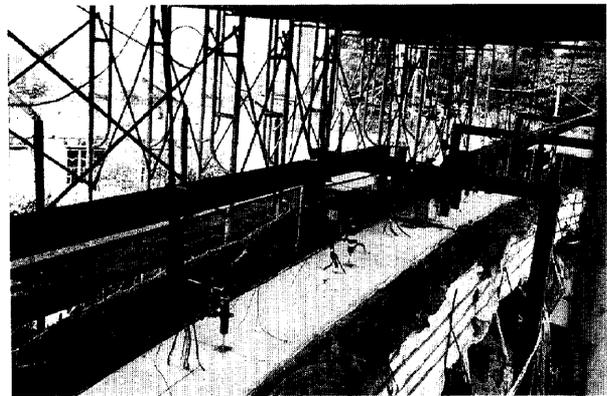


Photo 2 実験装置

下鉄筋にそれぞれ2枚を高温焼付けにて設置した。変位計は、コーベル上に不動点としての設けた架台に取付けた。また、供試体端面の回転角を算定するため、ガラス板を供試体に埋め込み、供試体上方200mm, 400mmの2点の水平変位量を変位計で計測した。Photo 2 に計測状況を示す。

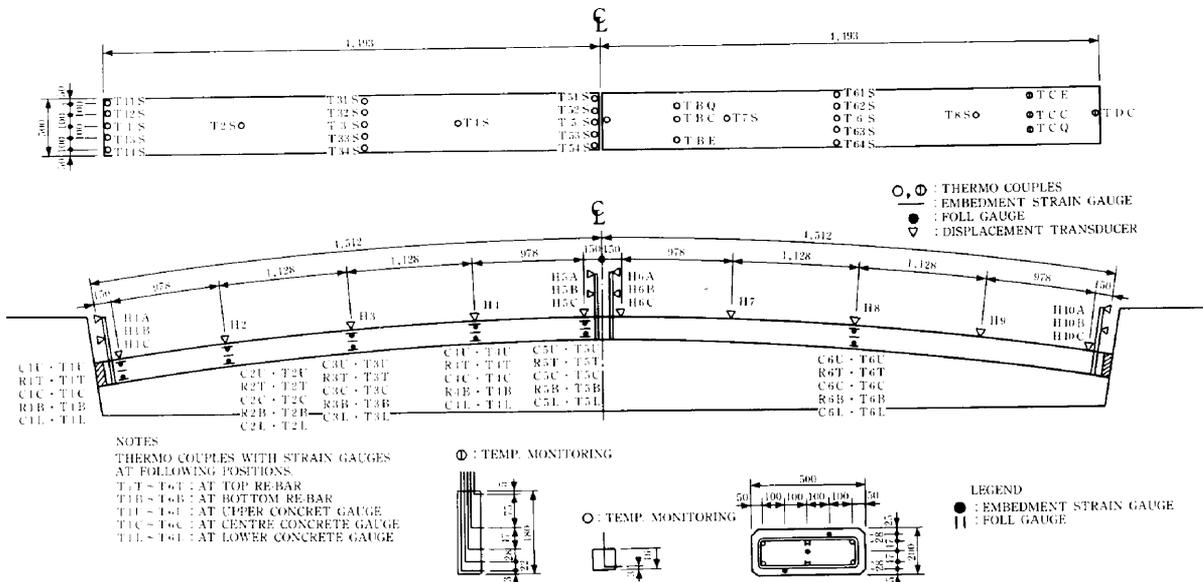


Fig.11 計器配置図

Table 3 コンクリート物性試験結果と高温加熱後の性状(既往文献)

項目	物性値・材令	規格および供試体	高温加熱後の性状(常温との比較)	備考
圧縮強度	42.7MPa 材令44日	BS1881 Part116, 1983 15cm×15cm×15cm, 3個	100~200℃では同等か、やや大きめの値であるが、300℃以上では、温度上昇とともに低下、熱間試験では、100℃でやや低下し、200~400℃で増加し、500℃で急激低下 ²⁾	
静弾性係数	22.6kN/cm ² 材令44日	BS1881 Part121, 1983 φ15cm, H=30cm, 3個	100℃で約30%の低下、温度上昇とともに直線的に低下。400℃で70%、500℃で80%の低下 ²⁾	
引張強度	2.92MPa 材令44日	BS1881 Part117, 1983 15cm×15cm×15cm, 3個	100℃から温度上昇とともに直線的に低下 ²⁾	
熱膨張率	昇温過程 $\alpha = -0.222T + 9.76$ 降温過程 $\alpha = 0.0250T + 5.37$ 材令44~49日	規格なし φ10cm, H=20cm, 3個の円柱供試体使用 150℃まで加熱	200℃まで温度上昇とともに直線的に低下、200℃以上で直線的に増加 ²⁾ 常温 ≤ T ≤ 207℃ $\alpha = 12.4 - 0.0330T$ 207℃ ≤ T ≤ 500℃ $\alpha = 3.73 + 0.008895T$	150℃までの熱膨張率試験を行った結果、既往研究 ²⁾ に一致していると判断し、その式を採用した。

5-2 コンクリートの物性試験

(1) 強度および静弾性係数

コンクリートの圧縮強度、引張強度および静弾性係数は、常温試験を香港の計測専門会社へ依頼して行った。

Table 3 にコンクリート物性試験結果を示す。

(2) コンクリートの熱膨張率

高温下におけるコンクリートの熱膨張率は、温度依存性が大きい²⁾ことが知られており、使用コンクリートの性状を把握することは重要である。しかし、現在、試験法の規格はない。よって、試験は、φ=10cm、高さ20cmの軽量モールドにコンクリート用埋込み型ひずみ計(中心部)と熱電対(中心部と側部)をセットした試験供試体を香港現地で作成し、これを日本へ持帰り技術研究所において実施した(ただし、試験装置能力から150℃までの試験実施、150℃以上は既往研究との比較・検討)。

Photo 3 に試験装置、Fig.12 に試験時の温度変化サイクル、Fig.13 に試験供試体温度とひずみの関係を示す。全体に、ひずみは温度上昇に伴い増加し、降下と共に減少するが、昇温過程の100℃付近で大きく減少し、降温過程の80℃付近で若干増加している。これは、コンクリート中水分の放出および吸収の影響が原因と考えられる。なお、既往研究と試験結果を比較した結果、OHVD SLAB に使用したコンクリートの熱膨張率は 概ね既往研究の次式²⁾が適用できると判断した。

$$\alpha_c = 12.4 - 0.0330T \quad \text{常温} \leq T \leq 207^\circ\text{C} \quad \dots(1)$$

$$\alpha_c = 3.73 + 0.008895T \quad 207^\circ\text{C} \leq T \leq 500^\circ\text{C}$$

Fig.14 に既往研究との比較を示す。

5-3 測量結果および考察

ここでは、コンクリート物性試験の実施と同時に行った実験結果を中心に記述し、(6)に繰返し実験の評価を述べる。

(1) コンクリート温度と温度管理

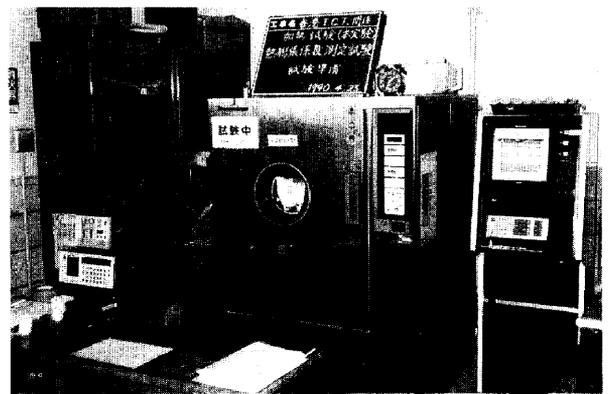


Photo 3 熱膨張率試験装置

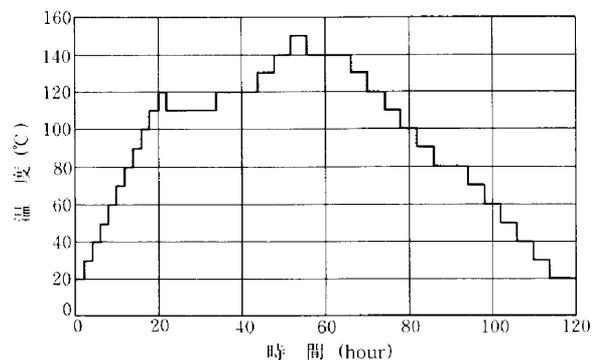


Fig.12 コンクリート熱膨張率試験の温度変化サイクル

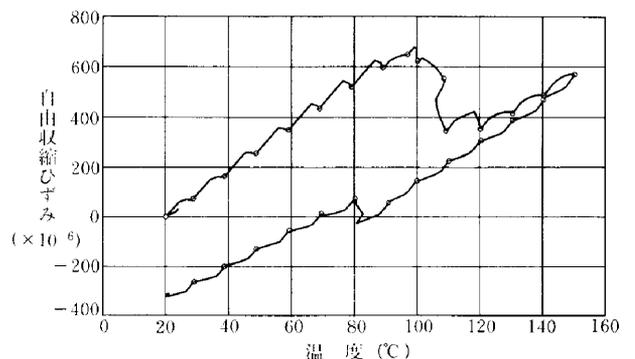


Fig.13 供試体の自由収縮ひずみと温度の関係

加熱表面部コンクリート温度の経時変化を Fig.15 に示す。温度保持時の幅方向温度差は、いずれも20℃程度であった。温度保持時の加熱表面部温度は、ほぼ満足できる温度管理ができたが、コベール付近の温度が低かった。これは、コベールへの放熱の過小評価が原因である。加熱面温度分布は、Fig.16 に示すように中央ヒンジを中心に対称となった。

スラブ断面内の鉛直方向温度分布は、Fig.18 に示すように加熱および温度保持時は双曲線状となり、温度降下時は加熱表面部の温度が急速に下がり、約70℃（経過時間300分）で均一化した。

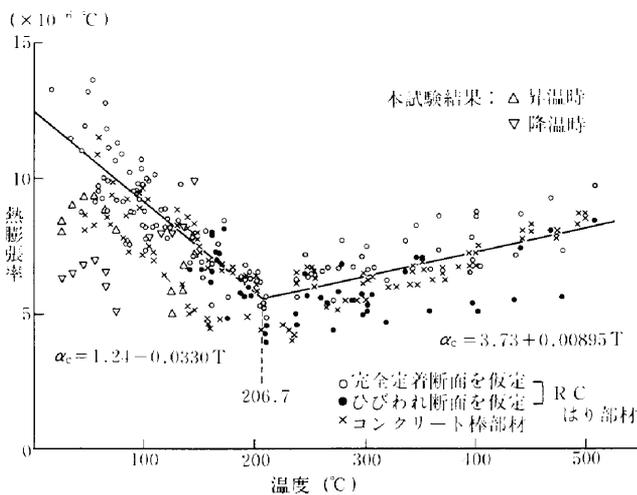


Fig.14 既往研究⁵⁾との比較

(2) コンクリートおよび鉄筋ひずみ

一般に、コンクリートひずみ計測における有効ひずみは、実測ひずみから自由膨張収縮ひずみを差し引いたものとして次式で表される。

$$\epsilon_c = \epsilon' - \alpha_c \cdot \Delta T \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 ϵ_c ：コンクリート有効ひずみ

$$\epsilon' : \text{実測ひずみ} \quad \epsilon' = K \{ (\epsilon - \epsilon_0) - \Delta \epsilon_0 \}$$

K ：校正係数

ϵ ：任意時間のひずみ測定器の読み

ϵ_0 ：初期設定時のひずみ測定器の読み

$\Delta \epsilon_0$ ：温度変化による零点移動量

α_c ：コンクリートの熱膨張率（5-2 参照）

ΔT ：初期温度からの温度変化量

鉄筋の有効ひずみは、高温下であることからコンクリートと鉄筋の熱膨張率の差を考慮し、次式を用いた。

$$\epsilon_s = \epsilon' - (\alpha_c - \alpha_s) \Delta T \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 ϵ_s ：鉄筋の有効ひずみ

α_s ：鉄筋の熱膨張率

鉄筋の熱膨張率は、次式⁵⁾($常温 \leq T \leq 500^\circ\text{C}$)を用いた。

$$\alpha_s = (0.00625 T + 10.9) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad \dots\dots\dots(4)$$

なお、使用した鉄筋ゲージは、自己温度補償されていないため、常温から250℃まで加熱試験を行って零点移動量の近似式を求め、ひずみ算定に用いた。

Fig.17 に温度およびひずみの経時変化を示す。温度

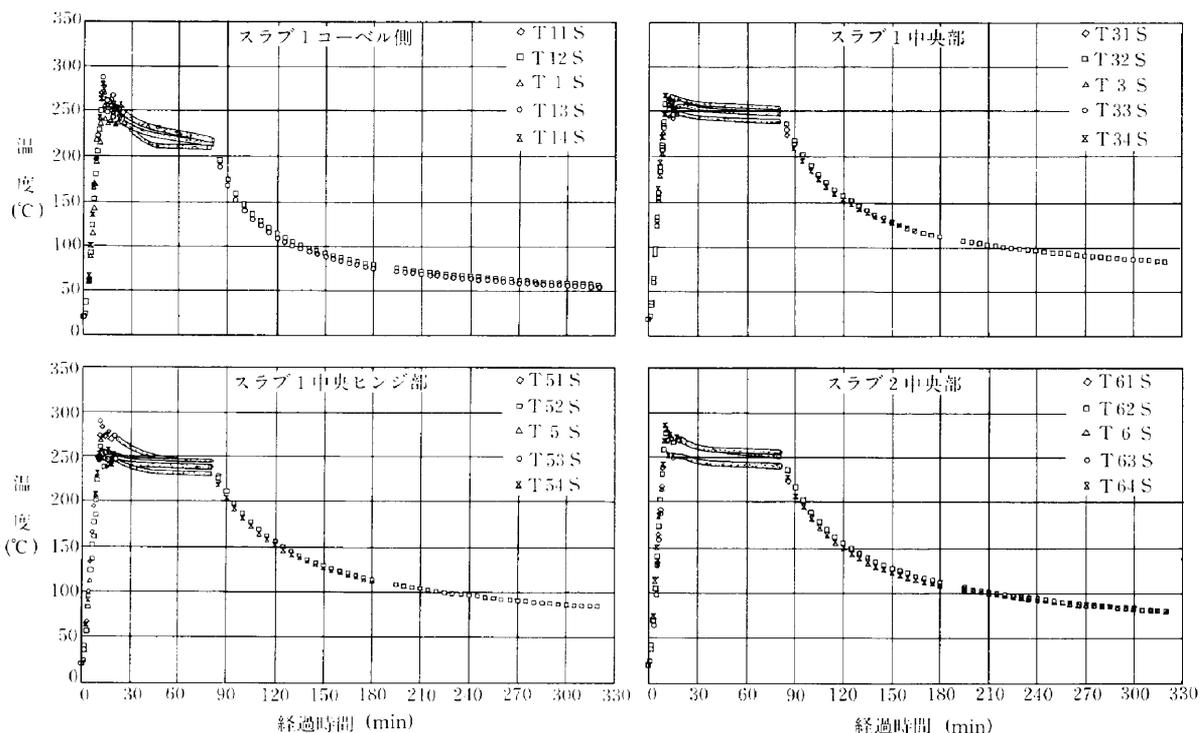


Fig.15 加熱表面部コンクリート温度の経時変化

立上げ時のひずみは、下部コンクリートが加熱による膨張の拘束のために圧縮となり、中央部では下部膨張により引張となった。また、温度保持時のひずみは、上、中および下部ともゼロに収束する方向に推移した。これは、

①部材温度の上昇に伴うヒンジの影響（無収縮モルタルとスラブ間の継目の開き）、②部材内温度差の減少、③クリープによるものと考えられるが、今回の実験結果から主要な原因を限定するのは難しい。また、温度降下時に

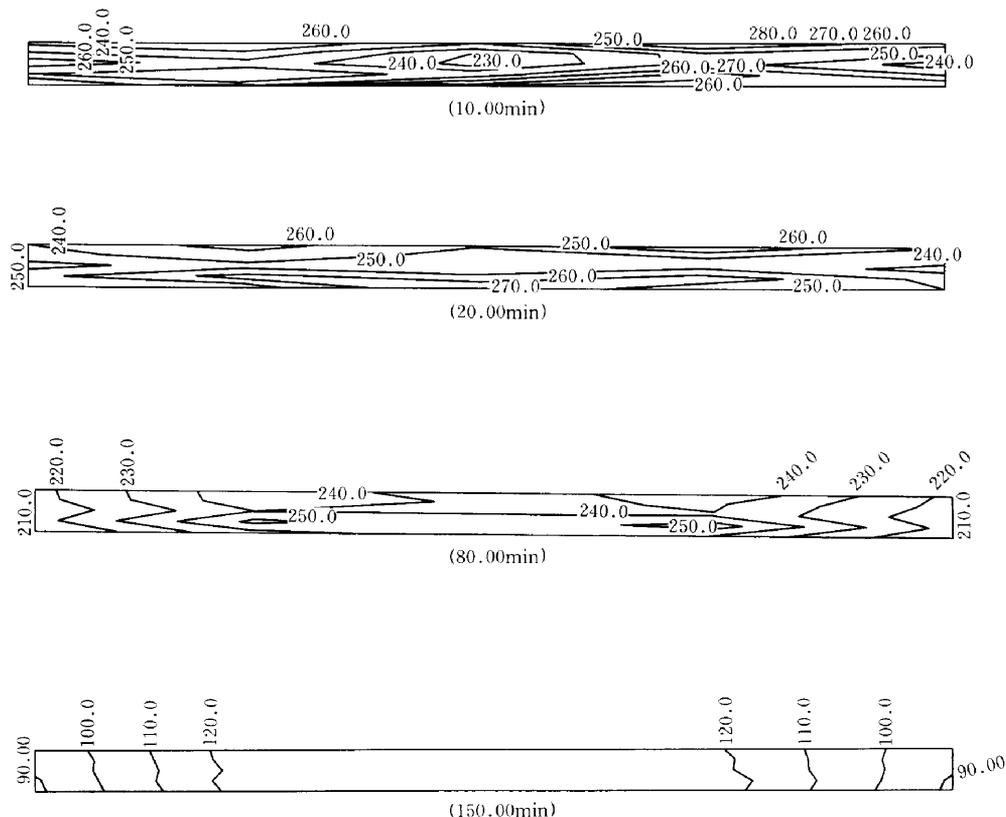


Fig.16 加熱表面部等温線図

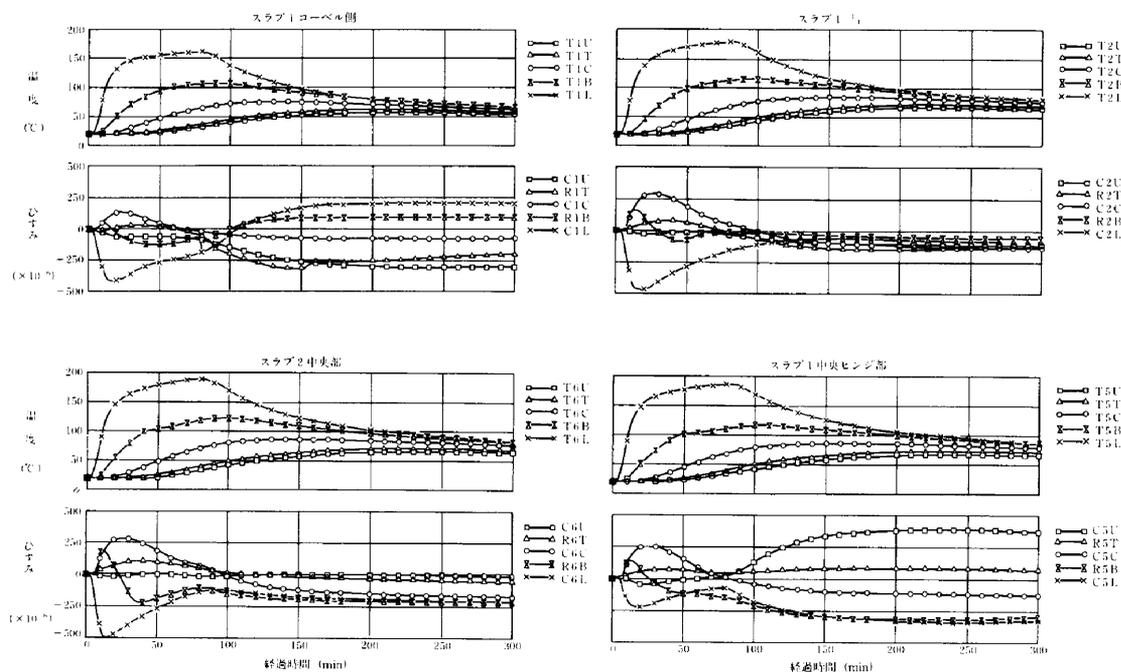


Fig.17 温度およびひずみの経時変化図

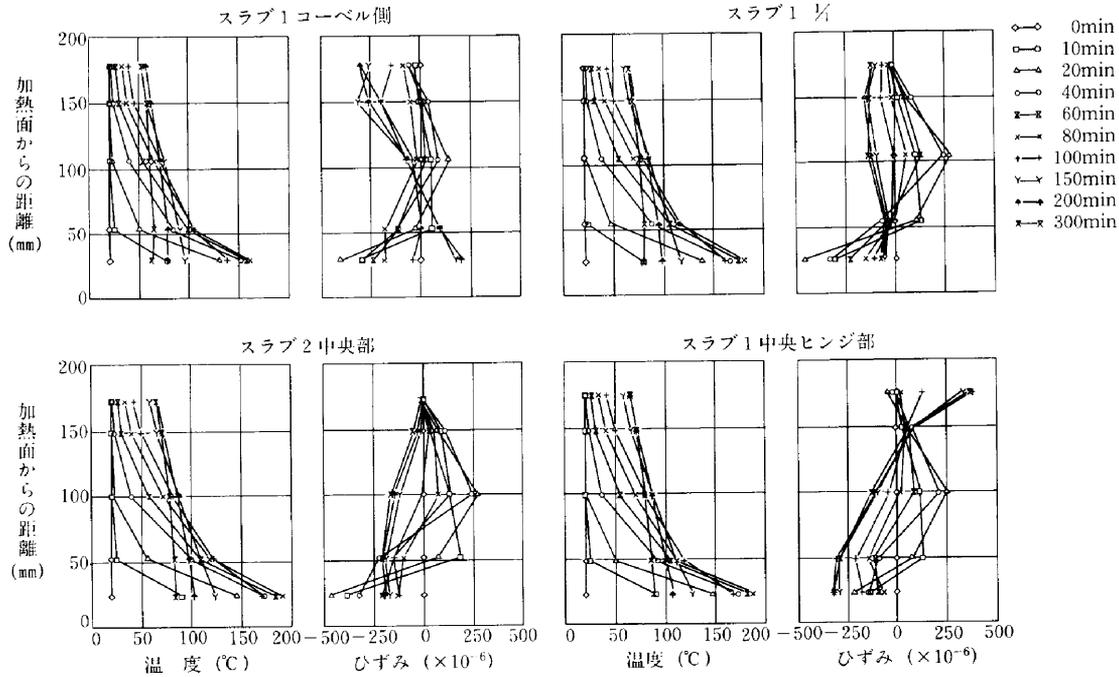


Fig.18 断面内鉛直方向の温度およびひずみ分布図

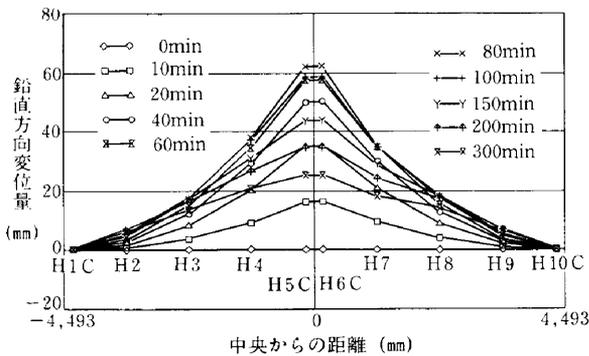


Fig.19 鉛直変位量分布

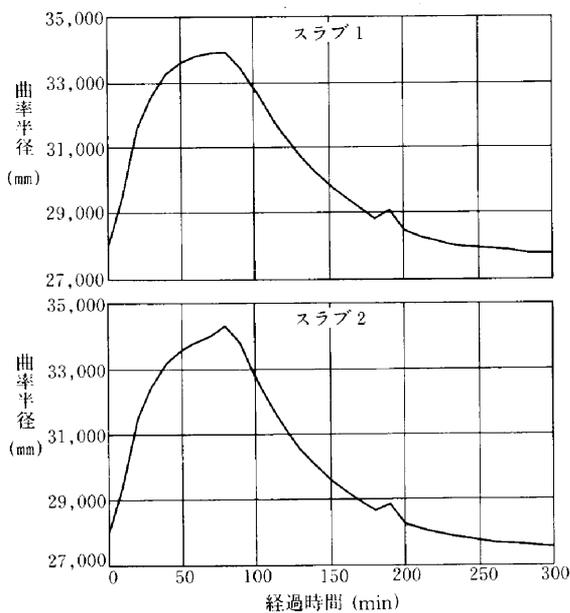


Fig.20 曲率の経時変化

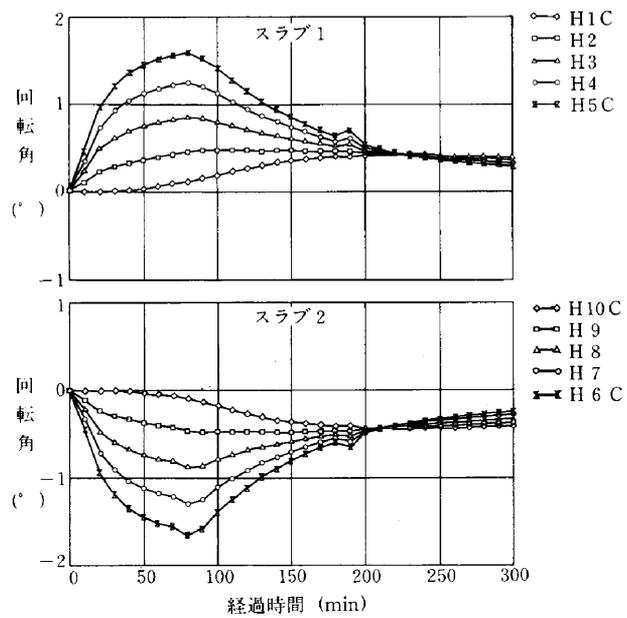


Fig.21 回転角の経時変化

における下部コンクリートひずみおよび中央接合部の上部コンクリートひずみは、加熱時と反対側へ値が移行する傾向がある。また Fig.18 からわかるように、コーベル側と中央接合部のひずみ分布は、逆の傾きとなる。これは、収縮時の拘束が原因であると考えられる。

(3) スラブ変位

スラブの鉛直変位分布を Fig.19 に示す。鉛直変位は、スラブ断面内温度の上昇に伴って増加するが、コーベル

側に設置した変位計の値は、給熱停止後もある期間増加した。なお、スラブ1と2の変位量は、中央ヒンジを中心にほぼ対称な分布となった。

(4) 曲率半径および回転角

Fig.20 に曲率半径の経時変化、Fig.21 に回転角の経時変化を示す。曲率半径は、各スラブ毎に5点の鉛直変位から算出した円の近似式の半径をスラブ上端面の曲率半径とした。スラブ1の曲率半径は、経過時間80分でピーク値34,000mm(初期値=28,043mm)に達する。スラブ2においてもスラブ1とほぼ同じ値で変化をするが、経過時間60分~100分の間での値が異なる。これは、スラブ2に設置した変位計H7の容量オーバーが原因である。

回転角は、スラブ上端面の円の式を1階微分することにより求めた。回転角の絶対値は、中央接合部に近づくにつれて大きくなった。また、供試体端面の回転角は、経過時間50分で正負が逆転し、回転の方向が逆になった。温度降下時は、スラブ1で経過時間225分、スラブ2では経過時間210分で中央接合部とコーベル側の回転角の値が逆転した。

なお、水平方向変位を用いて算出した回転角と近似式より求めた回転角の値は、定性的に類似しているが定量的には近似式から求めた値の方が大きかった。

(5) 観察事項

予備実験時では、熱電対設置用のモルタルスティックの高さを供試体厚と同一とした結果、スラブ上面からの著しい水分蒸発が起きた。これは、①計器リード線とモルタルスティック、②モルタルスティックと供試体の材質が異なることによってできた不連続面が原因であると判断した。本実験では②の対策として、モルタルスティックの高さを200mm以下の必要な高さとした。その結果、本実験では予備実験ほど著しい水分逸散はなかった。Photo 4 にこれを示す。

加熱実験後の目視観察では、スラブに貫通するようなひびわれは見られなかったが、コンクリート加熱面に不規則な網目状のひびわれが発生していた。これは、加熱によるコンクリート表面の乾燥が原因である。

(6) 繰返し実験の評価

設計時の熱荷重にしたがって、加熱温度250℃を3回実施した後、450℃の加熱実験を1回行った。

既往文献⁹⁾では、コンクリートの熱膨張率が処女加熱時と繰返し加熱時では異なるとされているが、加熱温度250℃の今回の各実験では、部材の温度上昇に多少の差異は見られたものの、ひずみの各計測結果は、ほぼ同じであった。これは、5時間程度の短い時間での加熱である



Photo 4 コンクリート表面からの水分逸散

ためと考える。また、コンクリートおよび鉄筋ひずみ値に急激な変化が見られないことと、目視観察結果では貫通ひびわれがなかったことから、本スラブは設計条件ZONE-2を十分満足するものと判断した。

加熱温度450℃の加熱実験では、供試体は脱落しなかった。また、実施工においては脱落防止のための用心鉄筋がOHVD SLABに配置されていることから、設計条件ZONE-1についても十分満足するものと判断した。

§6. あとがき

本プロジェクトにおけるOHVD SLABの採用は、工事の大幅な工期短縮に大きく貢献した。

また、OHVD SLABは、当社独自の過去に施工例のないトンネル内構造物であったが、理論面での安全性の検討が妥当であることが、トンネル内火災を想定した実物大供試体の繰返し加熱実験により、確認できた。さらに、無収縮モルタルを用いた3点ヒンジのアーチ形状コンクリート構造物の火災時の概略挙動が把握できた。なお、各温度段階におけるコンクリート物性の温度依存性を考慮した応力解析は、現在のところ、難しいと考える。この報文が、今後の研究の参考となれば幸いである。

なお文末ではあるが、今回の実験の実施にあたり全面的援助を引受けて下さったテーツケントンネル工事事務所の皆様を始め、香港支店、技術研究所の皆様、および本工法の発案者である香港支店技術開発部市川部長の助言と協力に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) BS8110: Structural use of concrete, Part 1, 1985.

- 2) DIN No.1075 : Concrete bridges, 1981.
- 3) CIVIL ENGINEERING MANUAL-HONG KONG.
- 4) BS8110 : Structural use of concrete, Part 2, 1985.
- 5) 金津努, 青柳征夫他 : 100°C を超える高温下におけるコンクリート・鉄筋コンクリートの力学的性質, 電力土木, No.202, pp.71~81, 昭和61年5月.
- 6) 金津努, 石田博彰他 : 鉄筋コンクリートはり部材の温度応力挙動, コンクリート工学年次論文報告集10-3, pp.709~714, 1988.
- 7) 福留和人 : 100°C ~ 500°C におけるコンクリートの性状, 間組研究年報, pp.109~118, 1985.
- 8) 黒田一郎, 太田俊昭他 : 高温加熱によるコンクリートはり部材の熱伝導と温度応力性状, 土木学会第45回年次学術講演会, 第 V 部, pp.398~399, 平成2年9月.
- 9) 西田徳行, 土橋吉輝, 鳥居雅之, 江藤俊行 : 高温下における3点ヒンジアーチ形状の鉄筋コンクリートスラブの挙動について, 土木学会第46回年次学術講演会, 第 V 部, 平成3年9月, 投稿中.