

耐火板一体型 RC セグメントの有用性に関する実験的研究

Experimental research on the usefulness of a fire refractory material one apparatus segment

和佐勇次郎※ 秋田谷聡※※ 久保田五十一※※※ 藤野豊※※※※

Yujiro Wasa, Satoshi Akitaya, Isoichi Kubota and Yutaka Fujino

The fire-resistant method of the segment used for shield construction has a method of counting on secondary lining concrete or attaching the fire refractory material after tunnel construction.

The segment which really casts a fire refractory material at the time of segment manufacture is suitable for time-necessary-for-completion shortening etc. compared with the conventional system.

A main subject is the report which conducted various experiments and checked the performance about the segment which really cast the fire refractory material.

「key word」: secondary lining free, fire refractory material

1. まえがき

シールド工事に使用されるセグメントの耐火方法は、従来二次覆工コンクリートに期待するかもしれないトンネル構築後耐火材を後付けする方法が用いられてきた。耐火材をセグメント製作時に一体成型する CPL セグメント (Ceramic Protector-Lined Segment) は、二次覆工省略型トンネルに適するばかりでなく、耐火板後付け工法や耐火材吹付け工法に比較して、工期等の短縮が可能となり、有用な工法と考えられる。

本編は、耐火板を RC セグメントと一体成型した CPL セグメントに関して、モデル供試体および実物供試体を用いて、種々の実験を実施し CPL セグメントの諸性能を確認した報告である。

「キーワード」 二次覆工省略、耐火材

※ 正会員 工博 株式会社 安部工業所

※※ 正会員 日本高圧コンクリート株式会社 技術開発室

※※※ フジミ工研株式会社 セグメント技術部

※※※※正会員 ジオスター株式会社 セグメント技術部

2. CPL セグメントの製作

CPL セグメントの製作フローを図-1 に示す。一般の RC セグメントとの違いは、型枠への鉄筋籠投入前に CP 板をセットすることにある。地下鉄複線断面の型枠を用いたコンクリートの打設試験では、通常の RC セグメントと同様にテーブルパイプレータを用いて締め固めを行ったが、CP 板の損傷、浮き、剥離等も無く良好な結果を確認した。

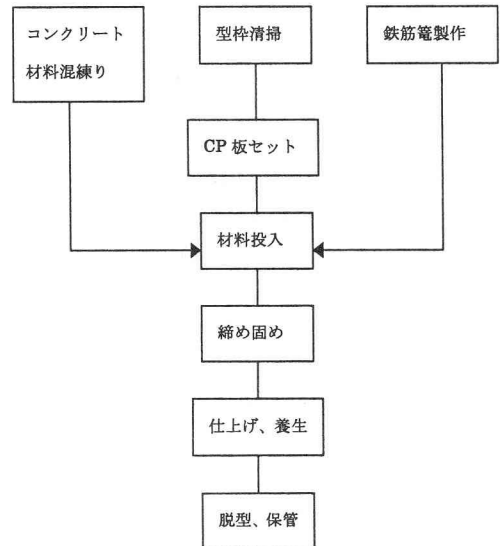
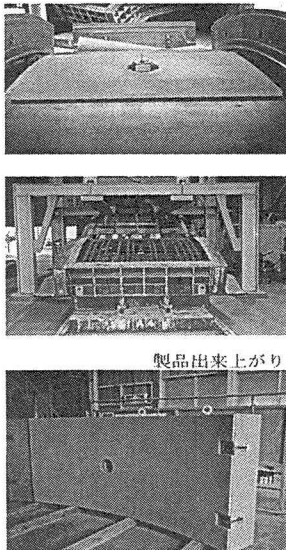


図-1 CPL セグメントの製作フロー

3. CPL セグメントの曲げ試験による付着性の確認

トンネルの覆工部材であるセグメントには、供用時において土水圧の作用により曲げと軸力が作用する。RC セグメントと一体成型された CP 板もこれらの影響を受けるため、曲げによる応力がセグメントに発生した場合でもセグメントと十分な付着力が必要となる。そこで、モデル供試体および実大供試体を用いた曲げ試験を実施し、付着力の確認を行った。

(a) 試験概要

モデル供試体による曲げ試験は、図-2 に示すように CP 板と一体成型した角柱供試体を作製し、正負の曲げ試験を実施した。計測は、供試体各点に取り付けたコンクリートひずみおよび CP 板とコンクリート境界面に配置した ϵ ゲージである。また、実大供試体を用いた曲げ試験は、図-3 のように地下鉄複線クラス ($\phi 10\text{m}$) の A 型ピースの試験体を製作し、両端可動、2 点集中载荷の条件で単体曲げ試験を実施した。

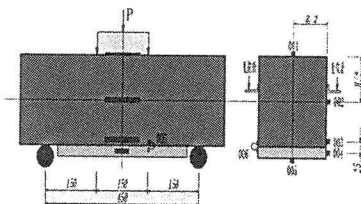


図-2 モデル供試体曲げ試験方法

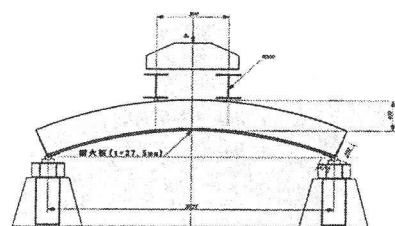


図-3 実大セグメント曲げ試験方法

(b) 試験結果

モデル供試体による曲げ試験結果を図-4～図-6に示す。図より CP 板とコンクリートのひずみは同程度の値であり、また、CP 板とコンクリートの剥離も認められなかった。

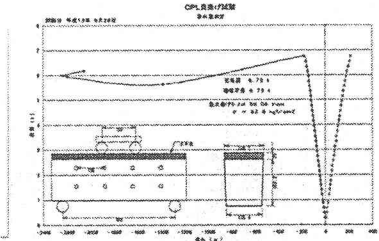
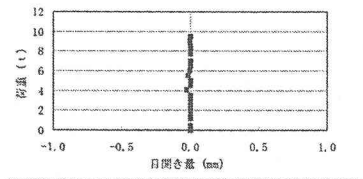
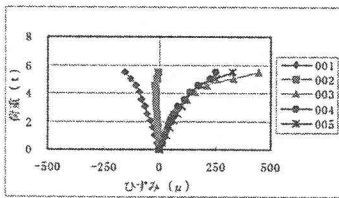


図-4 荷重～コンクリートひずみ(正曲げ)

図-5 荷重～目開き(正曲げ)

図-6 荷重～コンクリートひずみ(負曲げ)

次に実大供試体を用いた曲げ試験の結果を図-7～図-8に示す。試験は、1 回目載荷 ($P=360\text{kN}$ まで) と 2 回目載荷 (破壊まで) で行った。各荷重段階での観察結果を表-1に示す。

表-1 実大曲げ試験の経過および観察結果

載荷段階	観察結果
1 回目	265kN でコンクリート側面に初亀裂を確認した。 340kN で CP 板内面にひびわれを確認した。 360kN まで載荷した後除荷。CP 板とコンクリートの剥離は無し。
2 回目	ひびわれが外面側に延伸し、ひびわれ幅が増大。CP 板のひびわれはコンクリートと一体となって進展した。 P=1000kN にて破壊した。 除荷後、CP 板とコンクリートの剥離は見られなかった。

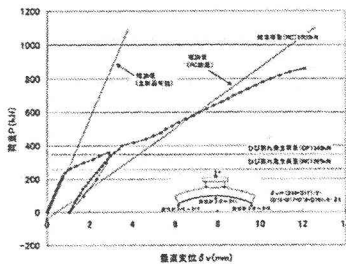


図-7 荷重～鉛直変位

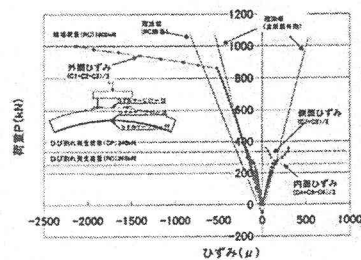
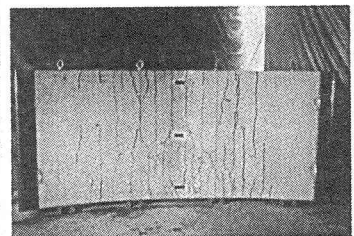


図-8 荷重～コンクリートひずみ



4. CPL セグメントの継続的使用に関する検討

一度火災を受けた耐火材は、火災規模にもよるが耐火材の膨張・収縮に伴うひびわれ発生や取付け金具の損傷等により補修や取替え作業が必要と考えられる。一方、耐火材と一体成型された CPL セグメントについても取替え等が必要であるかを確認するために、同一供試体を用いて RABT 曲線による耐火試験を 2 回実施し、コンクリートの表面性状、CP 板とコンクリートの付着性状を確認した。

(a) 試験供試体

試験供試体は、実物大 ($\phi 10\text{m}$) のセグメントから図-9のように $1400 \times 900\text{mm}$ の範囲に試験体を切り出し

て用いている。なお、試験体の仕様は以下の通りである。

- ・セグメント形状：外径 10m、厚さ 0.4m、幅 1.5m、8 分割
- ・設計基準強度：48N/mm²
- ・材齢：試験日材齢 1 年 10 ヶ月～11 ヶ月（平成 13 年 4 月打設）

（b）試験手順

試験は、試験体の CP 板にスリットを設け、熱電対をセグメント表面に埋め込み、「マルチ加熱炉」に試験体をセットして 1 回目 RABT-60 分の加熱を行った。そして CP 板の一部を剥がしてコンクリート表面性状等の確認を行った後、その部分の補修を実施して熱の遮断を行い、再度 1 回目と同様に RABT-60 分の加熱を行った。

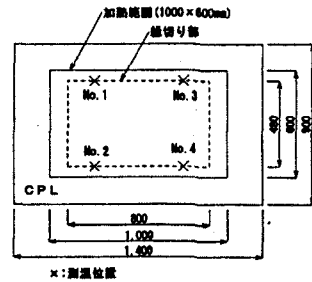


図-9 供試体形状

（c）確認項目

加熱後の確認は、1 回目、2 回目とも以下の通りとした。

- ① コンクリート表面温度の計測
- ② 加熱後 CP 板の一部をエアピックではつき撤去し、コンクリート表面の状況変化を目視にて確認
- ③ 図-10 に示す要領にて CP 板とコンクリートの付着強度の確認

- ・ φ45mm のコアカッターでコンクリートに達するまで切れ目を入れる。
- ・ 縁切りされた CP 板にエポキシ樹脂を塗布し、引張治具と固定する。
- ・ ユニバーサルジョイントを介して CP 板を直接引張る。
- ・ 荷重の検知はセンターホール型ロードセルを使用。

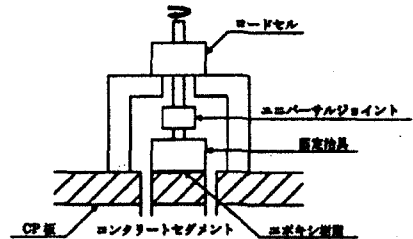


図-10 付着強度試験方法

（d）試験結果

図-11～図-12 に 1 回目と 2 回目の炉内温度とコンクリート表面温度およびその測定位置を示す。1 回目の最高温度は、試験開始 85～90 分後において 228℃を記録した。2 回目は同じく試験開始 85～90 分後において 262℃に達しており、1 回目と比較すると 34℃の上昇となった。しかしながらコンクリートの爆裂が発生する温度以下に抑制されている。

試験後の観察は以下の通りであった。

- ① CP 板の表面に微細なひびわれが発生していた。これは、冷却時の収縮によるものと考えられる。
- ② CP 板の一部をエアピックで剥がしたが、1 回目、2 回目とも CP 板の一部がコンクリートに付着した状態であり、付着は良好であることを確認した。
- ③ この付着している CP 板をケレン除去してコンクリート表面性状を見たが、2 回の試験ともコンクリートの爆裂、ひびわれ等の発生は無く健全であった。

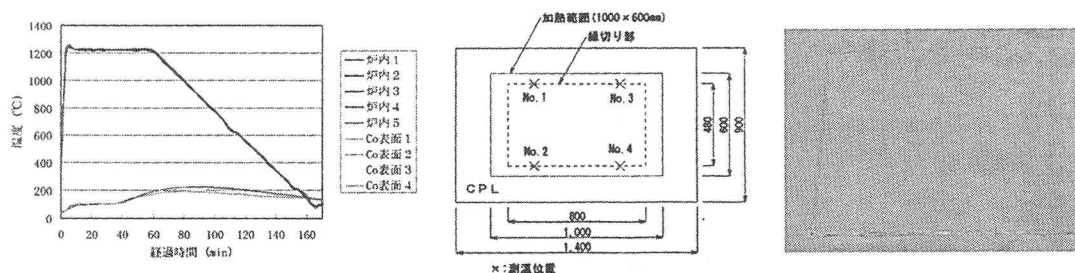


図-11 1回目測定位置と温度測定結果

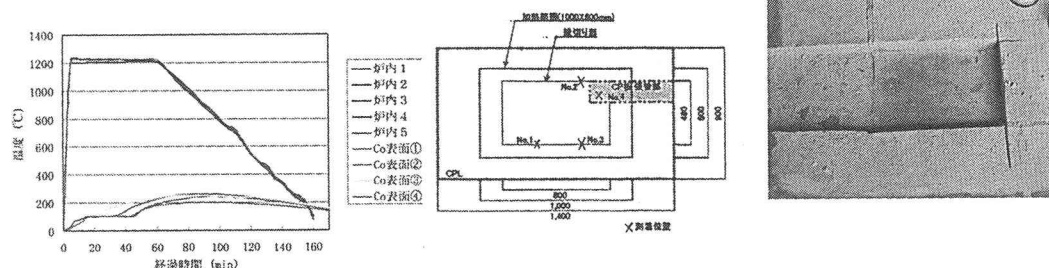


図-12 2回目測定位置と温度測定結果

次に付着強度試験結果を表-2に示す。表には今回使用した試験体の別の部位を用いて耐火試験前の付着強度についても記載している。試験値は若干ばらつきがあるものの、平均値として1回目283kN/m²、2回目211kN/m²であった。これは試験前の値と比較すると各々44%、33%となる。加熱後の付着強度が低下した理由としては、CP板はアルミナセメントを主成分に構成されており、セメントの特性としてCP板中の水分が加熱により逸散したことや高温による膨張と冷却による収縮が作用したことが考えられる。しかしながら、付着試験後の破断箇所はいずれのケースにおいてもCP板の本体部(母材)であり、試験結果は、付着強度ではなく母材強度で決まっており、コンクリートとの付着性は十分であると判断される。

表-2 付着強度試験結果

試験日	No	断面積 (m ²)	荷重 (N)	付着強度 (kN/m ²)	破断箇所
0回目 (H15.2.20) 実施	1	0.002833	1680	590	母材
	2	0.002959	1610	540	〃
	3	0.002783	2040	730	〃
	4	0.002948	2010	680	〃
	平均			640	
1回目 (H15.2.24) 実施	1	0.001557	530	340	母材
	2	0.001576	550	349	〃
	3	0.001551	470	303	〃
	4	0.001558	350	225	〃
	5	0.001578	310	196	〃
	平均			283	
2回目 (H15.3.24) 実施	1	0.001538	280	182	母材
	2	0.001539	410	266	〃
	3	0.001521	280	184	〃
	平均			211	

5. CPL セグメントの継手に関する検討

CPL セグメントは、セグメントの製作段階ではその製作性のため、分割して複数個を型枠に設置して完成される。また、現場では通常のセグメントと同様に各セグメントピースを組立てて完了となるため、セグメント継手面には隙間が発生する場合がある。

ここでは、上記のような製作時および施工時に発生する隙間が火災時にどのような影響を与えるかを確認するために各種の試験を行った。

5. 1 セグメント本体部継ぎ目の大きさおよび CP 板背面の密着に関する試験

(a) 試験目的

本試験は、製作時に CP 板と CP 板の間に隙間が発生した場合を想定し、その影響を把握するために行った。また、従来方法である耐火材後付け工法は、耐火材とコンクリート面に隙間が生じるが、その場合の熱影響を確認するために比較として CP 板の突合せ面の隙間と背面に隙間を設けて耐熱試験を実施した。

(b) 試験方法

試験方法は、1000×1000×200mm のコンクリート供試体に突合せ面の隙間を 1、2、4、8mm とし、また、CP 板とコンクリート面の隙間を 0、3、8mm に設定して CP 板をボルトで固定し、RABT-60 分の耐熱試験を実施して各隙間の温度を計測した。

温度計測箇所：N-0：一般部（隙間無し）

J-1：目地部（目地幅 1mm）

J-2：目地部（目地幅 2mm）

J-4：目地部（目地幅 4mm）

J-8：目地部（目地幅 8mm）

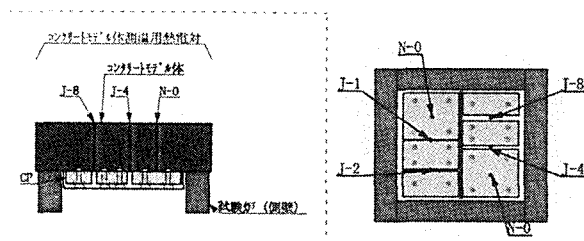


図-13 目地部試験方法

(c) 試験結果

試験結果を図-14 に示す。これらの結果をまとめると以下ようになる。

① コンクリートの表面温度は、目地や背面の空間が大きくなると高くなる傾向を示し、背面の隙間が大きく、かつ目地幅大きい場合には特に温度が高い。

② コンクリートの表面温度が 350℃以下に保たれる最大目地幅は、下記の通りである。

- ・背面隙間が 0mm の場合 → 約 5.9mm
- ・背面隙間が 3mm の場合 → 約 3.2mm
- ・背面隙間が 8mm の場合 → 約 3.1mm

以上から、コンクリートと耐火材が一体成型された CPL セグメントは、背面の隙間が無いいため、目地幅は 6mm 程度まで許容できる結果となった。

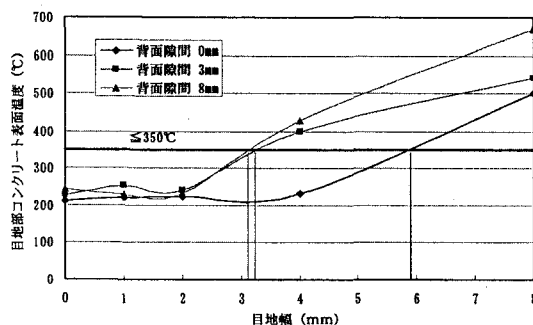


図-14 目地部試験測定結果

5. 2セグメント継手面の検討

(a) 試験目的

前項の本体部の検討に引き続き、セグメント継手面の検討を行った。シールドトンネルは複数のセグメントを組立ててトンネルが構築されるため、セグメントとセグメントの継手面には隙間が発生する場合がある。また、通常セグメントの内面にはコーキング溝が設けられるため、これらの隙間による影響を確認するために継手面を模擬した試験体を製作し、加熱試験を実施した。

(b) 試験方法

試験は、 $300 \times 250 \times 600\text{mm}$ のCPLセグメント供試体3体を製作し、目地幅を $6, 9\text{mm}$ に調整して接合する。この試験体を「マルチ加熱炉」を用いてRABT-60分の加熱試験を行った。なお、試験体目地部の半分には充填材（セラミックファイバー）を挿入して、その効果についても確認した。

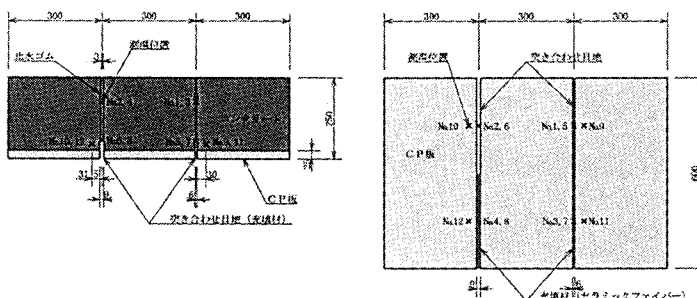


図-15 継手面試験体形状

(c) 試験結果

各測定位置の温度計測結果を図-16に記載する。また、各測定位置の最高温度と到達時間を表-3に示す。

図-16および表-3をまとめると以下ようになった。

- ・ 目地幅が 6mm の場合、継手部の温度は 205°C 、シール部は 60°C であり、コンクリートの爆裂や止水ゴムの劣化に対しては安全な温度と考えられる。
- ・ 目地幅が 9mm の場合、継手部の温度は 430°C 、シール部は 88°C となり、コンクリートの変質や止水ゴムの材質によっては多少懸念される温度となった。
- ・ しかし、目地幅が 9mm でも充填材を施すことにより、継手部の温度は 119°C 、シール部は 66°C に抑えることが可能である。

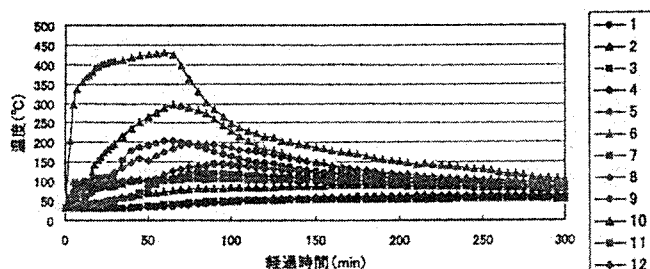


図-16 継手面試験測温結果

表-3 目地各部の温度測定結果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
測温位置	シール部				継手				コンクリート 30mm内部			
目地幅(mm)	6	9	6	9	6	9	6	9	6	9	6	9
充填材	無		有		無		有		無		有	
最高温度(℃)	61	88	55	66	205	430	119	197	146	297	106	143
到達時間(min)	270	185	260	265	60	60	85	75	90	65	90	90

6. おわりに

耐火材一体型 RC セグメントの耐火性能に関して、曲げによる付着強度、継続的使用の有無および目地部に着目した実験結果について報告した。これらをまとめると以下ようになる。

- ① 耐火材一体型 RC セグメントは、1200℃という高温の火災に対してコンクリートの爆裂やひびわれ等の有害な現象を抑えることができる。
- ② モデル供試体および実大規模の供試体による曲げ試験を行った結果、CP 板とコンクリートは同一の挙動を示し、CP 板の剥離等の現象は発生しなかった。曲げによりコンクリートにひびわれが発生した場合には、CP 板にもひびわれが発生することになるが、その幅はコンクリートと同程度であり、許容レベルにおいて 0.2mm 程度である。後に実験した目地本体部の加熱試験では、一体化された耐火材の目地幅は 6mm 以下であればコンクリート表面温度を 350℃以下にすることができるため、曲げによるひびわれについて耐火性能を損なうことは無いと考えられる。
- ③ 一度火災を受け、そのまま使用した場合でも耐火材の母材強度は若干低下するものの、コンクリート表面温度の抑制効果は十分にあり、また、付着力も通常考えられるトンネル内の空気圧の変化に対しても十分な強度を有していることから再度の使用は可能と考えられる。
- ④ 目地部については、目地の大きさおよび耐火材背面の隙間の大きさによりコンクリート表面温度が異なる。耐火材と一体成型された CPL セグメントは、目地幅 6mm 以下であれば目地部のコンクリート表面温度を 350℃以下に抑えることができる。
- ⑤ 目地幅が 6mm 以上の場合には、充填材等により対応可能である。

7. 参考文献

- 1) コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書 日本コンクリート工学協会