

# 扁平型断面シールド工法の開発（その 3）

## －扁平型セグメントの内部補強材定着アンカー引抜き実験－

### Development of Compressed Section Shield Tunneling Method (Part 3)

#### - Pullout Test of Anchors for Fixing Inner Reinforcing Members -

奥野三郎\* 浅野 剛\*\* 田中雅彦\*\*\*

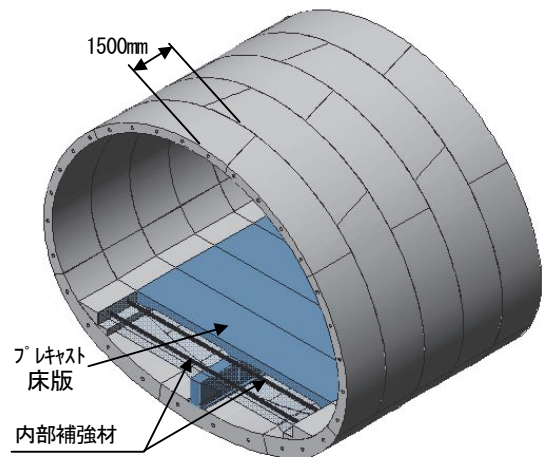
#### 要 旨

扁平型断面シールド工法は、シールド工法と同等の施工速度および都市部山岳工法と同等の経済性を併せ持つトンネル工法である。この工法に採用した扁平型セグメントでは、本体や継手の応力軽減方法として矩形や楕円形断面等のセグメントにおいて使用実績がある内部補強材を適用している。内部補強材による応力軽減効果については事前の数値解析により確認しているが、その次のステップとして内部補強材をセグメントに定着するアンカーの詳細構造を決定する目的で実大での引抜き実験を行った。実験の結果、アンカーの耐荷重性能や抜け出し状況が明らかになり、アンカー定着部の設計が可能となった。

キーワード：シールド工法、道路トンネル、扁平断面、内部補強材、アンカー引抜き試験

#### 1. まえがき

扁平型断面シールド工法に適用するために開発した扁平型セグメント（図－1）は、本体や継手の応力軽減方法として矩形や楕円形断面等のセグメントで使用されている内部補強材を適用しており、扁平型セグメントにおいても内部補強材が応力の低減効果を示すことを事前の数値解析により確認している<sup>1),2)</sup>。この内部補強材や内部補強材をセグメントに定着するアンカーの詳細構造を決定する目的で実大での引抜き実験を行った。本報では実験により明らかになったアンカーの抜け出し状況や耐荷重性能について報告する。

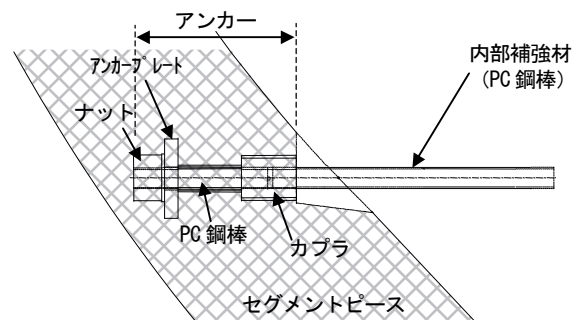


図－1 扁平型セグメント概要

#### 2. 内部補強材とアンカーの概要

内部補強材はネジ切りを行った呼び径φ40mmのPC鋼棒（鋼種C種1号：耐力 $\sigma_{sy}=1080\text{N/mm}^2$ ）を用い、図－1に示すように1リング（1500mm幅）あたり2本設置するように計画している。また、内部補強材はプレキャスト床版の内部を貫通しており、床版とは縁切りされた構造となっている。定着アンカーは内部補強材と同じ仕様のPC鋼棒の端部にアンカープレートをワッシャーとナットで取付けた支圧タイプとし、カブラで内部補強材に接続する（図－2参照）。

なお、アンカーはセグメントピース（以後、供試体）製造時に事前に埋め込んでおき、アンカーの周囲には補



図－2 アンカー部の概要

\*技術本部関西土木技術部 \*\*技術研究所 \*\*\*技術本部土木部

強用の鉄筋を配置した（図-3、4参照）。

### 3. 予備実験

本実験に先立ち、カブラ抜け出し、鉄筋ひずみの推移、破壊形態を明らかにするために、定着アンカーを1本のみ設置した供試体を用い、写真-1に示す実験装置により実大引抜き実験を行った。

#### 3.1 供試体

図-3にアンカー詳細を、図-4に供試体を示す。アンカーの定着長は468mm、供試体の大きさは幅1500mm、長さ2000mm、厚さ500mmとした。また、コンクリートの設計基準強度は48N/mm<sup>2</sup>である。

#### 3.2 実験概要

荷重は容量2000kNのセンターホールジャッキにより、25kNピッチでPC鋼棒の許容引張力である1200kNまで載荷した。計測項目は表-1に示すとおりである。供試体の変位およびひずみの計測点の位置は図-4に併記した。

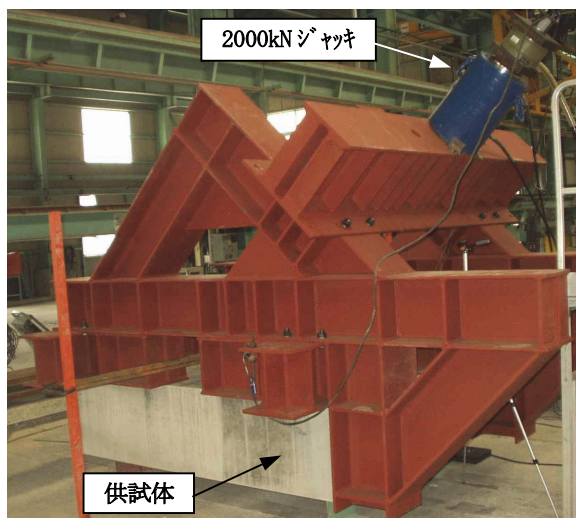


写真-1 実験装置

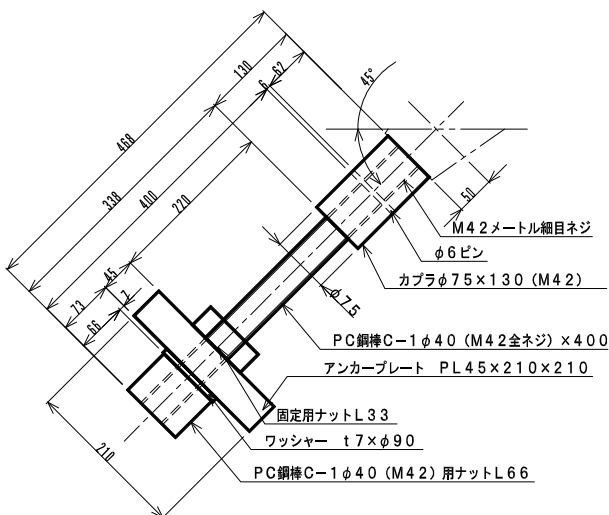


図-3 アンカー詳細

### 3.3 実験結果

図-5～9に実験結果を示す。ひずみ計測結果は図-4に示した各部材（鋼材および鉄筋）の計測点の表裏に貼り付けた2箇所（ひずみ計測値の平均）を示している。なお、設計荷重  $P_d$  はコンクリートのコーン状破壊で決まる頭付きアンカーの許容引張力として設定した<sup>3),4)</sup>。

#### a. アンカーの抜け出し

図-5に示すように、カブラの抜け出し量は設計荷

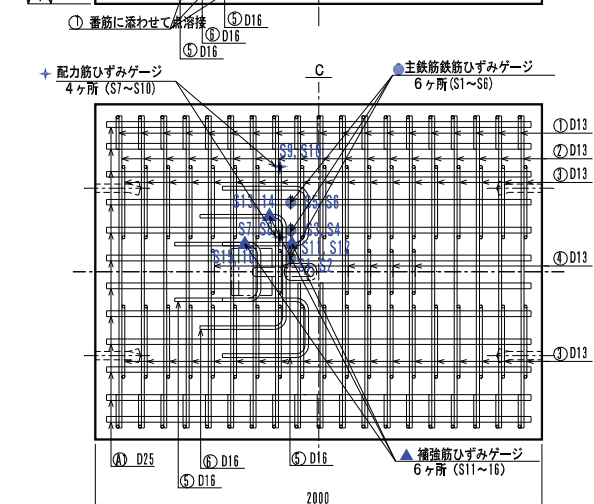
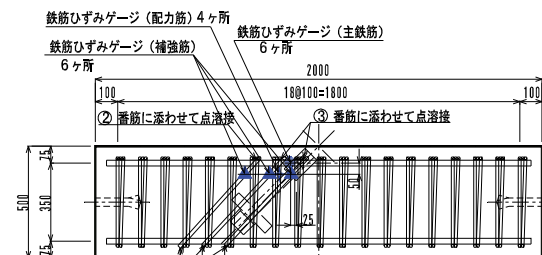
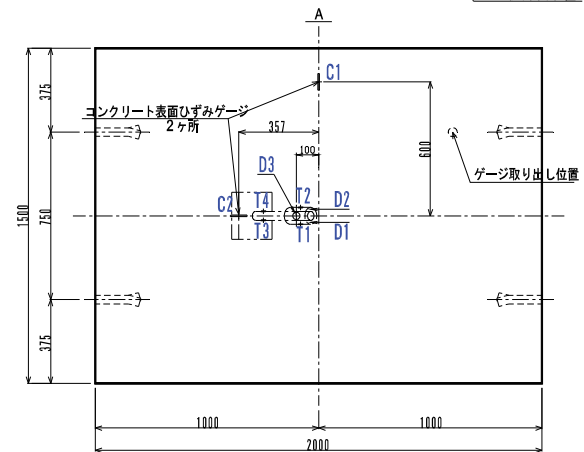
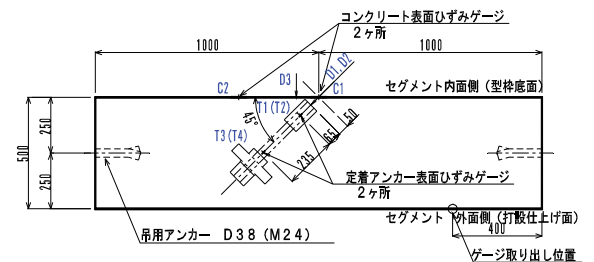


図-4 供試体概要

重 560kN (以後、 $P_{a1}$ ) で 0.5mm、最大荷重 1200kN (以後、 $P_{max1}$ ) で 2.0mm であり、荷重増加にともなうカブラ抜け出しの変化量 (以後、変位勾配) はひび割れ発生後に計算値よりも大きくなっている。コンクリート浮上がりは、 $P_{a1}$  で 0.05mm、 $P_{max1}$  で 0.3mm でありカブラ抜け出し量の 10%程度にとどまっている。

b. アンカーのひずみ

図-6 に示すように、カブラのひずみは荷重増加に比例してほぼ計算値に近い値で増加している。一方、PC

表-1 計測項目

計測項目	計測点 (図-4 参照)	計測器	
軸力	ジャッキ位置	ロードセル	
PC鋼棒ひずみ	PC鋼棒中央部	ひずみゲージ	
コンクリートひずみ	C1, C2 供試体上面	ひずみゲージ	
コンクリート浮上がり	D3 供試体上面	変位計	
アンカー	カブラ抜け出し	D1, D2	変位計
	カブラひずみ	T1, T2	ひずみゲージ
	ネジ部ひずみ	T3, T4	ひずみゲージ
主筋	ひずみ1	S1, S2	ひずみゲージ
	ひずみ2	S3, S4	ひずみゲージ
	ひずみ3	S5, S6	ひずみゲージ
配力筋	ひずみ1	S7, S8	ひずみゲージ
	ひずみ2	S9, S10	ひずみゲージ
補強筋	ひずみ1	S11, S12	ひずみゲージ
	ひずみ2	S13, S14	ひずみゲージ
	ひずみ3	S15, S16	ひずみゲージ
ひび割れ	供試体上面	クラックゲージ	

鋼棒のネジ部のひずみについては、ひび割れ発生後、荷重増加にともなうひずみ増加量 (以後、ひずみ勾配) が大きくなっている。 $P_{a1}$  以降のひずみ勾配は計算値の勾配よりも少し大きく、荷重の増加にともない双方のひずみの差はわずかではあるが小さくなっているが、同じ荷重レベルに対するひずみ量は  $P_{max1}$  に至るまで計算値以下となっている。

c. 鉄筋のひずみ

図-7、8 に示すように、主筋、配力筋に発生するひずみは  $P_{max1}$  時点でも最大で  $100 \times 10^{-6}$  と小さい値となっている。また、図-9 に示すようにアンカーの補強筋に関してはひび割れ発生後にひずみ勾配が大きくなっているが、ひずみ量は  $P_{max1}$  時点でも最大で  $160 \times 10^{-6}$  と小さい値にとどまっている。

d. ひび割れ発生状況

写真-2、3 に示すように、コンクリート表面の初期ひび割れは荷重 425kN で発生し、その後、ひび割れは荷重の増加とともに放射状に進展しており、カブラを中心とする同心円状のひび割れは見られなかった。

3.4 考察

予備実験結果より得られた知見を下記に示す。

a. アンカーの抜け出し

ひび割れ発生後、カブラの変位勾配が計算値よりも大

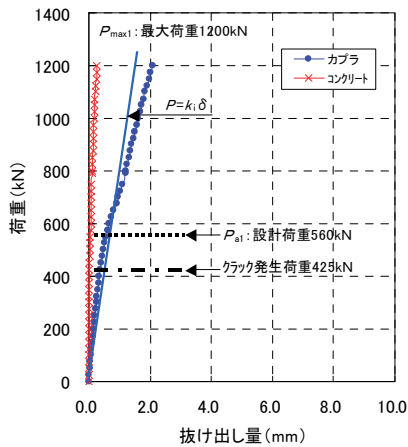


図-5 荷重とアンカー抜け出し量の関係

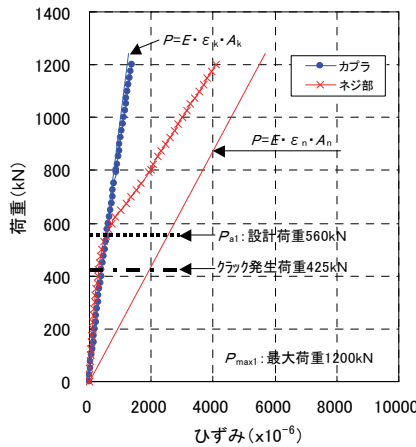


図-6 荷重とアンカーひずみの関係

設計荷重の算定式

$$P_a = 0.4 \cdot F_c^{1/2} \cdot A_c \cdot 0.313$$

ここに、  
 $F_c$  : コンクリートの設計基準強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $A_c$  : コーン状破壊面の有効水平投影面積 (mm<sup>2</sup>)

計算値

$$P = k_i \delta$$

$$P = E \cdot \epsilon_k \cdot A_k$$

$$P = E \cdot \epsilon_n \cdot A_n$$

ここに、  
 $\delta$  : アンカー抜け出し量 (mm)  
 $P$  : PC 鋼棒引張荷重 (N)  
 $k_i$  : アンカーばね定数 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $E$  : カブラ、ネジ部の弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $A_k$  : カブラの断面積 (mm<sup>2</sup>)  
 $A_n$  : ネジ部の断面積 (mm<sup>2</sup>)  
 $\epsilon_k$  : カブラの軸ひずみ  
 $\epsilon_n$  : ネジ部の軸ひずみ

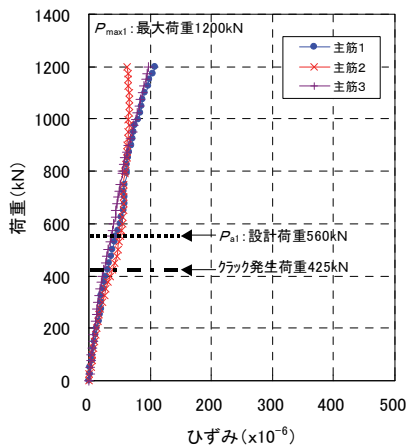


図-7 荷重と主筋ひずみの関係

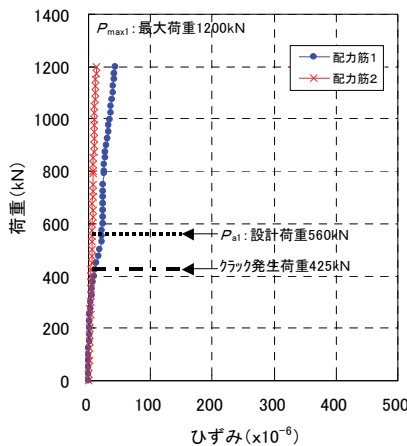


図-8 荷重と配力筋ひずみの関係

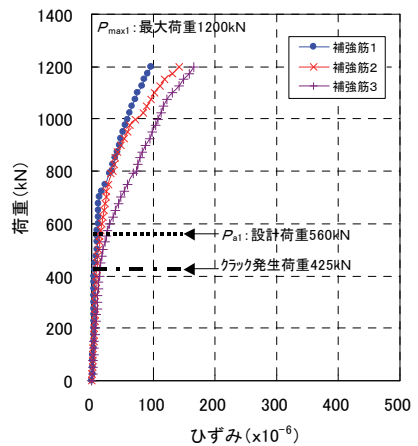


図-9 荷重と補強筋ひずみの関係

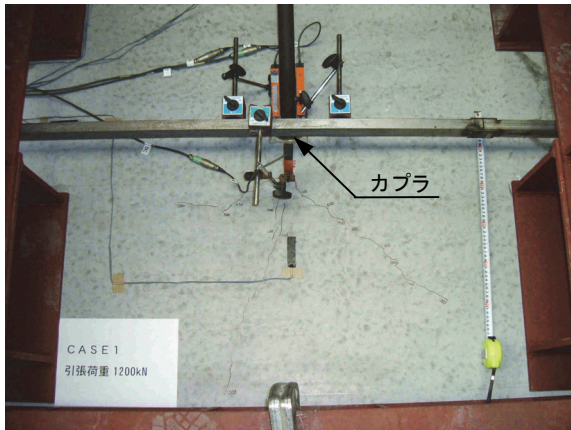


写真-2 供試体上面のひび割れ発生状況



写真-3 アンカー近傍のひび割れ発生状況

きくなっている。ひずみレベルよりアンカーは  $P_{max1}$  時点においても弾性状態にあると判断されることからアンカープレートの浮上がり量が抜出し量に加わっているものと考えられるが、その量は最大0.5mm程度となっている。

b. アンカーのひずみ

PC 鋼棒のネジ部のひずみ勾配は、コンクリートの付着が切れたと思われる荷重 550kN あたりから急激に大きくなる。これは、コンクリートの付着が切れてはじめて PC 鋼棒のネジ部にダイレクトに引張力が作用したためと考えられる。ただし、ひずみレベルが計算値より小さくなっていることから、付着は切れているもののネジ山の存在などに起因して PC 鋼棒と供試体の間にはせん断力が発生していること、さらに  $P_{max1}$  に至るまでネジ部のひずみが徐々に計算値に近づいていることから、この間にせん断力は減少している様子がうかがえる。一方、載荷初期にコンクリートとの付着切れが発生していると考えられるカブラのひずみ勾配は一定となっている。

c. 鉄筋のひずみ

引抜き荷重 1200kN でも鉄筋のひずみ量が微小であることから、供試体にはコーン状破壊や支圧破壊は起らず、コンクリート本体は充分安全であることが確認できた。

d. 供試体表面のひび割れ

供試体表面のひび割れの発生は、カブラのかぶりが少

ないため早期に発生したと考えられる。このひび割れがコーン状破壊や支圧破壊を原因としたコンクリート内部から進展したものではないことは、鉄筋ひずみが微小でコンクリート破壊に至っていないことから容易に推定される。

3.5 まとめ

以上の考察から、予備試験におけるアンカー仕様や配筋では、コンクリートのコーン状破壊が発生せず安全側の設計となっていると判断し、本実験においては、供試体の配筋はそのまま、表-2に示すようにアンカーの部材寸法を小さくするよう変更した。

ただし、早期に発生するひび割れ対策として、カブラのかぶりを大きくし、カブラの外周に緩衝材を、また、PC 鋼棒の外周に鋼管シースを設置してコンクリートとの付着を切った構造とした (図-10 参照)。

4. 本実験

予備実験の結果を踏まえ、写真-4に示すように実際のセグメントと同じ2本のアンカーを埋設した供試体を用いて引抜き実験を行った。

4.1 実験概要

アンカーを図-10に、供試体を図-11に示す。荷重は2箇所アンカーに2基の2000kNジャッキで導入した。なお、実験方法や計測項目は予備実験と同様である。

4.2 実験結果と考察

図-12、13 および、写真-5、6に本実験結果を示す。設計荷重および計算値は予備実験と同様の算定式を

表-2 アンカー部材寸法変更一覧

変更項目	予備実験	本実験
定着長	468mm	422mm
カブラのかぶり	50mm	100mm
アンカープレートの寸法	PL45×210×210	PL32×150×150
ナットの高さ	66mm	33mm
緩衝材、鋼管シース	なし	あり
コンクリートとの付着	あり	なし

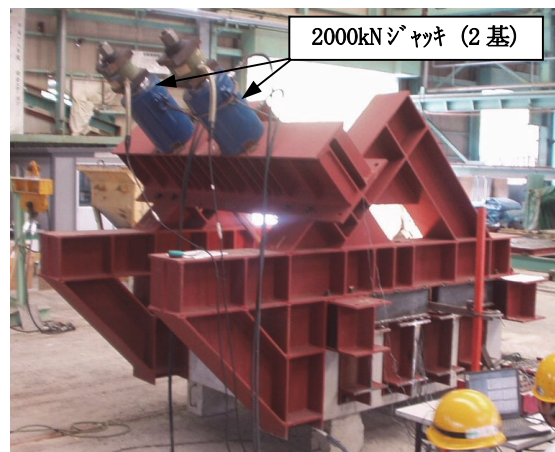


写真-4 実験装置 (本実験)

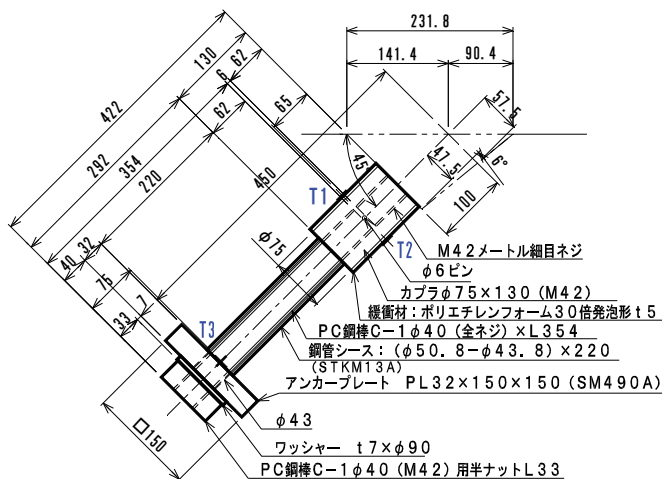


図-10 アンカー詳細(本実験)

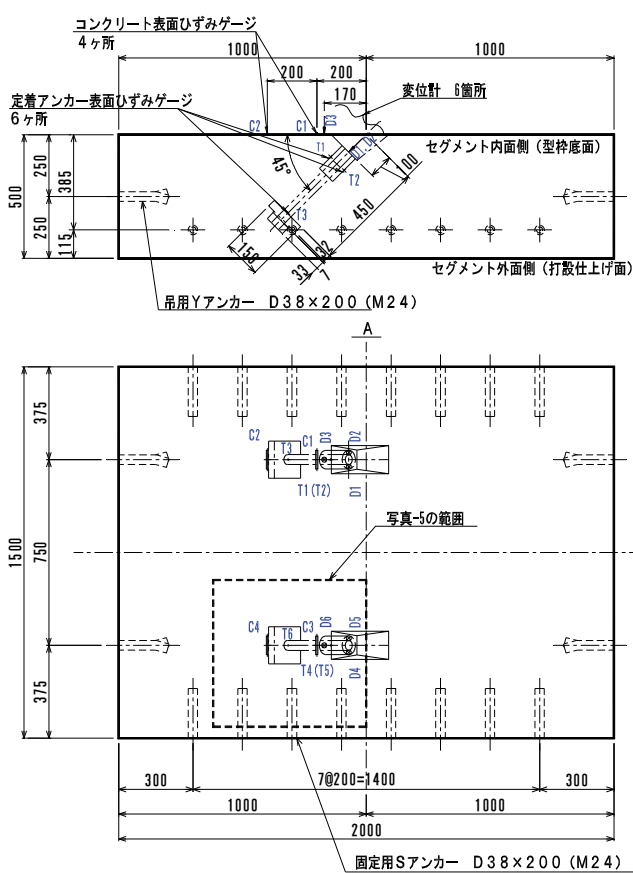


図-11 供試体(本実験)

表-3 計測項目(本実験)

計測項目	計測点
カプラ1 抜け出し	D1, D2
カプラ2 抜け出し	D4, D5
コンクリート浮上がり 1	D3
コンクリート浮上がり 2	D6
カプラ 1 ひずみ	T1, T2
カプラ 2 ひずみ	T4, T5
ネジ部 1 ひずみ	T3
ネジ部 2 ひずみ	T6

(注1)カプラ計測値は2点の平均値を図化に使用  
(注2)計測点位置は図-11に併記

用いて行った。ただし、本実験の場合には、アンカーが 2箇所 に設置されており、各々のコーン破壊断面の投影面積が重なるため、1本あたりの有効な投影面積は予備実験の場合よりも小さくなり、設計荷重は 480kN/本 (以後、 $P_{a2}$ ) となる。また、本実験では PC 鋼棒 2本での 載荷となるため、供試体に作用する総荷重は予備実験より大きくなる。当初は最大荷重については予備実験と同レベルを予定していたが、供試体の反力位置近傍にひび割れが発生したため、1100kN/本 (以後、 $P_{max2}$ ) で 載荷を終了した。なお、鉄筋ひずみ計測結果については、予備実験と同様に  $P_{a2}$  時点でひずみレベルが最大  $100 \times 10^{-6}$  程度にとどまっていることから本報では割愛する。鉄筋ひずみを除いた計測点を表-3に示す。

a. アンカーの抜け出し

図-12に示すように、カプラの抜け出し量は  $P_{a2}$  において 0.8mm、 $P_{max2}$  において 2.6mm となった。アンカーの各部材寸法を小さくし、カプラおよび PC 鋼棒とコンクリートとの縁を切った構造としているが、抜け出し量が予備実験の場合よりも極端に大きくなるような状況は見られなかった。また予備実験と同様に、供試体上面にひび割れが発生するまでは、カプラの変位勾配は計算値とほぼ一致している。

b. アンカーのひずみ

図-13に示すように、ひずみ勾配はカプラ、PC 鋼棒のネジ部ともに計算値に近い値で推移している。本実験では、カプラおよび PC 鋼棒がコンクリートと縁を切った構造としているため、コンクリートの付着の影響がなく、両者に引張力が一軸状態で作用したためである。

c. 供試体表面のひび割れ

カプラのかぶりを大きくしたため、ひび割れ発生荷重は供試体上面で 600kN/本、アンカー近傍で 900kN/本となり、予備実験時のような早期のひび割れ発生を大幅に抑制する結果となった。

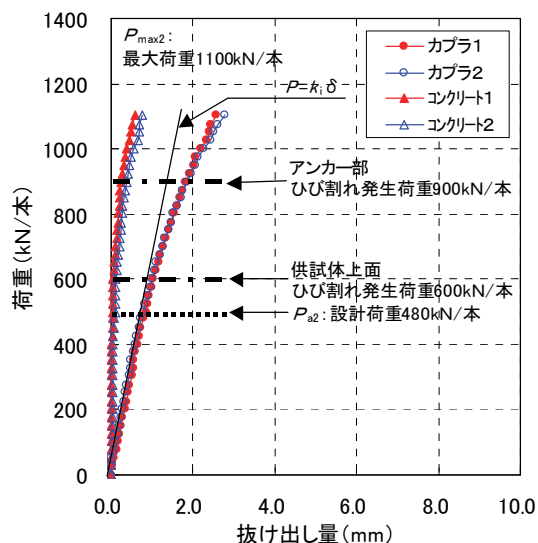


図-12 荷重とアンカー抜け出し量の関係(本実験)

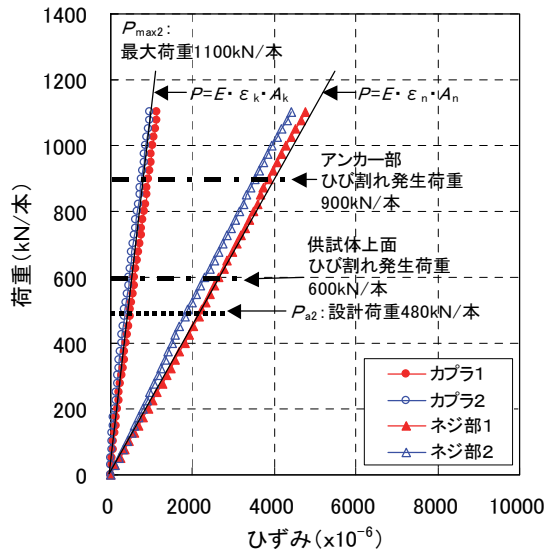


図-13 荷重とアンカーひずみの関係 (本実験)

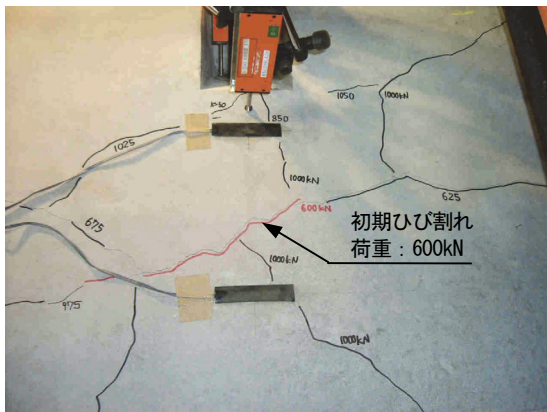


写真-5 供試体上面のひび割れ発生状況 (本実験)

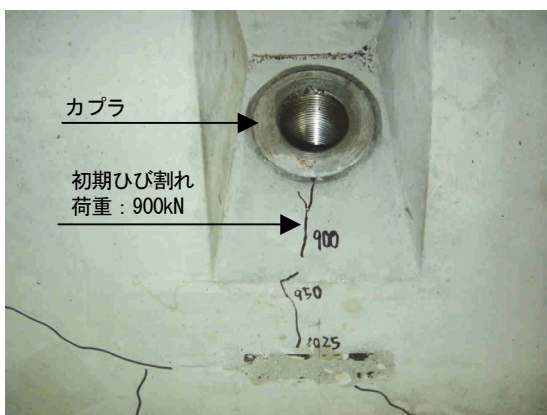


写真-6 アンカー近傍のひび割れ発生状況 (本実験)

## 5. あとがき

実大でのアンカー引抜き実験の結果より、以下の知見が得られた。

### i. アンカー引抜き抵抗

カブラや PC 鋼棒とコンクリートの付着を切っても、アンカープレートによる支圧作用によって内部補強材

の引張力に抵抗できる。

### ii. 鉄筋ひずみ

ネジ切りを行った PC 鋼棒の許容引張力である 1200kN/本に近い荷重が載荷された場合でも鉄筋ひずみ量は微小であり、供試体にはコーン状破壊や支圧破壊は起らず、コンクリート本体は健全である。

### iii. 早期ひび割れの抑制

アンカーのかぶりを 100mm とし、緩衝材や鋼管シースでコンクリートと縁を切る構造とすることで、早期のひび割れの発生を抑制できる。

### iv. 設計荷重

本実験で用いたアンカー仕様であれば、コーン状破壊を想定して設定した設計荷重以下では供試体表面にひび割れは発生せず、引抜き荷重とアンカー抜け出し量は直線関係を示し、設計荷重の設定が妥当であることがわかった。

今回の予備実験および本実験での実大アンカー引抜き実験により、アンカーの耐荷重性能や抜け出し状況を把握できたことで、扁平型セグメントが充分実工事に適用できることがわかった。

今後は、実工事を想定した内部補強材やアンカーの詳細仕様を決定し、継手構造を含めた扁平型セグメントの詳細構造の検討を行う予定である。

最後に、本開発については、首都大学東京 都市環境学部 西村和夫教授にご指導を賜わった。ここに深く感謝の意を表す。

### 【参考文献】

- 1) 田中雅彦、浅野 剛、荒川賢治、「扁平型断面シールド工法の開発 (その 1) -シールド工法と都市部山岳工法の境界領域を対象とした都市トンネル工法-」、奥村組技術研究年報、No. 32、pp. 13-18、2006
- 2) 橋口彰夫、橋本博英、田中雅彦「扁平型断面シールド工法の開発 (その 2 : 扁平型セグメントの開発)」、土木学会第 61 回年次学術講演会、VI-093、2006
- 3) 日本建築学会、「各種合成構造設計指針同解説、第 4 編、4 章各種アンカーボルト設計指針・同解説」
- 4) 岡田恒男、田中礼治、松崎育弘、坂本 功、川村壮一、「あと施工アンカー設計と施工」、技術書院、1990