

セグメント締結材の開発（その2）

石澤 秀文* 佐々木広輝*
豊田 泰晴*

要 旨

近年、地下河川、地下調節池などの需要が都市部を中心に高まりつつある。これらの施設は周辺環境への影響などからシールド工法により構築される場合が増加しており、この場合内水圧に対応可能な覆工構造が必要となる。一方、当社で開発したボルトレスタイプであるほぞ付きセグメントのセグメントピース間継手は、内水圧により発生する継手間の引張力に抵抗できる構造とはなっていない。そこで、経済性に優れたほぞ付きセグメントの利点を生かしつつ内水圧が作用するトンネルの需要に対応するため、ほぞ付きセグメントの新しい継手構造部材としてアラミド繊維を主材料とするセグメント締結材を考案した。

前年度に行った締結材の引張実験では、所要の引張耐力は有しているが、セグメント本体における継手部の補強方法に課題を残した。これらを踏まえ、補強方法について再考し引張実験を行った結果、所要の引張力に対して補強方法が有効であることを確認し、実用化への目処がついた。

1. まえがき

近年、都市部において地下河川や地下調節池のように満管時に内水圧が作用するトンネルをシールド工法により構築する例が増加しつつある。このうち、シールドトンネルの一次覆工のみで内水圧を負担させる場合、セグメント本体だけでなくセグメントピース間継手にも引張力が発生する場合がある。

一方、海外から技術導入し実用化されたほぞ付きセグメントは、二次覆工省略を容易にしたセグメントである。図-1に示すように、ほぞ付きセグメントのセグメントピース間継手は平面と凸ほぞの突き合わせ構造であり、継手部に発生する引張力に対して抵抗できる構造ではない。そこで、新たに考案した締結材によりセグメントを連結し、継手部に作用する引張力に抵抗可能なほぞ付きセグメントの開発に取り組んでいる。これにより、ほぞ付きセグメントは「二次覆工省略型+内水圧対応型」の覆工構造として、内水圧が作用するトンネルにも適用が可能となる。

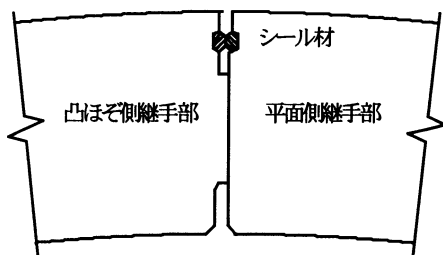


図-1 ほぞ付きセグメントのピース間継手

セグメント締結材は、引張力に対して高い耐力を持つアラミド繊維シートを主材料として選定した。このシートをエポキシ系樹脂により硬化、成形を行う。締結材はセグメント組立後、セグメント本体に予め設けた溝にはめ込む。締結材設置後にグラウト材で隙間の充填を行い、セグメント本体と一体化する。写真-1に実験時における締結材の設置状況を示す。

前年度に行った締結材単体での引張実験の結果、締結材は所用の引張耐力を有していることが確認できた。しかし、コンクリート供試体を用いた引張実験ではセグメント本体の補強方法について課題を残した¹⁾。これらの実験結果を踏まえ、今回の実験ではセグメント本体における補強方法の改善に特に重点をおいた。本報告は、実験結果およびその考察についてまとめたものである。



写真-1 締結材の設置状況（実験時）

* 土木設計部

2. 締結材の概要

2.1 材料の特性

締結材の主材料であるアラミド繊維シートの特性を表-1に示す²⁾。アラミド繊維シートは高い引張強度を有している。

表-1 アラミド繊維シートの特性
(シート1層当たり)

引張強度	N/mm ²	2,400
ヤング係数	kN/mm ²	80
破断伸度	%	3.0

2.2 セグメント締結材の設置方法

図-2に締結材の設置位置を示す。締結材は予めセグメント本体のセグメントピース間継手に設けた溝にはめ込み、グラウトにより隙間の充填を行う。

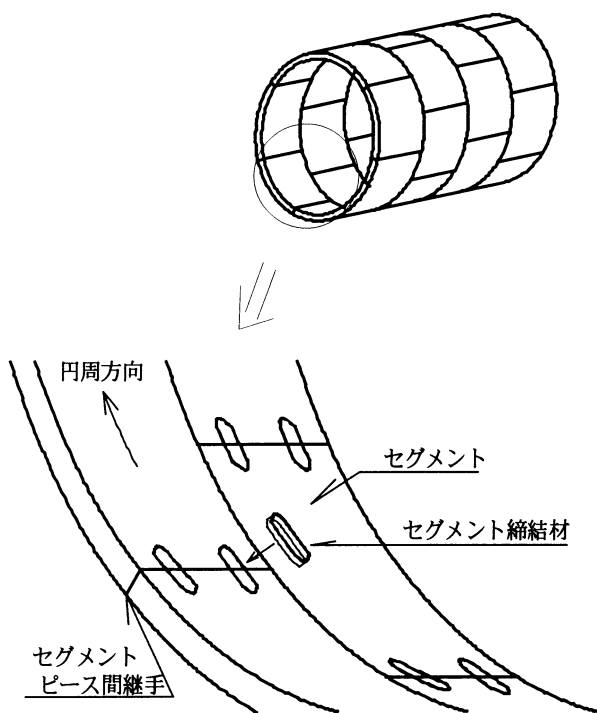


図-2 締結材の設置位置

2.3 セグメント本体の補強

締結材を設置したセグメントの継手部に引張力が発生すると、引張力はセグメントに伝達される。このとき、図-3に示すように締結材取付部分でせん断破壊を起こす可能性がある。よって、図-4に示すように、防食処理を施した鋼管と鉄筋を用いてせん断補強を行う。

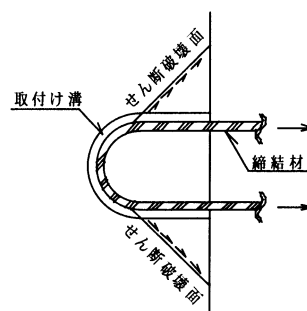
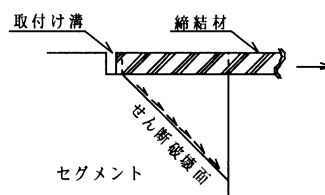


図-3 セグメントのせん断破壊

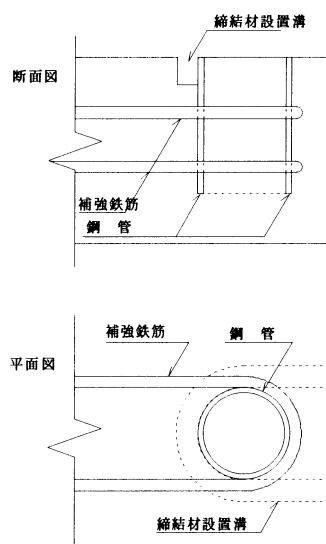


図-4 せん断補強方法

2.4 締結材の特徴

締結材の特徴は以下の通りである。

非金属材料であるアラミド繊維を用いることにより、耐腐食性に優れる。

セグメント組立と独立して作業を行えるので、シールド掘進・組立のサイクルタイムに影響を与えない。

締結材は、はめ込みと隙間の充填を行う作業のみであり、特殊な技術を必要としない。

作用する内水圧の大きさに対して締結材の寸法、セグメント内部の補強方法を適切に設定することで経済的な設計が可能である。

3. 締結材引張実験

3.1 目標とする性能

(1) 継手部に作用する引張力

シールドトンネルに作用する土圧、水圧などの外荷重に比較して内水圧が卓越する場合、セグメント本体および継手部には軸方向引張力が作用する。

本検討では、セグメントピース間継手に締結材を2個設置することとし、セグメントピース間継手に240kNの引張力が作用することを想定した。すなわち、締結材1個につき120kNの耐力を有することを目標とした。ピース間継手部に作用する引張力は、地盤条件、地下水位、内水圧、セグメント径などにより変化する。今回想定した引張力は、セグメント外径および外水位と内水位の水頭差をパラメータにした場合、概ね表-2に示すような条件に相当すると考えられる。

表-2 内水圧により発生する軸方向引張力

セグメント外径 (mm)	水頭差 (内水位-外水位) (m)	水頭差 による内 水圧 (kPa)	セグメントに 作用する軸 引張力 (kN)
φ2,000~φ3,000	20	200	240
φ5,000~φ6,000	10	100	

(2) 継手部に発生する目開き量

継手部に引張力が発生すると目開きが生じる。継手部における止水性の確保は、基本的にシール材の止水性によることとし、内水圧に対して継手部の目開きがシール材の止水性能を損なわない目開き量に抑制できることを目標とする。本実験ではシール材の止水性能から決まる許容目開き量を3mmに設定した。

3.2 実験概要

本実験は、以下の2項目を確認するために行った。

締結材およびセグメント本体の補強方法が所要の耐力を有していること。

所要の引張力に対して、セグメント間の目開き量が許容値以下となること。

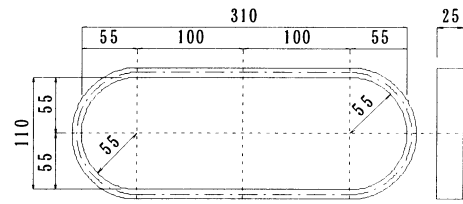
図-5に実験装置の概要を示す。実験供試体は、継手部分が実物大となるように作成した。使用材料および諸元を表-3に示す。測定は、表-4に示す4項目について行った。

表-3 使用材料および諸元

コンクリート	設計基準強度	$f_{ck} = 42\text{N/mm}^2$
鉄筋 (SD345)	主筋	D19
	配力筋	D13
	せん断補強筋	D16, D25
せん断補強鋼管 (STS410)		$\phi 101.6, t=8.1\text{mm}$
締結材	アラミド繊維シート	8層巻き
注入グラウト		高分子系高強度グラウト、石膏

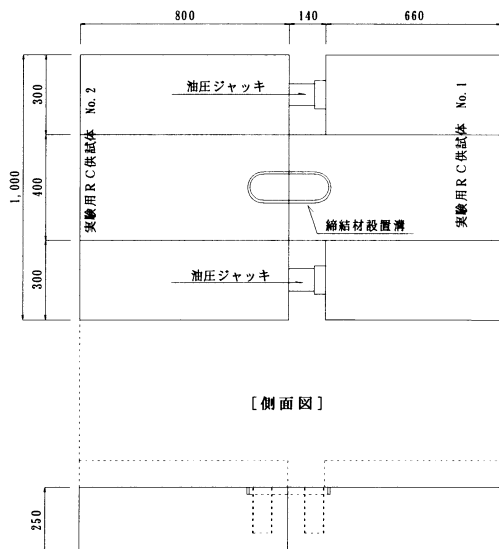
表-4 測定項目

測定項目	内容
① 締結材に作用する引張力	油圧ジャッキに設置した圧力計により引張力を計測する。
② 目開き量	供試体に設置した変位計により目開き量を測定する。
③ 補強鉄筋のひずみ	補強鉄筋にひずみゲージを貼付し、補強鉄筋各部位でのひずみを測定する。
④ 締結材のひずみ	締結材にひずみゲージを貼付し、締結材各部位でのひずみを測定する。



(締結材の寸法)

[平面図]



[側面図]

図-5 実験装置の概要

3.3 実験ケース

せん断補強方法をパラメータとして実験ケースは表 - 5 に示す 4 ケースとする。繰返し荷重の影響を定性的に把握するため、CASE1-2 では繰返し荷重の載荷を行った。載荷方法は120kNまで載荷後、油圧を抜き荷重を0とし、再び120kNまで載荷するパターンの繰返しとした。各ケースのせん断補強方法概念図を図 - 6 に示す。

表 - 5 実験ケース

ケース名	補強用鋼管	補強鉄筋	補強鉄筋段数	備考
CASE1-1	φ 101.6, t=8.1	D16(曲げフックあり)	3	
CASE1-2	"	"	"	0→120→0(kN)の繰返し載荷
CASE2	"	D16(曲げフックなし)	3	
CASE3	"	D25(曲げフックなし)	2	

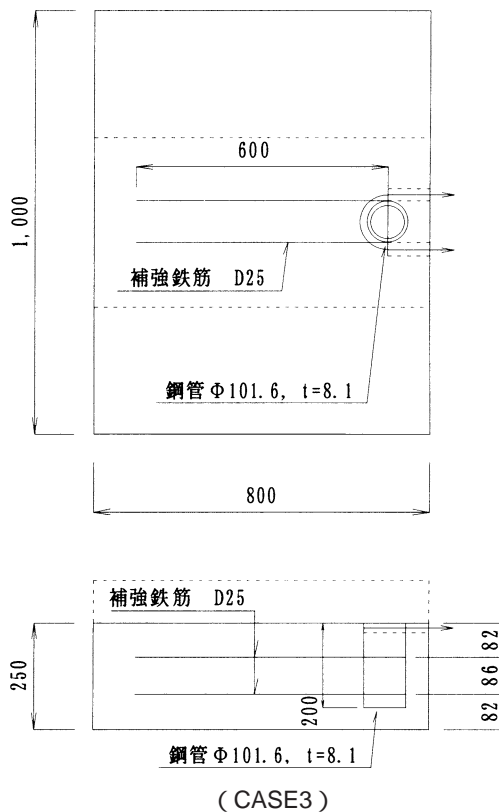
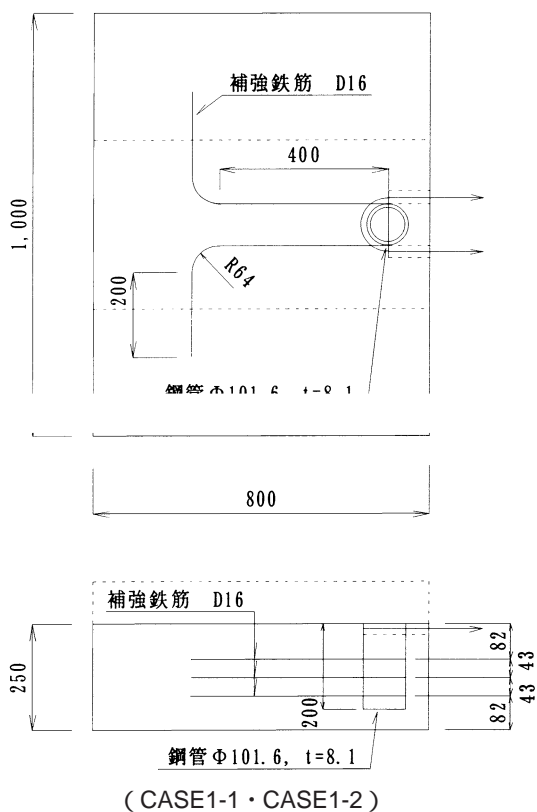
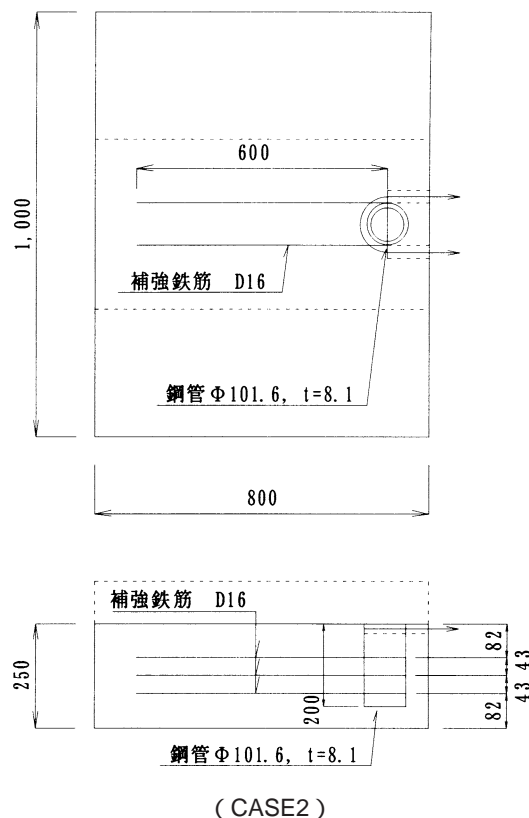


図 - 6 各実験ケースのせん断補強方法

4. 実験結果と考察

4.1 目開き量について

本実験における引張荷重とセグメント間目開き量の関係を図-7に示す。引張荷重P=120kNを載荷した時点における各ケースの供試体間目開き量を表-6に示す。

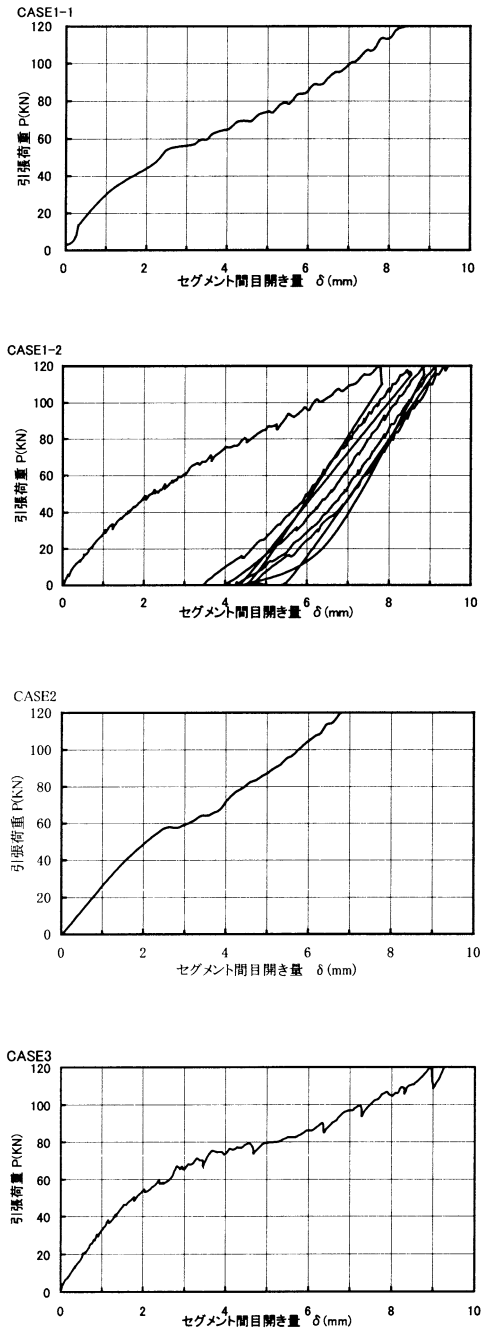


図-7 引張荷重とセグメント間目開き量の関係

表-6 供試体間目開き量 (120kN 載荷時)

	CASE1-1	CASE1-2	CASE2	CASE3
目開き量 δ (mm)	8.5	9.5	7.0	9.5

本実験におけるセグメント間の目開き量に対する締結材の要求性能は、引張荷重P=120kNにおいて許容目開き量3mm以下を目標としている。表-6に示すように本実験では許容値を満足することはできなかった。

セグメント間目開き量は締結材の伸びに起因するものと、締結材と設置溝の間に充填されたグラウト材料の圧縮や隙間の充填の不備に起因するものに分けられる。図-8にCASE2における引張荷重と締結材のひずみ量の関係を示す。

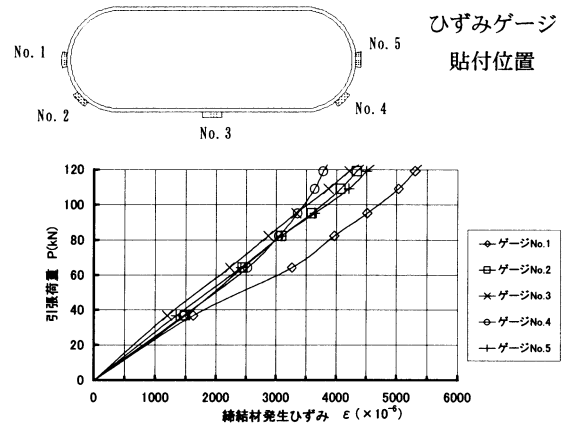


図-8 引張荷重と締結材ひずみ量の関係 (CASE2)

締結材に設置されたひずみゲージ値より、締結材の伸びに起因する目開き量および、それ以外に起因する目開き量は以下の式により求めることができる。

$$\delta_a = \Sigma \epsilon \times L \quad (1)$$

$$\delta_g = \delta - \delta_a \quad (2)$$

- ここで、 δ_a : 締結材の伸びに起因する目開き量(mm)
- : 締結材のひずみ
- L : 締結材長(mm)
- δ_g : 締結材の伸び以外に起因する目開き量(mm)
- : 測定目開き量(mm)

表-7にセグメント間目開き量を原因別にまとめたものを示す。締結材の伸びは3mm以下となっている。一方、荷重P=120kNにおいて発生する目開き量のうち、約70パーセントは締結材と設置溝の間に充填されたグラウト材料の圧縮や隙間の充填の不備によるものであることが

わかる。グラウト材料は、圧縮量が少ない材料を選択することにより対応は可能であり、隙間の充填方法も対応策がある。よって、目開き量に対する要求性能を満足することは可能であると考える。

表 - 7 セグメント間目開き量

	CASE1-1	CASE1-2	CASE2	CASE3
平均ひずみ ($\times 10^{-6}$)	4900	6000	4500	6300
締結材長 (mm)	415	415	415	415
締結材の伸び (mm)	2.0	2.5	1.9	2.6
上記以外による目開き量 (mm)	6.5	7.0	5.1	6.9
セグメント間目開き量 (mm)	8.5	9.5	7.0	9.5

4.2 セン断補強方法について

供試体に作用する引張荷重が $P=120\text{kN}$ に達したとき、供試体にせん断破壊が生じていないことを目視により確認した。また、供試体の破壊荷重が全ケースにわたり 200kN を越えていたので、ある程度の安全率を有して補強方法が有効であることが確認できた。

CASE2における引張力と補強筋に発生する応力度の関係を図 - 9 に示す。

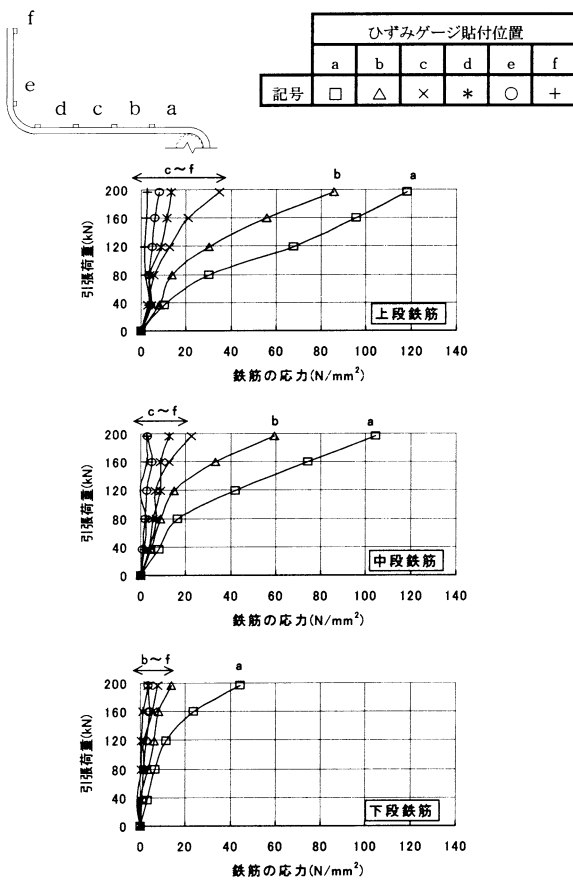


図 - 9 引張力と鉄筋の応力度の関係 (CASE2)

図 - 9 に示すように、上段 中段 下段と引張応力が減少している。また、上、中、下段ともに鋼管から離れるにつれ引張応力が減少している。この傾向は、CASE2 以外のケースでも変わらなかった。CASE1-1、CASE1-2のように補強筋に曲げフックを付けた場合の優位性は確認できなかった。引張荷重 $p=120\text{kN}$ 時では、補強鉄筋が有効に働く長さが曲げ加工をした部分よりも鋼管側であり、その部分で十分な耐力を有していたためであると考えられる。

各鉄筋の軸方向の応力分布について

図 - 10 に示すように、鉄筋の一部分を取り出すと、補強鉄筋の応力状態は、鉄筋に作用する引張応力と鉄筋とコンクリートの付着応力に分けられる。

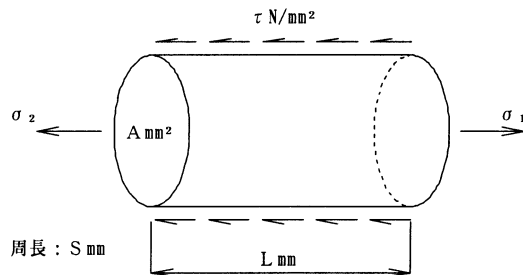


図 - 10 鉄筋に作用する引張応力と付着応力

鉄筋とコンクリートの付着応力は以下の式で求まる。

$$\tau_i = \frac{(\sigma_i - \sigma_{i-1}) \times A}{S \times L} \quad (3)$$

- ここで、 i : 付着応力 (N/mm^2)
- i : 引張応力 (N/mm^2)
- A : 鉄筋の断面積 (mm^2)
- S : 鉄筋の周長 (mm)
- L : 鉄筋の長さ (mm)

CASE1-2 において、それぞれ荷重が $P=40\text{kN}$ 、 80kN 、 120kN での上段鉄筋の応力分布を図 - 11 に示す。荷重が $P=40\text{kN}$ と小さい場合、鋼管付近の鉄筋とコンクリートの付着による応力が大きいことがわかる。 $P=120\text{kN}$ 時には a の地点では鉄筋の引張応力が卓越し、 b では付着応力が増加している。これより、引張荷重による鉄筋の応力状態は、荷重が増加するにつれ付着応力から引張応力が主体となるように遷移することがわかる。 $P=120\text{kN}$ 時でも $e \sim f$ 間は、付着応力、引張応力ともにほとんど生じていないことから、この補強方法は十分な耐力を有していることがわかる。

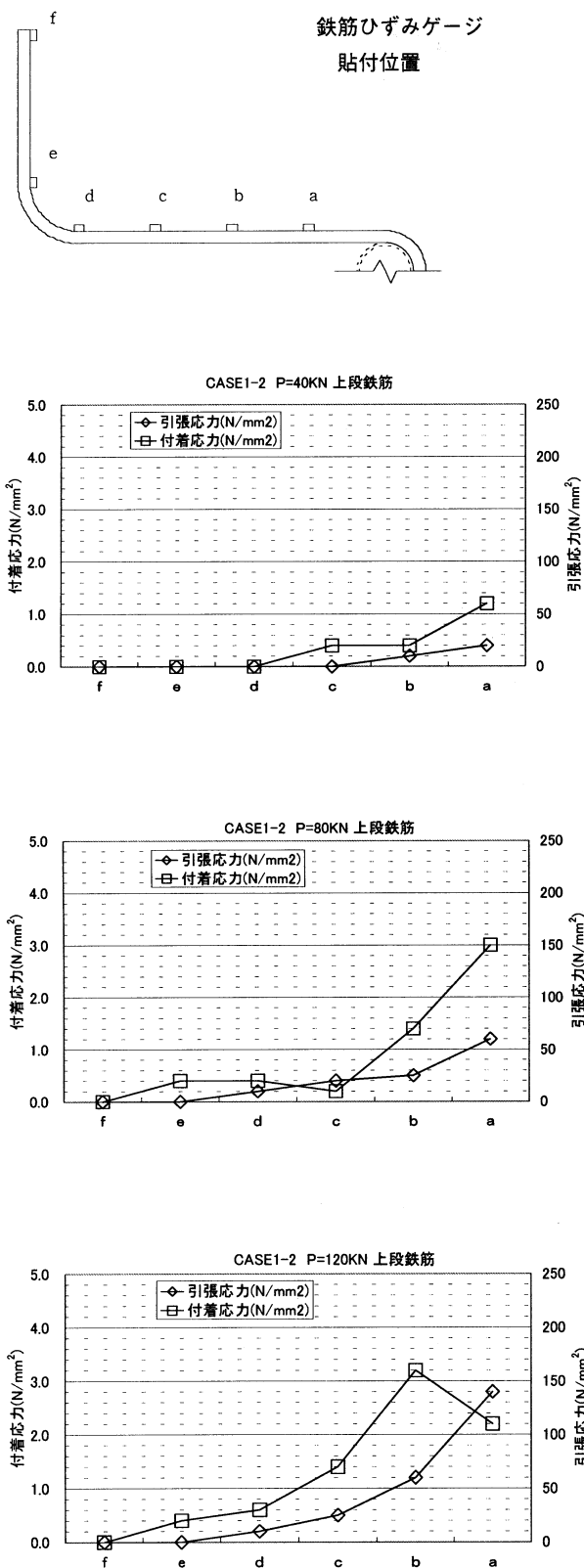


図 - 1 1 鉄筋の引張応力と付着応力 (CASE1-2)

各段における鉄筋の応力分布について

図 - 1 2 に各ケースにおける各段の引張応力の分担割合を示す。どのケースも上段の負担が大きく下段の負担が小さい。CASE1-1、CASE1-2、CASE2などの補強筋を3段に配置したケースの各段の分担率は、概ね上段60%、中段30%、下段10%となっている。CASE3の2段で配置した場合は、ほとんどが上段鉄筋で負担している。

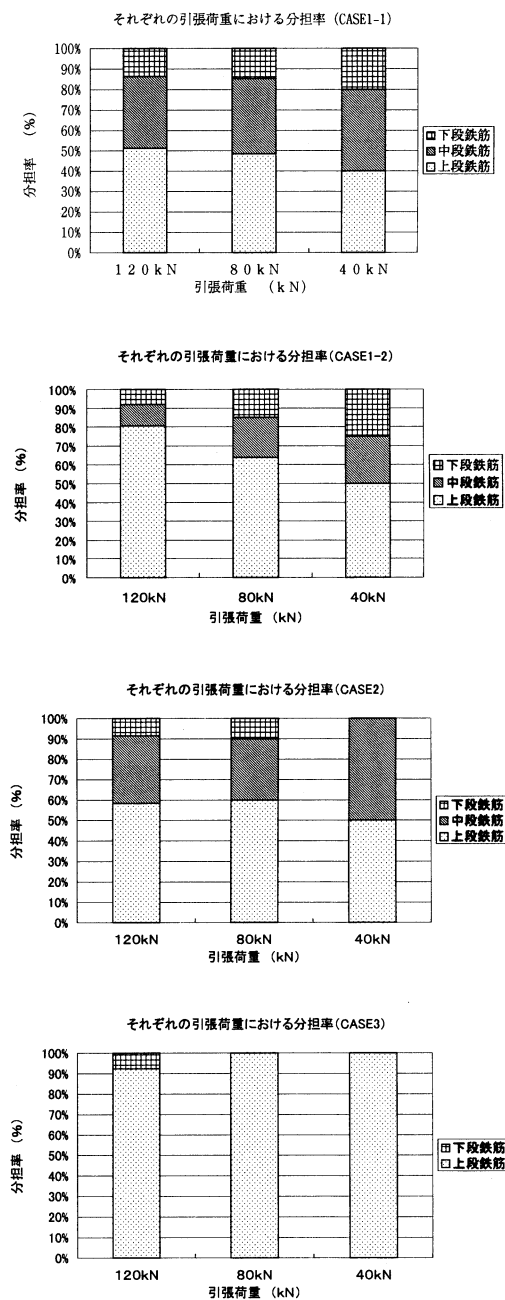


図 - 1 2 各段における引張応力の分担率

補強鉄筋の設計

図 - 13 に示すように、鋼管の下端を支点とし、引張荷重を支点周りのモーメントに換算すると、各鉄筋に作用する軸力は、アーム長 z_i を用いて算定できる。表 - 8 に本実験で用いた各段の補強鉄筋に作用する軸引張力を示す。

トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説の許容応力度を用いて、本実験で用いた上段鉄筋の付着応力および引張応力に対する照査結果を表 - 9 に示す³⁾。

CASE1-1、CASE1-2、CASE2では、付着より求まる鉄筋の必要長は実験で用いた長さ(600mm)よりも長くなる。また、引張応力についても許容値を満足していない。実験では、CASE1-1、CASE1-2、CASE2の3ケースともに、引張荷重 120kN 載荷時には補強部の破壊には至っていないため、許容応力度法を用いることにより、安全側の設計となることがわかる。CASE3においては、実験で用いた補強方法が設計上でも許容値を満足していたことがわかる。

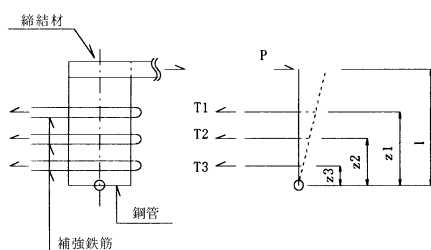


図 - 13 引張荷重と鉄筋に作用する軸力

表 - 8 各段の補強鉄筋に作用する軸力

ケース	引張荷重		支点から各段鉄筋までの位置			各段の鉄筋に作用する軸引張力		
	P(kN)	l(mm)	上段 z1(mm)	中段 z2(mm)	下段 z3(mm)	上段 T1(kN)	中段 T2(kN)	下段 T3(kN)
CASE1-1	120	188	118	75	32	129	82	35
CASE1-2								
CASE2								
CASE3	120	188	118		32	178		48

表 - 9 補強鉄筋の照査

付着応力の照査				
ケース	軸引張力 P(kN)	鉄筋径	許容付着 応力度 τ_{sa} (N/mm ²)	鉄筋必要長 L(mm)
CASE1-1	129	D16	2.0	650
CASE1-2				
CASE2				
CASE3	178	D25	2.0	560
引張応力の照査				
ケース	軸引張力 P(kN)	鉄筋径	許容引張 応力度 σ_{sa} (N/mm ²)	引張応力度 σ_s (N/mm ²)
CASE1-1	129	D16	200	325
CASE1-2				
CASE2				
CASE3	178	D25	200	176

5. あとがき

本報告で得られた結果と今後の課題について以下に示す。

セグメント目開き量は、引張荷重 $P=120\text{kN}$ に対して、許容目開き量 3mm を満足することができなかった。目開きの要因としては、締結材の伸びに起因するものと、グラウト材料の圧縮や隙間の充填の不備によるあそびなど締結材の伸び以外に起因するものとに分けられる。今回の実験では、締結材の伸び以外に起因する目開き量が大きかった。圧縮量の小さいグラウト材料の選択は容易であり、また、今回はあまり注意を払わなかった充填方法についても対応可能と考えており、実用化のめどがついたと考えられる。

セグメント供試体のせん断補強方法について、鋼管と補強鉄筋による方法が有効であることが確認できた。補強鉄筋を段配置にした場合、最上段の鉄筋が負担する応力が大きいことがわかった。

補強鉄筋の設計は、コンクリートと鉄筋の付着による応力の照査と、鉄筋の引張応力の照査を行うことにより可能であることが確認できた。

現在、締結材の主材料について、より変形量の少ないカーボン素材を用いたものについても研究中である。また、グラウト材の選定およびその充填方法についても、課題を解決するために引き続き検討を行う予定である。特にグラウトの充填方法は、締結材が有効に作用するための重要なポイントとなることから、実施工を想定した詳細な検討を行う予定である。

なお、締結材の開発は、帝人(株)との共同開発により進めている。

参考文献

- 1) 石澤秀文・白上勝章：セグメント締結材の開発、五洋建設技術研究所年報、Vol.29、pp.127 ~ 132、1999.12
- 2) 帝人(株)：ARシステム技術資料[テクノラシート編]、1997.5
- 3) 土木学会：トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説、pp.65 ~ 66、1996.7