

シールド工用セグメントのFRP-Key継手の材料特性と力学特性

花見 和則¹・木村 定雄²・小泉 淳³

¹正会員 東京電力(株) 銀座支店 (〒105-0011 東京都港区芝公園2-2-4)

²正会員 工修 佐藤工業(株) 中央技術研究所 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

³正会員 工博 早稲田大学 理工学部土木工学科(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

首都圏の基幹地中送電線用洞道は、近年トンネル位置の深層化に伴って硬質地盤での施工が多くなっている。この自立性の高い地盤を対象にセグメントの新型継手として、セグメント継手面とリング継手面の双方に凸形をしたFRPを埋め込み、一方、コンクリートには凹部を設けてこれと嵌合させる構造(FRP-Key継手)を研究開発した。このFRP-Key継手は、せん断力の十分な伝達機能を確保するとともに、セグメント組立時の調芯機能を有しているため、現場でのセグメント組立時間の短縮が期待できる。またFRP-Key継手の部材は型枠に設置してセグメント本体と一体成形できることから型枠製作費も抑制できる。本論文はFRPの材料特性や各種継手試験に基づいたFRP-Key継手の力学特性およびその継手の設計法について述べたものである。

Key Words : shield tunnel, design of tunnel lining, segment, joints of segment, fiber reinforced plastics

1. まえがき

現在、地中送電線をはじめとする都市部のライフライン構造物の構築には、輻輳する地下埋設物を避け、地上環境および地下環境に与える影響の少ないシールド工法が主に用いられている。

また近年、都市の急激な過密化により、シールドの発進および到達の基地となる立坑用地の確保難やトンネル位置の深層化等、都市トンネルを取り巻く施工環境はますます厳しくなっており、これらがトンネル工事コストの増加の要因ともなっている。

このような背景のもとで、シールド工事費の低減を考えると、シールド工事費の約1/3を占めているセグメントのコスト低減は最も効果的な対応策の一つであり、特にコンクリート平板形セグメントの構造の合理化に向けた技術開発が重要な課題となっている。

筆者らは、すでにコンクリート平板形セグメントに高流動コンクリートを適用(以下、高流動コンクリートセグメントと称す)することにより、振動締めやセグメント背面の表面仕上げの省略等、製造

工程の効率化が可能となる新たなセグメントの製造システムを実用化している¹⁾²⁾。

本研究はさらなるコスト低減を目指し、高流動コンクリートセグメントの特徴を生かした新型継手(FRP-Key継手)の研究開発を推進し、実現場への適用を図るために各種の検討を行ったものである。

2. 研究の目的と概要

コンクリート平板形セグメントの標準的な継手は、直ボルト締結方式の鋼製ボルトボックスタイプであり、この継手金物はセグメントコストに占める割合が大きく、直ボルトによる締結の手間はセグメントの組立時間を短縮する時のネックとなっている。

近年、セグメントのコスト低減を目的に新しい継手の技術開発やその実用化が多数報告されている³⁾が、トンネルの深層化に伴って比較的硬質地盤での施工が多くなることを考慮し、それらのうち自立性の高い地盤において経済性を追求する上で最も有力と見なされた「ほぞ付きセグメント」⁴⁾を基本的な仕様として、より合理的な新型継手の研究開発を

表-1 継手材料の性能比較

材 料 比較項目	材質 材料特性	FRP		鋼材 (SS400)	ステンレス (SUS304)	備 考 (単位：N/mm ²)
		熱硬化樹脂	熱可塑樹脂			
	せん断強度	45	80	140	120	
引張強度	30	160	240	210		
圧縮弾性係数	1.4×10^4	1.4×10^4	2.1×10^5	2.1×10^5		
引張弾性係数	6.0×10^3	3.2×10^3	2.1×10^5	2.1×10^5		
1. 長期耐久性 (強度・弾性係数の保持率・1年間浸漬)	酸	○(89%)	×(35%)	×	×	(pH=1)H ₂ SO ₄ 20%(23℃)
	アルカリ	○(79%)	○(87%)	○(100%)	○(80~100%)	(pH=14)NaOH 5%(23℃)
	塩水	○(81%)	○(73%)	×	○(100%)	NaCl 20%(70℃)
2. 製作性		○	○	△	△	・FRPは機械加工が容易
3. コンクリートに対する緩衝性		○	○	×	×	・圧縮弾性係数がコンクリートより小さいこと
4. 耐火性		○	○	○	○	・FRPは難燃材料 (防災2級)
5. コスト		1.0	1.2	1.3	2.0	・継手部材とした場合のコスト比 (せん断耐力が同等)
総合評価		○	×	×	×	

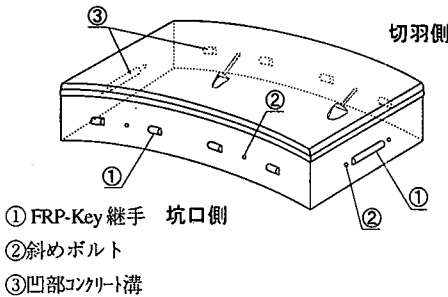


図-1 FRP-Key継手の概要

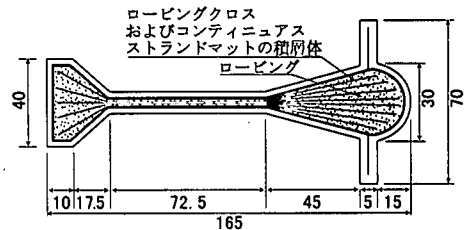


図-2 FRP-Key継手の構造

行った⁹⁾¹⁰⁾。

ほぞ付きセグメントは、リング間の継手面に凹凸のほぞを設けてそれらを噛み合わせ、またセグメント継手面はコンクリートを突き合わせる構造とすることにより、継手金物の省略やセグメントの組立時間の短縮を図るといった利点がある。しかしながら、従来のほぞ付きセグメントでは、継手面に凹凸部を形成するため型枠の削りだし等の機械加工量が増し、型枠製作費が増大するなど、改善の余地が残されている。

そこで、コンクリート平板形セグメントに高流動コンクリートを適用すれば、型枠への強力な加振がなくなることに着目し、図-1に示すようにセグメント継手面とリング継手面のいずれにも簡易な継手部材を埋め込み、コンクリートの凹部と嵌合させる構造を採用することを試みた。リング間の継手部材はせん断力の伝達機能(せん断Key)と組立時の調芯機

能を、またピース間のそれは組立時の調芯機能を持たせるものである。この継手部材は型枠に設置してセグメント本体と一体成形できることから型枠の加工量を低減できる。

本研究ではまず、継手部材に選定したFRP(Fiber Reinforced Plastics)がこれまでにセグメント用の構造材料として用いられたことがないことから、その材料特性を調べ、次に各種の継手試験に基づいてFRP-Key継手の力学特性を明らかにした。最後に実現場への適用を考え、FRP-Key継手を有するセグメントの設計法について検討を加えている。

3. 継手の材料特性

(1) 継手材料の選定

セグメント継手面およびリング継手面の凸部となる継手部材の材料は、構造用材料としての実績、成

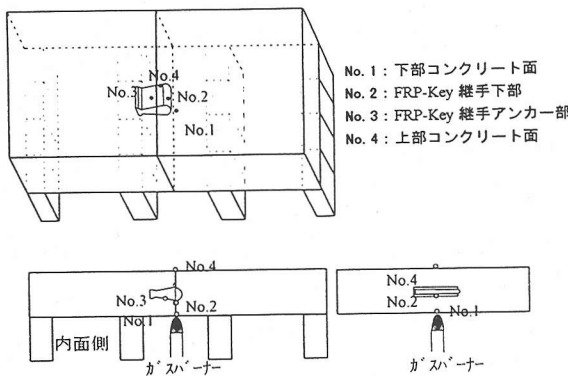


図-3 加熱試験の状況

形のし易さ、コスト等を考慮し、鋼材、ステンレスおよびFRPの3種類に絞り込み、継手材料としての適性を詳細に比較し検討を行った。

検討結果は表-1 に示すように、①長期耐久性、②製作性、③コンクリートに対する緩衝性、④耐火性および⑤コストについて評価し、すべての項目において要求品質を満足するFRPを新型継手の継手部材として選定した。特にFRPの圧縮弾性係数は、コンクリートの1/3程度と小さいことから、FRPがコンクリートと接触した場合でも緩衝効果が発揮され、コンクリートの欠損を防ぐことが可能である。また、FRPはガラス繊維の方向や配置により強度を調整できるという利点がある。なお、ここで用いたFRPは連続引抜き法により製作したものであり、母材はビニルエステル樹脂(熱硬化樹脂)、補強材はガラス繊維(ロービング、ロービングクロスおよびコンティニュアスストランドマット、繊維混入率:40~43%)から構成されている⁹⁾(図-2参照)。

(2) FRPの耐熱特性

FRPは電力設備の材料として洞道内の電力ケーブル用トラフおよび橋梁添架の電力ケーブル保護管に適用されており、常時においては熱特性も含めてその材料特性はすでに把握されている⁹⁾。しかし、洞道内の火災のような非常時の材料特性についてはいまだ明確にされておらず、その特性を把握し、構造材料としての信頼性を確保する必要がある。セグメントの継手部材に選定したFRPは防災2級の難燃材料であるが、FRPをセグメントの構造用材料として初めて適用することから、その耐熱特性について検討を加えることとした。この検討はトンネル内の火災を想定しているが、火災を忠実に再現することは困難であるため、JIS K 6911に準拠し、図-3に示す加熱試験¹⁰⁾によりFRP-Key継手の温度上昇量を把握するとともに、FRPの熱による強度低下等を試験に

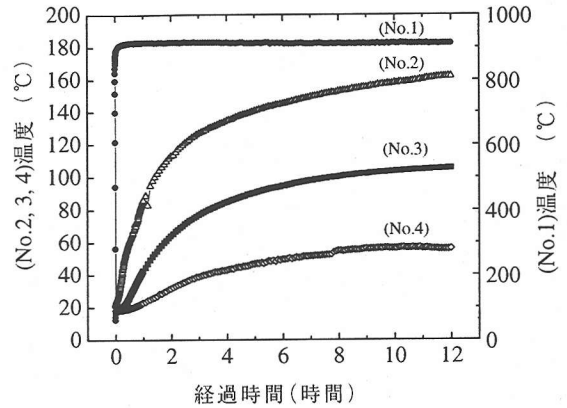


図-4 加熱試験の結果

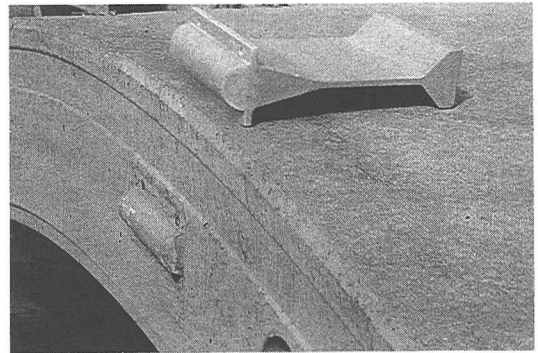


写真-1 FRP-Key継手の形状

より確認するものである。なお、継手部の平均目開き量は2mmに設定した。

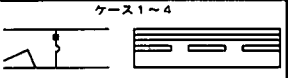
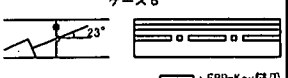
試験結果は図-4に示すとおりで、12時間の加熱(セグメント内面は900°C)によりFRP-Key継手付近は160°C程度まで温度が上昇し、ほぼ定常状態となった。

一方、FRPを160°Cで12時間加熱し、その後常温まで自然冷却した時のせん断強度および圧縮弾性係数の保持率(常温におけるそれらの値との比率)を求めた。結果はそれぞれ保持率が100%および70%程度であり、熱による材料特性の低下はほとんど考慮する必要がないものと判断された。なお、160°Cの状態におけるせん断強度および圧縮弾性係数の保持率は両者ともに40%程度であるが、圧縮弾性係数が低下すると、断面力算定から求まる設計せん断力も小さくなることから、継手の安全性は確保(第5章試験適用で詳述)できるものと推定される。

(3) FRP-Key継手の形状

FRPはコンクリートと接触した場合でも緩衝効果が期待できることから、写真-1に示すように継手部の断面形状を半円形とし、コンクリート部と確実

表-2 継手曲げ試験のケース

ケース	軸力 (kN)	斜めボルトの有無	シール材の有無	継手面の構造
1	50	無	無	ケース1~4 
2	250	無	無	
3	500	無	無	
4	750	無	無	
5	500	有	有	ケース5 

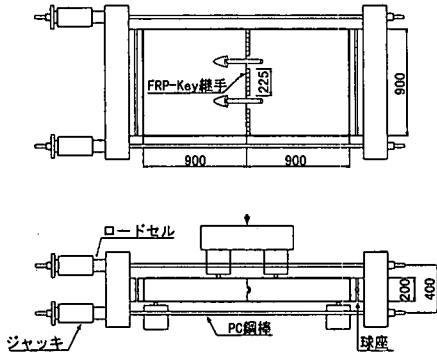


図-5 継手曲げ試験の状況

に嵌合させることにした。これにより、継手部に要求した調芯機能も十分に発揮できる。また、リング継手においても、この半円形の断面形状が、継手面に作用するせん断力の応力集中を軽減できるものと考えた。なお、FRP-Key 継手と嵌合するコンクリート凹部の形状は、挿入時にそれと同心円となる半円形断面とし、挿入余裕として、1.5mm~2.0mm のクリアランスを設けた。一方、FRP-Key 継手のコンクリート埋込み部は、コンクリートへの定着を確保するため最深部を拡幅した。

なお、先にも述べたとおり FRP 部材は連続引き抜きにより製作するため、リング間およびセグメントピース間に用いる FRP-Key 継手の断面形状を同一にすることで製作コストの低減も期待できる。

4. 継手の力学特性

(1) 継手試験の目的

セグメントの継手はセグメント継手とリング継手に大別され、各々の継手に求められる力学的性能は異なる。すなわち、前者は主に曲げモーメントおよび軸力を伝達し、また後者は主にせん断力を伝達する。それらに要求される性能は対象となる地盤に応じて異なるが、洪積層や固結した粘性土層のような自立性の高い地盤においては、セグメントリングの変形に伴う地盤反力を有効に利用する方が経済的な設計が図れることから、リングとしての剛性を高める必要はなく、セグメント継手は柔構造でよい。

FRP-Key 継手は、自立性の高い地盤を対象としてリング間およびピース間に設けた凸形の FRP と凹形状のコンクリートが嵌合する構造であり、継手部の断面力算定は、はりばねモデル計算法を用いる必要がある。このため、断面力の算定にあたってはセグメント継手を回転ばねにモデル化する時のばね

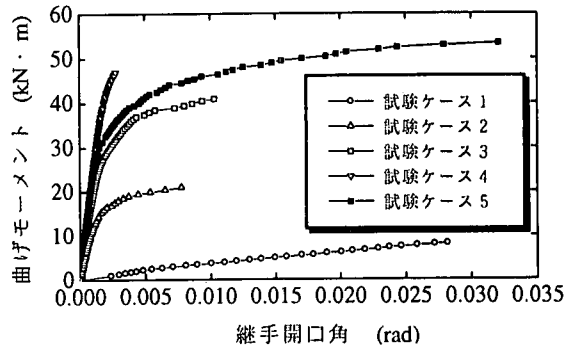


図-6 曲げモーメントと継手開口角との関係

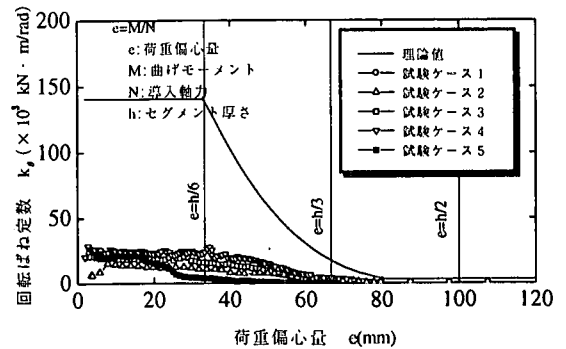


図-7 荷重偏心量と回転ばね定数との関係

定数およびリング継手をせん断ばねにモデル化する時のばね定数を把握する必要がある。

そこで、これらのばね定数を求めるとともに継手部の耐力を確認することを目的として、セグメント継手の曲げ試験およびリング継手のせん断試験を行った。

(2) セグメント継手の曲げ試験

a) 試験概要

セグメント継手の曲げ試験は図-5 に示すように、セグメント継手の回転性能を把握することに着目し、

表-3 曲げ耐力の試験結果

ケース	軸力 (kN)	斜めボルトの有無	シール材の有無	破壊曲げモーメント (kN・m)	終局曲げモーメント (圧縮強度) (kN・m)	試験から求まる部材係数
3	500	無	無	48	49 (70N/mm ²)	1.0
5	500	有	有	63	63 (78N/mm ²)	1.0

セグメント本体部は平板にモデル化して行った。載荷は2点載荷(2点支持)とし、軸力の導入が可能な試験方法にした。試験ケースは表-2に示すとおりで、軸力の大きさおよび斜めボルトとシール材の有無をパラメータとして設定している。

b) 試験結果

i) 継手の回転ばね定数

曲げモーメントと継手の開口角との関係を図-6に示す。図中のグラフの接線勾配が継手の回転ばね定数を表す。軸力が大きくなるにつれて回転ばね定数は大きくなっていることがわかる。

軸力の影響を考慮した荷重偏心量と回転ばね定数との関係を図-7に示す。図中の実線は継手の全面が突き合わさる状態での回転ばね定数の理論値^{11),12)}を示したものである。FRP-Key 継手の回転ばね定数の試験値は明らかにこの理論値を下回っており、ヒンジに近い挙動を示している。これは、FRP-Key 継手とコンクリート凹部とが接していないこと、およびコンクリート継手面の微細な平滑度の影響を受けていることによるものと考えられ¹³⁾、コンクリートどうしを突合せた継手の回転ばね定数は参考文献11)に示したレオンハルトのコンクリートヒンジの理論では説明し難いことを意味している。

以上から、実務設計に用いる回転ばね定数は部材設計の安全を考慮し、理論値と試験値の両者から最大値や最小値を定めてそれぞれの値を用いた設計計算で安全性を照査する必要がある。

ii) 継手の曲げ耐力

ケース3およびケース5の曲げ耐力の試験結果を表-3に示す。表中の破壊曲げモーメントは、荷重による曲げモーメントに試験体のたわみに伴う軸力の偏心による曲げモーメントを加えて示した試験結果である。また終局曲げモーメント M_u は、継手面の全面が突き合わさるものと仮定し、図-8に示す曲げモーメントと軸方向力とを受ける部材の終局状態における曲げモーメントであり、式(1)で与えられる。

$$M_u = C \left(\frac{h}{2} - \frac{\beta}{2} \cdot \frac{N_d + A_s \cdot f_{sy}}{0.85 f_{ck} \cdot \beta \cdot b} \right) + T_s \cos \theta \cdot \left(\frac{h}{2} - d \right) \quad (1)$$

ここに、

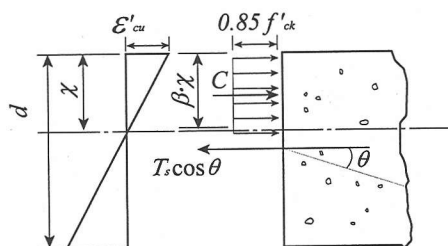


図-8 曲げ耐力の算出方法

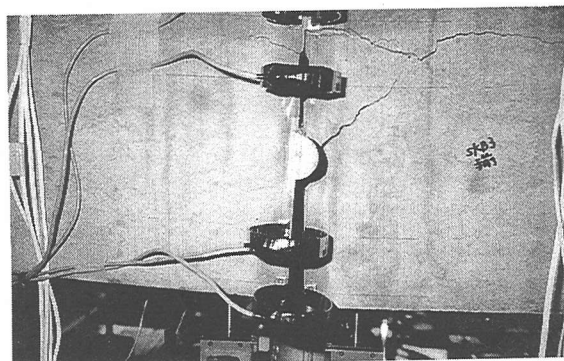


写真-2 曲げ破壊状況の例

- M_u : 終局曲げモーメント(N・mm)
- N_d : 終局時の軸方向力(N)
- C : コンクリートの圧縮応力の合力(N)
- θ : 斜めボルトの角度(rad)
- T_s : 斜めボルトの引張力(N)
- h : セグメント厚さ(mm)
- β : 等価ブロックに換算した時の応力度分布に対する係数(=0.72)
- x : 圧縮縁から中立軸までの距離(mm)
- d : 部材断面の有効高(mm)
- b : セグメント幅(900mm)
- A_s : 斜めボルトの断面積(mm²)
- ϵ'_{cu} : コンクリートの終局ひずみ(=0.0035)
- f'_{ck} : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)
- f_{sy} : 斜めボルトの降伏点(N/mm²)

である。

なお、式(1)の右辺の第二項は斜めボルトを引張鉄筋(単鉄筋)とみなし考慮した項である。斜めボルトはセグメントを組立てる時の真円を保持する観点から設けた仮設部材であり、継手の設計に際してはこの項を考慮しないのが一般的である。

前述の方法で求めた終局曲げモーメントは、試験結果の破壊曲げモーメントとほぼ一致している。このことから、継手部の曲げ耐力は式(1)を用いて評価

表-4 継手せん断試験のケースおよび試験結果

ケース	FRP-Key 継手の長さ×個数	FRP-Key継手の配置 ▨ : FRP-Key継手	拘束力 (kN)	破壊せん断力 (kN)	終局せん断耐力(圧縮強度) (kN)	試験結果から求まる 部材係数 γ_{bsc}	せん断ばね定数	
							k_{s1} (GN/m)	k_{s3} (GN/m)
1	225mm×3		50	187	337 (84N/mm ²)	1.8	—注1)	0.53
2			200	(弾性載荷)	(弾性載荷)	(弾性載荷)	1.28	0.35
3			400				1.72	—注2)
4	150mm×2		50	107	225 (84N/mm ²)	2.1	0.39	0.28
5	100mm×1		50	73	92 (82N/mm ²)	1.3	0.26	0.05

注1) 低荷重レベルで滑りが生じ計測不能
注2) 荷重レベルが高く載荷中止

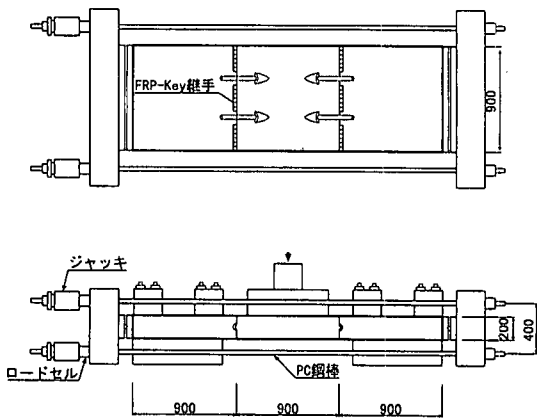


図-9 継手せん断試験の状況

することができる。また FRP-Key 継手と凹部コンクリートとの間には 1.5mm のクリアランスを設けているが、継手部の曲げ耐力の算定においては、その影響が小さく無視できるものと考えられる。なお、継手部の破壊状況は写真-2 に示すとおりであり、圧縮縁のコンクリートが圧壊した。

(3) リング継手のせん断試験

a) 試験概要

リング継手のせん断試験は図-9 に示すように、リング継手のせん断性能を把握することに着目し、セグメント本体部は平板にモデル化して行った。

試験ケースは表-4 に示すとおりである。試験ケース 1,4,5 は継手のせん断ばね定数が FRP-Key 継手の総長に依存すると考え、それを確認するためにそれぞれの総長を 675mm, 300mm, 100mm と変化させて設定した。また、継手のせん断ばね定数は拘束力の影響も受けると考え、試験ケース 1,2,3 で拘

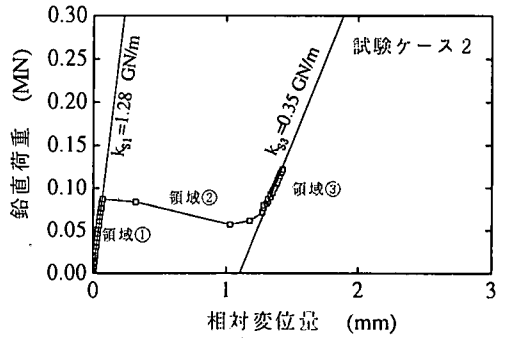


図-10 荷重と相対変位量との関係

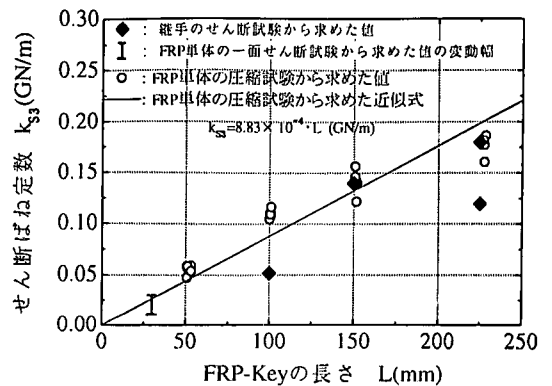


図-11 FRP-Key 継手一個あたりの長さとの関係

束力の大きさを变化させた。一方、継手部のせん断耐力はコンクリートの破壊時に形成されるせん断コーンの形状の影響を受けるものと考え、理想的なコーンの形成が期待できるもの(ケース 5)、セグメント端部で自由境界面があるもの(ケース 1)、その中間となるもの(ケース 4)を試験ケースとして設定した。

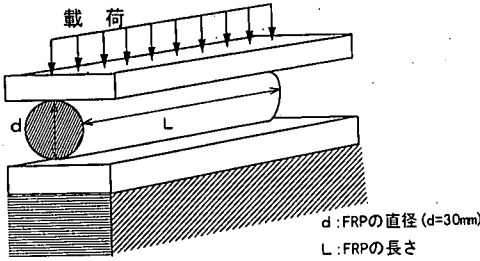
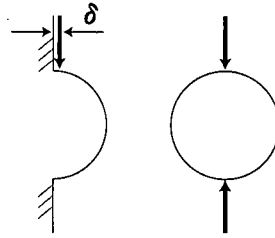


図-12 FRP 単体の圧縮試験の状況



a) 継手せん断試験の場合 b) FRP 単体の圧縮試験の場合

図-13 作用荷重の状況

b) 試験結果

i) 継手のせん断ばね定数

荷重と継手面の相対変位量との関係の一例を図-10 に示す。継手面の相対変位量は図-9 中の中央に位置する供試体とその左右に位置する供試体との間に生じる相対的な鉛直変位量をそれぞれ高感度変位計を用いて計測したものである。荷重と相対変位量との関係は、①主に継手面の摩擦が卓越し相対変位量が微小である領域、②せん断力が摩擦抵抗力を上回り FRP-Key 継手部のクリアランス分の滑りが生じる領域、③ FRP-Key 継手にせん断力が直接作用する領域の3つに分けられる。

表-4 の k_{S1} および k_{S3} は、それぞれ領域①および③の一継手面あたりのせん断ばね定数を示したものである。 k_{S1} は拘束力(摩擦力)が大きいほど大きな値となる。

一方、 k_{S3} は拘束力による影響があまり認められず、FRP-Key 継手の長さの影響を受けるものと考えられることから、これを図-11 に示す FRP 単体の圧縮試験(図-12 参照)によって得られたばね定数と比較した。すなわち、FRP-Key 継手に作用するせん断力は、図-13a)に示すようにせん断距離 δ が微小であるため、その応力状態は図-13b)に示すような FRP 単体の圧縮試験の状況とほぼ等しいものと考えた。

その結果、両者は概ね一致しており、FRP 単体の圧縮試験から k_{S3} が推定できることを確認した。また、長さが 30mm の FRP 単体の一面せん断試験を行い、継手のせん断ばね定数を求めたところ、図-11 中に示したとおり FRP 単体の圧縮試験から求めたそれとほぼ等価であった。

ii) 継手のせん断耐力

せん断試験から得られた一継手面あたりの破壊せん断力は表-4 に示すとおりであり、どの試験ケースにおいても凹部のコンクリートが破壊した時に得

られた値である。FRP-Key 継手にせん断力が作用して破壊する時の終局せん断耐力は、凹部のコンクリートが押抜きせん断によって破壊する場合と FRP-Key 継手そのものがせん断によって破壊する場合とが考えられる。前者は図-14a)に示すようにほぞ付きセグメントの場合と同様の破壊形式であること⁷⁾から、そのせん断耐力 S_{uc} は式(2)で与えられる。

$$S_{uc} = A_c \cdot f_{tk} \quad (2)$$

ここに、

S_{uc} : コンクリートのせん断耐力(N)

f_{tk} : コンクリートの引張強度(N/mm²)($f_{tk} = 0.23 f_{ck}^{2/3}$)

f_{ck} : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

A_c : 有効投影面積(mm²)

c : 縁端までの距離(mm)

L : FRP-Key 継手の長さ(mm)

R : 有効投影面積の半径(mm)

α : せん断破壊時の角度

(試験によって把握 $\approx 45^\circ$)

である。

一方、後者の FRP-Key 継手そのものがせん断によって破壊する場合は図-14b)に示す FRP 単体のせん断強度から求めることができ、そのせん断耐力 S_{uf} は式(3)で与えられる。

$$S_{uf} = A_f \cdot f_{sf} \quad (3)$$

ここに、

S_{uf} : FRP-Key 継手のせん断耐力(N)

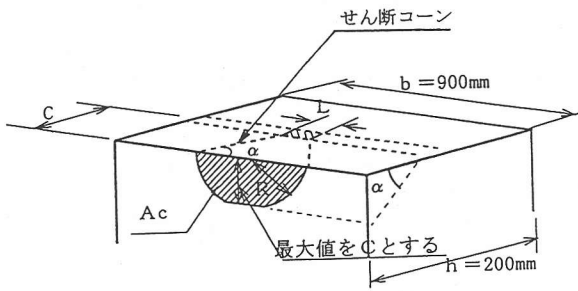
f_{sf} : FRP のせん断強度(N/mm²)

A_f : FRP-Key 継手のせん断有効面積
(mm²)($=d \cdot L$)

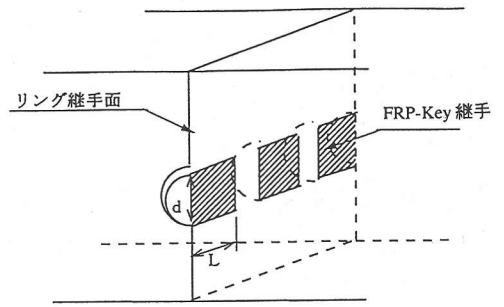
d : FRP-Key 継手の直径(mm)

L : FRP-Key 継手の長さ(mm)

である。



a) 凹部コンクリートの破壊



b) FRP-Key継手の破壊

図-14 終局せん断耐力の算出方法

本試験に用いた供試体は凹部のコンクリートが破壊するようにFRP-Key継手の長さを設定したものであり、表-4中の終局せん断耐力は式(2)を用いて求めた値である。

形成されるせん断コーンの領域は、ケース1およびケース4ではセグメントの両端部に達しており、さらにケース1では隣接したFRP-Key継手の離隔距離が小さいためその一部が重なっている。有効投影面積 A_c はこのことを考慮して求めた。

図表中には終局せん断耐力と試験から得られた破壊せん断力との比を部材係数と仮定して示している。理想的なせん断コーンが形成できたと考えられるケース5の場合は、部材係数は1.3となり式(2)の実用性が確認できた。一方、ケース1およびケース4では部材係数がそれぞれ1.8、2.1と大きな値となった。この原因はセグメント端部での拘束力が失われることから、図-14a)に示すようなせん断コーンが形成できなかったためと考えられる。また、実際のセグメントのリング間に設置するFRP-Key継手の離隔距離は大きく、隣合う継手部のせん断コーンは重ならない。これより、セグメント継手面からせん断コーンが形成できるだけの離隔をとってFRP-Key継手を設置すれば、せん断耐力は部材係数を考慮することで式(2)を用いて評価することができるものと考えられる。なお、実際のセグメントの継手部の設計せん断力の大きさを考えると、実験から得られた破壊せん断力は十分に大きな値となっている。継手部の破壊状況を写真-3に示す。

5. 実現場への試験的な適用

FRP-Key継手の材料特性や力学特性を各種試験によって把握したが、それらの結果をセグメントの設

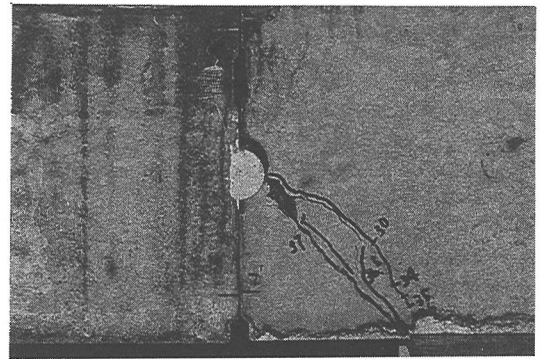


写真-3 せん断破壊状況の例

計にどのように反映するかを検討するため、実現場のセグメントにFRP-Key継手を試験的に適用し、その安全性の照査を行うとともに、施工性についてもあわせて確認することとした。

(1) 実現場への試験的な適用の概要

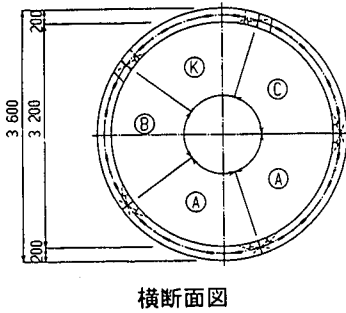
このFRP-Key継手は、横浜市本牧埠頭付近に建設している延長703.4m、セグメント外径3,600mmの地中送電用シールドトンネルにおいて、高流動コンクリートセグメントを用いた直線区間の20リングに採用した。この地盤は図-15に示すように横浜市全域の基盤をなす自立性の高い上総層の固結粘土層(泥岩層)である。なお、図-16はこれに用いたFRP-Key継手を有する高流動コンクリートセグメントの構造を示したものである。

(2) セグメントの安全性の照査

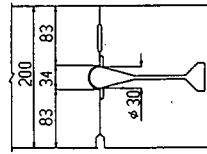
a) 荷重の設定

図-17に示すセグメントの設計に用いた荷重は、

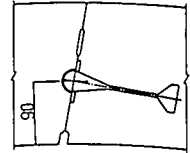
- ①土圧および水圧(土水分離とし、鉛直土圧はTerzaghiの換算緩み高さより求め、その下限値をセ



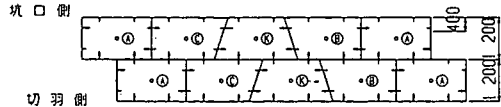
横断面図



嵌合部詳細図
(一般部)



嵌合部詳細図
(テーパー部)



内側展開図

図-16 セグメントおよび継手の構造

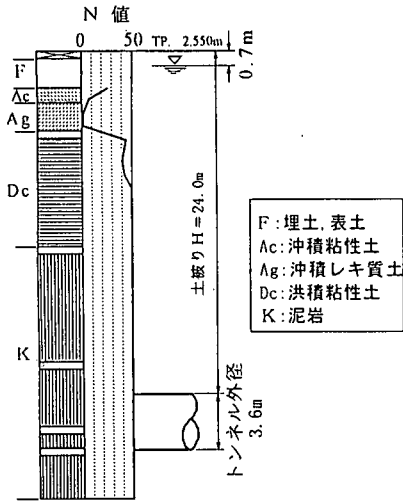


図-15 土質柱状図

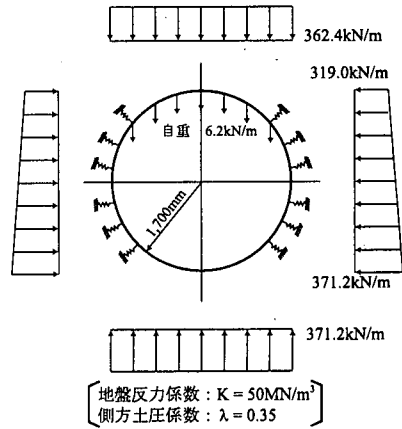


図-17 荷重図

グメントリング外径の2倍とした), ②地盤反力, ③上載荷重および④セグメントの自重である。

なお, 断面力の算定にあたっては, シールドテール内でセグメントリングが組まれることから, 自重による変形に対する地盤反力は考慮していない。

b) 構造モデルと計算ケース

断面力の算定方法は, FRP-Key継手の材料特性や力学特性が評価できる「はりばねモデル」^{14),15)}を採用し, 図-18に示すようにセグメント本体部を曲がりばねに, セグメント継手を回転ばねに, リング継手をせん断ばねにモデル化した。

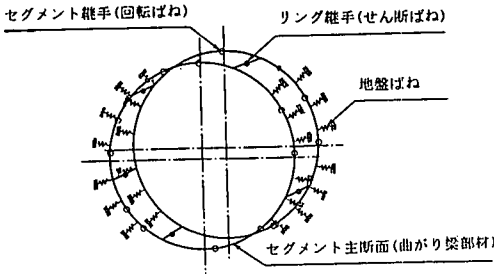
計算ケースは, 表-5に示すとおりで各種のばね定数の組合せにより6ケースとした。

継手の曲げ試験結果によると, セグメント継手は軸圧縮力の影響をほとんど受けずにヒンジに近い挙動を示したが, 継手面が理想的にその全面で突き合

わされる場合の理論値も考慮し, セグメント継手の回転ばね定数 k_θ は①最大値として理論値の132 MN·m/radおよび②最小値として試験値の0.1 MN·m/radの2ケースを設定した。なお, セグメントの自重に対する計算においては, セグメント継手の回転ばね定数は斜めボルトを考慮した値の4.5 MN·m/radとした。

一方, 継手のせん断試験結果によると, リング継手のせん断ばね定数 k_s はトンネル縦断方向のジャッキ推力の残存等を想定した拘束力の影響を受ける。そのため, ①継手面の摩擦力によって継手面にずれ変位が生じない時のせん断ばね定数(1.53GN/m), ②せん断力が摩擦力を上回り継手面にずれが生じた後にFRP-Key継手の圧縮剛性によって定まるせん断ばね定数(0.088 GN/m)および③FRP-Key継手が火災により軟化した時のせん断ばね定数(0.088×0.4=0.035 GN/m)の3ケースを設定した。

表-5 計算ケース



ケースNO.	土水圧作用時		自重作用時	
	回転ばね定数(k_θ) (MN·m/rad)	せん断ばね定数(k_s) (GN/m)	回転ばね定数(k_θ) (MN·m/rad)	せん断ばね定数(k_s) (GN/m)
1	132	1.53	4.5	1.53
2	132	0.088	4.5	0.088
3	132	0.035	4.5	0.035
4	0.1	1.53	4.5	1.53
5	0.1	0.088	4.5	0.088
6	0.1	0.035	4.5	0.035

図-18 構造モデル

表-6 計算結果

ケース NO.		1	2	3	4	5	6	備考
ばね定数 (土水圧作用時)		132			0.1			
		k_θ	k_s	k_θ	k_s	k_θ	k_s	
①主断面	曲げモーメント	M (kN·m)	20.5	17.4	17.4	23.8	19.5	18.0
	軸力	N (kN)	575	575	575	561	572	576
	判定	$A_{req} \leq A_{max}$	○	○	○	○	○	○
②セグメント継手	設計曲げモーメント	M_{dl} (kN·m)	8.6	9.5	10.0	-1.8	-2.5	-3.0
	軸力	Nd (kN)	594.2	587.0	585.9	605.5	620.2	622.9
	終局曲げモーメント	R_{dl} (kN·m)	56.1	55.5	55.5	57.1	58.4	58.6
		R_{dl}/M_{dl}	6.5	5.9	5.6	32.4	23.8	19.7
	判定	$R_{dl}/M_{dl} \geq 2.8$	○	○	○	○	○	○
③リング継手	設計せん断力	S_{ds} (kN)	5.5	1.8	1.4	11.2	3.6	2.7
	コンクリートのせん断力	R_{cds} (kN)	55.6	55.6	55.6	55.6	55.6	55.6
	FRP-Key継手のせん断耐力	R_{Fds} (kN)	103.8	103.8	41.5	103.8	103.8	41.5
	終局せん断耐力	$R_{ds} = \min R_{Fds}, R_{cds} $ (kN)	55.6	55.6	41.5	55.6	55.6	41.5
		R_{ds}/S_{ds}	10.0	30.7	30.4	5.0	15.6	15.6
	判定	$R_{ds}/S_{ds} \geq 2.8$	○	○	○	○	○	○
④鉛直直径変化量	鉛直直径変化量	δ (mm)	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.4
⑤セグメント継手の目開き量	回転角差	θ (rad)	0.00033	0.00046	0.00055	0.00068	0.00093	0.00114
	目開き量	ω (mm)	0.067	0.091	0.109	0.136	0.186	0.229

注1) コンクリートの圧縮強度の特性値 $f'_{ck} = 78\text{N/mm}^2$ $f_{tk} = 0.23 \times (f'_{ck})^{2/3} = 4.2\text{N/mm}^2$

c) 計算結果

計算結果は表-6に示すとおりで、①セグメントの主断面、②セグメント継手、③リング継手、④鉛直直径変化量および⑤セグメント継手の目開き量を指標として整理し、①～③については安全性の照査結

果もあわせて示した。表中の安全率は、FRPの材料係数がコンクリートのそれと比べて小さい¹⁶⁾ことから、コンクリートの安全係数に主眼をおき、材料係数や部材係数を総合的に考慮して2.8とした。なお、主断面の安全性の照査は、断面の必要鉄筋量(Areq)

が最大鉄筋比を1%とした時の鉄筋量(Amax)以下であるか否かで判定した。

安全性の照査の結果、トンネル内の火災によりFRPの剛性が低下することを想定した計算ケースも含め、①～③のすべての指標においてFRP-Key継手を有する高流動コンクリートセグメントの安全性は十分に確保されているものと評価できた。またセグメントリングの横断面内の変形性能を表わす④および⑤の指標では、これらの変化量は無視できる程度に小さい値となっており、自立性の高い地盤におけるこのセグメントの適用性が確認できた。

6. まとめ

本研究はセグメントの新型継手であるFRP-Key継手の開発にあたり、その材料特性および力学特性を各種試験により評価したものである。これにより、得られた知見を挙げると以下のとおりである。

- (1) 新型継手の材料として選定したFRP(ビニルエステル樹脂)は、継手部材としての機能や力学性能を十分に満足するとともに、トンネル内の火災に対しても十分な安全性を有する。
- (2) FRP-Key継手を設置したセグメント継手は、曲げモーメントと軸圧縮力に対して、コンクリートの全面で突き合わされる構造とみなして、その断面耐力を算定することが可能である。一方、継手の曲げに対する剛性、すなわち回転ばね定数は小さい値となる。
- (3) FRP-Key継手を設置したリング継手は、FRP-Key継手の長さを適切に設定することにより、せん断力に対する耐力を算定することが可能である。一方、継手のせん断力に対する剛性、すなわちせん断ばね定数は、拘束力が大きい場合は継手面の摩擦力、また小さい場合はFRP単体の圧縮剛性から推定することができる。
- (4) 実現場への試験的な適用にあたり、設計手法および設計用値の設定方法を検討した結果、FRP-Key継手は自立性の高い地盤への適用性が高いことがわかった。

7. あとがき

FRP-Key継手は、高流動コンクリートセグメントの開発に伴い、セグメント製造時の型枠への加振が省略できることから、低コストの簡易継手として研究開発したものである。しかし、この継手は型枠へ

の取付方法を工夫することにより、従来のセグメントにも十分に適用可能であると考えている。

また、FRP-Key継手を有する高流動コンクリートセグメントを実現場に20リング試験的に適用した。その結果、セグメント組立てには問題はなく、むしろ円滑な組立作業が可能であり、目違いや目開き等の組立精度も良好なことから、施工性もよいことが確認できた。

なお、試験適用区間においては、土圧、水圧等の外荷重およびセグメントの挙動の計測を実施しており、今後その計測データを分析することにより設計手法の合理化および適用地盤の明確化等についてさらに検討を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 花見和則, 松裏寛, 岩藤正彦, 秋田谷聡: 高流動コンクリートセグメントの開発(1), 土木学会第53回年次学術講演会, VI-25, pp.50-51, 1998.10.
- 2) 矢郷隆浩, 宇野洋志城, 花見和則, 松裏寛: 高流動コンクリートセグメントの開発(2), 土木学会第53回年次学術講演会, VI-26, pp.52-53, 1998.10.
- 3) 地盤工学会: シールド工法の調査設計から施工まで, 地盤工学・実務シリーズ, 1997.2.
- 4) 平出亨, 福島昭男: ホゾ付きセグメントの性能確認実験, トンネルと地下, pp.21-32, Vol.25, No.10, 1994.10.
- 5) 花見和則, 川村祥二, 原園誠, 木村定雄: FRP-Key継手の開発(1), 土木学会第53回年次学術講演会, III-B157, pp.314-315, 1998.10.
- 6) 川村祥二, 花見和則, 吉成寿男, 木村定雄: FRP-Key継手の開発(2), 土木学会第53回年次学術講演会, III-B158, pp.316-317, 1998.10.
- 7) 中島秀夫, 木村定雄, 花見和則, 川村祥二: FRP-Key継手の開発(3), 土木学会第53回年次学術講演会, III-B159, pp.318-319, 1998.10.
- 8) (社)強化プラスチック協会: FRP用語解説, p.186, 1983.2.
- 9) (社)強化プラスチック協会: FRP構造設計便覧, 技報堂, pp.47-54, 1994.9.
- 10) 日本工業規格: JIS K 6911 『熱硬化プラスチック一般試験方法』
- 11) Leonhardt, F. and Reimann, H.: Betongelenke, DER BAU-INGENIEUR, Vol.41, pp.49-56, 1966.
- 12) 西岡巖, 松浦一之, 金子研一, 杉藤哲也: CONEX SYSTEMのセグメント設計手法について, 土木学会第50回年次学術講演会, III-619, pp.1238-1239, 1995.9.
- 13) 林光俊, 斎藤正幸, 小泉淳: ガス導管シールドトンネル用セグメントの力学実験と解析について, 土

- 木学会論文集, No.535, III-34, pp.43-56, 1996.3.
- 14) 村上 博智, 小泉 淳: シールドセグメントリングの耐荷機構について, 土木学会論文報告集, No.272, pp.103-115, 1978.4.
- 15) 村上 博智, 小泉 淳: シールド工用セグメントのセグメント継手の挙動について, 土木学会論文報告集, No.296, pp.73-86, 1980.4.
- 16) 土木学会: 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー第 88 号, pp.4-5, 1996.9.
- (1998. 6. 8 受付)

MATERIAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE FRP-KEY JOINT FOR SHIELD TUNNEL SEGMENTS

Kazunori HANAMI, Sadao KIMURA and Atsushi KOIZUMI

The authors developed a new type joint of shield tunnel segment suitable for highly stable ground. Called "FRP-Key" the new joints consist of FRP tongues partially embedded in the surface of the circumferential joint and the longitudinal joint, and they are fitted with the groove cut on the opposite surfaces. The FRP-Key joint ensures transmission of shear forces and controls the positioning of segments during assembly. This reduces the time required for segment assembly in situ and saves the manufacturing cost of concrete forms as the joint can be preinstalled in steel formwork. This paper presents the characteristics of FRP and the mechanical characteristics of the FRP-Key joint obtained from various tests, and describes the method of designing segments with FRP-Key joint.