

論文 テーパー型定着体を用いたあと施工アンカーの引抜き抵抗機構

平林 雅也*¹・小林 薫*²・鈴木 雄大*³

要旨: あと施工アンカー工法は、コンクリート構造物の補強工事や付帯設備の取り付けなどで、多く用いられている。接着系あと施工アンカーの高耐力化、信頼性向上を目的に、アンカー筋先端にテーパ型先端定着体を設ける工法を考案した。テーパ型先端定着体のアンカーを FEM 解析により表現することで、テーパ型先端定着体や充填材、母材コンクリートに生じる力学的挙動を把握し、実験により変位・荷重の関係と比較した。これにより、引抜き抵抗機構を明らかにした上で、テーパ型先端定着体の引抜き抵抗力の設計式を提案した。

キーワード: 接着系あと施工アンカー, 先端定着, 付着強度

1. はじめに

あと施工アンカー工法は、コンクリート構造物の補強工事や付帯設備の取り付けなどで多く用いられている。接着系あと施工アンカー工法¹⁾は、母材となるコンクリートに削孔を行い、カプセル方式あるいは注入方式で、アンカー筋周辺部にモルタルなどを充填し、母材コンクリートとの一体化を行う。アンカー筋周辺に充填したモルタル等が固結することで、アンカー筋の引抜き耐力が発揮される。

接着系あと施工アンカー筋の引抜き耐力は、あと施工アンカーを構成している各要素の付着強度に依存している。例えば、母材コンクリート孔壁面と充填モルタル、アンカー筋と充填モルタルとの接合面の二箇所において、それぞれが所定の付着強度を発現することで、アンカー筋の引抜き耐力が発揮される。

あと施工アンカー筋に所定の引抜き耐力を発揮させるためには、削孔面の状況、充填モルタルのドライアウト防止など、適切な施工管理が必要となる。仮に、管理状況が不備となった場合、所定のアンカー筋耐力が発揮できず、モルタルを充填したアンカー筋周辺全体が引抜けてしまう場合もある。このような挙動の発生は、あと施工アンカーの機能を損ねるとともに工法の信頼性を低下させる要因のひとつになっているものと思われる。

そこで、あと施工アンカー工法の高耐力化を図り、かつ信頼性を確かのものとする方法として、付着に依存した定着機構から、先端定着体を用いた先端定着機構に着目した。

先端定着機構のアイデアとしては、くさび形状のテーパを有する先端定着体をアンカー筋先端部に配置する構造を考えた。アンカー筋と充填モルタルとの付着を無くすることで、アンカー筋に作用する引張力をテーパ型先端定着体に直接作用することで、定着体のテーパ

部分からの支圧力を孔壁部に与えることができる。このようにアンカー筋の引張力を充填モルタル部への支圧力に変換することで、充填モルタルや母材コンクリート強度を有効活用することができ、同時に孔壁部との摩擦力も利用可能で、低強度コンクリートや孔壁面の状況に作用されずに、安定したアンカー筋耐力が発揮されるものと考えられる。

本報告は、テーパ型定着体を用いた接着系あと施工アンカー工法定着部の基礎的性状を明らかにすることを目的に実験および FEM 解析により検討を行ない、テーパ型先端定着体の引抜き抵抗力を求めるための設計式を提案した。

なお、本研究が対象としている先端定着体と類似している既往の研究としては、金属拡張アンカーボルトを用いた引抜き抵抗機構に関する研究^{2) 3)}、削孔先端部を円錐状に穿孔するアンダーカットを有するアンカーボルトの性状に関する研究⁴⁾などがある。既往の研究では、コーン状の破壊となるような実験が行われているが、本研究では孔壁面で充填モルタル部を押し広げながら滑る破壊形状に着目して実験および FEM 解析を行っている。

2. テーパー型先端定着体を用いた接着系あと施工アンカー工法の概要

図-1 に、テーパ型先端定着体を用いた接着系あと施工アンカー工法の概要を示す。アンカー筋径の 10 倍程度定着された通常の接着系あと施工アンカー工法では、充填モルタルとアンカー筋との付着が働くので、アンカー筋に引張力が作用するとコンクリート表面付近から徐々に付着劣化が生じ、同時にアンカー筋の定着長も短くなる。破壊形態もアンカー筋と円錐状のコンクリート塊が抜け出すコーン破壊が一般的に起こる。

*1 東日本旅客鉄道 (株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 研究員 (正会員)
 *2 東日本旅客鉄道 (株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 主幹研究員 博(工) (正会員)
 *3 東日本旅客鉄道 (株) 東京工事事務所 品川工事区 助役 (正会員)

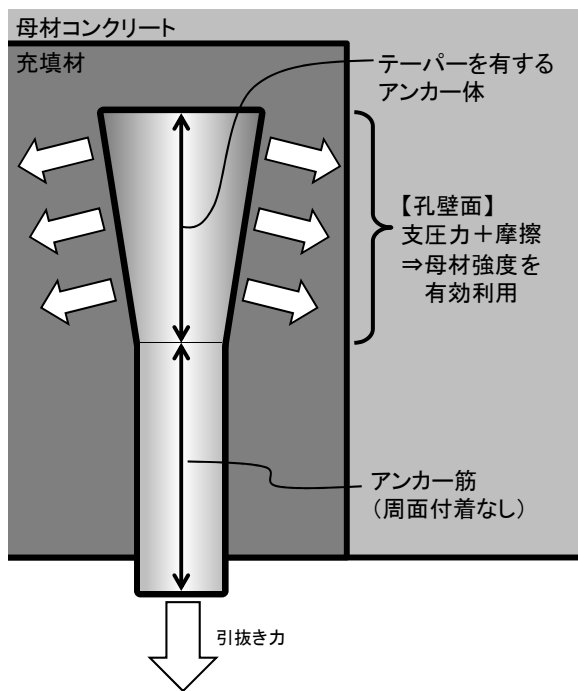


図-1 テーパー型先端定着体を有する接着系あと施工アンカー工法の概要

本提案工法では、アンカー筋に作用した引張力を直接充填モルタルに伝達させるのではなく、アンカー筋の周面の付着をグリース等で切ること、引張力に作用した引張力がテーパ型先端定着体を介してモルタルに伝達する。さらにテーパにより引張力が充填材や母材コンクリートに斜めに伝達するため、付着強度や引張強度に依存した耐荷機構から、充填モルタルや母材コンクリートの圧縮強度に依存した耐荷機構に変化させることを意図し、孔壁の状況や母材コンクリート強度が低い場合でも安定したあと施工アンカー工法になるものと考えた。

3. 実験概要

3.1 試験体概要

テーパ型先端定着体の定着効果を確認するため、模倣試験体による載荷実験を行った。実験ではテーパ型定着体の角度と充填モルタルおよび母材コンクリートの強度に着目した。

試験体は図-2 および写真-1 に示すテーパ型先端定着体を有するアンカーで、図-3 に示す配置として表-1 に示すパラメータで3種類とした。ここでは定着体の効

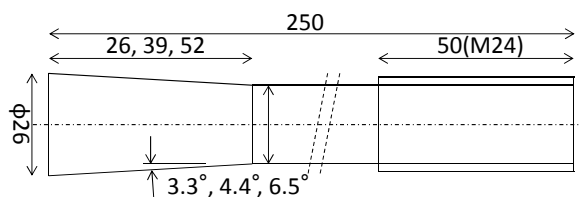


図-2 テーパー型先端定着体の寸法

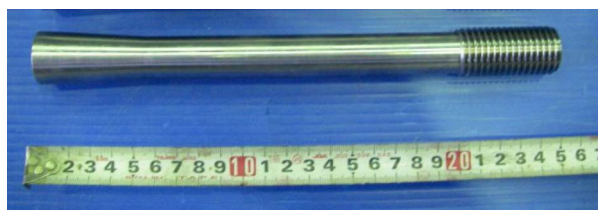


写真-1 テーパー型先端定着体の形状

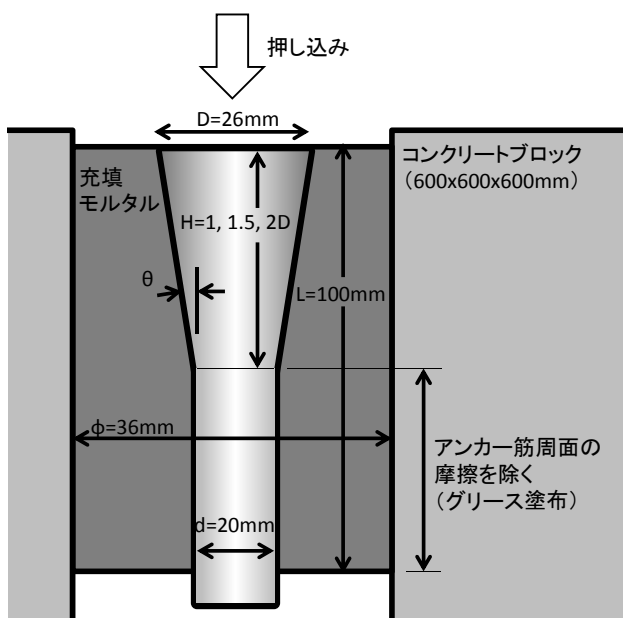


図-3 試験体概要

果確認を意図しているため、それぞれの種類で1体ずつを作成した。あらかじめ製作したコンクリートブロックに $\phi 36\text{mm}$ の貫通孔を設け、アンカーが所定の位置となるように水充填モルタルを注入した。定着体の応力の影響範囲以上とするため、充填長さは100mmとした。モルタルはアンカーの施工向きによらないモルタルポンプで注入できる流動性を確保し、1袋10kgのプレミックスタイプのモルタルに水1.9kgを配合とした。

試験体に用いたコンクリートブロックは、600mm×

表-1 強度確認試験体

試験体No.	テーパ形状				試験項目	コンクリートブロック		充填モルタル		穿孔径 ϕ (mm)	定着長 (mm)	最大荷重 (kN)
	底部径D (mm)	首部径d (mm)	高さH (mm)	角度 θ (°)		寸法 (mm)	強度 (N/mm ²)	強度 (N/mm ²)				
1/1.0	26	20	26	6.5	挿込試験	□600	31.0	65.7	36	100	68.8	
1/1.5			39	4.4			30.9					86.6
1/2.0			52	3.3			28.6					

600mm×600mm の寸法とし、表-1 に示す配合とした。アンカーの押し込みによるブロックの割裂破壊を防止するために、φ180mm のスパイラル筋を貫通孔の周りに配置し、ブロック外周を鉄筋で拘束した。

貫通孔は、孔壁に付着した削りかすを除去した上で、モルタルのドライアウト防止するため、モルタル充填の前に母材コンクリートに水を刷毛塗りした。

充填モルタルの長さはテーパの広い面（以下、底部）を天端として狭い面（以下、首部）へ向けて 100mm に統一し、母材コンクリートとモルタルとの付着長さが一定となるようにした。

アンカーの形状はテーパ角度の影響を確認するためにテーパ形状を 3 種類とした。テーパの形状は円錐の先端を切り落とした形状となっており、底部の直径 D を 26mm、首部の直径 d を 20mm とし、テーパ高さ H をパラメータとして、テーパ角度 D/H を 1/1.0、1/1.5、1/2.0 とした。テーパ形状による荷重伝達の効果を確認するため円柱状になっているアンカー筋にグリースを塗布し、摩擦の効果を除くようにした。

表-2 コンクリート配合

設計強度 (N/mm ²)	W/C (%)	単位重量(kg/m ³)				空気量 (%)	スランプ (cm)
		水	セメント	細骨材	粗骨材		
24	50	170	340	896	960	13.5	3.4

3.2 荷重方法

テーパ型先端定着機構は、アンカーが引っ張られたときに、先端のテーパ形状がモルタルに引き込まれることで引張力を直接伝える機構となっている。定着体の強度は不明であるため、本実験では底部から首部の方向へ油圧ジャッキにより押し込むことで荷重した。

荷重方法は、テーパ型定着体の底部から 1000kN 用油圧ジャッキにより荷重を加えた。テーパ型定着体の底部から荷重を載荷する方法を採用した理由は、アンカー筋の付着を切ることを前提としているため、アンカー筋の引張力が直接テーパ型定着体に作用する機構としているからである。写真-2 に実験状況を示す。

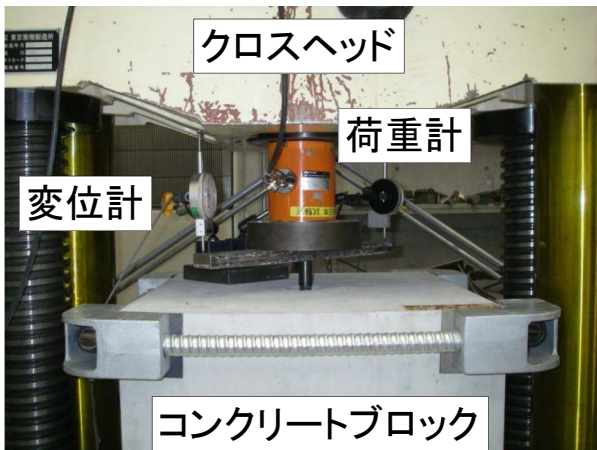


写真-2 実験状況

3.3 実験結果

表-1 に実験結果を、載荷荷重-鉛直変位の関係を図-4 に示す。塑性域初期における 5mm 程度押し込むまでの荷重においては、D/H=1/1.0 と D/H=1/1.5 で同様の値となり、D/H=1/2.0 が大きな値を示した。一方、それぞれの最大荷重を比較すると、D/H=1/1.0 で 68.8kN、D/H=1/1.5 で 86.6kN、D/H=1/2.0 で 128.2kN となり、テーパ角 θ が小さいほど最大荷重が大きくなることがわかった。これは、テーパ角 θ が小さくなるほどテーパ面と充填材の接触面が大きくなること、急な角度を支持するために大きな支圧力がテーパ面と充填材の接触面に発生することが原因だと考えられる。

実験終了後、コア削孔により試験体のアンカーから母材コンクリートまでの一部を取り出して内部の状況を確認した。写真-3 にテーパ角度 D/H=1/1.5 の場合、写真-4 にテーパ角度 D/H=1/2.0 の場合を示す。すべての試験体において、テーパ型先端定着体が充填材を押し分けながら抵抗する挙動となっている。母材コンクリートの天端が盛り上がる挙動が見られ、テーパにより押し分けられた充填材が母材コンクリートを押すために発生すると考えられる。これより充填材が押し込まれることによる放射状の圧縮応力が発生していることが言える。実験終了後の母材コンクリートの状況を写真-5 に示す。母材コンクリートには放射状のひび割れが発生しており、同心円状にコンクリートがひび割れるだけの引張応力が発生していることがわかる。スパイラル筋より内側の亀裂は 45° 程度ごとに発生しており、外周は矩形なため軸対称でない形状をしているが、中央部は軸対称に同心円状の引張が均一に発生していることが言える。

4.FEM 解析

4.1 解析モデル概要

テーパ型先端定着体アンカーの耐荷挙動を明確にするために、FEM 解析により検討を行った。

解析モデルは図-5 に示すような形状をしており、スバ

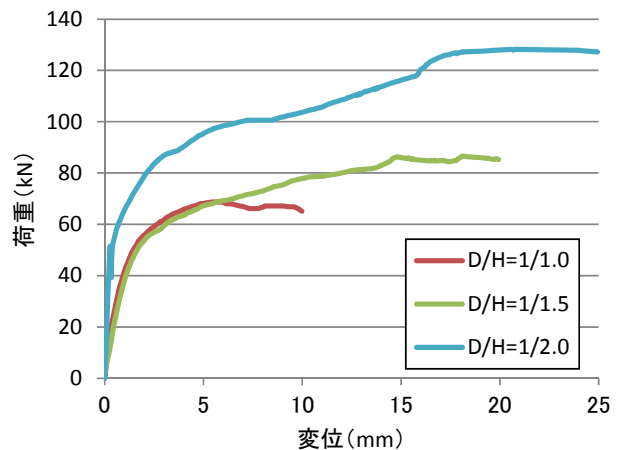


図-4 荷重-変位曲線

イラル筋およびスパイラル筋より内側の母材コンクリート、充填材、アンカーをモデル化し、アンカーを押し込む方向へ強制変位を与えた。スパイラル筋より内側で亀裂が45°程度ごとに発生していたことより、1ブロックを45°となる1/8分割と考え、安全側を考慮して2ブロック分の90°となる1/4分割の対称性モデルにより解析を行った。スパイラル筋より内側をモデル化したのは、スパイラル筋による拘束を再現できる範囲とすることで、アンカー近傍の挙動が確認できると考えたためである。スパイラル筋は内側の母材コンクリートやモルタルを拘束できればいいので、均一化して円筒状のモデルとなっている。モデルの静止摩擦係数、材料特性は、治具、テーパ型定着体、アンカー筋およびスパイラル筋において材質を鋼として、弾性係数210000N/mm²の弾性体とし、その他において表-3の通りとした。



写真-3 載荷後の充填材内部 (H/D=1/1.5)



写真-4 載荷後の充填材内部 (H/D=2.0)



写真-5 コンクリートブロックひび割れ状況

母材コンクリートの材料特性は、最大圧縮応力を要素試験結果より D/H=1.0 で 31.0N/mm²、D/H=1/1.5 で 30.9N/mm²、D/H=1/2.0 で 28.6kN/mm² とし、充填材のモルタルの材料特性は、65.7kN/mm² とした。コンクリートとモルタルは、バイリニアの弾塑性体とし、塑性後は水平となる応力-ひずみ関係を設定している。

実験において押し込み時にアンカーがモルタルを押し広げながら鉛直変位が進む挙動となっていることから、テーパ面と充填材の間およびアンカー筋と充填材の間に接触要素を用いた。静的載荷であるため、接触面には静止摩擦力が発生するようにしており、グリースにより摩擦を除いているアンカー筋は摩擦係数 $\mu=0$ とし、テーパ面は摩擦係数が不明であるため、 $\mu=0\sim 1$ でパラメトリックに解析した。

実験において押し込み時にアンカーがモルタルを押し広げながら鉛直変位が進む挙動となっていることから、テーパ面と充填材の間およびアンカー筋と充填材の間に接触要素を用いた。静的載荷であるため、接触面には静止摩擦力が発生するようにしており、グリースにより摩擦を除いているアンカー筋は摩擦係数 $\mu=0$ とし、テーパ面は摩擦係数が不明であるため、 $\mu=0\sim 1$ でパラメトリックに解析した。

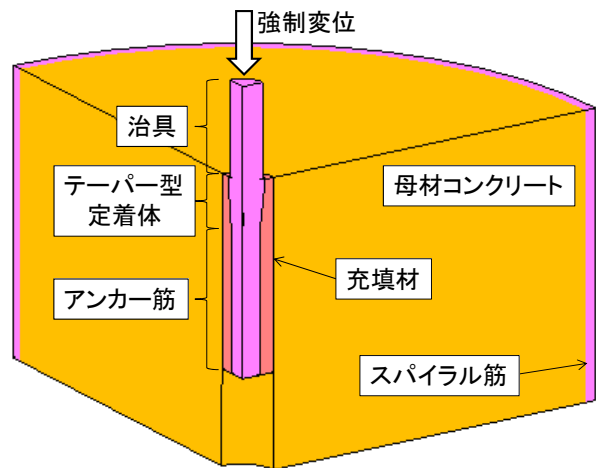


図-5 解析モデル

表-3 解析条件

モデルNo.	静止摩擦係数 μ		充填材				母材コンクリート			
	テーパ面 充填材境界	アンカー筋 充填材境界	材質	材料特性	弾性係数 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	材質	材料特性	弾性係数 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)
D/H=1/1.0	0.00	0.00	モルタル	弾塑性体	25000	65.7	コンクリート	弾塑性体	25000	31.0
D/H=1/1.5	~	0.00								30.9
D/H=1/2.0	1.00	0.00								28.6

表-4 解析条件 (テーパ角θのみ変化)

モデルNo.	静止摩擦係数 μ		充填材				母材コンクリート			
	テーパ面 充填材境界	アンカー筋 充填材境界	材質	材料特性	弾性係数 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	材質	材料特性	弾性係数 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)
D/H=1/1.0, $\mu=0.20$	0.20	0.00	モルタル	弾塑性体	25000	60.0	コンクリート	弾塑性体	25000	30.0
D/H=1/1.5, $\mu=0.20$										
D/H=1/2.0, $\mu=0.20$										

さらに実験時の材料や施工など試験結果がばらつくため、テーパ角θのみをパラメータとした荷重-変位の関係を解析的に検討した。治具、テーパ型定着体、アンカー筋およびスパイラル筋の材料特性は変更せず、その他の材料特性と静止摩擦係数は表-4 に示すようにコンクリート強度、モルタル強度、静止摩擦係数を一定とし、テーパ角θをD/Hを1/1.0、1/1.5、1/2.0の3種類に変化させた。

4.2 解析結果

実験および解析における、アンカーの底部の鉛直反力と鉛直変位の関係を図-6~8 に示す。

テーパ面の摩擦係数が $\mu=0$ のときは、D/Hに係らず実験結果に対して解析結果の勾配および荷重が低くなることわかった。また、D/H=1/1.0に $\mu=0.20$ 、D/H=1/1.5に $\mu=0.17$ 、D/H=1/2.0に $\mu=0.23$ を設定することで、実験と解析の荷重-変位の関係が概ね一致することがわかった。そのため、アンカーの耐荷力には摩擦力が寄与していることがわかり、摩擦係数 μ をパラメータとした解析モデルの適用性を確認できた。

解析結果より、テーパ面の摩擦係数 μ は最少で0.17であったと推定したが、黒皮をグラインダーで除去した鋼板とモルタル (圧縮強度 64.4N/mm²) との摩擦力を測定した実験⁵⁾の静止摩擦係数0.26より小さくなっている。これはテーパ面のほうがグラインダー処理より平滑に仕上がっているために、滑りやすかったためだと考えられる。

テーパ角θのみをパラメータとした解析結果を図-9 に示す。この結果より、D/H=1/2.0で最大となり、テーパ角度が小さくなるほど荷重は大きくなった。勾配がなだらかになる押し込み長2mm~10mmの区間において、D/H=1/1.0に対するD/H=1/2.0の反力は最大1.3倍となった。このため、底部と首部の径が決まっている場合、テーパ高さHを長くし、テーパ角θを小さくすることで高い耐荷力となることが言える。また、テーパ角θを変化させても弾性域の勾配に大きな差が見られなかった。実験では弾性域の勾配に差が見られたが、実験における材料特性のばらつきや、試験器具の遊びが原因だと考えられる。

これまでの実験および解析結果より、テーパ型先端

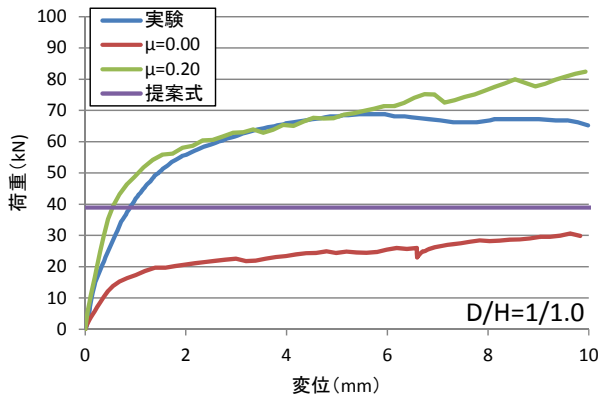


図-6 荷重-変位 (D/H=1/1.0)

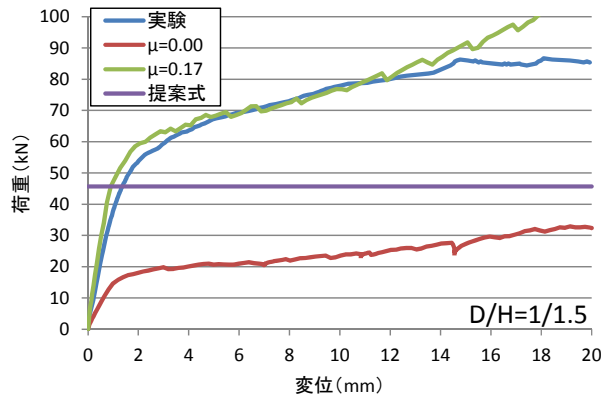


図-7 荷重-変位 (D/H=1/1.5)

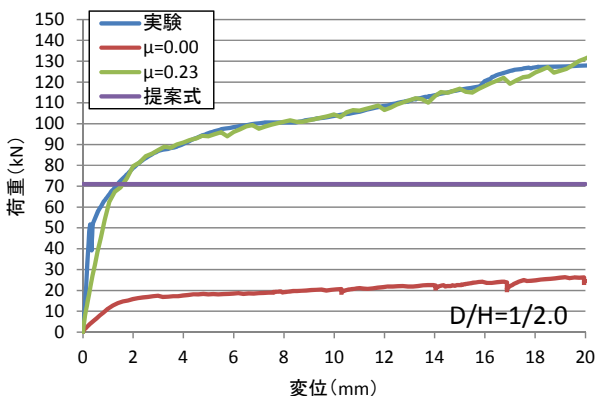


図-8 荷重-変位 (D/H=1/2.0)

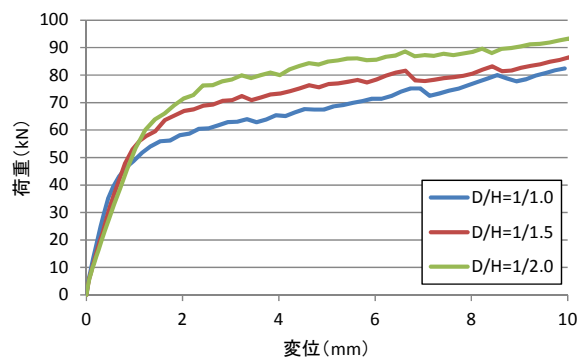


図-9 荷重-変位 (テーパ角θのみを変化)

定着体の耐荷モデルを検討した。テーパ部を取り出すと図-10に示すような力のつり合いとなる。

ここで、 F は引抜き力、 R はテーパ面直角方向の力、 μ は静止摩擦係数、 θ はテーパ角である。引抜き方向のつり合いは式(1)となる。

$$F = R \sin \theta + \mu R \cos \theta \quad \text{図-10 力のつり合い}$$

(1)

充填モルタルがテーパ面接する全面で塑性変形し、テーパ面の応力 σ が均一になったと仮定すると、 R は式(2)となる。

$$R = \sigma \times A \quad (2)$$

ここで、 A はテーパの面積である。式(1)と式(2)よりテーパ型先端定着体の引抜き力は式(3)となる。

$$F = \sigma \times A \times (\sin \theta + \mu \cos \theta) \quad (3)$$

この提案式に実験で得た充填材のモルタルの降伏応力 65.7N/mm^2 と、解析により求めた D/H ごとの静止摩擦係数 μ を代入すると、 R は $D/H=1/1.0$ で $\mu=0.20$ として 38.9N 、 $D/H=1/1.5$ で $\mu=0.17$ として 45.7N 、 $D/H=1/2.0$ で $\mu=0.23$ として 71.0N となる。これら耐荷力を図-6~8に入れると、それぞれ実験値の荷重-変位において、弾性域の最大引抜き力を示す変位概ね一致した。

提案式は、テーパ面に接するモルタルが全面降伏していることを表す。全面降伏後は、モルタル塑性化範囲母材コンクリートの方向に拡大していくと想定されるため、塑性域の拡大に伴い、モルタルの抵抗力が減少し、荷重-変位の勾配が緩やかになると考えられる。図-11は $D/H=1/2.0$ の解析モデルにおいて、提案式より算出された反力となったときの、充填材および母材コンクリートの最小主応力分布を示している。塑性範囲と表記した範囲の最小主応力がモルタルの降伏応力に達しており、その範囲はテーパと接するほぼ全面であることがわかる。

以上より、この提案式はテーパ型先端定着体における荷重-変位曲線の弾性域での最大引抜き力を評価する式とする。

図-11において、モルタルと接する母材コンクリートまで応力が発生しており、テーパの効果により支圧力が発生していることが確認できる。

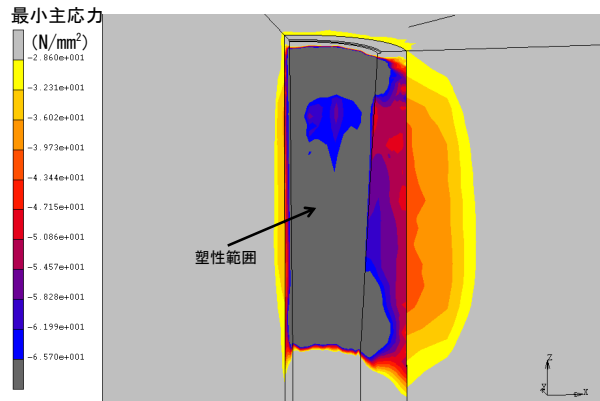
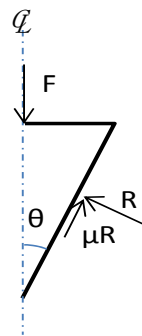


図-11 充填材、母材コンクリートの最小主応力分布

5.まとめ

本検討結果を以下にまとめる。

- (1) 実験の範囲内で、テーパ型先端定着体による破壊形状は、充填材を押し広げながら定着体が抜けていく挙動を示すことが分かった。
- (2) テーパ角 θ が同じ場合、テーパ面に摩擦力が生じることで、耐荷力が上昇することがわかった。
- (3) 実験および解析より、テーパ型先端定着体の底部と首部が同じ寸法であるとき、テーパ角 θ が小さいほど、大きな耐荷力となった。
- (4) テーパ部の鉛直方向の力のつり合いと、テーパ面に接する充填材の圧縮強度より、テーパ型先端定着体の耐荷力の計算式を提案した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説,2010.11
- 2) 上村克郎, 小西敏正, 橋高義典, 関和彦：メカニカルアンカーボルトの引抜き耐力に及ぼすコンクリート母材の影響, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp405-408, 1986
- 3) 細川洋治, 青山博之, 小谷俊介, 石原益夫：耐震補強金属系アンカーの引抜き抵抗機構, コンクリート工学年次論文報告集, 10-3, pp63-68, 1988
- 4) 百瀬光広, 丸山久一, 清水敬二, 橋本親典：アンダーカット型アンカーボルトの性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 12-2, pp801-806, 1990
- 5) 松沢晃一, 小澤潤治, 渡邊高朗：鋼材とセメント系材料の摩擦性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol303, No.3, pp1141-1146, 2008