

論文 テーパ型ナットを PC 鋼棒定着体としたあと施工アンカー工法の定着体形状に関する検討

伊藤 隼人*1・菅野 貴浩*2・小林 寿子*3

要旨：PC 鋼棒先端にテーパを有するナットを取り付けて先端定着体とする工法について、現行の先端定着体形状および工法では、高引張力状態で、先端定着体上部から充填モルタルにリング状のクラックが発生し、微小な荷重低下が発生することがある。高引張力状態での施工品質の安定と信頼性の向上を目的とし、先端定着体の最適な形状を検討するため、実験・解析を行った。本検討から、テーパ角を小さく、テーパ型先端定着体の高さを高くすることで、大きな耐力を発揮できる可能性と、応力の負担割合を考慮する必要があることを確認した。

キーワード：あと施工アンカー、先端定着、PC 鋼棒

1. はじめに

あと施工アンカー工法は、既存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接着剤を充填し、硬化することで、アンカー筋と母材とを物理的に固着し一体化させるアンカー工法である。

接着系あと施工アンカー工法の引張耐力は、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する。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の境界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、接着系あと施工アンカー工法の引張耐力が発揮される。

接着系あと施工アンカー工法で所定の引張耐力を発揮するためには、削孔面の状況、充填モルタルのドライアウト防止など、適切な施工管理も必要となる。仮に、管理状況に不備があった場合、接着系あと施工アンカーとして、所定の引張耐力を発揮できず、充填モルタルを含んだアンカー筋周辺全体が引き抜けてしまう場合もある。このような挙動の発生は、接着系あと施工アンカー工法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になるものと思われる。

そこで、小林ら²⁾は、あと施工アンカー工法の高耐力化、信頼性向上を目的に、アンカー筋に PC 鋼棒を使用し、PC 鋼棒先端にテーパ型に加工したナットを取り付けて先端定着体とする工法を考案した。本工法について、引張耐力確認試験を実施すると、定着長を PC 鋼棒の直径の 20 倍とすることで、あと施工アンカーとして PC 鋼棒が破断する破壊形態となることが確認されてい

る²⁾。

上記構造について、載荷途中に金属音に近い硬い音（以下、「クラック音」という）が発生し、PC 鋼棒の最大引張荷重の 0.3~10%程度の微小な荷重低下を生じる場合がある。載荷を継続すると再び耐力を発揮するが、施工品質の安定と信頼性の向上の観点から発生させたくない現象である。図-1 に上記の荷重低下が発生した引抜試験後の試験体をコア削孔し、取り出したテーパナット付近のコンクリートコアを示す。内部を観察すると、テーパ型ナットの最小径部付近（以下、「肩部」と呼ぶ。）から円周状のクラックが見られる。これは、肩部に応力が集中し、充填モルタルの微破壊が発生しているためと考えられる。

そこで、本検討では、応力集中による充填モルタルの微破壊を避けるため、テーパ型ナットの形状に着目して引抜試験と 3 次元 FEM 解析を実施したので報告する。

2. テーパ型先端定着体を有するあと施工アンカー工法の概要

図-2 は、テーパ型のナットを付着の小さい丸鋼のアンカー筋先端に螺合し、あと施工アンカーに用いた場合に想定した耐荷機構の略図を示したものである。高引張耐力化を図るためアンカー筋は、PC 鋼棒の使用を想定している。テーパ型先端定着体の形状を写真-1 に、テーパ型先端定着体を PC 鋼棒先端にセットした状況を写真-2 に、それぞれ示す。

丸鋼形状の PC 鋼棒は、一般的に、接着系あと施工アンカーでの使用は認められていない¹⁾。しかしながら、アンカー筋先端の定着強度が十分ならば、高強度で丸鋼形状の PC 鋼棒をアンカー筋に用いるあと施工アンカー

*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 上席研究員 博(工)(正会員)

*3 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 (正会員)

工法を適用できる可能性がある。本工法では、母材コンクリートを削孔し、PC 鋼棒先端にテーパ型先端定着体を取付けたアンカー筋を削孔内に挿入後、モルタルを充填する。充填モルタルが固結することで、アンカー筋に引張抵抗力が発揮される。

丸鋼形状の PC 鋼棒は、充填モルタルとの付着力が異形鋼棒より低下すると考えられるため、アンカー筋に引張力が作用すると、大部分がアンカー筋の先端定着部に作用することとなる。テーパ型先端定着体に引張力が作用すると、先端定着体のテーパ面から充填モルタルに支圧応力が作用し、母材コンクリートの孔壁部分へも伝達される。母材コンクリート孔壁面に伝達された支圧応力は、充填モルタルと母材コンクリート孔壁面に摩擦力を励起させる。また、先端定着体近傍以外の箇所では、充填モルタルの付着力が作用する。この両者の引張抵抗機構から、高強度の PC 鋼棒を用いても安定した引張耐力を発揮するあと施工アンカーとして機能できると考えた。

本検討工法では、接着系あと施工アンカー工法のように、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、テーパ型先端定着体を介して伝達することで、充填モルタルの付着強度や母材コンクリートの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狙ったものである。

3. 引抜試験

テーパ型先端定着体を PC 鋼棒先端に取り付けたアンカー筋を用いたあと施工アンカー工法について、最適な先端定着体形状を検討するため、コンクリートブロックにテーパ型先端定着体を有する PC 鋼棒をアンカー筋としたあと施工アンカー工法を施工し、先端定着体形状をパラメータとして引抜試験を行い、荷重変位関係の確認及び、載荷中の挙動を確認した。本検討で行った試験概要を以下に示す。

3.1 試験概要

図-3 にテーパ型先端定着体形状寸法、図-4 に引抜試験体セット状況、写真-3 に引抜試験状況、表-1 に引抜試験体に用いた材料強度試験結果を示す。テーパ型先端定着体は、S45C の生材を用いた。ここで、肩部は 1~3 mm 程度、底部は 20~30 mm 程度、高さは 55~60 mm 程度、角度は 1.4~3.6° 程度の範囲内であり、Type1 は、底部の径を小、肩部の面積を小、テーパ角度 θ を中とし、テーパ部の側面積は小さくなる。Type2 は、底部の径を小、肩部の面積を大、テーパ角度 θ は小とし、テーパ部の側面積は、大きくなる。Type3 は、底部の径を大、肩部の面積を大、テーパ角度 θ は大とし、テーパ部の側面

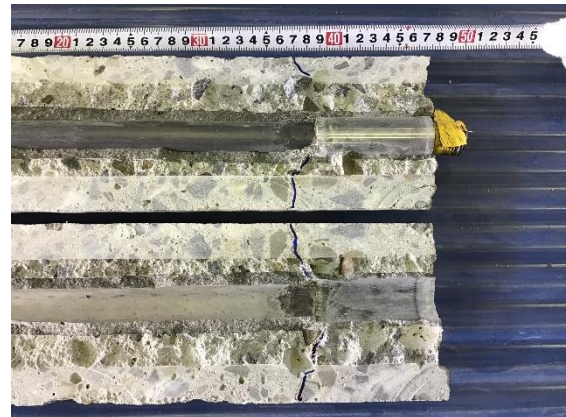


図-1 引抜試験後の充填材内部状況

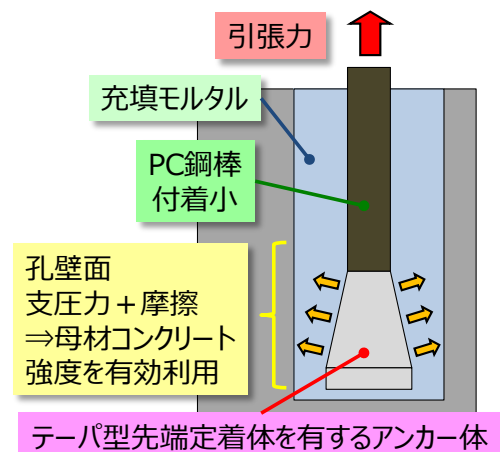


図-2 テーパ型先端定着体先端定着体を有するあと施工アンカー工法の耐荷機構の略図

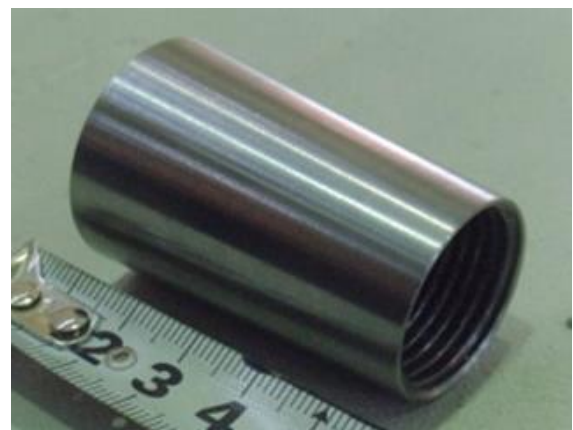


写真-1 テーパ型ナットの形状



写真-2 テーパ型先端定着体を PC 鋼棒にセットした状態

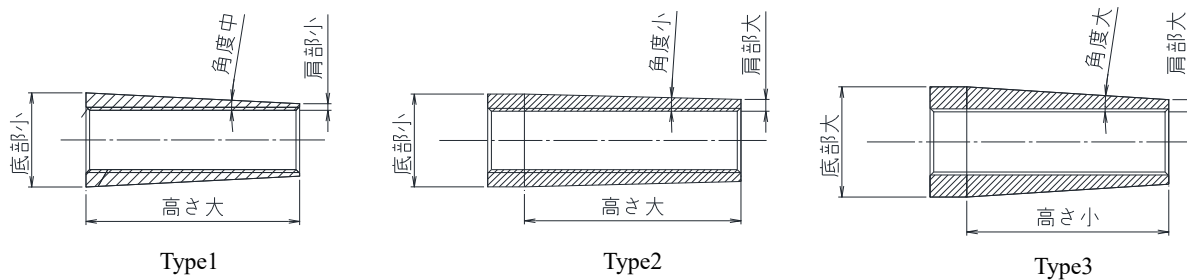


図-3 テーパ型先端定着体形状イメージ

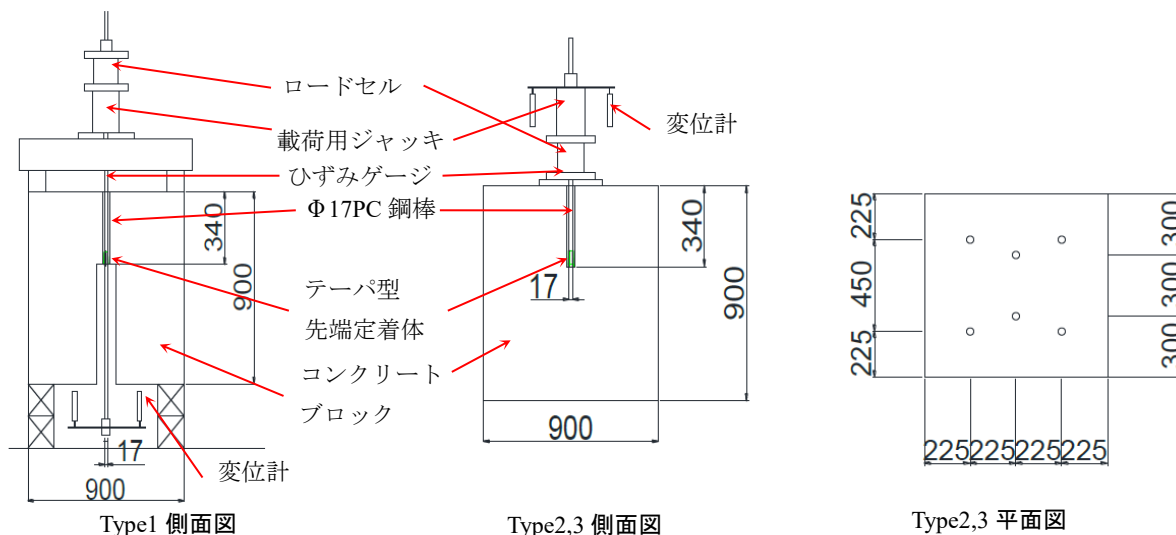


図-4 引張耐力確認試験セット状況

積は大きくなる。検討に用いた PC 鋼棒はφ17で、C種1号 (SBPR1080/1230) の規格のものを用いた。定着長は、PC 鋼棒直径の 20 倍とした。この値は、充填モルタルとコンクリート孔壁面の付着強度から定めた²⁾。

引張耐力確認試験に用いたコンクリートブロック寸法は、900mm×900mm×900mmとした。なお、Type2, 3については、他の複数の試験を行ったため、1つのコンクリートブロックに対して6本のあと施工アンカーを施工している。また、Type1では、反対の面からもコア削孔することでコンクリートブロックの削孔を貫通させ、下部で変位を測定しているが、Type2, 3については有底とし、上部で変位を測定している。

試験体の製作は、コンクリートブロックにコアマシンで所定の位置にφ34mmの削孔を行った。次に、孔壁面に水を含ませ、充填モルタルを打設後、テーパ型先端定着体をセットしたアンカー筋を孔内に配置した。なお、コンクリートブロックは、吊り金具を取り付けた D13 筋を1周配置しているのみで、テーパ型先端定着体からコンクリートブロックまでの領域は無筋となっている。充填モルタルについては、市販のプレミックスタイプのものを使用した。荷重は、500kN用のセンターホール型の油圧ジャッキを手動の油圧ポンプを用いて加圧して、アンカー筋に引張荷重を作用させた、なお、荷重荷重は、Type1については、土木学会規準に従い、 $0.7\sigma_B$ 程

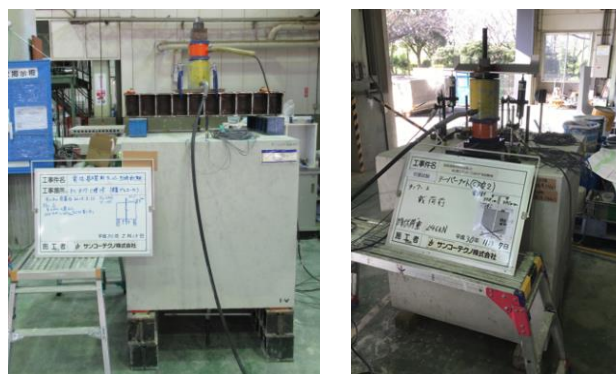


写真-3 引抜試験状況

表-1 引抜試験体の材料強度

試験体名	テーパ型先端定着体 鋼材の規格	アンカー筋 鋼材の規格	コンクリート ブロック圧縮強度 fck (N/mm ²)	充填モルタル 圧縮強度 fck (N/mm ²)
Type1	S45C (生材)	C種1号 (SBPR1080/1230)	30.0	71.5
Type2			22.8	93.3
Type3			22.8	95.4

度 (σ_B : PC 鋼棒の引張強さ)、Type2, Type3 については、0.2%永久伸びに対する荷重程度とした。荷重は Type1 は、土木学会基準 計測項目は、引張荷重と変位およびコンクリートブロック上面から 20mm 上方位置でのひずみとした。

3.2 試験結果

図-5 に引抜試験の荷重変位関係を示す。なお、変位

については、Type1 と Type2,3 とで計測位置が異なるため、Type1 は変位計の値と、アンカー筋先端からコンクリートブロック上面までの距離にひずみを乗じたものの和とし、Type2,3 は変位計の値から、変位計位置からコンクリートブロック上面までの距離にひずみを乗じたものを差し引き、コンクリートブロック上面位置で想定される変位となるよう補正を行っている。

Type1 試験体は、123kN 付近で、1 度荷重を止めたため、クリープと思われる変位の進行と荷重低下が発生している。その後、130~150kN にかけてクラック音が継続的に発生し、1kN 未満の微小な荷重低下が発生した。最大荷重 170.7kN、最大変位 3.17 mm で荷重を終了した。荷重終了後も、コンクリート上面にひび割れや剥離等は見られなかった。

Type2 試験体は、140kN 付近で最初のクラック音が発生し、176.6kN、184.7kN、212.0kN と続いた。さらに、232.1 kN でクラック音とともに 30N 程度荷重が低下したが、荷重を継続すると引抜耐力が回復し、最大荷重 249.8kN、最大変位 3.30 mm で荷重を終了した。荷重終了後も、コンクリート上面にひび割れや剥離等は見られなかった。

Type3 試験体は、72kN 付近で最初のクラック音が発生し、さらに 184kN まで微小なクラック音が発生したが、大きな荷重低下は見られなかった。最大荷重 245.9kN、最大変位 6.29 mm で荷重を終了した。荷重終了後も、コンクリート上面にひび割れや剥離等は見られなかった。

3.3 考察

100kN 程度までは、ほぼ同等の荷重変位関係を示したが、その後、充填モルタルの塑性化が進行することで、変位荷重に差異が生じる。これは、テーパ型先端定着体上部の PC 鋼棒との擦り付けのための肩部に、応力集中が発生していることによると考えられる。今回の場合、Type1 試験体が最も肩部の支圧面積が小さく、肩部接触面の充填モルタルが早く塑性化するため変位が大きくなったものと考えられる。また、それにより、充填モルタルの微破壊が進行し、クラック音が発生していると考えられる。また、Type2 と Type3 を比較すると、220kN 以上の高耐力下では Type3 のほうが変位が大きい。これは、Type3 のほうがテーパ角 θ が大きいことにより、テーパ面に作用する垂直抗力が大きく、テーパ面の応力負担の割合が大きくなることで、テーパ側面での充填モルタルの塑性化が進行する可能性を示唆している。

4. 解析

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、静的 3 次元 FEM 解析を実施した。

4.1 解析概要

図-6 に解析モデル、表-2 に材料特性を示す。コンクリートブロックは、Type1 において 900 mm×900 mm×900 mm と 600 mm×600 mm×600 mm の解析結果に差異が見られなかったため、解析効率を考慮 600 mm×600 mm×600 mm で解析を行った。その他の部材は、引抜試験を再現した対称性モデルにより解析を行った。引抜試験に対応させ、それぞれ Type1_ana、Type2_ana、Type3_ana とした。PC 鋼棒上面に z 方向の強制変位を与えることで、引抜試験を再現するものである。また、コンクリートブロック底面は x、y、z 方向に完全拘束した。メッシュ寸法については、引抜により応力の集中すると考えられる先端定着体を 1 mm、先端定着体付近の充填モルタルのメ

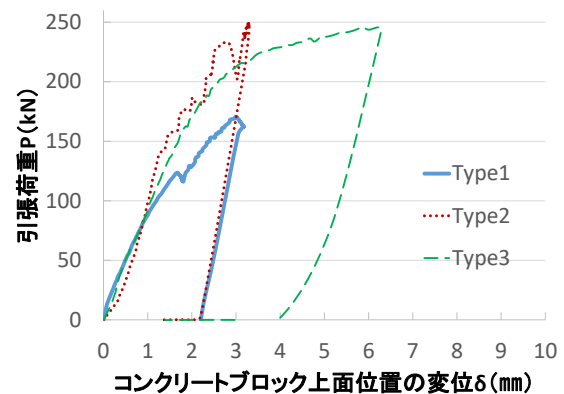


図-5 引抜試験の荷重変位関係

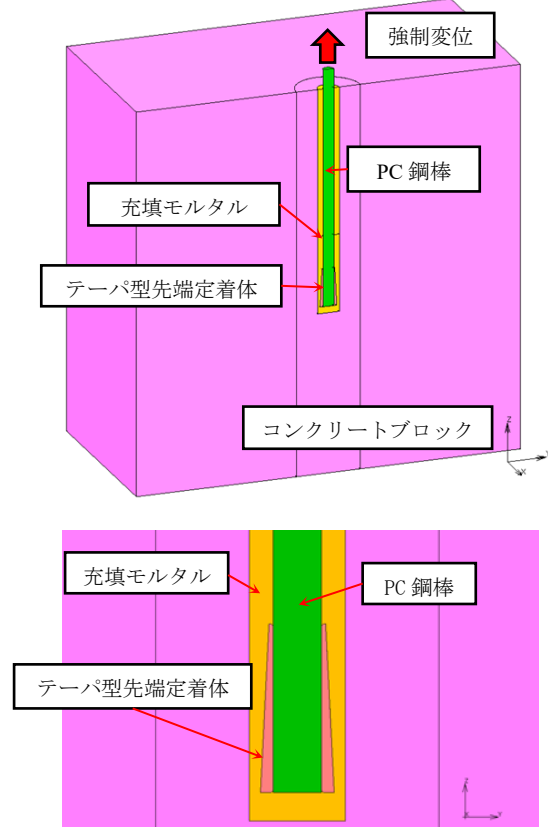


図-6 解析モデル

ッシュを 1.7 mm と細かく設定し、PC 鋼棒は、8.5 mm、コンクリートブロックは、中心から 50 mm の範囲を 11 mm、それ以外の部分を 25 mm とした。材料特性は線形弾性とし、PC 鋼棒とテーパ型先端定着体の弾性係数は 200kN/mm²、充填モルタルは、カタログ値の材齢 28 日での静弾性係数 33.2kN/mm²、コンクリートブロックは、鉄道構造物等設計標準・同解説⁴⁾に示される 30N/mm²の弾性係数である 28kN/mm²として設定した。ポアソン比は、PC 鋼棒と、テーパ型先端定着体については 0.3、充填モルタルと母材コンクリートについては 0.2 とした。また比重は PC 鋼棒とテーパ型先端定着体については 7.85、充填モルタルと母材コンクリートについては、2.3 とした。なお、それぞれの部材間に発生する摩擦係数は 0.6 として設定した。

4.2 解析結果

図-7 に、引抜試験および解析の荷重変位関係を示す。Type1_ana, Type2_ana, Type3_ana のいずれも、ほぼ同等の荷重変位関係となったが、剛性は Type2_ana, Type3_ana, Type1_ana の順で高くなった。また、50kN 程度までの初期の剛性は概ね試験結果を再現しているが、その後は、それ以降は緩やかに乖離していく。図-8 に 1 mm の強制変位を与え、荷重が約 100kN となった際の充填モルタル面に作用しているミーゼス応力分布を示す。充填モルタル面に作用しているミーゼス応力の最大値は Type1_ana で 1838N/mm²、Type2_ana で 1019N/mm²、Type3_ana で 979.4N/mm² となり、応力の集中箇所は、どのケースでもテーパ型先端定着体の肩部となっている。

図-9 にコンクリートブロック面に作用しているミーゼス応力分布を示す。コンクリート面に作用しているミーゼス応力の最大値は Type1_ana で 42.08N/mm²、Type2_ana で 44.76N/mm²、Type3_ana で 39.45N/mm² となった。テーパ型形状の先端定着体に引張力が作用し、先端定着体のテーパ面から充填モルタルに支圧応力が作用し、母材コンクリートの孔壁部分へも伝達されていることが分かる。

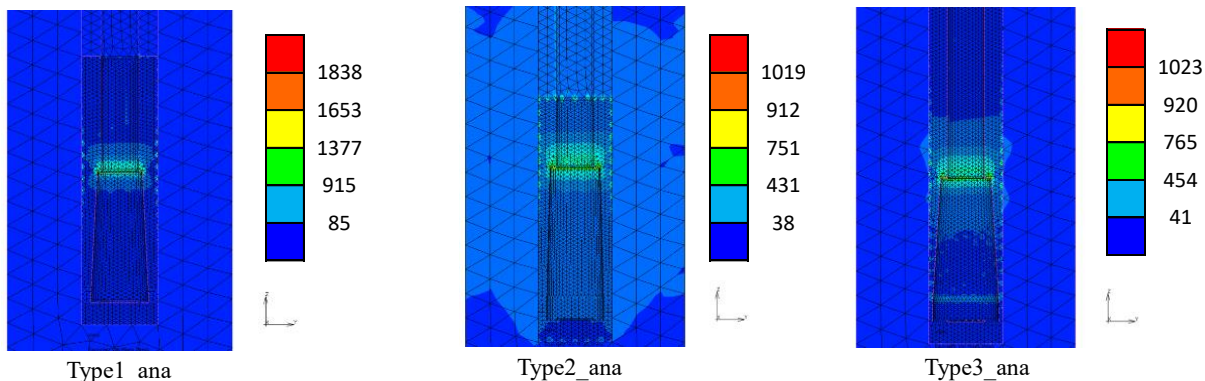


図-8 充填モルタル面のミーゼス応力分布 (N/mm²)

4.3 考察

荷重変位関係については、50kN 程度まではほぼ試験結果と概ね一致している。これは、充填モルタルあるいは母材コンクリートが塑性化するまでの線形範囲内において、解析的に再現できたためだと考えられる。それ以降については、今回は、材料特性を線形弾性として解析を行っており、引抜試験では、充填モルタルあるいはコンクリートブロックが塑性化するために乖離している。また、充填モルタル面に作用しているミーゼス応力分布は、いずれのケースもテーパ型先端定着体の肩部に応力が集中している。これは、先端定着体の肩部の面積が、テーパ型先端定着体の側面積に対して小さいこと、引抜力に対して、アンカー筋が一樣に伸びると仮定すると、テーパ型先端定着体の上部のほうが、累積する変位量が大きいため、常に応力の負担割合が大きくなることに起因すると考えられる。

平林ら⁴⁾によれば、充填モルタルがテーパに接する全面で塑性変形すると仮定すると、図-10 のような力のつり合いとなり、弾性域での最大引抜力 F は式(1)のよう

表-2 材料特性

部材	特性	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	比重
PC鋼棒	線形弾性	200.0	0.3	7.85
テーパ型先端定着体				
充填モルタル		33.2	0.2	2.3
コンクリートブロック	28.0			

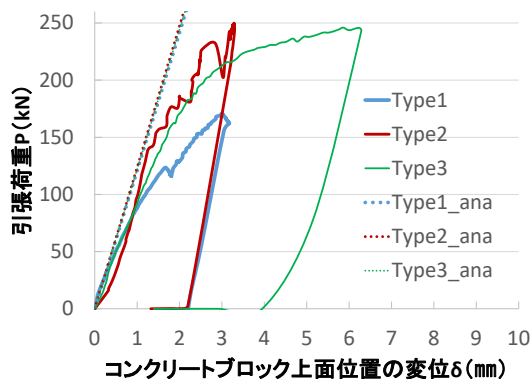


図-7 引抜試験および解析の荷重変位関係

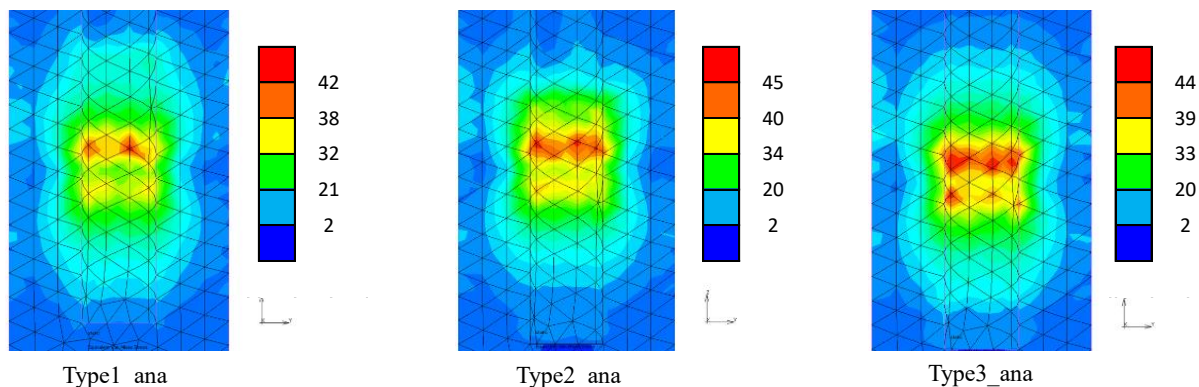


図-9 コンクリートブロックのミーゼス応力分布 (N/mm²)

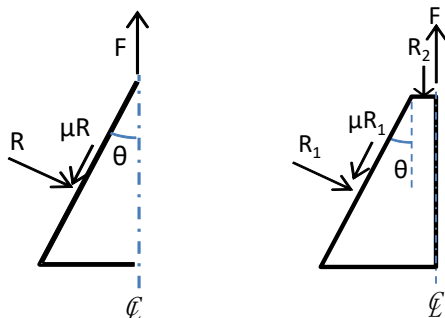


図-10 旧耐荷モデル 図-11 提案耐荷モデル

に表される。

$$F = \sigma A (\sin\theta + \mu \cos\theta) \quad (1)$$

ここで、

σ :テーパ面の応力 A :テーパ面積
 θ :テーパ角度 μ :摩擦係数

本試験で使用したテーパ型先端定着体は、加工の都合上、肩部が形成されてしまうため、図-11のような耐荷モデルとなり、式(2)のように表される。

$$F = R_1 \sin\theta + \mu R_1 \cos\theta + R_2 \quad (2)$$

ここで、

R_1 :テーパ面の垂直効力 R_2 :肩部の反力
 充填モルタルとの圧縮面が全面で塑性化すると仮定すると R_1 は式(3)、 R_2 は式(4)のようになる。

$$R_1 = \sigma A_1 \quad (3)$$

$$R_2 = \sigma A_2 \quad (4)$$

ここで、

A_1 :テーパ面の側面積 A_2 :肩部の面積
 式(2)、式(3)、式(4)より、引抜き力 F は式(5)となる。

$$F = \sigma A_1 (\sin\theta + \mu \cos\theta) + \sigma A_2 \quad (5)$$

式(5)より、削孔径により、ある程度テーパ角度 θ および肩部の面積が限定されるため、あえて θ を小さく、テーパ型先端定着体の高さ h を高くすることで、テーパ

面の側面積 A_1 、および肩部の面積 A_2 の面積を大きくなり、効率的に引抜き力を大きくすることができる。但し、肩部とテーパ面の応力負担割合を考えなければならない。式(5)によれば、 F は Type2 より、Type3 の方が高い耐力を示すはずであるが、実験および解析結果と一致しなかった。これは式(5)が全面で塑性化することを前提しており、応力の負担割合を無視しているためだと考えられる。

5. まとめ

- (1) 解析により、線形範囲については、引抜き試験結果を概ね再現できた。
- (2) 解析により、先端定着体のテーパ面から充填モルタルに支圧応力が作用し、母材コンクリートの孔壁部分へも伝達されていることが確認できた。
- (3) 提案した耐荷式より、テーパ角を小さく、テーパ型先端定着体の高さを高くすることでテーパ面積および肩部の面積が大きくなり、大きな耐荷力を発揮できると考えられるが、応力の負担割合を考慮する必要がある。

謝辞

本実験を行うにあたり、サンコーテクノ(株) 今井清史氏、藤井保也氏の協力を得ました。ここに記して、深く感謝いたします。

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) 小林薫，鈴木雄大，平林雅也，伊藤隼人：テーパ型ナットをPC鋼棒定着体としたあと施工アンカー工法に関する検討：コンクリート工学年次論文集，vol.38,No2,2016
- 3) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)，丸善，2004.4
- 4) 平林雅也，小林薫，鈴木雄大：テーパ型定着体を用いたあと施工アンカーの引抜き抵抗機構：コンクリート工学年次論文集，vol.35,No2,20