

金属系あと施工アンカーの引張試験の再現解析による破壊過程に関する一考察

国立研究開発法人 土木研究所 正会員 ○小泉悠 日下敦

1. はじめに

道路トンネル内にはジェットファン等の附属物が設置されており、それらの多くは金属系あと施工アンカー（以降、アンカーと称する）等の取付部材により覆工に固定されている。著者らは、室内での引張試験（写真-1 参照）により、アンカーの施工上の不具合や母材コンクリートのひび割れ等がアンカーの最大引張荷重に及ぼす影響について調査研究を進めてきた¹⁾。引張試験では、条件を揃えて試験を行っても最大引張荷重や最大荷重時の変位にバラつきが生じ、有意な試験結果を得るために多数の試験を行う必要があった。バラつきの要因としては、例えば、アンカーと母材コンクリート内の粗骨材の噛み合わせの影響等が考えられた。また、試験時はアンカーに作用する引張荷重と発生変位の計測を行ったが、母材コンクリート内部への計器の設置は困難で、コーン状破壊等の破壊の詳細な過程等を解明するには限界があった。以上の課題を踏まえ、有限要素解析による引張試験の再現解析を実施したので、その結果について報告する。



(a) 使用したアンカー

金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）
ねじの呼び M16、スリーブ長 60mm



(b) 引張載荷状況



(c) 母材コンクリートのコーン状破壊の一例

2. アンカーの引張試験の解析モデル

アンカーの引張試験の再現解析は、これまでも実施例があり、例えば佐藤ら²⁾は、接着系あと施工アンカーを対象に2次元の軸対称モデルを用い、接着剤部を界面要素でモデル化して再現解析を実施した。本解析事例を参考にし、著者らは、母材コンクリートのひび割れ軟化特性を考慮できる非線形解析ソフトとして midas FEA ver.3.7.0 を使用した。解析モデルを図-1 に、母材コンクリートの入力物性値を表-2 に示す。試験に使用したアンカー（写真-1 (a) 参照）は、スリーブが打ち込まれることでその径が拡がり、母材コンクリートとの間で摩擦力を得て引張荷重に抵抗する。解析モデルでは、スリーブ部をテーパ形状として拡径された状態を模擬した。それとともに、2 ステージからなる解析とし、1 ステージ目でスリーブの節点を水平方向に強制変位させて母材コンクリートで応力が発生する状況を模擬し、2 ステージ目で引張荷重を 2kN/step ずつ増加させた。非線形解析の収束計算にはニュートンラフソン法を用い、収束判定条件はエネルギーノルムが 0.001 を下回ることとし、最

写真-1 引張試験の実施状況¹⁾

表-1 母材コンクリートの入力物性値

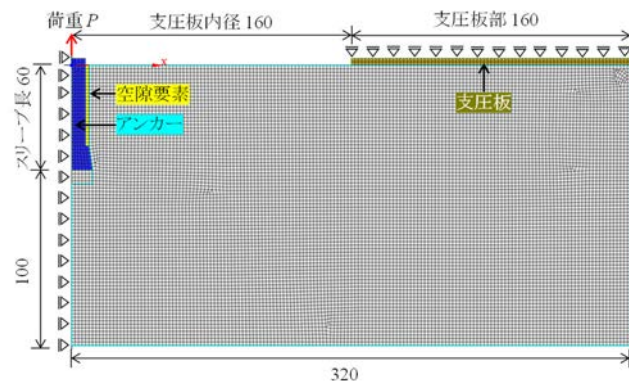


図-1 引張試験の解析モデル(単位:mm)

引張/圧縮	モデル	物性値			備考	
		項目	単位	値		
共通	共通	弾性係数	E	kN/mm ²	20.68	円柱型供試体の圧縮強度試験結果より
		ポアソン比	ν	-	0.17	
引張関数	Hordijkモデル	引張強度	F_t	N/mm ²	2.39	円柱型供試体の割裂引張試験結果より
		破壊エネルギー	G_f	N/mm	0.0744	Hordijkの提案式に限界開口幅 $w_c=160\mu\text{m}$ を代入
		要素の等価長さ	h	mm	12.38	$2 \times (3 \times L^3 / 4\pi)^{1/3}$
圧縮関数	放物線モデル	圧縮強度	F_c	N/mm ²	26.5	円柱型供試体の圧縮強度試験結果より
		破壊エネルギー	G_c	N/mm	45.3	$8.8 \times (F_c)^{0.5}$
		要素の等価長さ	h	mm	12.38	$2 \times (3 \times L^3 / 4\pi)^{1/3}$

※ L:一要素長(2mmとして設定)

キーワード トンネル, 金属系あと施工アンカー, 引張試験, 有限要素解析, コーン状破壊
連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 TEL 029-879-6791

大反復回数は50回とした。つまり本解析では、反復計算を50回繰り返してもエネルギーノルムが0.001を下回らないステップが、引張試験で破壊が生じたタイミングであると解釈した。

3. 引張試験の再現解析結果及び考察

図-1に示す空隙要素の弾性係数 E をパラメトリックに変更させ、試験と解析で最大引張荷重が最もよく整合する $E=50\text{N/mm}^2$ を同定した。この際の塑性域の分布の推移を図-2に、荷重-変位曲線を図-3に示す。引張荷重 P の増大に伴い、スリーブの周辺及びびコンクリート表面で塑性域が拡大し、 $P=18\text{kN}$ 以降でそれらの塑性域が連結したことで荷重-変位の勾配が緩やかになったと考えられる。その後、スリーブの下端から斜め上方向に塑性域が進展しており、これがコーン状破壊面に相当すると考えられる ($P=32\text{kN}$)。 $P=38\text{kN}$ ではコーン状破壊面がさらに進展するとともに、アンカー近傍ではひび割れが限界開口幅に到達して引張抵抗を失った要素が増大し、解析の最終ステップ ($P=42\text{kN}$) に至った。コーン状破壊面に相当する塑性域の角度は約 25° (図-2参照) であり、実際のコーン状破壊のコーン形状 (写真-1 (c) 参照) ともよく整合することが確認された。

さらに、過去には、同じアンカーを用いて、埋込み深さを20mm短くした引張試験、20mm長くした引張試験を実施しており、これらについても再現解析を実施した。図-4において解析値と試験値を対比したが、整合性は良好であり、検討した解析モデル及び手法が幅広く適用できることが確認された。

4. まとめ

著者らはアンカーの引張試験を多数実施してきており、本検討ではその再現解析に取り組んだ。その結果、母材コンクリートのひび割れ軟化特性を考慮した非線形解析により、引張試験結果が再現され、母材コンクリートの応力状態等まで把握できた。著者らは別途、母材コンクリートにひび割れを導入した状態での引張試験も実施しており、今後はこれらの再現解析にも取り組み、様々な条件下にあるアンカーが破壊に至る過程を解明することで、附属物の維持管理の合理化に貢献する所存である。

参考文献

- 1) 日下敦ら：トンネル内の金属系あと施工アンカーの引抜き耐力に関する基礎的実験，トンネル工学報告集，Vo.27, I-46, pp.1-5, 2017.
- 2) 佐藤あゆみら：接着系あと施工アンカーの引抜き性状に関する有限要素解析，Vol.70, No.1, pp.526-532, 2016.

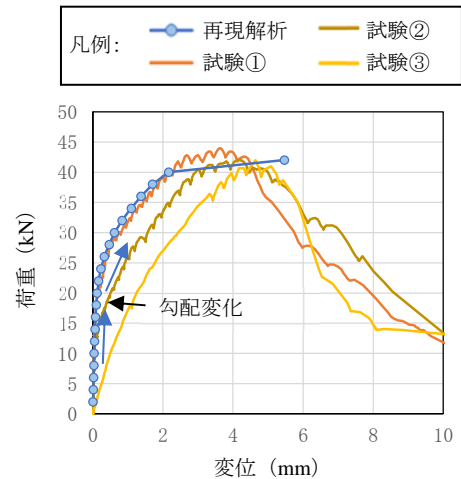


図-3 引張載荷時の荷重-変位曲線

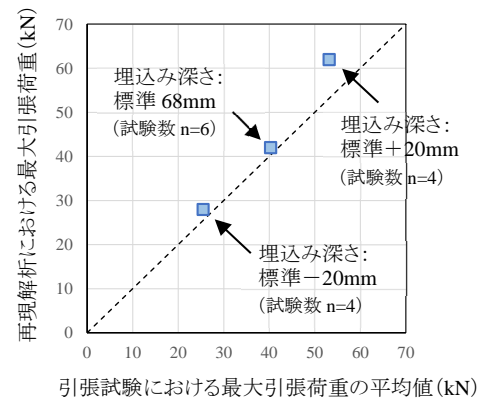


図-4 再現解析と引張試験での最大引張荷重の比較

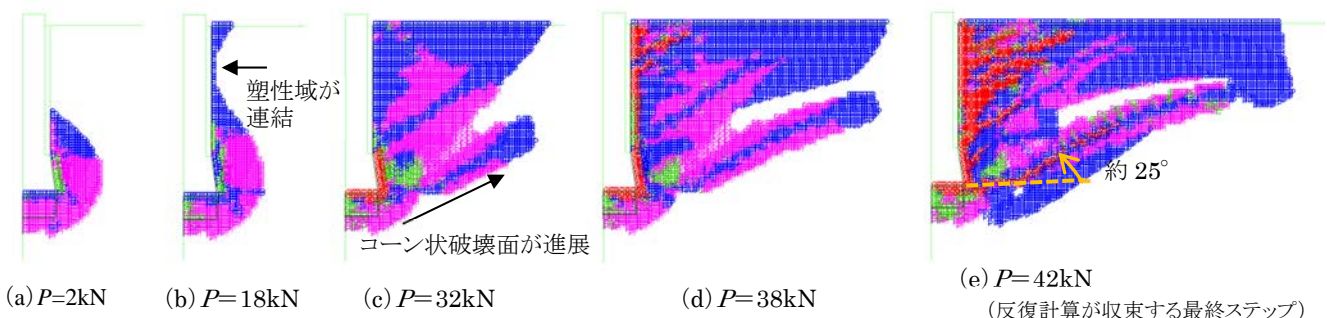


図-2 引張載荷に伴う塑性域の拡大状況

