トルク管理型あと施工アンカーの引抜き耐力とトルク耐力[†]

平井 俊樹* 東山 浩士** 仲辻 浩一***
五十嵐心一*** 永目 有*** 出口 祐太****

Pull-Out Bearing Capacity and Torque of Post-Installed Screw Anchor with Torque Management Device

by

Toshiki HIRAI*, Hiroshi HIGASHIYAMA**, Koichi NAKATSUJI***

Sinichi IGARASHI***, Yu NAGAME*** and Yuta DEGUCHI****

Post-installed anchors are used in many existing concrete structures to construct additional members. The purposes of this study are to investigate the bond strength, pull-out bearing capacity, and torque of a post-installed screw anchor with the epoxy resin adhesion. In this study, the single anchor was installed into concrete slabs. The test parameter was the embedment depth. From the results of the pull-out tests, firstly, the bond strength was obtained. Secondary, the pull-out bearing capacity failed in the cone failure mode was estimated based on the empirical equation proposed by Fuchs et al. Furthermore, from the relationship between the pull-out bearing capacity and bond strength curves, the pull-out bearing capacity in the combined failure mode was safely estimated applying the intersection value at the depth of the bond failure. Finally, the correlation between the pull-out bearing capacity and the torque was revealed to be the linear trend in the relatively short embedment depth of anchor.

Key words:

Post-installed screw anchor, Epoxy resin adhesion, Bond strength, Pull-out bearing capacity, Torque

1 緒 言

平成 24 年 12 月 2 日に発生した笹子トンネルの天井板崩落事故に伴い、接着系アンカーの引抜き耐力や耐疲労性などに関する信頼性評価が多数行われてきた^{1)~4)}。また、あと施工アンカーは金属系アンカーと接着系アンカーに大別され、平成 26 年 3 月には土木学会「コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案)」が刊行されている⁵⁾。

著者らは Fig. 1 に示すアンカーとエポキシ樹脂系接着剤を併用したあと施工アンカー(以降、アンカーと称す)の引抜き耐力に関する研究を進めてきた⁶⁾。本アンカーは呼び径(D_n) 16 mm、外径 18.5 mm であり、穿孔径 ϕ 16.5 mm に対してインパクトレンチによりアンカーを容易に打設でき、アンカーのねじ山をコンクリートに切り込ませることにより、確実にアンカーを定着することができる。また、機械的抵抗機構に加え、樹脂接着による付着抵抗機構を有する。さらに、アンカー頭部にトルク管理用のピンテールを設けることにより、アンカー施工後の点検時における健全度の確認が可能となる工夫がなされている。

アンカーの引抜き時における破壊形態には、アンカー自体の破断、付着破壊、コンクリートのコーン状破壊、さらにコーン状破壊と付着破壊の結合破壊がある。既往の研究⁶⁾では、本研究とは異なるエポキシ樹脂系接着剤を用いた付着強度の評価、ならびに付着破壊を呈するときの引抜き耐力とトルク耐力の関係について実験的検討を行ってきた。本研究に使用したタイプのアンカーに関する既往の研究^{7)~10)}は少なく、さらに引抜き耐力とトルク耐力の関係についてもレンガ造りの歴史的建造物に用いられたモルタルの品質管理や健全度評価にトルク耐力を適用する研究^{11),12)}がなされているがその数は多くない。

本研究では、付着強度およびコーン状破壊時の引抜き耐力、さらに引抜き耐力とトルク耐力との関係を評価することを目的として各種試験を実施した。まず、アンカーの付着強度を求めるための引抜き試験を行った。続いて、アンカーの埋込み深さをパラメータとした引抜き試験から、破壊形態の違いを確認し、引抜き耐力について検討を行った。さらに、アンカー施工後の点検時における健全度評価のためのデータを得るためにトルク試験から得られたトルク耐力と先の引抜き耐力とから両者の関

[†] 原稿受理 平成30年1月20日 Received Jan. 20, 2018

©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 近畿大学 理工学部社会環境工学科(現 五洋建設㈱) 〒577-8502 東大阪市小若江
Dept. of Civ. & Environ., Kindai Univ., Kowakae, Higashiosaka 577-8502.

** 正 会 員 近畿大学 理工学部社会環境工学科 〒577-8502 東大阪市小若江
Member, Dept. of Civ. & Environ., Kindai Univ., Kowakae, Higashiosaka 577-8502.

*** 酒井工業㈱ 〒601-8027 京都市南区東九条中御霊町
Sakai Construction, Co. Ltd., Minami-ku, Kyoto 601-8027.

**** ジャパンライフ㈱ 〒124-0024 東京都葛飾区新小岩
Japan Life, Co. Ltd., Katsushika-ku, Tokyo 124-0024.

Fig. 1 Post-installed screw anchor with torque management device.

Fig. 2 Specimen for bond strength test.

係を明らかにした。本稿ではこれら一連の試験結果について報告する。なお、各試験は、樹脂接着剤を注入した後、直ちにアンカーを打設し、1日養生後に実施した。

2 付着強度試験

2・1 試験体

試験体は寸法 1000×1000×250 mm のコンクリート床版にアンカーを打設したものである。試験体パラメータはアンカーの埋込み深さであり、40, 50, 60 mm の3種類とした。試験体数は各パラメータに対して5本である。なお、試験時のコンクリートの圧縮強度は 19.1 N/mm²であった。

アンカーの打設方法は、付着破壊を生じさせるため Fig. 2 および Fig. 3 に示すように、予めφ45 mm のハンマードリルで拡大孔を穿孔することにより、アンカーとの非接触区間を設けた。なお、本試験では埋込み深さが短いた

Fig. 3 Expansion hole and embedment depth.

Fig. 4 Test setup.

め、それに対応して、コンクリートに埋込むアンカースクリュー部分の長さを短くした短尺のアンカーを用いている。また、Fig. 3 に示すように、拡大孔の深さ (l_{ex}) は、埋込み深さ (l) 40, 50, 60 mm に対して、それぞれ 50, 40, 30 mm とした。続いて、φ16.5 mm の孔をハンマードリルにより先の埋込み深さとなるまで穿孔し、穿孔内のコンクリート粉をワイヤブラシと吸塵機により清掃した後、接着剤として高粘度水中硬化型エポキシ樹脂（ボンド E280G, コニシ）をカートリッジ式インジェクターにより注入し、インパクトレンチによりアンカーをコンクリートに打設した。

2・2 試験方法

付着強度試験状況を Fig. 4 に示す。载荷方法はカブラーを用いてアンカーにテンションロッドを接続し、鋼製梁上に設置したセンターホールジャッキ（容量 300 kN）によりテンションロッドを介してアンカーに引抜き荷重を作用させた。

2・3 付着強度

破壊状況は、すべての埋込み深さにおいて、接着剤を含むアンカーのねじ山頂部付近で引抜ける凝集破壊（付着破壊）であった。よって、付着強度試験における引抜き耐力（最大荷重）から有効埋込み深さ全長にわたり付着応力が一様に作用すると仮定した式(1)を用いて付着強度を算出した。その際の有効埋込み深さは埋込み深さから Fig. 1 に示したアンカーの先端加工部 5 mm を差し引いた値とした。Table 1 に得られた付着強度を示す。

$$T_b = \pi D_a l_e \tau_a \quad (1)$$

Table 1 Effective embedment depth and bond strength.

Effective embedment depth (mm)	Maximum load (kN)	Bond strength (N/mm ²)	Average bond strength (N/mm ²)
35	17.9	10.2	11.9
	20.4	11.6	
	20.9	11.9	
	22.1	12.6	
	23.2	13.2	
45	22.8	10.1	12.5
	25.5	11.3	
	28.5	12.6	
	28.7	12.7	
	35.6	15.7	
55	(14.7)	—	12.8
	31.2	11.3	
	36.0	13.0	
	37.2	13.5	
	37.4	13.5

Fig. 5 Bond strength and effective embedment depth.

ここに, T_b : 引抜き耐力 (N)
 D_a : 呼び径 (mm)
 l_e : 有効埋込み深さ (mm)
 τ_a : 付着強度 (N/mm²)

本試験より得られた付着強度と有効埋込み深さとの関係を Fig. 5 に示す. 同図には日本建築あと施工アンカー協会 (JCAA) の指針 (案)¹³⁾に規定されている式(2)より算出される付着強度も示している.

$$\tau_a = 10 \sqrt{\frac{f'_c}{20}} \quad (2)$$

ここに, f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

JCAA¹³⁾の付着強度は本試験結果の下限值に相当することが分かる. さらに, 付着強度に及ぼす有効埋込み深さの影響は小さく, ほぼ一定であることから, それらすべてを平均すると付着強度は 12.4 N/mm²であった. 既往の研究⁶⁾では, 本研究と異なるエポキシ樹脂系接着剤を用い

Fig. 6 Observed failure modes.

て, 同様な付着強度試験を実施したが, その際の平均付着強度は 23.6 N/mm² (コンクリートの圧縮強度は 21.8 N/mm²) であり, 接着剤の種類による付着強度への影響は大きいと言える.

3 引抜き耐力試験

3・1 試験体

試験体は寸法 1000×1000×250 mm のコンクリート床版にアンカーを打設したものである. 試験体パラメータはアンカーの埋込み深さであり, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120 の 8 種類とした. 試験体数は各パラメータに対して 5 本である.

アンカーの打設方法はφ16.5 mm の孔をハンマードリルにより所定の深さまで穿孔し, 穿孔内のコンクリート粉をワイヤブラシと吸塵機により清掃した後, 接着剤として高粘度水中硬化型エポキシ樹脂 (ボンド E280G, コニシ) をカートリッジ式インジェクターにより注入して, インパクトレンチによりアンカーをコンクリートに打設した.

3・2 試験方法

引抜き試験方法は Fig. 4 と同様であり, カプラーを用いてアンカーにテンションロッドを接続し, 鋼製梁上に設置したセンターホールジャッキ (容量 300 kN) によりテンションロッドを介してアンカーに引張荷重を作用させた.

3・3 破壊性状

本試験では, Fig. 6(a)に示すコーン状破壊と Fig. 6(b)に示すコーン状破壊と付着破壊を有する結合破壊の両破壊性状が確認された. すべての試験結果を Table 2 に示すが, アンカーの有効埋込み深さが短い場合にはコーン状破壊となり, 有効埋込み深さが長い場合には結合破壊へと破壊性状が移行する傾向にある.

3・4 コーン状破壊時の引抜き耐力

まず, コーン状破壊した 26 本の引抜き耐力 (最大荷重) と有効埋込み深さの関係を Fig. 7 に示す. また, コーン状

Table 2 Effective embedment depth, pull-out load and failure mode.

Effective embedment depth (mm)	Pull-out load (kN)	Failure mode	Effective embedment depth (mm)	Pull-out load (kN)	Failure mode
35	13.7	Cone	75	39.6	Cone
35	14.0	Cone	76	42.1	Cone
35	14.3	Cone	75	44.2	Cone
35	14.5	Cone	75	44.5	Cone
36	14.9	Cone	77	46.5	Combined
47	20.6	Cone	85	50.2	Cone
45	22.3	Cone	85	48.5	Combined
49	23.1	Cone	86	52.7	Combined
46	25.7	Cone	85	56.7	Combined
45	21.8	Combined	87	58.7	Combined
55	23.1	Cone	96	54.4	Cone
55	26.0	Cone	95	61.6	Cone
56	26.6	Cone	95	58.7	Combined
56	27.7	Cone	95	64.6	Combined
56	28.0	Cone	97	71.2	Combined
65	32.0	Cone	117	77.7	Cone
66	32.0	Cone	116	87.9	Cone
65	35.1	Cone	115	73.5	Combined
65	34.3	Combined	116	86.9	Combined
65	36.3	Combined	115	92.2	Combined

Fig. 7 Measured test results compared to predicted results for cone failure.

破壊時の引抜き耐力式として、以下に示す 2 つの耐力式と本試験結果とを比較して考察する。

土木学会 (JSCE) の指針 (案)⁵⁾に規定されている接着系アンカーに関する耐力式を式(3)~(6)に示す。ただし、安全係数は考慮していない。

$$T_c = K_t \alpha A_c \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

$$K_t = 1.0 \quad (\text{短期間}) \quad (4)$$

$$\alpha = 0.23 \quad (\text{接着系アンカー}) \quad (5)$$

$$A_c = \pi l_e (l_e + D_a) \quad (6)$$

次に、Fuchs ら¹⁴⁾の耐力式を式(7)に示す。ここで、Fuchs らはコンクリート強度を一辺が 200 mm の立方供試体から求めているため、 k_{nc} は 13.5 としている。円柱供試体の

Fig. 8 Relationship of pull-out loads between bond and cone failures.

コンクリート強度に換算した場合、Eligehausen ら¹⁵⁾の研究を参照して k_{nc} は 14.7 となる。

$$T_c = k_{nc} \sqrt{f'_c} l_e^{1.5} \quad (7)$$

Fig. 7 から、JSCE の耐力式⁵⁾は本試験結果の 50~60% 程度の耐力となる。一方、Fuchs ら¹⁴⁾の耐力式は本試験結果を比較的精度よく推定することができ、試験値/算定値の平均値は 1.03、変動係数は 7.97% であった。Küenzlen ら⁷⁾は樹脂接着剤を使用しないスクリーアンカーのコーン状破壊時の耐力は有効埋込み深さの 1.5 乗に比例して増加すると述べており、樹脂接着剤を使用した本試験においても同様な結果が得られている。ここで、本試験結果に対しては k_{nc} を 15.1 とすることにより、試験値/算定値の平均値は 1.00 となり、僅かに精度が向上する。今後はコンクリートの圧縮強度を変動させるとともに、試験本数を増やすことにより k_{nc} の値について検討を加えていくことにする。

次に、式(1)および式(7)から付着破壊時の耐力とコーン状破壊時の耐力について、本試験の範囲におけるそれぞれの引抜き耐力と有効埋込み深さの関係を Fig. 8 に示す。両耐力は約 88 mm の有効埋込み深さで交差する関係にある。Table 2 に示したように、有効埋込み深さ 85 mm から結合破壊を呈するアンカーが増加している傾向と符合する結果である。

3・5 結合破壊時の引抜き耐力

本試験では、14 本のアンカーにコーン状破壊と付着破壊の結合破壊が見られた。この結合破壊に対する引抜き耐力について、まず、式(1)の付着破壊時の耐力式と式(7)のコーン状破壊時の耐力式から検討を行う。結合破壊時の引抜き耐力はコーン状破壊時の深さから両耐力式の累積による式(8)として与えられる。

$$T_m = k_{nc} \sqrt{f'_c} l_{cone}^{1.5} + \pi D_a (l_e - l_{cone}) \tau_a \quad (8)$$

ここに、 l_{cone} : コーン状破壊の深さ(mm)

Fig. 9 Measured test results compared to predicted results for combined failure.

Fig. 10 Measured test results compared to predicted results.

コーン状破壊の深さは, Cook¹⁶⁾の研究を参考に, 式(8)を最小化することによって得られるとすると, k_{nc} に 15.1 を適用して式(9)のように表される.

$$l_{cone} = \left(\frac{\pi D_a \tau_a}{22.65 \sqrt{f'_c}} \right)^2 \quad (9)$$

本試験におけるコンクリートの圧縮強度 19.1 N/mm^2 および平均付着強度 12.4 N/mm^2 を式(9)に代入すると, コーン状破壊の深さは 39.6 mm となる. このコーン状破壊の深さを式(8)に代入して結合破壊したアンカーの引抜き耐力を算出したところ, Fig. 9 に示す結果 (一点鎖線) となった. 結合破壊が多く見られた有効埋込み深さが長い範囲において試験値と算定値に乖離が生じている. ここで, この 39.6 mm のコーン状破壊の深さは引抜き試験後に測定した値に比べて小さく, また, Fig. 8 に示したコーン状破壊時の耐力と付着破壊時の耐力とが交差するときの有効埋込み深さ 88 mm と比べてもその差が大きい.

そこで, 式(7)によるコーン状破壊時の引抜き耐力 ($k_{nc}=15.1$) と比較したところ, Fig. 9 の実線で示すように, 結合破壊であるにも関わらず, コーン状破壊時の耐力式により試験結果を推定できている. しかし, 破壊形態に合致した耐力式の検討が必要であるとの考えに基づき, 本論では結合破壊時の耐力の推定として, Fig. 8 に示したコーン状破壊時の耐力と付着破壊時の耐力とが交差する有効埋込み深さをその境界と仮定し, コーン状破壊の深さを $l_{cone} = 88 \text{ mm}$ として式(8)から耐力を算出した. すべての試験結果と破壊モードを仮定した算定結果の比較を Fig. 10 に示す. コーン状破壊時の耐力に比べて, 有効埋込み深さが 88 mm 以上を結合破壊として算出した耐力は比較的安全側の算定結果となっている. また, 試験値/算定値のすべての平均値は 1.04, 変動係数は 9.16% であった. 上述したように, 今後はコンクリートの圧縮強度を変動させるとともに, 試験本数を増やしたさらなる検討が必要であることを記しておく.

4 トルク耐力試験

4.1 試験体

試験体は寸法 $1000 \times 1000 \times 250 \text{ mm}$ のコンクリート床版にアンカーを打設したものである. 打設方法は 3・1 に述べた引抜き耐力試験と同様であるのでここでは省略する. 試験体パラメータはアンカーの埋込み深さであり, 40, 50, 60, 70 mm の 4 種類とした. 試験体数は各パラメータに対して 5 本である.

4.2 試験方法

トルク試験は, Fig. 11 に示すように, アンカー頭部のピンテルあるいはアンカーに固定したナットにトルクレンチを設置し, アンカーの打込み方向と逆方向に回転させ, すべりが生じたときの最大トルクを測定することによりトルク耐力とした.

4.3 トルク耐力

アンカーのトルク耐力を Table 3 に示す. ここで, 有効埋込み深さが 65 mm ではアンカー自体がねじ切れるケースが生じたため, 得られた結果が少なくなっている. Fig. 12 にトルク耐力と有効埋込み深さの関係を示す. ややば

Fig. 11 Torque test.

Table 3 Effective embedment depth and maximum torque.

Effective embedment depth (mm)	Maximum torque (N・m)	Average torque (N・m)	Effective embedment depth (mm)	Maximum torque (N・m)	Average torque (N・m)
35	151.7	162.2	58	272.7	303.7
37	151.7		55	294.9	
37	156.9		55	295.1	
35	157.4		55	327.7	
36	193.1		56	328.1	
46	229.0	260.2	65	330.8	328.9
45	242.1		65	330.9	
48	270.2		65	325.1	
45	277.5				
46	282.0

Fig. 12 Maximum torque and effective embedment depth.

Fig. 13 Correlation between pull-out load and maximum torque.

らつきを呈しているが、トルク耐力は有効埋込み深さと線形関係を有していると言える。なお、本研究と異なるエポキシ樹脂系接着剤を使用した既往の研究⁶⁾においても同様の線形関係が確認されている。

4・4 引抜き耐力とトルク耐力の関係

トルク試験を実施した有効埋込み深さ 35～65 mm の範囲における引抜き耐力とトルク耐力の各平均値についての関係を Fig. 13 に示す。この範囲における引抜き耐力とトルク耐力は線形関係を有していると言える。このこと

から、アンカー施工後の維持管理において、トルク試験は引抜き耐力の評価手法になり得るものと考え、さらなるデータの蓄積と精度確認を行っていくこととする。

5 結 言

本研究では、エポキシ樹脂系接着剤を用いたトルク管理型あと施工アンカーの付着強度、引抜き耐力ならびにトルク耐力を得るための各種試験を実施した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 非接触区間を設けた埋込み深さ 40～60 mm のアンカーの引抜き試験では、すべてのアンカーにおいて接着剤を含むアンカーのねじ山頂部付近で引抜ける凝集破壊が見られた。引抜き耐力からアンカーの付着強度を算出した結果、日本建築あと施工アンカー協会の指針(案)¹³⁾に規定される付着強度は試験結果の下限値に相当し、また、有効埋込み深さに関係なく、12.4 N/mm²の平均付着強度が得られた。
- (2) コーン状破壊時の引抜き耐力は Fuchs ら¹⁴⁾の耐力式により算定できることが分かった。また本研究において、コーン状破壊と付着破壊の結合破壊時の引抜き耐力は、コーン状破壊時の耐力式と付着破壊時の耐力式の交差部における有効埋込み深さを適用することにより、安全側に算定できることが分かった。
- (3) 埋込み深さが比較的短い 40～60 mm の範囲におけるトルク耐力は、既往の研究⁶⁾と同様に、有効埋込み深さ、ならびに引抜き耐力と線形関係を有している。

6 今後の展望

著者らは、アンカー施工後の維持管理において、アンカー頭部に設けたピンテールを活用したトルク試験によりその引抜き耐力を評価することを目的に研究を進めている。本論を含め、これまでの研究成果から、引抜き耐力とトルク耐力に線形関係が見られたことから、今後は、ピンテールのトルク耐力からアンカーの保証引抜き耐力を精度よく評価するためにピンテールの形状や強度について検討する必要がある。また、継続的に保証引抜き耐力の評価を行うためには、取替え可能なピンテールに工夫することも必要である。

参 考 文 献

- 1) Y. Ryu, T. Tadokoro, M. Okamoto and T. Furuya, "A study on the pulling strength of post-installed anchors based on the load-bearing mechanism", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.37, No.2, pp.505-510 (2015).
- 2) J. Kawaguchi, M. Kunieda and T. Makita, "Influence of strength and cracking of concrete on loading capacity of post-installed anchors", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.37, No.2, pp.511-516 (2015).
- 3) N. Katsuyama, S. Iguchi, S. Kado and S. Tatsuki, "Experimental study on durability of post-installed adhesive anchor (pullout test)", Proceedings of the

- Japan Concrete Institute, Vol.37, No.2, pp.1195-1200 (2015).
- 4) K. Naito, N. Yamada and S. Iguchi, "Experimental study on durability of post-installed adhesive anchor (evaluation for alkali resistance)", *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.37, No.2, pp.1207-1213 (2015).
 - 5) JSCE, "Recommendations for design and construction of post-installed anchors in concrete", *Concrete Library* No.141 (2014).
 - 6) T. Hirai, H. Higashiyama, K. Nakatsuji, S. Igarashi, Y. Nagame and Y. Deguchi, "Pull-out behavior of post-installed adhesive anchor with torque control device", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 67, No.1, pp.121-128 (2018).
 - 7) J. H. R. Küenzlen and R. Eligehausen, "Load bearing behavior of fastenings with concrete screw", *Otto-Graf-Journal*, Vol. 13, pp. 27-51 (2002).
 - 8) G. A. Stuarat, D. K. Harrison, B. M. Wood and M. Maclachlan, "A proposed methodology for the design and characterization of concrete screw anchors", *Meccanica*, Vol. 45, pp.635-656 (2010).
 - 9) J. Olsen, T. Pregartner and A. J. Lamanna, "Basis for design screw anchors in concrete", *ACI Structural Journal*, Vol. 109, No. 4, pp. 559-567 (2012).
 - 10) A. Mohyeddin, E. F. Gad, K. Yangdon, R. Khandu and J. Lee, "Tensile load capacity of screw anchors in early age concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 127, pp. 702-711 (2016).
 - 11) H. M. Algin, "Investigation of masonry wall fixings subjected to pullout load and torque", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 2041-2046 (2007).
 - 12) D. Marastoni, A. Benedetti, L. Pelà and G. Pingnagnoli, "Torque penetration test for the in-situ characteristics of historical mortars: fracture mechanics interpretation and experimental validation", *Construction and Building Materials*, Vol. 157, pp. 509-520 (2017).
 - 13) JCAA, "Recommendations for design of post-installed anchors" (2005).
 - 14) W. Fuchs, R. Eligehausen and J. E. Breen, "Concrete capacity design (CCD) approach for fastening to concrete", *ACI Structural Journal*, Vol.92, No.1, pp.73-94 (1995).
 - 15) R. Eligehausen, R. A. Cook and J. Appl, "Behavior and design of adhesive bonded anchors", *ACI Structural Journal*, Vol.103, No.6, pp.822-831 (2006).
 - 16) R. A. Cook, "Behavior of chemically bonded anchors", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.119, No.9, pp.2744-2762 (1993).