

各種要因が接着系あと施工アンカーの付着耐力に及ぼす影響

Influences of various factors to bond capacity of post-installed bonded anchors

北海道大学大学院工学研究科北方圏環境政策工学専攻 ○学生員 佐原愛士 (Aishi Sahara)
 北海道大学大学院工学研究院北方圏環境政策工学部門 正会員 佐藤靖彦 (Yasuhiko Sato)
 日本ヒルティ株式会社 正会員 高橋宗臣 (Muneomi Takahashi)
 日本ヒルティ株式会社 正会員 石原力也 (Rikiya Ishihara)

1. はじめに

接着系あと施工アンカーは、施工が容易でかつアンカーボルトの取付け位置の確保が比較的確実にできるといった利点から付帯設備の取り付けに幅広く使用されており、土木分野においても近年需要が増加している¹⁾。

実環境における長期間の供用では、母材とアンカーの接着に使用する樹脂が温度履歴やクリープ、疲労などの影響によって劣化し、付着耐力の低下を引き起こすことが考えられる。

そこで本研究では、付着耐力に影響を及ぼすと予想される要因のうち、環境温度および施工条件に着目した。具体的には、実環境での長期暴露、施工時および試験時の低温環境、母材コンクリートの締め固め程度（材料分離の有無）、母材の性質の違いに着目し、それらが付着耐力に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 実験供試体と試験方法

供試体の諸元を図-1 に示す。外径 190mm（肉厚 5.5mm）、高さ 100mm の鋼管内にコンクリートを打設し、その中央を穿孔（ ϕ 14mm、深さ 60mm）した後、長さ 200mm、呼び径 12mm の全ネジボルトを埋め込むことで供試体を作製した。ボルトを埋め込む際には、ビニルウレタン系樹脂（以下、樹脂 A）、エポキシ系樹脂（以下、樹脂 B）、エポキシアクリレート系樹脂（以下、樹脂 C）、エポキシ系樹脂（以下、樹脂 D）の 4 種類を用い、2 日間の樹脂硬化養生後に引張試験を実施した。

本研究で用いた引張試験方法を図-2 に示す。試験機と供試体表面との間には、コンクリートのコーン状破壊を抑制するために支圧鋼板を設置しており、さらに供試体へ均一な荷重伝達を促すために支圧鋼板と供試体の間にセメントパウダーをまぶしている。なお、支圧鋼板の内径は穿孔径の 1.5 倍としている²⁾。引張荷重は油圧ジャッキにて与えられており、载荷中は荷重とアンカーボルトの引抜け変位を測定するとともに、载荷速度が約 1.0 kN/秒となるよう制御した。また、欧州の認証機関で行った実験では 60 秒で破壊に至るように载荷速度を制御した。

2.2 実験変数

各実験変数とそれに使用した樹脂を表-1 に示す。実験変数は大きく 4 つに分類できる。それらは、施工時と試験時の低温に着目した実験（実験変数 I）、屋外に暴

露後 2 年間の付着耐力の変化に着目した実験（実験変数 II）、圧縮強度に着目した実験（実験変数 III）、そして、締め固め程度に着目した実験（実験変数 IV）である。

実験変数 I の実験では、4 種類の樹脂を使用した。表-2 に示すようにパラメータは、常温にて樹脂施工および载荷をした N-N-N と、樹脂施工時は常温で载荷時が低温の N-N-L、低温下で樹脂施工および载荷を実施した N-L-L の 3 つである。なお、コンクリートは常温で打設している。

実験変数 II の実験では、那覇市と旭川市での実環境暴露による温度履歴の影響をパラメータをとした。使用した樹脂は 1 年目では 4 種、2 年目では樹脂 A と B の 2 種類のみを使用した。

実験変数 III の実験では、樹脂 A を用いて支圧鋼板による拘束下での付着耐力に及ぼすコンクリート強度の影響を検討した。この検討では、著者の実験室で作製した配合 1 から 4 からなるコンクリートと、欧州の認証機関と国内の専門業者に依頼して作製した配合 5 からなるコンクリートを使用した。配合を表-3 に示す。

実験変数 IV の実験では、母材のコンクリートの締め固め程度をパラメータとし、樹脂 A のみを使用して引張試験を実施した。

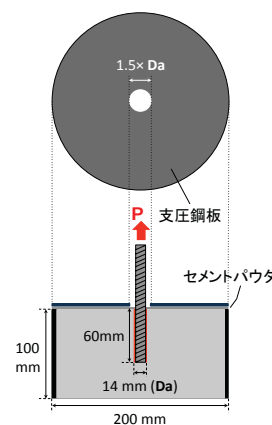


図-1 供試体

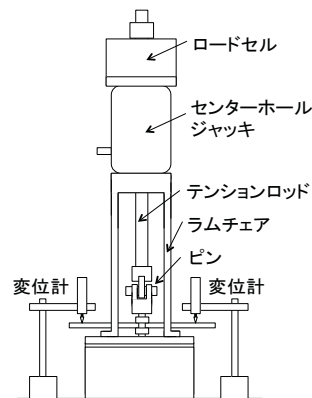


図-2 引張試験機

表-1 実験変数と使用樹脂

		樹脂 A	樹脂 B	樹脂 C	樹脂 D
3.1	N-N-N	○	○	○	○
	N-N-L	○	○	○	○
	N-L-L	○	○	○	○

3.2	暴露 1 年	○	○	○	○
3.2	暴露 2 年	○	○	-	-
3.3	圧縮強度	○	-	-	-
3.4	締め固め	○	-	-	-

○：使用 -：不使用

表-2 低温環境を想定したパラメータ

パラメータ	打設時	樹脂施工時	載荷時
N-N-N	20℃	20℃	20℃
N-N-L	20℃	- 20℃	- 20℃
N-L-L	20℃	- 20℃	- 20℃

表-3 供試体のコンクリート配合設計

	単位水量 (kg/m ³)	W/C (%)	S/a (%)	粗骨材 寸法 (mm)
配合 1	160	40.0	47.0	25
配合 2	160	45.0	47.0	25
配合 3	160	55.0	47.0	25
配合 4	160	65.0	47.0	25
配合 5	159	58.0	45.0	20

3. 実験結果および考察

3.1 施工時と試験時の低温環境（実験変数 I）

寒冷環境下での接着系あと施工アンカーの施工及び載荷が付着耐力に影響を検討した。

破壊は全てにおいて付着破壊がおこった。破壊性状は図-3 (a) のようにボルト端部からコンクリート表面に向かって、ボルト樹脂界面からコンクリート樹脂界面へと破壊面が移行していくものと、図-3 (b) のように一貫してコンクリート樹脂界面で破壊が発生しているものに大別できた。また、L-L-L の樹脂 B では、樹脂が完全に硬化していなかったため樹脂層内部において破壊が発生し（図-3 (c) ）、L-L-L の樹脂 D では樹脂が硬化しておらず、荷重も全く増加しなかった（図-3 (d) ）。

樹脂ごとのパラメータ間で最大付着耐力を比較したものを図-4 にて示す。全ての樹脂で、N-N-L、N-N-N、N-L-L の順に付着耐力が小さくなっている。これらの結果から、施工時の低温条件は樹脂の付着力を低下させ、試験時の低温条件は樹脂の付着力を向上させることが読み取れる。しかしパラメータによる付着強度の増減率は樹脂によって異なる。

施工時の低温によって引張耐力が低下した原因は、低温によって樹脂の硬化反応が常温時に比べて進行しなかったことが考えられる。また載荷時の低温によって引張耐力が増加した原因は、低温下でコンクリート圧縮強度の上昇とも考えられる³⁾。しかし後述するように、付着耐力がコンクリート圧縮強度に影響されないことを考えると、現段階でその理由を明らかにすることは難しい。



図-3 供試体の破壊面

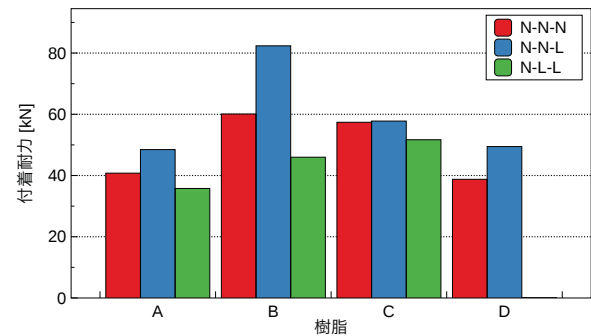


図-4 各パラメータの最大耐力比較

3.2. 環境暴露実験（実験変数 II）

国内の温度変化を取得する目的で那覇市と旭川市を暴露地に選定し、供試体の2年間における通年暴露を行い、高温および低温環境下での温度履歴の影響を確認した。図-5に暴露状況を示す。

温度は埋め込み式の小型温度データロガーを樹脂層内部に埋め込むことで測定した。測定した温度データの一例を図-6に示す。測定結果から、樹脂層が経験する最大温度は55.5℃、最低温度は-24℃、最大日温度変化は40℃であった。また供試体は地上に設置していたことから、旭川では積雪によって凍結融解の影響をほとんど受けず、コンクリートの凍結融解性状に基づき⁴⁾、-2℃と0℃をまたぐ場合に凍結融解が発生したとすると、2年間の通年暴露で凍結融解サイクルは最大で30回だったと考えられる。

供試体は1年ごとに回収し引張試験を実施した。引張試験結果を図-7に示す。破壊は全てにおいて付着破壊が発生し、破壊形式は3.1と同様の破壊形式であった。

旭川では、付着耐力が若干増加し（図-7 (a) ）、那覇では、暴露1年で付着耐力が若干増加し、2年目には若干の低下が見られた（図-7 (b) ）。



(a) 那覇 (b) 旭川

図-5 暴露状況

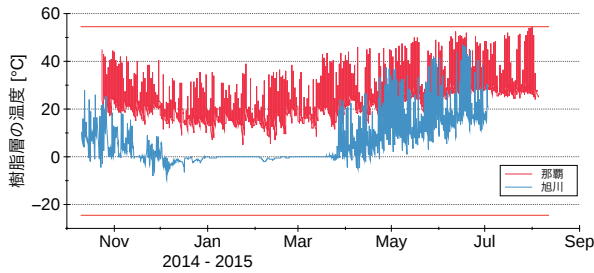
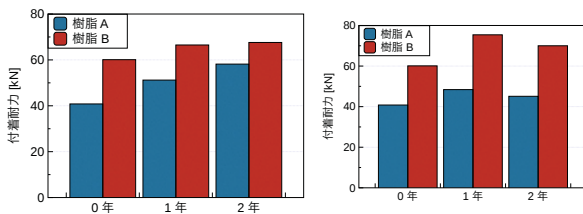


図-6 データロガーによる測定温度の一例



(a) 旭川 (b) 那覇

図-7 付着耐力の経年変化

3.3. コンクリート圧縮強度の影響（実験変数 III）

図-8 に付着耐力とコンクリートの圧縮強度との関係を示す。支圧鋼板を使用した本試験方法では、配合 5 を除き、コンクリート圧縮強度は付着耐力にほとんど影響を与えないと考えられる。

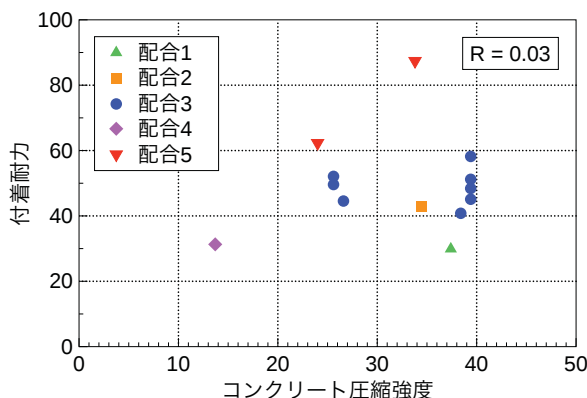


図-8 付着耐力に与える圧縮強度の影響

3.5. 母材コンクリートの締め固め程度（実験変数 IV）

供試体作製時に鋼管内のコンクリートに直接パイプレーターを挿入し、30 秒程度振動させることで過度に締

め固めた場合と、パイプレーターを用いずに突き棒により適度に締め固めた場合との比較を行った。その結果を表-4 に示す。破壊は全てで付着破壊だった。過度に締め固めた供試体に比べて、適度に締め固めた供試体では、付着耐力が約 7 %大きく、変動係数では約 1.8 倍小さい値を示している。しかし両者の値は決して大きな違いとは言えないため、母材コンクリートの締め固め程度の違いが付着耐力に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

表-4 締め固め程度が付着耐力へ与える影響

	過度な締め固め	適度な締め固め
付着耐力	48.7 [kN]	52.4 [kN]
変動係数	6.5	3.7

4. 付着耐力に関する総合的評価

4.1 付着耐力に及ぼす主要因

3.3 で得られた結果から、樹脂 A の付着耐力を打設された機関ごとに分類した（図-10）。同じ樹脂を使用しているにも関わらず、付着耐力はそれぞれ異なる値に収束しているように見て取れる。また、打設機関ごとの平均付着耐力を表-5 に示すが、図-10 と同じ傾向が樹脂 A、樹脂 B の両者から見られた。

破壊は全てにおいて付着破壊が発生し、破壊面は図-11 で見られるように、配合 3 にて実験室で打設された供試体では、樹脂-コンクリート界面で破壊が発生し、配合 5 にて専門業者に委託して打設された供試体の樹脂 B では樹脂-アンカー界面で破壊が発生し、樹脂 A では破壊面が移行するように破壊が発生し、配合 5 にて欧州の認証機関で打設された供試体では両樹脂において樹脂アンカー界面で一貫した破壊が発生した。

これらの結果から、付着耐力はコンクリートの配合設計もしくは破壊形式の違いによる影響を受けると考えられる。また欧州の認証機関と専門業者では同じ配合 5 によって供試体を作製しているが、2.2 で述べたように引張試験時の載荷速度は異なる。一般に、載荷速度は付着耐力に影響を与えるが⁵⁾、本研究で採用した 2 種類の実験方法の差は±0.5kN/秒程度しかないので、載荷速度は付着耐力に影響を与えないと考えられる。また工学的に無視できるような配合の違いによって付着耐力が敏感に変化することは現実的に考え難いことから、付着耐力への影響は破壊形式による影響が卓越していると考えられる。

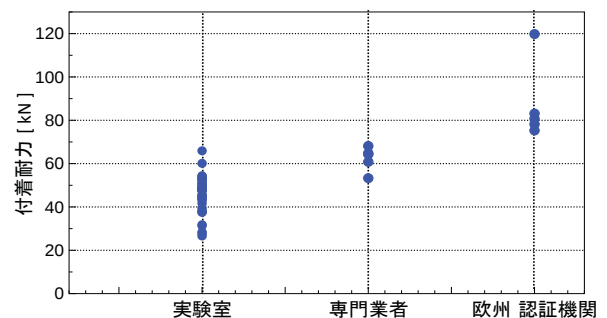


図-10 供試体作製機関ごとの樹脂 A の付着耐力

表-5 平均付着耐力の比較

	実験室	専門業者	欧州 認証機関
樹脂 A	40.8 [kN]	62.3 [kN]	87.4 [kN]
樹脂 B	60.1 [kN]	83.4 [kN]	104.5 [kN]



(a) 配合 A (b) 配合 B (c) 配合 C

図-11 破壊面の違い

4.2 破壊形式による付着耐力の整理

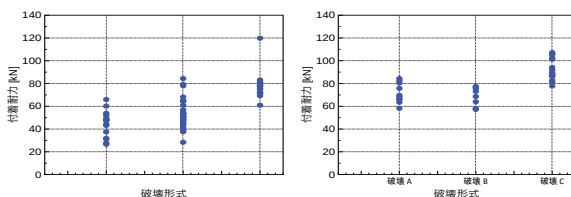
接着系あと施工アンカーの付着破壊は、樹脂コンクリート界面での破壊（図-11 (a)）、樹脂アンカー界面での破壊（図-11 (c)）、破壊面がアンカー端部からコンクリート表面に向かって樹脂コンクリート界面から樹脂アンカー界面へと移行していく破壊（図-11 (b)）の、大きく 3 つのパターンに大別できた。これらの破壊形式の違いが付着耐力に与える影響について、本引張試験で使用する樹脂 4 種を含む全試験結果から検討を行った。なお、検討を行うにあたって、施工状態によってアンカー端部で樹脂が少なからず破壊することを考慮し、アンカー端部から 1.5mm 未満で破壊面が樹脂アンカー界面から樹脂コンクリート界面に移行しているものを破壊 A、有効埋め込み長さ 60mm 全てで一貫して樹脂アンカー界面で破壊が発生しているものを破壊 C、その他の破壊を破壊 B と定義した（図-12）。

各樹脂において、破壊形式に基づいて付着耐力を分類した結果を図-13 に示す。樹脂 B を除いて破壊 A から破壊 C に向かって付着耐力が大きくなる傾向が伺える。また、全ての樹脂で破壊 A と破壊 B との間の付着耐力差はほとんどなく、破壊 C との間は大きな耐力差が発生していることから、樹脂 B においても傾向としては同じだと考えられる。なお、各破壊形式における付着耐力のばらつきは表-6 に示されている。

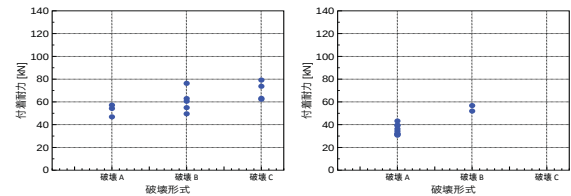


(a) 破壊 A (b) 破壊 B (c) 破壊 C

図-12 破壊面の分類



(a) 樹脂 A (b) 樹脂 B



(c) 樹脂 C (d) 樹脂 D
図-13 破壊形式による付着耐力の分類

表-6 破壊形式ごとの付着耐力の変動係数

	樹脂 A	樹脂 B	樹脂 C	樹脂 D
破壊 A	24	12	8	12
破壊 B	24	11	15	4
破壊 C	16	10	10	—

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 低温下での樹脂施工かつ載荷は、接着系あと施工アンカーの付着耐力を低下させる。
- 一部のエポキシ系の樹脂では、施工時および載荷時の低温条件によって完全な硬化に至らない樹脂や耐力を示さない樹脂がある。
- 常温下での樹脂施工かつ低温下での載荷は、接着系あと施工アンカーの付着耐力を増加させるが、現段階でその理由を解明するのは難しい。
- 本試験方法において接着系あと施工アンカーの付着耐力はコンクリート圧縮強度の影響を受けないと考えられる。
- コンクリート打設時における締め固めの程度が接着系あと施工アンカーの付着耐力に与える影響はほとんどないと考えられる。
- 付着耐力は破壊形式の影響を受けると考えられ、破壊面が樹脂コンクリート界面の場合に比べて樹脂アンカー界面の場合の方が、接着系あと施工アンカーの付着耐力は大きな値を示す傾向があり、破壊面が移行する場合は両者の間の値を示す傾向がある。

参考文献

- 土木学会コンクリート委員会あと施工アンカー委員会: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），2014 年 3 月
- European Technical Approval Metal Anchors for Use in Concrete, Part five:Methods of Varification, 2002
- 後藤幸正，三浦尚:極低温下における鉄筋コンクリート部歳の性質に関する研究，土木学会論文報告集，第 285 号，1979 年
- 岡本修一，魚本健人:コンクリートの凍結融解性状に関する基礎研究，生産研究，48 巻 10 号，1996 年
- 中山淳，藤掛一典，佐藤紘志，石橋猛，神保隆弘:接着系あと施工アンカーの動的引抜き耐力に関する研究，土木学会第 56 回年次学術講演会