

論文 接着系あと施工アンカーのクリープ特性に及ぼす載荷荷重の影響

久保田 龍太*1・濱崎 仁*2・安藤 重裕*3・高橋 宗臣*4

要旨：接着系のあと施工アンカーでは引張荷重の継続載荷によるクリープ変形に留意する必要がある。本研究では、接着系あと施工アンカーの引張クリープ特性に及ぼす載荷荷重の影響を評価し、長期的に載荷可能な載荷荷重を検討した。載荷荷重の異なる引張クリープ試験によるクリープ変形量から、長期間のクリープ変形量を推定し、クリープ破壊に至るまでの時間と載荷荷重の関係式を得た。この関係式により長期的な許容応力度設定のための載荷荷重の考え方について示した。

キーワード：接着系あと施工アンカー、クリープ特性、載荷荷重、長期許容応力度

1. はじめに

あと施工アンカーは、既存の RC 構造物の補強や設備機器、配管等の固定に必要不可欠なものである。建築物においては、耐震改修における補強フレームの固定や耐震壁の増設、設備機器および配管の固定などに適用されている。しかしながら、クリープ特性や耐アルカリ性などの長期的な性状については不明な点も多いことから、構造物に対して長期荷重を負担させるような使い方については懸念が生じる。長期荷重を負担させるような使い方ができるようになれば既存建物の床スラブの増設・固定、開口部の補強、基礎梁の増し厚補強、エレベーターや工作物の増設や固定等に適用することが想定され、既存ストックの有効活用にもつながる。

本研究においては、接着系あと施工アンカーの長期的な性状のうち、引張クリープ特性に着目している。クリープ特性の評価については、著者らによる研究^{1)~4)}、松崎らによる研究⁵⁾などが報告されているがその数は少ない。特に、載荷荷重に応じたクリープ特性の評価については、長期的な許容荷重を設定する場合の重要な指標になるが、既往の研究例はほとんどない。本研究においては、無機系および有機系の接着系あと施工アンカーを用いたクリープ試験を行った結果から、クリープ特性について評価し、長期的な許容応力度の設定の考え方等について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は外径 $\phi 216.3\text{mm}$ 、内径 $\phi 200\text{mm}$ 、高さ 91mm の鋼管に、呼び強度 18、スランブ 18cm、空気量 4.5%の普通コンクリートを打ち込んだコンクリート試験体に、ハ

ンマードリルを用いて有機系は $\phi 16\text{mm}$ 、無機系は $\phi 18\text{mm}$ の穿孔を行い、接着系あと施工アンカーを打設した。コンクリートに使用した材料を表-1 に、コンクリートの調合を表-2 に示す。

アンカー筋には、公称径 D13 で、降伏点強度が 785N/mm^2 以上の高強度異形棒鋼を用いた。また、載荷および計測のため JIS G 4107 (高温用合金鋼ボルト材) に規定される SNB7 の M14 をアップセットパッド溶接した。試験体の形状および寸法を図-1 に示す。

アンカーの接着剤は、無機系および有機系の 2 種類とした。無機系はセメント主剤のものを、有機系はエポキシ樹脂主剤のものを、用いた。

試験体の養生期間は、コンクリート打設後、材齢 22 日において無機系アンカー施工、27 日後に有機系アンカー施工を行った。その後、材齢 34 日において後述の短期載荷試験を行った。クリープ試験は、有機系が材齢 155 日、無機系が材齢 128 日～155 日の間に載荷を開始させた。短期載荷試験時 (材齢 33 日) のコンクリート強度 (σ_b) は、 26.4N/mm^2 、クリープ試験開始時点 (材齢 128 日) のコンクリート強度は 28.5N/mm^2 であった。

表-1 コンクリートに使用した材料

セメント(C)	普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm^3)
粗骨材(G)	茨城県笠間産砕石 (表乾密度: 2.65g/cm^3)
細骨材(S)	茨城県行方市産砕砂 (表乾密度: 2.56g/cm^3)
混和剤(Ad.)	変性リグニンスルホン酸系 AE 減水剤標準型

表-2 コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				
		C	W	G	S	Ad.
70.8	51.7	263	186	877	909	2.63

*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

*2 芝浦工業大学 工学部建築学科准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 (正会員)

*4 日本ヒルティ (株) 技術本部 (正会員)

2.2 短期載荷試験

あと施工アンカーの最大付着応力度およびその時の変位を求めるため、静的引抜き試験を行った。本研究では、これを短期載荷試験と称する。短期載荷試験は、クリープ試験開始前およびクリープ試験後に実施し、**図-2**および**写真-1**に示す装置を用いて油圧ジャッキによって載荷した。変位の計測は、**図-1**に示すアンカー筋の自由端および載荷側の変位を測定した。本試験ではアンカー筋周辺を載荷板により拘束してコンクリートのコン破壊を防ぎ、接着剤の付着破壊が生じるようにした。試験体数は有機系および無機系を各6体とした。

2.3 クリープ試験

クリープ試験は、**図-3**および**写真-2**に示すクリープ載荷装置を用い、油圧ジャッキによってコイルバネに反発力を導入し、その反発力によって継続荷重を載荷した。載荷荷重は、式(1)における付着応力度として、 3.33N/mm^2 、 6.67N/mm^2 、および短期載荷試験で得られた最大付着応力度の平均値に対して50%、66.7%および80%の付着応力度の5段階を目標荷重とした。本研究では最大付着応力度と実際に載荷荷重による付着応力度の比を荷重レベルと称す。

試験体への載荷荷重の目標値と実測値を**表-3**に示す。**表-3**の最大耐力との比を求める場合のコンクリート強度は、短期載荷試験時のコンクリート強度を基準としている。

$$\tau = \frac{P}{\pi d l} \sqrt{\frac{\sigma_B}{21}} \quad (1)$$

ここに、 τ : 付着応力度(N/mm^2)

P : 荷重(N)

d : 鉄筋の公称径(mm)

l : 鉄筋の付着長さ(mm)

σ_B : コンクリート強度(N/mm^2)

試験体数は、 $\tau=3.33\text{N/mm}^2$ および 6.67N/mm^2 は各1体、その他は各2体とした。なお、O-3については、試験装置の故障により除外した。クリープ試験は、気温 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $65\pm 5\%$ の恒温恒湿環境下で実施し、少なくとも90日間の載荷を行った。

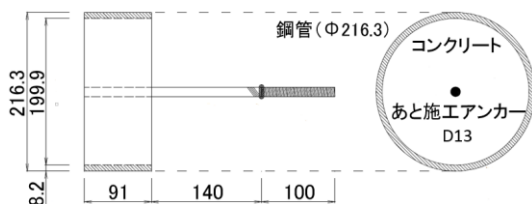


図-1 試験体形状および寸法



写真-1 短期載荷試験状況



写真-2 クリープ試験状況

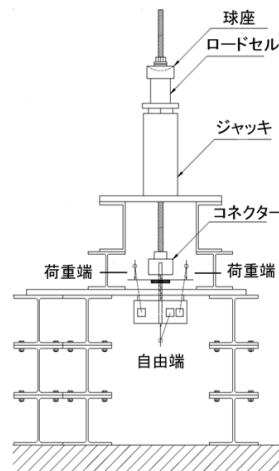


図-2 短期載荷試験装置

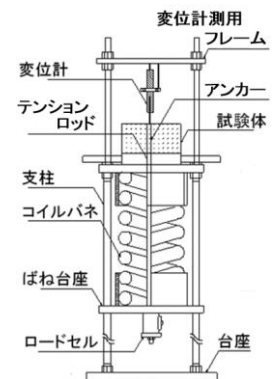


図-3 クリープ載荷装置

表-3 試験体への載荷荷重

有機系	載荷荷重 (kN)	荷重レベル	無機系	載荷荷重 (kN)	荷重レベル
O-1	14.6	0.14	I-1	14.4	0.19
O-2	29.3	0.28	I-2	28.7	0.37
O-3	—	—	I-3	45.2	0.59
O-4	59.1	0.57	I-4	46.6	0.61
O-5	76.6	0.74	I-5	62.8	0.82
O-6	77.2	0.75	I-6	62.4	0.81
O-7	82.2	0.79	I-7	74.9	0.97
O-8	78.6	0.76	I-8	68.6	0.89

3. 実験結果および考察

3.1 短期荷重試験

表－4 に短期荷重試験の結果を示す。また、図－4 に荷重－変位曲線の例を示す。

有機系接着剤は無機系接着剤に比べて変位が大きく破壊に至るまでの変位が大きい。試験前後の比較では、有機系接着剤は最大荷重がほぼ変わらず最大荷重時の変位は大きくなっている。無機系接着剤は最大荷重が20%程度大きくなるが、最大荷重時の変位の増加はわずかであり、水和の進行による強度の上昇と剛性の向上の双方の効果によるものと思われる。

アンカー筋の変位は、自由端側はアンカー筋自体の伸びの影響を受けないと考えられるが、荷重側では鉄筋の伸びが加わるため変位が大きくなる。また有機系ではアンカー筋の降伏値（荷重約 100kN）を超えるため、さらに変位が大きくなっている。したがって、本研究における変位の評価は、自由端変位を対象として考えている。

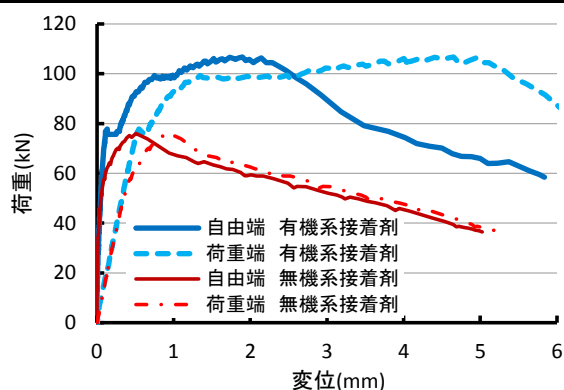
3.2 クリープ試験の結果

図－5 から図－8 にクリープ試験結果を示す。

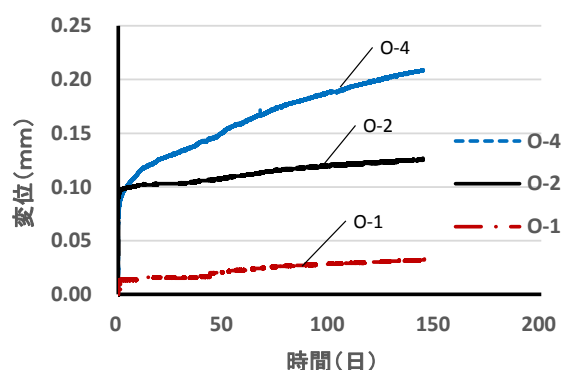
アンカー筋の自由端変位は、クリープ荷重導入時の弾性変形の後に、時間の経過に従ってクリープ変形による変位を生じる。実験で得られたクリープ変位は接着剤のクリープ変形とコンクリートのクリープ変形の両方が含まれているが、本試験では両者を合わせてクリープ変位として評価している。載荷荷重が大きくなるほど弾性変形量およびクリープ変形量は大きくなる。

表－4 短期荷重試験の結果

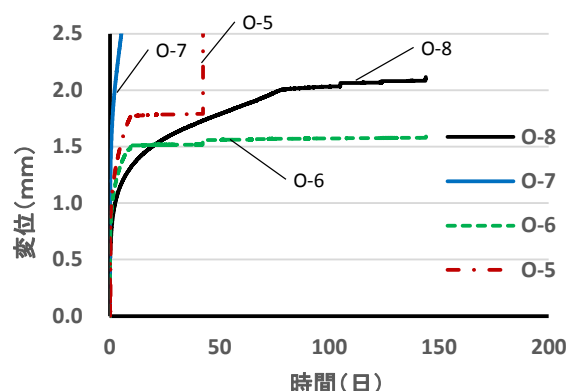
接着剤		有機系		無機系	
試験時期		クリープ	クリープ	クリープ	クリープ
		試験前	試験後	試験前	試験後
最大荷重(kN)		107.6	109.8	84.3	97.6
付着応力度 (N/mm ²)	平均値	30.2	30.7	22.4	26.1
	標準偏差	2.43	3.39	3.25	4.01
最大荷重時 の変位(mm)	平均値	1.76	2.00	0.47	0.52
	標準偏差	0.26	0.40	0.03	0.13



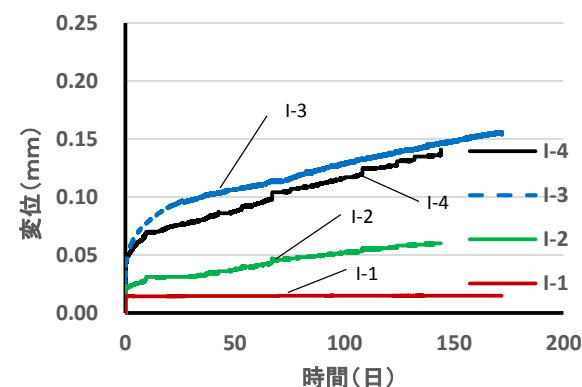
図－4 短期荷重試験における荷重－変位曲線の例



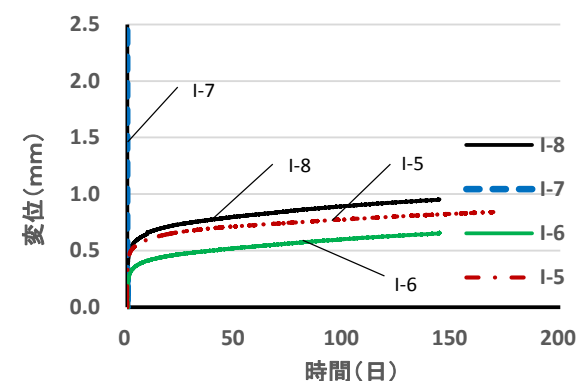
図－5 クリープ試験結果 (O-1～O-4)



図－6 クリープ試験結果 (O-5～O-8)



図－7 クリープ試験結果 (I-1～I-4)



図－8 クリープ試験結果 (I-5～I-8)

なお、O-5 は載荷開始後 42 日、O-7 は 8 日、I-7 は 28 分後にクリープ破壊を生じた。また有機系の O-6 および O-8 については、クリープ変形が大きくなった時点で変位計測に不備が生じている。クリープ破壊直前の自由端変位は、O-7 が 3.318mm、I-7 が 0.967mm であった。また、O-5 のクリープ破壊時の変位は、後述の最小二乗法による近似を用いて変位測定に問題のない期間のデータから推測すると、2.578mm であった。いずれも、短期載荷試験時の最大荷重時の変位よりも大きな値となっている。

3.3 クリープ変形量の推定と破壊時の予測

長期的なクリープ変形量の予測方法は、Findley によって式(2)が提案され⁶⁾、ACI 355.4-11⁷⁾ (以下、ACI 基準と記す)や EOTA ETAG 001 Part 5⁸⁾ (以下、ETAG と記す)におけるクリープ特性の評価においてもその考え方が適用されている。

$$S(t) = S(0) + a \cdot t^b \quad (2)$$

ここに、 $S(t)$: 時間 t における変位量
 $S(0)$: 載荷直後における変位量
 t : クリープ開始後の時間
 a, b : 実験によって求める定数

式中の a, b の定数の求め方は、ACI 基準および ETAG では、クリープ試験における 70 日～90 日における変形量から最小二乗法によって求めることとされている。本研究においてもこの考え方に従い、前節の結果からクリープ変形量の予測を行った。ただし、O-6 については、変位の測定が不可能となった期間以前の 5 日間のデータによって推定を行った。

また、クリープ破壊時の予測は、クリープ変形量の推定値が、短期載荷試験における最大荷重時の変位に達した時点とされており、本研究においても原則としてその考え方に従って予測を行った。しかしながら、これまでの実験結果³⁾においても、短期載荷試験における最大荷重時の変位に比べクリープ破壊時の変位は大きくなることが分かっており、今回の実験結果においても、無機系、有機系ともにクリープ破壊時の変位を短期載荷試験の最大荷重時の変位を上回っていることから、O-7 および I-7

試験体におけるクリープ破壊直前の変位についてもクリープ破壊時の変位として予測し両者を比較した。

クリープ変形量の推定結果として、図-9 および図-10 に測定値と推定値の比較の例、図-11 および図-12 に長期の変形量の予測結果の例を示す。また、表-5 にクリープ破壊に至るまでの予測結果を示す。図に示したように、実測値と推定値はよく一致している。また、長期のクリープ変形量の推定が可能である。クリープ破壊に至るまでの時間は荷重レベルが大きい場合、短期載荷試験の変位で予測すると実際のクリープ試験の結果と比較して極端に短くなることから、クリープ破壊時の変位で予測した方が実際の現象に近くなることが推測される。言い換えれば、短期試験時の変位で評価をすることによって相当の安全側の評価をすることになるといえる。

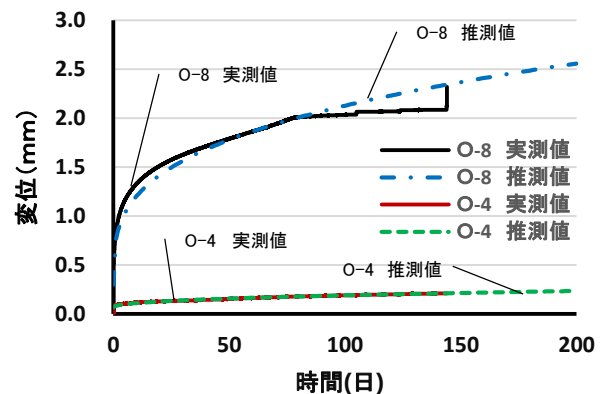


図-9 クリープ試験の実測値と推定値の比較（有機系）

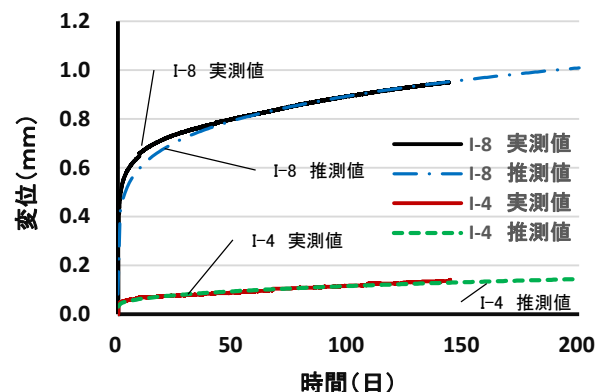


図-10 クリープ試験の実測値と推定値の比較（無機系）

表-5 クリープ破壊に至るまでの時間の予測結果

クリープ破壊の評価の基準とした変位		O-1	O-2	O-3	O-4	O-5	O-6	O-7	O-8
破壊に至るまでの時間 (年)	短期載荷試験 (1.785mm)	1053	697.8	—	106.9	破壊	0.0567	破壊	0.139
	クリープ試験 (3.318mm)	3196	2574	—	453.3	破壊	0.927	破壊	1.418
クリープ破壊の評価の基準とした変位		I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	I-8
破壊に至るまでの時間 (年)	短期載荷試験 (0.467mm)	1.21×10^{55}	72.57	4.931	13.34	0.0038	0.0869	破壊	0.0056
	クリープ試験 (0.967mm)	3.95×10^{60}	344.2	21.97	81.13	1.469	2.239	破壊	0.4304

3.4 荷重レベルとクリープ破壊時間の関係

松崎らの研究⁵⁾によれば、ポリエステル樹脂系のあと施工アンカーの荷重レベルとクリープ破壊に至るまでの時間には、時間の対数に比例関係があると報告され、(3)式の関係が示されている。

$$Ls/Pt = -0.11\log(T \times 365) + 0.74 \quad (3)$$

ここに、 Ls/Pt : 最大耐力との荷重比

T : 時間 (ただし、 $T \geq 1.18 \times 10^{-5}$ 年)

図-13 および図-14 に荷重レベルと破壊に至るまでの時間の関係を示す。時間軸は対数で表している。また、短期試験時の荷重レベルを1とし、载荷時間は3分と仮定して計算している。なお、試験体 I-1 については破壊に至るまでの時間が極端に大きいことから算定から除外した。

荷重レベルと破壊に至るまでの時間の間には、おおよそ時間の対数との比例関係が確認される。有機系における短期載試験時の変位による場合を(4)式、クリープ破壊時の変位による場合を(5)式、無機系における短期載試験時の変位による場合を(6)式、クリープ破壊時の変位による場合を(7)式に示す。

$$D = -0.0971\log_{10} t + 0.591 \quad (4)$$

$$D = -0.0907\log_{10} t + 0.649 \quad (5)$$

$$D = -0.0817\log_{10} t + 0.642 \quad (6)$$

$$D = -0.0707\log_{10} t + 0.734 \quad (7)$$

ここに、 D : 最大付着応力度との比

t : 破壊に至るまでの年数 (年)

これらの式が得られたことにより、長期的に载荷が可能な荷重を得ることができる。例えば、短期載試験時の変位を基準として考えた場合、ACI 基準等における評価の目安である 50 年間クリープ破壊に至らない荷重レベルは有機系では最大付着応力度の 0.43 倍、無機系では 0.66 倍に相当する荷重レベルとなる。また、クリープ破壊時の変位を基準とした場合には、同じく有機系が 0.68 倍、無機系が 0.75 倍となる。同様に 100 年間でクライテリアとして考えた場合には、クリープ破壊に至らない荷重レベルは、有機系では最大付着応力度の 0.40 倍、無機系では 0.48 倍に相当する荷重レベルとなる。また、クリープ破壊時の変位を基準とした場合には、同じく有機系が 0.47 倍、無機系が 0.59 倍となる。

相対的に無機系の値が大きくなった理由として、短期載試験時(施工後 12 日後)の付着強度が、クリープ開始時(施工後 116 日以降)のまで間に強度増進したこと等が考えられる。試験方法の標準化等を検討する際、試

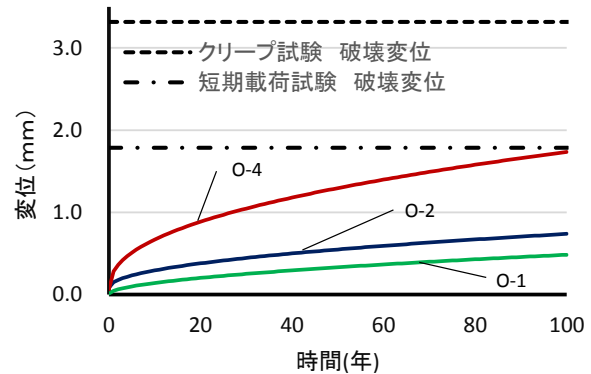


図-11 クリープ変形量の予測結果の例 (有機系)

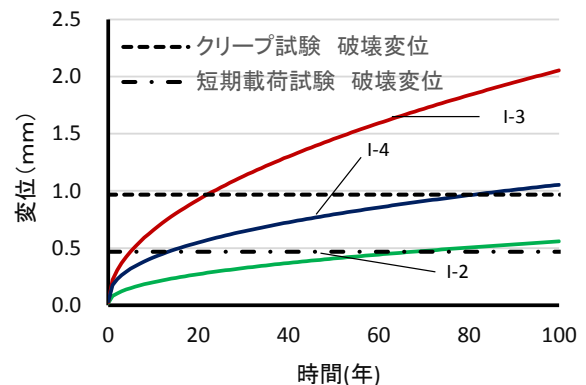


図-12 クリープ変形量の予測結果の例 (無機系)

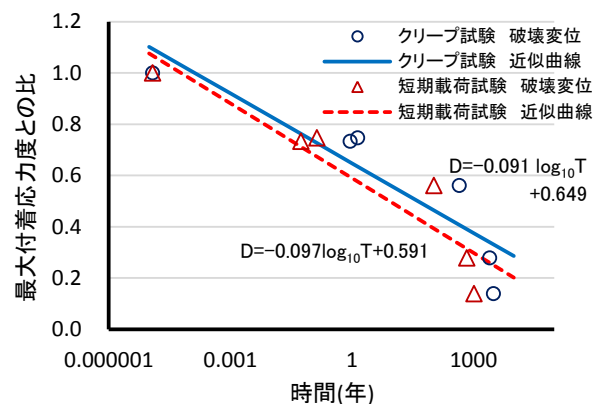


図-13 荷重レベルと破壊に至るまでの時間の関係 (有機系)

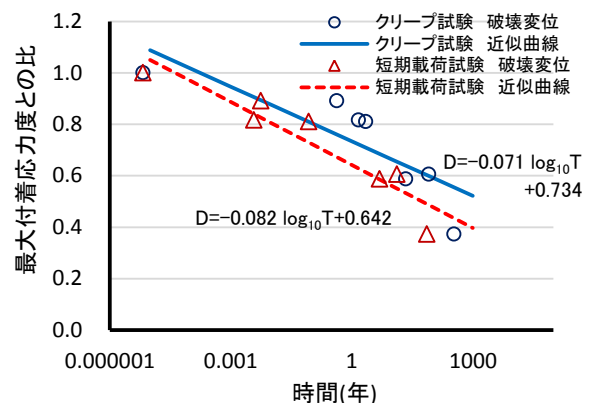


図-14 荷重レベルと破壊に至るまでの時間の関係 (無機系)

験の実施時期などについても考慮が必要である。

なお、これらの結果は、本実験に使用した材料に特有の値であるため、すべての接着系あと施工アンカーに当てはまるのではなく、使用する材料によってその特性は異なる。したがって、個々の材料について、短期載荷試験における最大耐力やそのばらつきとそのクリープ特性の両者を評価することが重要であるといえる。また、クリープ破壊時の変位を基準とした場合には、クリープ破壊に対する余裕度の観点から、材料のばらつきなども考慮した荷重レベルの設定が必要であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、有機系および無機系の接着系あと施工アンカーに対するクリープ試験を行い以下のような知見を得た。

- 1) 載荷荷重の異なるクリープ試験を行い、荷重レベルごとの長期的なクリープ変形量およびクリープ破壊に至るまでの時間を推測できた。
- 2) クリープ破壊の評価を行う際の基準となる変位は、ACI 基準における短期載荷試験で得られた最大付着応力度時の変位を基準とするのではなく、クリープ破壊に至る直前の変位を基準とした方が、実際のクリープ破壊までの時間を評価できると思われる。
- 3) 有機系、無機系それぞれについて荷重レベルとクリープ破壊に至るまでの時間の関係式が得られた。また、この関係式によって、目標とする期間についてクリープ破壊に至ることがない荷重レベルの設定の考え方を示した。

謝辞

本研究の実施にあたっては、国立研究開発法人建築研究所土屋直子氏の協力を得た。記してここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 濱崎仁ほか：接着系あと施工アンカーの長期特性の評価に関する実験 その 1 引張クリープ特性の評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.691-692，2014.9
- 2) 安藤重裕ほか：あと施工アンカーの引張クリープ試験方法の基礎的評価，日本建築学会技術報告集，第 21 巻，第 47 号，pp.7-10，2015.2
- 3) 兼吉孝正ほか：超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性 その 6 クリープ特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.661-662，2014.9
- 4) 高橋宗臣ほか：穿孔機械の違いによる注入方式あと施工アンカーの長期引張性能実験 簡易引張クリープ試験装置による検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.665-666，2014.9
- 5) 松崎育弘，阿部保彦，宇佐見滋：ポリステル系樹脂アンカーの長期持続引張荷重による限界耐力（常温及び 65℃の場合），日本建築学会関東支部研究報告集，pp.249-252，1981.3
- 6) Findley, W. N.: Mechanism and Mechanics of Creep of Plastics, Society of Plastics Engineers Journal, pp.57-65, 1960
- 7) American Concrete Institute : ACI355.4-11 Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete, Aug.2011
- 8) European Organization for Technical Approval : ETAG 001 GUIDLINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL OF METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE Part 5 BONDED ANCHORS, Feb.2008