

## (25) あと施工アンカーボルトの動的引抜き破壊特性に関する実験的考察

## AN EXPERIMENTAL STUDY OF DYNAMIC FAILURE MECHANISM OF CHEMICAL AND MECHANICAL ANCHOR BOLT UNDER PULLOUT LOADING

園田佳巨\*, 佐藤紘志\*\*

Yoshimi SONODA, Hiroshi SATOH

\* 博士(工学) 防衛大学校講師 土木工学科(〒239-8081 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\* 工博 防衛大学校教授 土木工学科(〒239-8081 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード:あと施工アンカーボルト、動的引抜き破壊

(Chemical and mechanical anchor bolts, dynamic pullout failure)

## 1. はじめに

あと施工アンカーは、従来、主に建築分野において配管の固定等の軽微な用途に使用されてきたが、最近では耐震補強壁の接合部やガードレール支柱の基礎部等の構造上重要かつ動的な荷重が作用する箇所にも利用され始めている。しかし、あと施工アンカーの耐力特性に関する検討は必ずしも多くなく、また過去の研究<sup>1), 2)</sup>は静的荷重に対するもののみであり、動的な外力に対する耐力の評価はなされていない。そこで、本研究ではあと施工アンカーボルトに動的な引抜き荷重が作用したときの破壊メカニズムや耐力特性を把握することを目的として、載荷速度をパラメータとした引抜き試験を行い、その動的破壊特性について検討した。

## 2. 実験の概要

本実験では、金属系と接着系の2種類のあと施工アンカーに対して動的引抜き耐力を検討した。両者のコンクリート母材に対する定着機構は全く異なり、金属系アンカーが主に拡張部の摩擦抵抗によるものであるのに対して、接着系アンカーは接着剤の付着力によることから、両者の比較を力学的観点から行うには、ボルトの埋め込み深さを同一にすることが望ましいが、本実験では両者のアンカーの一般的な使用条件下で検討を行い、それぞれに載荷速度の影響を考察した。

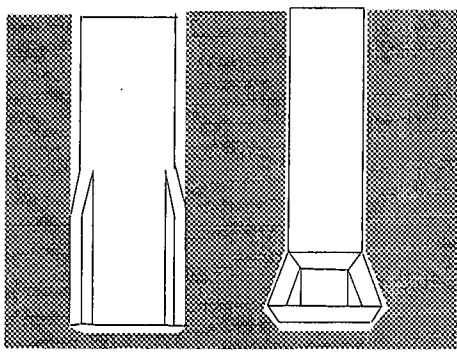
## 2.1 実験試験体

図-1に示すような、拡張部形状の異なる2タイプの

金属系アンカーとポリエステル樹脂系の接着系アンカーを用いた。アンカーボルトの諸元は、表-1に示すとおりである。なお、使用するボルト径がM10と小さいことから、実験値に対する骨材の影響を極力小さくするために、表-2に示すような示方配合による1:3モルタルを用いて、図-2に示す寸法の試験体を製作した。なお、試験時のテストピースの圧縮強度は180~200kgf/cm<sup>2</sup>、割裂試験による引張強度の平均値は15 kgf/cm<sup>2</sup>であった。

## 2.2 実験方法

載荷は、図-3のような引張載荷装置を高速載荷装置の下に設置することで、圧縮力を引張力に変換してボルトに引抜き荷重を与えた。試験体は、ボルト設置面を下側に向け、支点間距離40cmの4辺単純支持とした。計測項目は、引抜き荷重、載荷点変位、試験体表面ひずみの3項目であり、ひずみの測定は、図-4に示すようにボルト中心からの距離が50mm、100mmの2個所に2軸ゲージを貼付し、ボルト中心を基準とした極座標に対する半径方法ひずみおよび円周方向ひずみの2成分を計測した。実験は、表-3に示すような静的、低速、中速、高速の4種類の載荷速度に対して行った。なお、表中の載荷速度は、レーザ式変位計による実測の載荷部変位-時間関係の勾配から換算した値の平均値を示しており、ひずみ速度は使用したボルトの初期長さ(120mm)を基準にし



(a)内部コーン打込み型 (b)アンダーカット型 (c)接着系アンカー

図-1 実験に使用したあと施工アンカーボルト

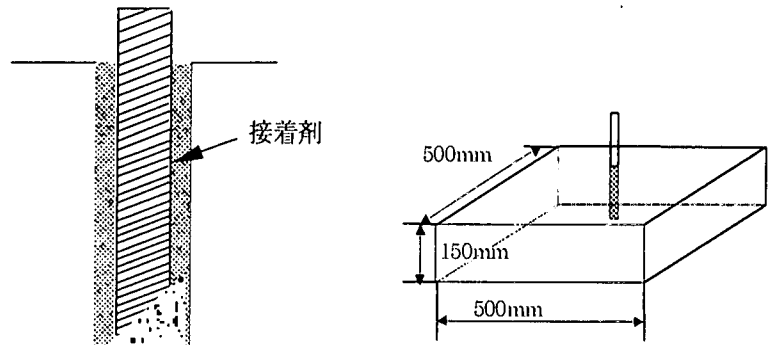


図-2 試験体寸法

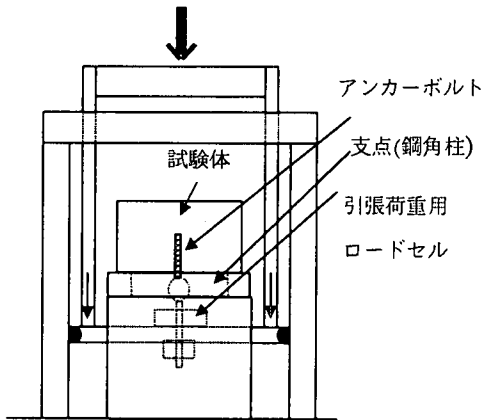


図-3 引抜き荷重試験状況

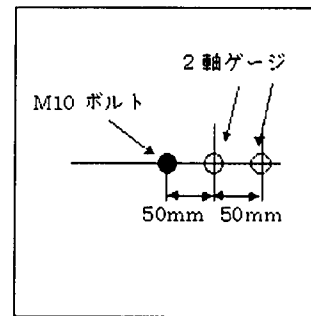


図-4 ひずみゲージの貼付位置

表-1 アンカーボルトの諸元

種類	タイプ	ボルト径	穿孔径	穿孔深さ
金属系	内部コーン拡張型 アンダーカット型	10mm	12mm	40mm
接着系	ポリエステル樹脂系	10mm	12mm	80mm

表-2 モルタルの示方配合

呼び強度 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	水セメント比 W/C(%)	空気量 (%)	単位量(kgf/m <sup>3</sup> )		
			水	セメント	細骨材
180	72.0	4.0	285	396	1434

(平均圧縮強度  $\bar{\sigma}_c = 190 \text{ kgf/cm}^2$ 、平均引張強度  $\bar{\sigma}_t = 15 \text{ kgf/cm}^2$ )

表-3 実験ケース一覧

実験ケース	平均荷重速度 (cm/s)	平均ひずみ速度 (1/s)
静的荷重	$1.20 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-4}$
低速荷重	3.20	0.26
中速荷重	45.0	3.75
高速荷重	151.7	12.64

た公称ひずみをもとに求めている。この表より、本実験はボルトから見た場合、 $10^{-4} \sim 10^1$ 程度のひずみ速度の範囲を網羅していることがわかる。

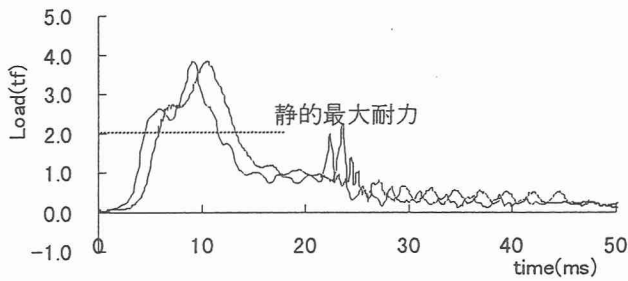
### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 引抜き速度が破壊形態と最大耐力に与える影響

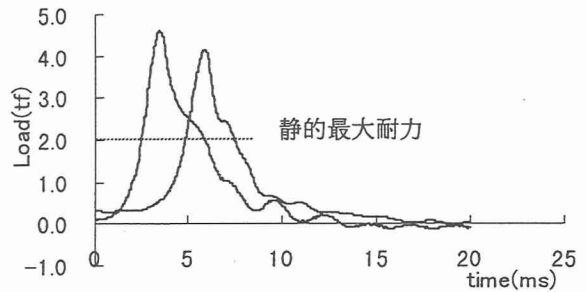
##### (1) 接着系アンカー

図-5(a)~(b)は、それぞれ、中速および高速荷重試験による引抜き荷重-時間関係の例を示したものである。図中の破線の値は、静的試験による最大耐力を示しており、引抜き速度が速くなるにつれ低速荷重で約25%、中速荷重で約50%、高速荷重になると約80%

も最大耐力が増加する結果が得られた。図-6は、全実験結果をもとに引抜き速度と最大耐力の関係をまとめたものである。この図より、引抜き速度が1m/s程度で最大耐力が4.2~4.6tf程度のピーク値に達し、それ以上の引抜き速度を与えても耐力の上昇は見られなくなることがわかる。写真-1は、低速荷重時と高速荷重時の破壊状況を示したものである。本実験では、ボルトにS45C材を使用しており、モルタル母材の強度も小さいことから、全試験体でコーン破壊を示した。全般的には、荷重速度とともにコーン面積が大きくなる傾向にあるが、中速荷重では逆に静的荷重ケースよりもコーン面積が小さくなるなど、明確な荷重速度との相関性は



(a) 中速引抜き荷重-時間関係



(b) 高速引抜き荷重-時間関係

図-5 接着系アンカーの最大耐力に引抜き速度が与える影響

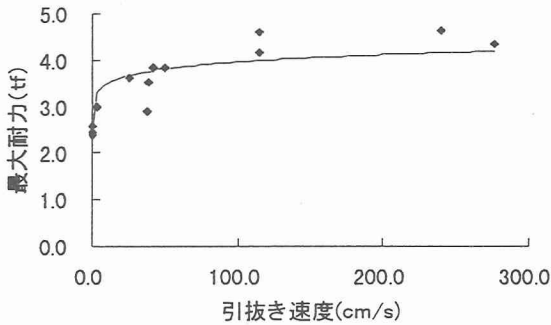
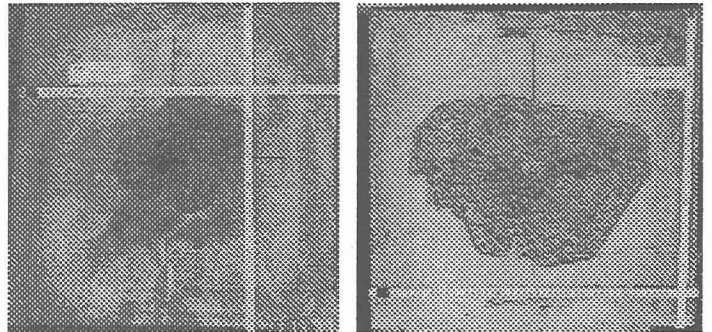


図-6 引抜き速度と最大耐力の関係



(a) 低速引抜き破壊状況 (b) 高速引抜き破壊状況  
写真-1 接着系アンカーの動的引抜き破壊状況

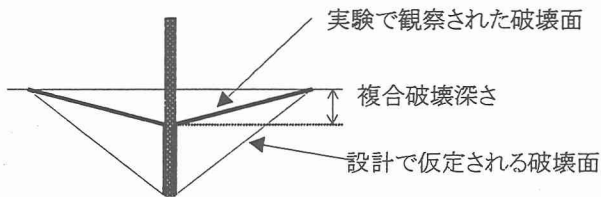


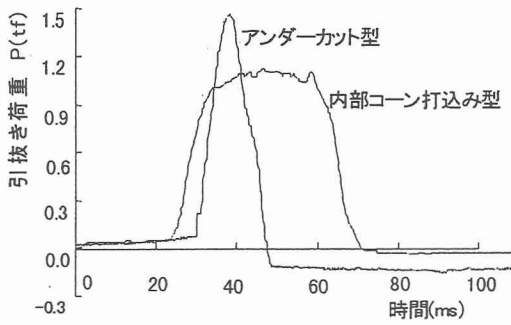
図-7 接着系アンカーの破壊モード

見られず、同程度の速度においてもコーン面積には大きなばらつきが見られた。また、実際の破壊形態は理想的なコーン破壊ではなく、図-7に示すようなコーン破壊と付着破壊の複合型を全ての実験ケースで示した。したがって、現行のようなアンカー底部を基点としたコーン破壊による耐力算定式や、付着破壊が単独で発生することを想定した耐力の評価式は、本ケースのような破壊形態では適用し難く、コーン破壊と付着破壊の複合的な破壊モードを想定した新しい耐力の評価方法を確立する必要があるものと考えられる。

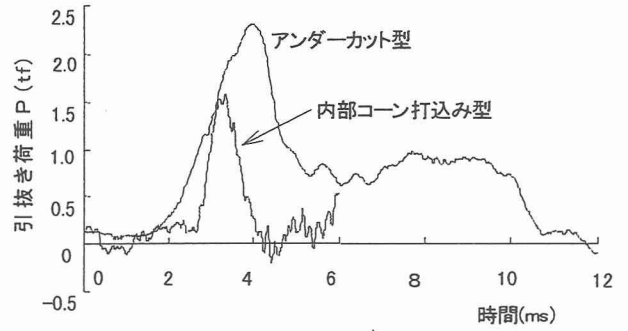
## (2) 金属系アンカー

図-8は、それぞれ内部コーン打込み型とアンダーカット型の低速載荷と高速載荷試験による引抜き荷重-時間関係を比較したものである。この図より、載荷速

度に関わらずアンダーカット型の方が内部コーン打込み型よりも大きな引抜き耐力を示すことがわかる。また図-9に示すように、両者ともに載荷速度の増加とともに最大耐力も増大する傾向にあり、低速載荷時に対する高速載荷時の最大耐力は、内部コーン打込み型で約40%、アンダーカット型で約60%増加した。しかし、必ずしも載荷速度に比例して耐力の増加が見られるわけではなく、特にアンダーカット型の場合には、ある一定の速度(本実験では約30cm/s)を境に急激な耐力の増加が認められ、引抜き力に対する抵抗のメカニズムが、コンクリート面との摩擦抵抗から拡張部自体のアンカーのせん断変形に対する抵抗へと、載荷速度の増大にともない移行したものと推察される。写真-2は、両タイプのアンカーによる高速引抜き破壊状況を示したものである。本実験では全ケースで写真に示すような、アンカー埋込み底部から生じる全体コーン破壊を示したが、載荷速度に関わらずアンダーカット型の方がコーン面積は約60~80%程度も大きくなることが確認された。現在の設計法においては、両者でボルトの埋込み深さが同じであるため、コーン破壊による引抜き耐力は同じであり、アンダーカット型の利点は既にひび割れが生じているコンクリートに対して安定した耐力が

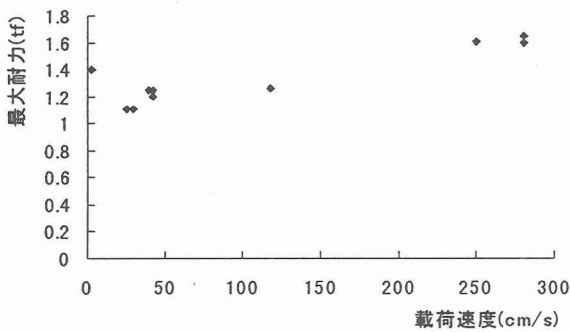


(a) 低速引抜き荷重－時間関係

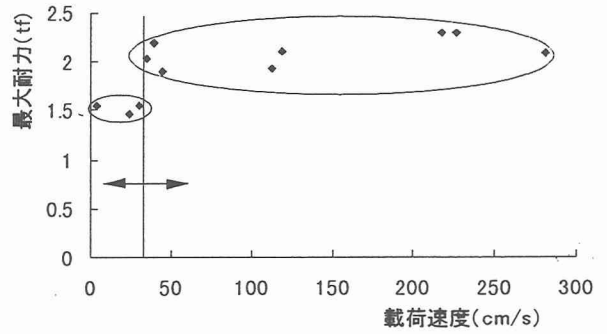


(b) 高速引抜き荷重－時間関係

図－8 金属系アンカーの動的引抜き荷重－時間関係

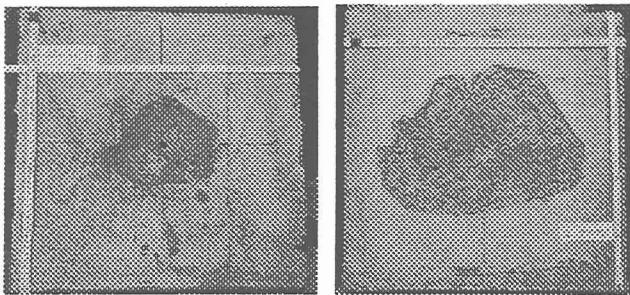


(a) 内部コーン打込み型



(b) アンダーカット型

図－9 载荷速度と最大耐力の関係



(a) 内部コーン打込み型 (b) アンダーカット型

写真－2 金属系アンカーの高速引抜き破壊状況

得られることとして評価されている。しかし、常にアンダーカット型の方がコーン面積とともに耐力も大きくなる事実を考えると、コーン有効面積の算定に引抜き力に対する抵抗のメカニズムの相違を考慮することで、アンダーカット型の耐力の正確な評価を行う必要があるものと思われる。

### 3.1 接着系アンカーの複合破壊モードに関する考察

ここでは、接着系アンカーで見られたコーン破壊と付着破壊の複合モードに対する基礎的考察を行った。すなわち、複合モードに対する新しい耐力算定法を見出すための基礎的段階として、静的複合破壊深さの簡

易算定法について検討した。

#### (1) 接着剤の付着応力伝達状況に関する静的実験

接着系アンカーの破壊メカニズムを明らかにするには、接着剤の付着応力伝達状況を把握することが不可欠である。そこで、ここでは図－10 に示すように、切欠きに単軸ゲージを貼付したアンカーを鋼管の中に入れ、周囲に接着剤を充填させた試験体を3体製作し、静的引張試験を行ったときのアンカー側と鋼管側のひずみを計測し、接着剤の付着応力分布を調べた。表－4の値は、静的引張荷重 2tf 時の3回の実験で得られた平均ひずみ値を示している。式(1)による計算式から各計測区間内の付着力を求めると、図－11の灰色部分に示すような接着剤の応力分布が得られた。

$$P_{bx2} - P_{bx1} = E\varepsilon_{x1}A - E\varepsilon_{x2}A = \int_{x1}^{x2} \pi D \tau(x) dx \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_{x1}, \varepsilon_{x2}$  : 埋込み深さ X1, X2 で計測されたボルトのひずみ

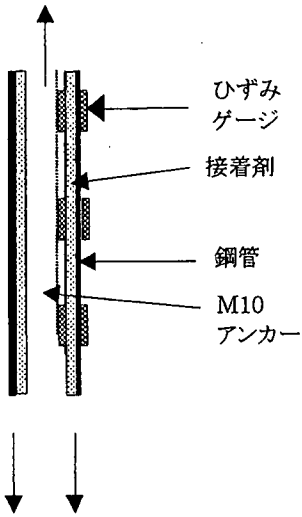


図-10 付着応力測定実験

表-4 ひずみ分布(ボルト側)

ゲージ貼付位置(mm)	引抜き耐力2tf時のひずみ(μ)
10	826.5
25	630.5
40	530.5
55	372.5
70	138

コーン破壊耐力は、式(2)に示されるように有効コーン面積がボルトの埋込み深さ $X$ の2次関数として表されることから、埋込み深さの自乗に比例して増加するものと考えられる。一方、付着破壊耐力も、式(3)に示される接着剤の付着応力 $\tau(x)$ が未知の関数ではあるが、ボルトの埋込み深さとともに単調に増加するものと考えられる。

$$P_c(x) = \sigma_f A_c(x) \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_f$ : コンクリートの引張強度、

$$A_c(x) = \pi(x \tan \theta + \frac{D}{2})^2 - \pi(\frac{D}{2})^2 : \text{有効コーン面積} \\ (D \text{ はボルト径})$$

$$P_b(x) = \int_0^x \pi D \tau(x) dx \quad (3)$$

前野らは、コーン破壊もしくは付着破壊が単独で生じる場合には、これら両者の中で小さい値を示す方の破壊モードが得られるものと考えられ、複合破壊のケースでは、その発生深さにおいて両者の値が等しくなる状況が生じていることを指摘している<sup>2)</sup>。そこで、静的実験で得られた付着応力分布をもとに、関数 $\tau(x)$ として図-11の破線で示すような、以下の3通りに仮定し

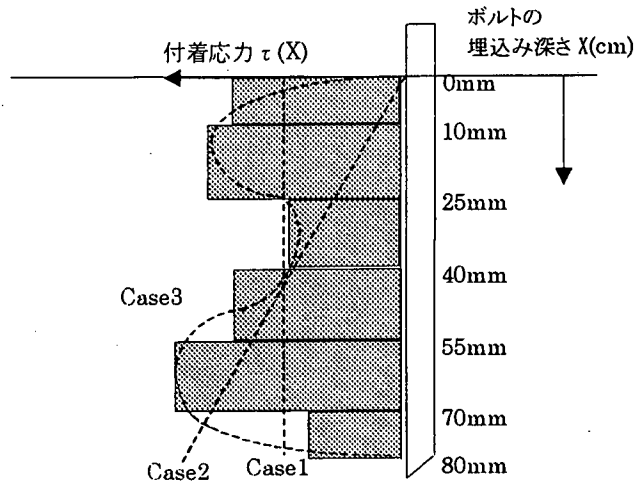


図-11 接着剤の静的付着応力分布

表-5 複合破壊発生深さ $X_c$ に関する比較

付着応力分布	計算値(cm)	実験値(cm)
Case 1	4.7	3.9
Case 2	8.0	
Case 3	4.2	

たときの複合破壊深さについて計算を試みた。

Case 1: 付着応力が深さ方向に一様に分布しているものと仮定

Case 2: 付着応力が深さ方向に線形的に増加するものと仮定

Case 3: 簡易実験で得られた付着応力分布をもとに 4次式で補間した関数を仮定

すなわち、3通りの関数 $\tau(x)$ を式(3)に代入し、式(2)と等値としたときの深さ $X$ に関する式を解き、有意な解( $0 \leq X \leq$  埋込み深さ)を選択すると、表-5の値が得られた。この表より、静的実験の複合破壊深さと簡易実験による付着応力を用いた計算値は良好に一致しており、今後より詳細な検討から接着剤の付着応力分布を表す関数 $\tau(x)$ を求めれば、信頼性のある複合破壊深さの算定が可能であることが推察された。

#### 4. 結論

本研究では、引抜き抵抗機構が異なる2種類のあと施工アンカーボルトに対して、動的な引抜き荷重が作用したときの破壊形態および耐力特性について検討した。本研究で得られた成果を要約すると以下ようになる。

(1) 接着系アンカーの最大引抜き耐力は、引抜き速度とともに増加する傾向にあり、引抜き速度が約 100cm/s で静的耐力に比べて約 80%増加した。しかし、それ以上の速度を与えても耐力の上昇は見られないことが認められた。

(2) 接着系アンカーの動的引抜きによるコーン破壊面積にはばらつきが大きく、引抜き速度との相関性は小さいことが推察された。また、全実験ケースで付着破壊をとともなう複合的な破壊モードを示す結果が得られ、現行のコーン面積を基準とした耐力の評価式の適用は、理論的な根拠に乏しいものと思われる。

(3) 今回の実験で用いた2種類の金属系アンカーの場合、最大引抜き耐力は引抜き速度とともに増加することが確認された。特に、アンダーカット型の方がその傾向が顕著であり、載荷速度がある一定の速度(本実験では約 30cm/s)を境に大きな耐力の増加が見られた。

このことは、引抜き抵抗のメカニズムが摩擦抵抗から拡張部自体のせん断変形に対する抵抗へと移行していくためであると思われる。

(4) 2種類の金属系アンカーで動的引抜き耐力を比較すると、常にアンダーカット型の方が内部コーン型よりも 20~30%程度大きくなることが認められた。この相違

については、発生するコーン面積自体もアンダーカット型の方が大きいことから、現在のコーン面積の計算方法にアンカー拡張部の影響による修正を加えることで考慮することができるものと思われる。

(5) 接着剤の付着応力分布に関する簡易な実験のデータを用いることにより、接着系アンカーによる複合破壊深さについて評価できることが確認された。

謝 辞: 本実験を行うにあたり、神奈川県産業総合研究所研究員の篠原敬治氏および小林行雄氏には貴重な助言をいただきました。また試験体の製作には日本デコラックス(株)東京営業所長の佐竹尚信氏と峰岸(株)東京機材部長の松村光男氏には御助力いただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 細川洋治: あと施工アンカーの強度と剛性に関する基礎的研究(東京大学学位論文), 平成4年5月
- 2) 前野裕文、後藤芳顕、小畑誠、松浦聖: 引抜き力を受ける付着型アンカーボルトの定着部の破壊機構に関する研究, 土木学会論文集, No.441/I-18, pp.185-192, 1992年1月