

## 論文 繰返し荷重を受ける曲げ部材のアンカーの引抜けモデル

杉山 伸康<sup>\*1</sup>・椿 龍哉<sup>\*2</sup>・林 和彦<sup>\*3</sup>

**要旨：**橋脚の耐震補強工法のための RC 巻立て工法で用いるあと施工アンカーの挙動のモデル化を行った。モデル化には RC 巻立て柱を模した供試体の正負交番載荷と準動的載荷における実験結果、および定着部におけるアンカー筋の単調引抜き実験の結果を用いた。本モデルは載荷履歴を表現するためのパラメータを組み込むことにより、種々の載荷履歴を受けるアンカー筋の平均応力 - すべり関係を表すことができる。

**キーワード：**あと施工アンカー、繰返し荷重、モデル化、引抜け、すべり

### 1. はじめに

兵庫県南部地震以降、橋脚の耐震補強工法として RC 巻立て工法が実施されている。RC 巻立て工法の中には、RC 巻立て部（以下、補強部）の軸方向鉄筋を、エポキシ樹脂を用いたあと施工アンカーによってフーチングに埋め込む工法があり、近年注目されている。本工法の利点として、橋脚の曲げ耐力が向上し、地震後の残留変位を少なく抑えることができることが知られている。しかし、問題点としてアンカー埋込み長と動的挙動の関係が不明であることが指摘されている。

有限要素解析などの応力解析を用いて、地震動を受ける橋脚の挙動をシミュレーションする場合、橋脚とフーチングの局所的変形の影響を接合要素で表現している。既存の接合要素モデルは、コンクリートと鉄筋の界面における付着応力 - すべり関係が用いられている。しかし、本研究の対象である RC 巻立て柱では、エポキシ樹脂で接着されたあと施工アンカーを用いているため、付着部が複合的構造となり、既存のモデルを適用できない。一方、エポキシ樹脂を用いたアンカーの引抜き実験は数多く報告されているが、実施工条件を考慮した繰返し載荷による研究はこれまでに行われていない。

そこで本研究では RC 巻立て柱を模した供試体の正負交番載荷と準動的載荷における実験（本学で実施）<sup>1)</sup>、および著者らによる定着部におけるアンカーの単調引抜き実験に基づき、あと施工アンカーの挙動のモデル化を試みた。

### 2. RC 巻立て柱のアンカーの挙動

#### 2.1 供試体概要

実験の対象とした既存の RC 橋脚は、1980 年以前の基準を基に設計、施工された独立 2 本柱形式および壁形式の中の代表的な寸法のもの（以下、既存橋脚）である。補強後の供試体形状を図-1 に示す。既存橋脚の柱主鉄筋には D10(SD295A)、D13(SD345)鉄筋、柱帯鉄筋には D3 鉄筋、フーチング上側主鉄筋には D6(SD295A)鉄筋、下側主鉄筋には D13、D16(SD295A)鉄筋、補強部の主鉄筋、アンカー筋には D10(SD345)鉄筋、帯鉄筋には D6(SD345)鉄筋を使用した。鉄筋の力学特性を表-1 に示す。使用したエポキシ樹脂の圧縮降伏強さは 74.3MPa、引張強さは 51.1MPa である。コンクリートは、最大粗骨材寸法 10mm のレディミクストコンクリートである。実験日のフーチングコンクリートの圧縮強度は、現場養生で 24MPa 程度である。あと施工アンカーの埋込み長は鉄筋径の 20φ である。埋込み長 20φ

\*1 横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻 (正会員)

\*2 横浜国立大学大学院 工学研究院 教授 Ph.D. (正会員)

\*3 横浜国立大学大学院 工学研究院 助手 修士 (工学) (正会員)

は、実施工における標準埋込み長である。

表-1 鉄筋の力学特性

径	規格	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
D3	—	323	341
D6	SD295A	350	504
D6	SD345	425	602
D10	SD295A	389	524
D10	SD345	401	552
D13	SD295A	359	503
D13	SD345	373	552
D16	SD295A	368	530

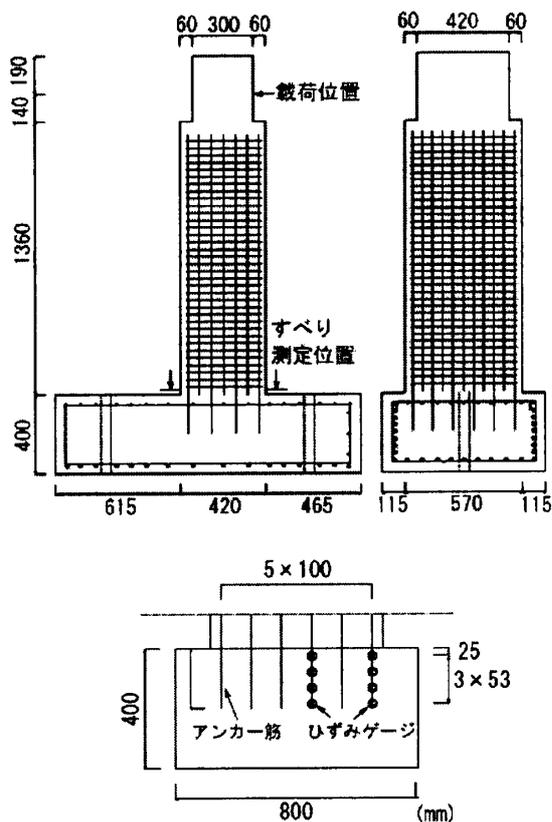


図-1 供試体形状と測定位置

## 2.2 荷重方法および計測方法

軸応力度 0.34MPa 相当の鉛直方向の一定軸力を加力したのち、柱頭部に水平交番荷重を加力している。正負交番荷重では、ひび割れ荷重前は荷重制御方式で繰返し数 1 回ずつの漸増交番

加力とし、ひび割れ後は、変位制御方式により、最大荷重までは部材回転角が 1/200rad, 最大荷重後は 2/200rad の整数倍とした。

準動的荷重で使用された地震波は、兵庫県南部地震で神戸海洋気象台において観測された地震波の NS 成分の 15 秒間である。準動的荷重とは、コンピュータによって計算された応答変位を供試体に強制変位として与え、そのときの復元力を用いて次のステップの運動方程式を解き、得られた応答変位を供試体に強制変位として与えるという過程を繰り返し行い、地震時の応答挙動を生起する実験手法である。

アンカー筋のすべりは、柱の根元から 20mm に設置した変位計を用いて計測している。アンカー筋のひずみは、2 枚 1 ゲージ法で貼り付けたひずみゲージを用いて 4 箇所測定している。それぞれの測定位置を図-1 に示す。通常ひずみゲージを貼り付ける際に鉄筋のリブを削る必要があるが、それによって鉄筋断面が減少することが懸念される。しかし、本実験ではエポキシ樹脂とコンクリートの界面で破壊することが予想されたのでリブ欠損に伴う鉄筋の付着の低下は考慮する必要はないと考えた。

## 2.3 平均応力の算出方法

本研究におけるすべりとはアンカー筋の拔出し量と伸び量の和でありアンカー筋の全体の変化量を表現した指標である。そこでモデル化にあたりすべりに対応する指標としてアンカー筋全体に作用している平均応力を用いた。平均応力の抽出には、図-1 に示すアンカー筋に貼り付けたひずみゲージの値を用いた。ひずみゲージの値を直線近似してアンカー筋のひずみ分布を仮定し、平均ひずみを算出した。アンカーの深さ方向で鉄筋に作用する応力は一様ではなく、鉄筋の応力はフーチング上端で最大となる。フーチング上端で鉄筋応力が降伏点に達すると、他の位置では降伏していなくても、鉄筋の平均応力と平均ひずみの弾性的関係は失われる。したがって、アンカー筋の平均応力の降伏点は、フーチング上端の鉄筋応力がその降伏点に達し

た時点と定義する必要がある。さらに、アンカー筋の平均応力-平均ひずみ関係は、単体鉄筋のような降伏棚はなく、降伏後直ちにひずみ硬化域に入ると定義する必要がある。しかし、エポキシ樹脂中に埋め込まれた鉄筋の挙動を表すモデルは存在しない。以上より、エポキシ樹脂中のアンカー筋の応力-ひずみ関係を検討した。

鉄筋降伏前のアンカー筋の平均応力はアンカー全体が弾性体と考えられるので、平均ひずみに鉄筋の弾性係数を掛け、その値を平均応力とした。降伏後の平均応力は、アンカー筋の降伏点と単体鉄筋のひずみ硬化点を結ぶ経路をたどると仮定した。

降伏後の除荷と再載荷時の平均応力-平均ひずみ関係については、除荷時は引張方向と圧縮方向ともに弾性時と同じ傾きをもつ直線を仮定した。再載荷については過去に経験した最大応力点を目指す経路をたどり、降伏していない方向に対する再載荷の場合は、降伏点を目指す経路をたどると仮定した。図-2にアンカー筋の平均応力-平均ひずみ関係のモデルを示す。

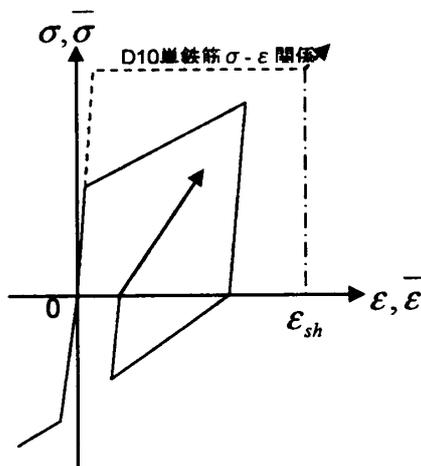


図-2 平均応力-平均ひずみモデル

## 2.4 正負交番載荷実験結果

基部の損傷が著しく、埋め込まれたアンカー筋は、アンカー筋上側にコーン状のコンクリートを伴いながら、エポキシ樹脂とコンクリートの界面における付着が切れて抜け出していることが確認された。

初載荷時に圧縮力を受けるアンカー（以下、

圧縮アンカー）の平均応力-すべり関係は引張力を受けるアンカー（以下、引張アンカー）と比べて相対的に同一のすべり量に対する平均応力が小さいことがわかったが、この現象はアンカー筋が受ける最初の荷重が圧縮力か引張力かの違いによるものと考えられる。この現象は既往の研究においても報告されており<sup>2)</sup>、最初に圧縮力を受ける鉄筋はフーチングの中に押し込まれ、鉄筋とコンクリートとの付着の損失が生じたことによる現象と考えられている。

交番載荷におけるそれぞれの載荷方向側の代表的なアンカー筋の平均応力-すべり曲線を図-3に示す。その挙動の特性は各載荷方向とも、すべり量が極小時は剛性が高いが、すべり量が増大し繰返し数も増えるたびに、耐力が減少している。この現象は繰返し数が増え、すべり量が増大するたびにエポキシ樹脂とコンクリートの界面の付着が弱くなるために生じたと考えられる。アンカー筋に圧縮力が作用するときの特性としては、ある一定のすべり量までは、一定応力を保ったまますべり量が減少し、そこから急激に勾配が上昇し、すべり量が0に戻るためには引張時最大応力と同等の応力が必要となる。

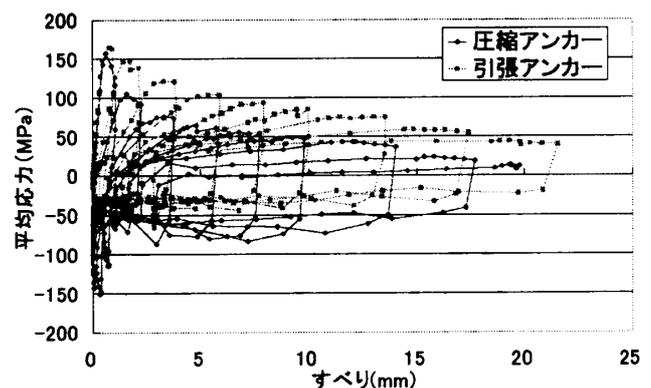


図-3 アンカー筋  $\bar{\sigma}-S$  関係

## 2.5 準動的載荷実験結果

破壊形態は、静的正負交番載荷実験と同様に基部にひび割れが集中し、フーチングにもひび割れが発生している。実験結果から抽出した圧縮アンカーの代表的な平均応力-すべり曲線を図-4に示す。静的正負交番載荷実験では繰

返し数が多いため同じ量のすべりに対しても耐力が低下していることがわかった。この結果からアンカー筋の耐力の持続には交番荷重の繰返し数が大きく影響することがわかる。

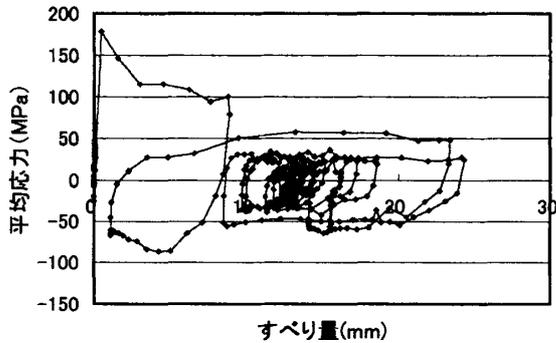


図-4 圧縮アンカー  $\bar{\sigma}-S$  関係

### 3. 引抜き供試体のアンカーの挙動

#### 3.1 供試体と載荷方法

実験の概要を図-5に示す。試験体はD10鉄筋を6本1組で使用し、埋込み長を鉄筋径( $\phi$ )の20倍とし、フーチング上面位置で予め載荷治具に溶接して固定した。載荷治具により引張力が各鉄筋に均等に作用するようにした。フーチングの形状、コンクリート強度および鉄筋比を柱供試体のフーチングと同等である。コンクリート強度は26.4MPa、アンカー筋の降伏強度は389MPaである。

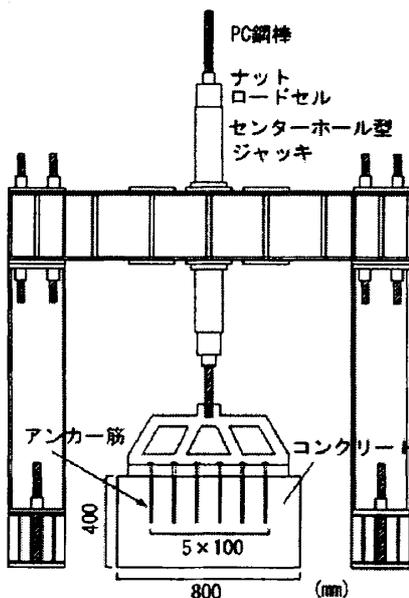


図-5 供試体と載荷装置

載荷は鋼製門型フレームに取付けたセンターホール型油圧ジャッキで行い、載荷速度は360 N/sec以下とした<sup>3)</sup>。

#### 3.2 計測方法

鉄筋のひずみ分布は図-1に示す柱供試体のアンカー筋と同じ位置に貼り付けたひずみゲージの値から求めた。すべり量は載荷治具のたわみや偏心の影響を考慮して、図-6に示す位置に6箇所設置した変位計から求めた。

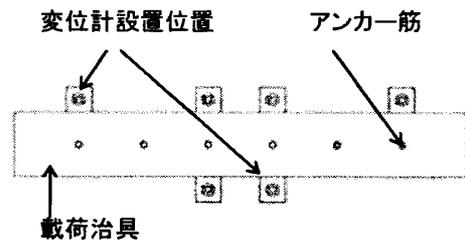


図-6 変位計設置位置

#### 3.3 実験結果

実験から得られたアンカー筋の代表的な平均応力-すべり関係を図-7に示す。この結果を4章で述べる包絡線の基本則の構築に使用した。

鉄筋降伏以前は、曲線は急勾配で上昇しているが、鉄筋降伏を境に勾配が著しく小さくなり、やがてすべりが増えても平均応力は減少することがわかる。鉄筋降伏後の付着の低下は数多く報告されている<sup>4)</sup>。その原因としては、ポアソン効果によって鉄筋径が小さくなるため、鉄筋ふしのコンクリートへの引っ掛かりが弱くなること、鉄筋の谷部とコンクリートとの間に隙間ができ、ふしからの支圧力を受け持つコンクリートが変形しやすくなることなどが考えられる。

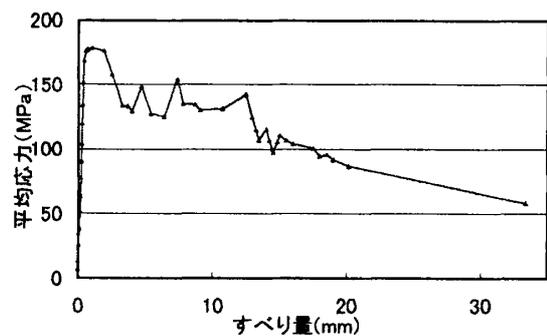


図-7 単調引抜き  $\bar{\sigma}-S$  関係

#### 4. 平均応力-すべり履歴関係のモデル化

##### 4.1 包絡線

鉄筋降伏点であるすべり量  $S_1$  位置まではアンカー筋を弾性体として扱い、その領域内は繰返しの影響はないとする。弾性域内での勾配を  $K_1$  とする。降伏後の勾配  $K$  は、 $S_1$  以降からのすべり絶対値の和の関数とした。包絡線の勾配を図-8に示す。すなわち

$$\bar{\sigma} = K \times S \quad (1)$$

以下に述べるそれぞれの基本則は鉄筋降伏後におけるアンカー筋の特性を表す。用いられるパラメータの値を表-2に示す。

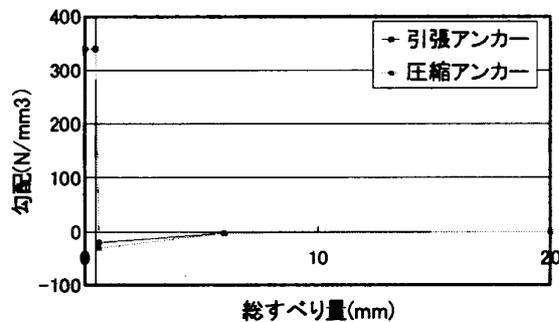


図-8 勾配  $K$  と総すべり量の関係

##### 4.2 除荷および圧縮載荷時の基本則

引張圧縮において、任意の点  $A(\bar{\sigma}_A, S_A)$  から除荷したときの除荷勾配を  $K_2$  とする。すなわち 
$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_A + K_2(S - S_A) \quad (2)$$
 さらに圧縮方向に載荷を続けると、応力 0 の点  $(0, S_0)$  から勾配  $K_2$  のまま点  $B(\bar{\sigma}_B, S_B)$  まで至り、その後一定応力を保持してすべり量のみ減少する降伏棚が存在する。定点  $I(\bar{\sigma}_I, S_I)$  以降は、勾配  $K_3$  で  $S=0$  まで至る (図-9参照)。

$$\bar{\sigma} = K_2(S - S_0) \quad (S_B < S \leq S_0) \quad (3)$$

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_B \quad (S_I < S \leq S_B) \quad (4)$$

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_B + K_3(S_B - S) \quad (0 < S \leq S_I) \quad (5)$$

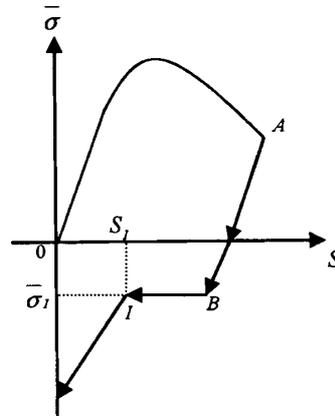


図-9 除荷・圧縮載荷時のモデル

##### 4.3 再載荷時の基本則

再載荷開始時の点を点  $C(\bar{\sigma}_C, S_C)$  とする。まず最大すべり量時の点、ここでは点  $A(\bar{\sigma}_A, S_A)$  の応力を低減した点  $D(S_A, \beta\bar{\sigma}_A)$  を目指す経路をたどる。点  $D$  から勾配に低減係数  $\alpha$  を掛け、包絡線の延長線上の点  $E$  を目指す。合流後は過去に経験したすべりの総量を考慮した新しい法絡線となる。ただし、 $S_A \geq S_2$  の場合、低減係数  $(\alpha, \beta)$  が  $(\alpha', \beta')$  となる (図-10参照)。

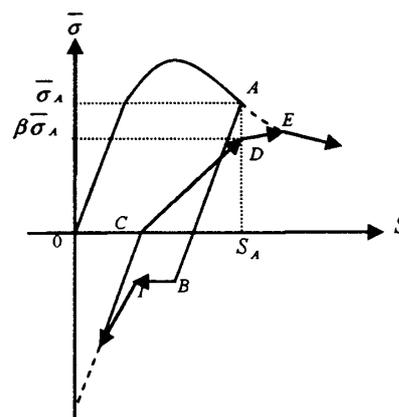


図-10 再載荷時のモデル

表-2 モデルに用いられるパラメータの値

載荷方向	$K_1$ (N/mm <sup>3</sup> )	$K_2$ (N/mm <sup>3</sup> )	$K_3$ (N/mm <sup>3</sup> )	$S_1$ (mm)	$S_2$ (mm)	$S_I$ (mm)	$\bar{\sigma}_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\alpha$	$\alpha'$	$\beta$	$\beta'$	$\gamma$
圧縮	340	550	200	0.45	3.3	0.5	-50	0.1	0.1	0.5	0.8	0.6
引張	340	550	200	0.45	3.6	0.5	-30	0.5	0.1	0.6	0.8	0.6

