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*1・椿 龍哉*2・林 和彦*3

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)¹⁾,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20 である。埋込み長20

*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。

公	土日 大 攵	降伏強度	引張強度			
11	况怕	(MPa)	(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			

表 - 1 鉄筋の力学特性





図 - 1 供試体形状と測定位置

2.2 載荷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。正負交番載荷では,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。

準動的載荷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。準動的載荷と 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箇所で測定している。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 があり,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 されたのでリプ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抜出 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 一筋の平均応力 - 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²⁾,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 $\sigma-S$ 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。



- 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() 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。



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³⁾。

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。



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⁴⁾。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。



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

$$\overline{\sigma} = K \times S \tag{1}$$

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。



4.2 除荷および圧縮載荷時の基本則

引張圧縮おいて,任意の点 $A(\sigma_A, S_A)$ から除 荷したときの除荷勾配を K_2 とする。すなわち $\overline{\sigma} = \overline{\sigma}_A + K_2(S - S_A)$ (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 $B(\overline{\sigma}_B, S_B)$ 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 $I(\overline{\sigma}_I, S_I)$ 以降は,勾配 K_3 で S=0 まで至る(図 - 9参照)。

$$\overline{\sigma} = K_2(S - S_0) \qquad (S_B < S \le S_0) \quad (3)$$
$$\overline{\sigma} = \overline{\sigma}_B \qquad (S_I < S \le S_B) \quad (4)$$

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



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 $C(\overline{\sigma}_c, S_c)$ とする。まず最 大すべり量時の点,ここでは点 $A(\overline{\sigma}_A, S_A)$ の応 力を低減した点 $D(S_A, \beta\sigma_A)$ を目指す経路をた どる。点Dから勾配に低減係数 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, $S_A \ge S_2$ の場合,低減係数,

)が(', ')となる(図 10参照)。



図 10 再載荷時のモデル

載荷	K_1	K_2	K_{3}	S_1	S_2	S_{I}	$\overline{\sigma}_{B}$	α	α'	β	β'	
万回	(N/mm ³)	(N/mm ³)	(N/mm [°])	(mm)	(mm)	(mm)	(N/mm²)			•	•	
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

表 - 2 モデルに用いられるパラメータの値

4.4 包絡線上以外からの除荷と再載荷基本則

除荷勾配は通常時と同じ*K*₁とする。圧縮載荷 時の降伏棚は通常時のものに低減率 を掛けた 値とする。引張側の再載荷は,通常時と同じく, 最大すべり時の応力を低減した点を目指す経路 をたどる(図 11参照)。



図 - 1 1 包絡線上以外からの経路モデル

5. 平均応力 - すべり履歴モデルの適用性

提案したモデルを用いて,柱の正負交番載荷 と準動的載荷における圧縮アンカーの挙動をシ ミュレーションした結果をそれぞれ図-12, 13に示す。繰返し載荷の影響を再現できてお り,本モデルの妥当性を示している。本モデル の適用範囲は,D10 異形鉄筋を用いた埋込み長 20 のあと施工アンカーで、コンクリート強度 24MPa 程度,接着剤はエポキシ樹脂、アンカー 穿孔径は鉄筋径+10mm での施工条件に限る。





図 - 13 準動的載荷実験との比較

- 6. 結論
- (1)繰返し荷重を受けるあと施工アンカーの 引抜けモデルを構築した。
- (2)すべり履歴を表現するパラメータを導入 することにより,繰返しの影響を表すこ とができる。
- (3)規則的な静的載荷および準動的載荷のア ンカー筋の挙動を表現できることが確認 された。
- (4)本モデルの適用対象は D10 鉄筋で埋込み 長が 20 のアンカー筋である。適用範囲 を広げるために今後さらに実験データを 蓄積する必要がある。

参考文献

- 日本道路公団試験研究所:コンクリート構 造物の一体化に関する実験研究報告書, 2004.3
- 2) 鈴木 基行・張 一泳・綿貫 正明・尾坂 芳
 夫:フーチングからの軸方向主鉄筋の抜出
 し量評価法に関する研究,コンクリート工
 学論文集,第3巻,第1号,pp33 43,1992.1
- 3) 土木学会:引抜き試験による鉄筋とコンク リートとの付着強度試験方法 (JSCE-G503-1999),2005年制定コンクリー ト標準示方書[規準編],pp.239-242,2005.
- 4) Hawkins,N.M., Lin,I.J. and Jeang,F.L : Local Bond Strength of Concrete for Cyclic Reversed Loadings, Bond in Concrete, Ed. by P.Bartos, Applied Science Publishers, pp.151-161, 1982