

ひびわれを考慮した地中構造物の 軸引張剛性の評価法に関する研究

Evaluation method of tensile stiffness considered with cracks in under ground RC structure

塚田あゆみ¹⁾・橘 義規¹⁾・田中 努²⁾

Ayumi TSUKADA, Yoshinori TACHIBANA, Tsutomu TANAKA

On a seismic design of tunnel in longitudinal direction for large scale earthquake, it is necessary to be used tensile stiffness, which is considered with cracks and yield of reinforcing bars. But, evaluation method of such tensile stiffness is not established. Basing on bond character of reinforcing bar and concrete, we calculated pull-off displacement of reinforce bar from crack surface, and studied evaluation method of tensile stiffness. And we carry out simulation analysis of a cyclic loading test result by our method. As a result, this method can trace skeleton-curve of test, approximately.

Key Words: tensile stiffness, cracks, under ground RC structure

1. はじめに

トンネルの長手方向の耐震設計は、トンネルを弾性床上のはりでモデル化し、地盤ばね端に地盤変位を与える応答変位法で行われる。一般には、断面力の算定で考慮する躯体の剛性は、ひびわれ発生前のコンクリート全断面有効の値が用いられ、断面の応力計算では引張側のコンクリートの抵抗は無視し、鉄筋の抵抗のみを考慮する安全側の設計手法が取られている。しかし、躯体に多数のひびわれが生じたり、鉄筋が降伏するような状態に達する可能性もある大規模地震に対して、ひびわれ発生前の剛性を用いて計算することは、実挙動と整合しないばかりか、過大な設計断面力を与えたり、ひびわれ部の鉄筋のひずみを過小評価する可能性がある。

曲げ変形に対しては、RC理論に基づいてM～ ϕ 関係を求め、ひびわれや鉄筋の降伏を考慮した剛性を用いることができるが、軸引張に関しては、これらを考慮した剛性評価法が確立されていない。そこで、本研究では鉄筋とコンクリートの付着理論に基づいて、ひびわれ部の鉄筋の抜け出し量を求め、これを考慮することにより、ひびわれ発生後の引張剛性の評価法について検討を行った。

2. ひびわれ発生後の引張剛性の評価法

(1) 基本的な考え方

RC棒部材に軸引張力が作用しているときの荷重～変位（伸び量）関係および荷重～軸ひずみ関係は次式で表すことができる。

$$P = K \times \delta \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$P = E A \times \varepsilon = \frac{E A}{l} \times \delta \quad \text{-----} \quad (2)$$

1) 正会員 株式会社 オリエンタルコンサルタンツ
2) フェロー 株式会社 オリエンタルコンサルタンツ

P : 軸引張力 (kgf) , ϵ : 軸ひずみ , δ : 伸び量 (cm)

$E A$: 軸引張剛性 (kgf) , l : 棒の長さ (cm) , K : 軸引張ばね (kgf/cm)

(1), (2) 式により、荷重～変位関係から軸引張剛性 $E A$ を求めることができる。

次に、これまでの研究^{1)～3)}より R C 棒部材に軸引張力 (荷重) を与え、徐々に増加させた時の挙動は次のようになると考えられる。

① 荷重をゼロから増加させると、コンクリートの引張剛性 $E A_c$ から求めた引張ばね $K_c (= E A_c / l)$ に応じ、棒部材が伸びる。

② コンクリートの応力度が引張強度に達すると、ひびわれが生じる。ひびわれ発生部ではコンクリートが分担していた引張力が鉄筋に移り、鉄筋応力度が増加する。

③ 鉄筋応力度の増加に伴い、ひびわれ発生位置から内部にかけて鉄筋の伸びとコンクリートの伸びの差によってずれが生じ、鉄筋の抜け出しが生じる。この状態での棒部材の伸びは、コンクリートの伸びと鉄筋の抜けだし量の和となる。また、棒部材全体の引張ばねは、コンクリートのばねとひびわれ部鉄筋のばねが直列に結合されたモデルで表せる。

④ 棒部材全体の引張ばねは、鉄筋の抜け出しにより低下するため、同一変位での反力は低下する。

⑤ 再度荷重を増加させると、鉄筋、コンクリートともに応力度が増加する。

⑥ コンクリートの引張強度相当まで荷重は増加するが、それ以後は上記の②～⑤を繰り返す。ひびわれが密になると、付着による鉄筋からコンクリートへの応力の伝達量が不足し、コンクリート応力度が引張強度に達しなくなる。これ以後、ひびわれは発生しなくなり、荷重を増加させると鉄筋の抜け出しが増加するのみとなる。ただし、ひびわれ発生荷重よりも鉄筋の降伏荷重の方が小さい場合は、ひびわれが 1 カ所発生した後、荷重を増やしても新たなひびわれは発生せず、このひびわれが開くことになる。

以上より、軸引張剛性の算定には、鉄筋とコンクリートの付着機構に基づくひびわれ発生の予測と、ひびわれ部の鉄筋の抜け出し量の算定が重要であることが解る。

(2) 鉄筋抜け出し量の算定

図-1 のように、ひびわれ部から $X + \Delta X$ 離れた位置での鉄筋応力度と鉄筋滑り量は、各々次式で与えられる。なお、(3) 式において、 ΔX 間で $\tau (X)$ は一定と仮定している。また、(4) 式における鉄筋の滑り量は、コンクリートの変位に対する鉄筋の相対変位量であるが、コンクリートの変位量は鉄筋の変位に比べて微小であるため、ここでは無視した。

$$\sigma_s (X + \Delta X) = \sigma_s (X) - \frac{U \cdot \Delta X \cdot \tau (X)}{A_s} \quad \text{----(3)}$$

$$S (X + \Delta X) = S (X) - \frac{\sigma_s (X)}{E_s} \Delta X \quad \text{-----(4)}$$

σ_s : 鉄筋応力度 (kgf/cm²) , U : 鉄筋の周長 (cm)

A_s : 鉄筋の断面積 (cm²) , S : 鉄筋の滑り量 (cm)

τ : 付着応力度 (kgf/cm²) , E_s : 鉄筋のヤング係数 (kgf/cm²)

また、付着応力とすべり量の関係については、岡村らの研究¹⁾があり、定着長が十分に長い場合の $\tau \sim S$ 関係を表した (5) 式が与えられている。

$$\tau = 0.9 f' c^{2/3} \{ 1 - \exp(-40 s^{0.6}) \} \quad \text{----- (5)}$$

τ : 付着応力 (MPa) , S : 滑り量 (cm)

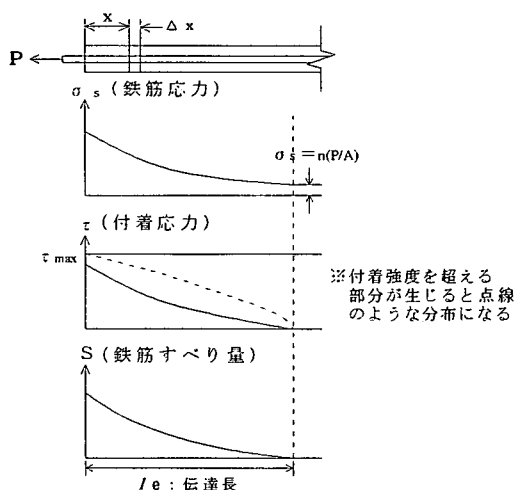


図-1 各分布の概念図

f_c : コンクリート強度 (MPa), D : 鉄筋径 (cm)

$$s : s = S / D$$

$x = 0$ および $x = l_e$ (l_e : 図-1 参照) での境界条件を考える。

$$x = 0 : \sigma_s(0) = P / A_s$$

$$x = l_e : \sigma_s(l_e) = n P / A_c \quad (n : \text{ヤング係数比})$$

$$S(l_e) = 0$$

$$\tau(l_e) = 0$$

ただし、伝達長がひびわれ間隔の $1/2$ より長くなる場合は、 $x = 1/2$ における鉄筋とコンクリートのひずみは一般と異なり節となるため、境界条件は以下になる。

$$x = 1/2 : S(1/2) = 0$$

$$\tau(1/2) = 0$$

コンクリートの伸びを無視すると、“ひびわれ部の抜け出し量＝ひびわれ部の滑り量”であるから、上記の境界条件を満足する $S(0)$ を求めれば良いことになる。解析では $S(0)$ を仮定し、繰り返し計算により境界条件を満足する $S(0)$ を求めることになる。

3. 実験結果のシミュレーション

2節で示した評価法の適用性を検討するために、RC部材の既往の繰り返し引張・圧縮荷重実験結果のシミュレーションを行った。

(1) 実験の概要

実験はシールドトンネル二次覆工の地震時挙動を把握するために、鉄筋量をパラメータとした供試体を3種製作し、変位制御の軸方向正負交番荷重を行ったものである³⁾。初期ひびわれをリング継手位置において発生させることを前提として、供試体の所定位置にひびわれを誘発させる切り欠き断面を設けてある(図-2 参照)。両端には加振機及び反力フレームに固定するための鋼板があり、コンクリートにアンカーして、一体となっている。各ケースにおける供試体の諸元を表-1 に示す。

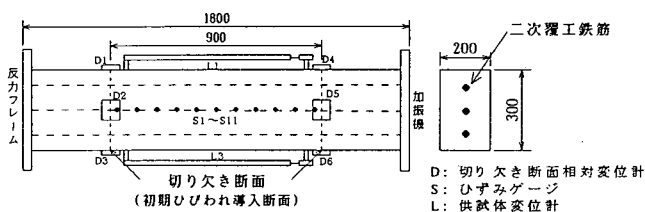


図-2 供試体の寸法形状と計器配置 (単位: mm)

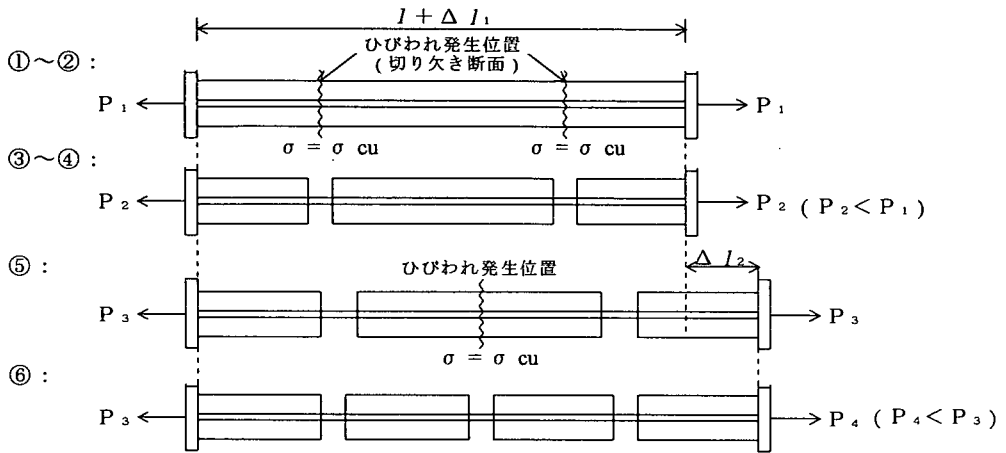
表-1 供試体の断面諸元

供試体 番号	コンクリート 面積 (cm^2)	軸方向鉄筋 (SD345)	
		呼び径	面積 (cm^2)
No. 1	594	D16	5.958
No. 2	591	D19	8.595
No. 3	588	D22	11.613

(2) 解析の手順

実験は変位制御で行われているため、以下のような手順で解析を行った。各項における供試体の状態を、No. 1 の供試体を例として図-3 に示す。

- ①コンクリートの引張剛性（圧縮剛性と同じと仮定）を用いて、コンクリートの応力度がひびわれ発生応力度に達するまでの供試体全体の伸び量を算定する。
- ②最初のひびわれ発生位置を実験結果と同じに設定する。
- ③ひびわれの発生により反力が低下するため、ひびわれ部の鉄筋の抜け出し量が、ひびわれ発生前のコンクリートの伸び量に等しいと仮定して、反力を逆算する。
- ④上記③の状態においても、実際にはコンクリートの伸びが生じているため、鉄筋の抜け出し量とコンクリートの伸び量の和が、ひびわれ発生直前の供試体伸び量にほぼ一致するまで反力算定を繰り返す。
- ⑤ひびわれ発生直後の反力が求まれば、さらに変位を増加させ、次のひびわれが発生するまで、鉄筋の抜け出しによる供試体の伸びとコンクリート部分の伸びを加算していく。
- ⑥以上の②～⑤までの計算を、新しいひびわれが発生しなくなるまで続ける。



図－3 解析順序例（供試体No.1）

(3) 解析条件

①断面諸元

表－2 に供試体の断面諸元を示す。実験では事前に使用コンクリートの材料試験が行われており、圧縮強度や弾性係数が得られているが、解析ではひびわれ前載荷における供試体の圧縮側の荷重～変位関係から逆算したコンクリートの弾性係数を用いた。

表－2 供試体の断面諸元

供試体番号		No. 1	No. 2	No. 3
コンクリート	断面積 (cm ²)	594	591	588
	引張強度 (kgf/cm ²)	25.3	25.3	25.3
	圧縮強度 (kgf/cm ²)	312	312	312
	弾性係数 (kgf/cm ²)	3.89×10^5	1.61×10^5	3.33×10^5
鉄筋	鉄筋量	D16×3	D19×3	D22×3
	断面積 (cm ²)	5.958	8.595	11.613
	直径 (cm)	4.77	5.73	6.66

②ひびわれの発生順序

鉄筋コンクリートにひびわれは、理論上は伝達長だけ中に入った内側において、コンクリートの引張抵抗力の弱い位置に発生すると考えられるが、実験では表－3、図－4 のような順番でひびわれが発生した。本検討は実験のシミュレーションであるため、実験での発生順序を用いて解析を行った。

表-3 実験におけるひびわれ順序

供試体番号	ひびわれ順序
No. 1	①切り欠き断面→②中央
No. 2	①切り欠き断面→②1/4位置(片端)→③中央
No. 3	①切り欠き断面→②1/4位置(片端)→③3/8位置(3/4側の中央)

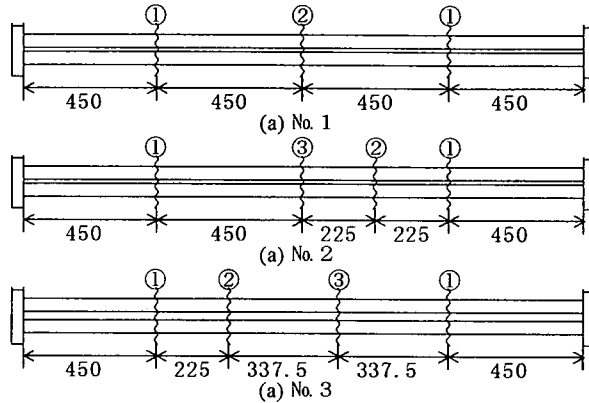


図-4 実験におけるひびわれ順序

4. 解析結果及び考察

(1) 荷重～変位関係の比較

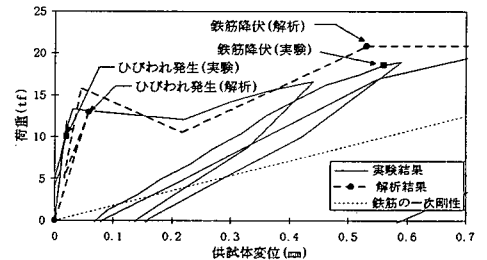
図-5 に、荷重～変位関係についての実験と解析の比較を示す。なお、解析ではひびわれ発生時および発生直後の荷重と変位を算定し、その途中は線形で表している。

同図より、いずれの供試体においても、解析による鉄筋降伏点は実験と非常に近い値をとっており、繰返し载荷の包絡線もほぼ近似している。なお、解析では、ひびわれは発生と同時に供試体を貫通すると仮定しているが、実験時の観察によれば、ひびわれが供試体を貫通する前に、次のひびわれが発生する場合もあり、この影響により、供試体の各ひびわれ点の実験値と一致しなかったと考えられる。

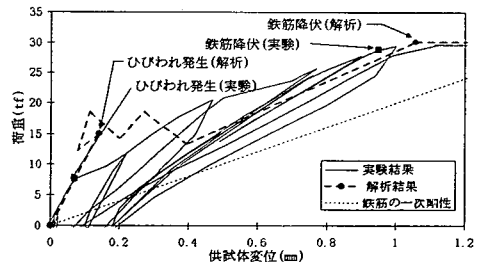
(2) 鉄筋軸ひずみの比較

ひびわれが発生直後の荷重が減少した状態における実験結果と解析結果のひずみ分布の比較例を、供試体No. 2 について図-6 に示す。

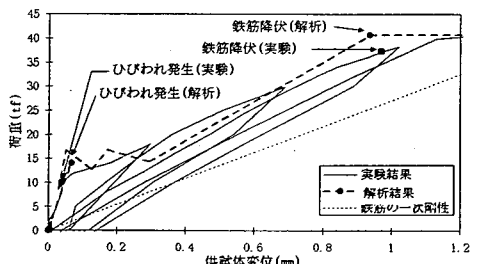
同図より、ひびわれの発生が進展するほど、解析結果と実験結果のひずみ分布の整合性が高くなっており、中央でひびわれが発生した③以降のひずみ分布はほぼ近似できている。これは「(1) 荷重～変位関係の比較」で述べたように、低荷重ではひびわれが貫通しないため、解析条件と異なるが、荷重の増加に伴いひびわれが供試体を貫通し、解析の仮定と等しい条件となったためと考えられる。また、図-7 に示すように、供試体を貫通はしないものの、細かいひびわれが多く



(a) 供試体No. 1



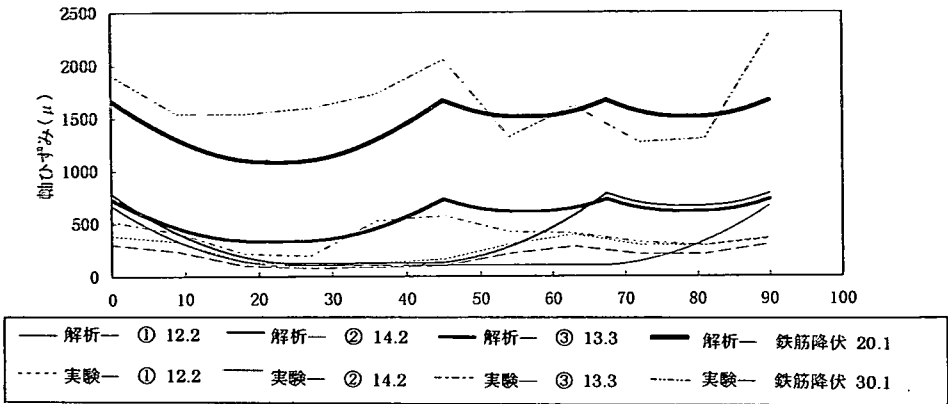
(b) 供試体No. 2



(c) 供試体No. 3

図-5 荷重～変位関係の比較

発生している。このひびわれが発生したときの荷重は文献からは明らかでないが、これも低荷重状態での分布に差異が生じる原因ではないかと考えられる。



※1) 凡例の○内の数字は図-4 のひびわれ順序に対応する。
2) 凡例の○右の数値は荷重 (tf) である。

図-6 ひずみ分布の比較 (No. 2)

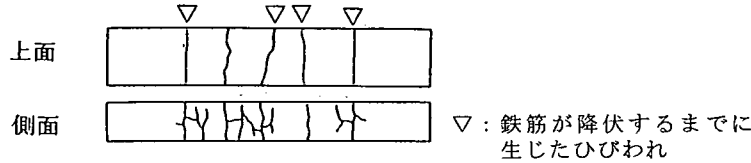


図-7 実験における供試体の損傷状況 (No. 2)

5. おわりに

ひびわれの発生と鉄筋の抜け出しを考慮した本論文で述べた手法を用いることにより、大規模地震時に問題となると考えられる鉄筋降伏までの荷重と変位を再現することができた。また、繰り返し載荷における荷重～変位関係の包絡線もほぼ近似できることが解った。

本研究ではひびわれの発生位置については実験の結果を用いた。また、実際の構造物においては、様々な要因で、対象とする地震荷重を受ける前に、すでにひびわれが生じている可能性がある。ひびわれ発生位置の特定は困難であることから、ひびわれの発生位置やその順序が引張剛性に及ぼす影響を今後検討していきたい。

参考文献

- 1) 島・周・岡村：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力－すべり－ひずみ関係，土木学会論文集 第378号，pp165-174，1987
- 2) 田中・橘・大竹：ひびわれ部の剛性を考慮したトンネル覆工の耐震設計法，トンネル工学研究発表会論文報告集 第3巻，pp219-224，1993.11
- 3) 建設省土木研究所：土木研究所資料 シールドトンネルの耐震性に関する研究，1997