

組合せ荷重を受けるスタッドアンカーの荷重-変位関係

大阪大学工学部 正 員 大谷恭弘
 大阪大学大学院 学生員 ○ 森戸義貴
 大阪大学工学部 正 員 福本湧士

1. まえがき

鋼・コンクリート複合構造における接合部では、せん断作用に対する無方向性、施工性といった理由からスタッドアンカーが広く使用されている。一般に、複合構造物の接合部には組合せ力が作用する。スタッドアンカーに組合せ力が作用する場合の挙動は、線形弾性の範囲内では単一の荷重が独立に作用した場合の重ね合わせとして考慮できるかもしれない。しかし、終局状態にいたる挙動については荷重の組合せによる相互作用や荷重経路に依存した複雑な非線形挙動を接合部は示すであろう。構造解析においては、接合部の荷重伝達機構・変形挙動を任意の荷重状態に対して適切に評価する必要がある。そこで、任意のせん断・引張組合せ荷重を受けるスタッドアンカーの荷重-変位関係をMultiple Hardening Modelにより定式化し、解析に適用可能な数学モデルの作成を行った。

2. 荷重-変位モデルの概要

引張・せん断組合せ荷重を受けるスタッドアンカーの実験結果¹⁾より、最大荷重に至る引張力-引張変位関係あるいはせん断力-せん断変位関係における明瞭な非線形性、およびそれらの載荷履歴への依存性が明らかとなっている。ここで変位とは、スタッド基部とコンクリートとの載荷方向の相対変位である。一方、実験結果から耐荷力は破壊に至る荷重順序にはほとんど依存しないことがわかった。また、その耐荷力は次の耐荷力相関曲線で十分に予測できることも確認された。

$$\left(\frac{T}{T_u}\right)^{(5/3)} + \left(\frac{S}{S_u}\right)^{(5/3)} = 1 \quad T: \text{引張荷重}, S: \text{せん断荷重}, T_u: \text{引張耐荷力}, S_u: \text{せん断耐荷力} \quad (1)$$

$$\text{また、} T_u = \min [T_{uc}, T_{us}] \quad T_{uc}: \text{コンクリート引抜き耐力}, T_{us}: \text{スタッド破断引張耐力} \quad (2)$$

そこで本モデルにおいては、この相関曲線を破壊基準として採用した。

任意の載荷経路に対する非線形な荷重-変位関係を定式化するため、従来より応力-ひずみ関係の定式化において広く用いられている硬化型塑性理論の概念を導入する。ここでは、Multiple Hardening Model²⁾を用いてモデルの定式化を行った。載荷曲線(降伏曲線)として破壊基準と同様の相関式を仮定し、せん断と引張を独立した2つのHardening Modeとして定式化することにより、等方硬化よりも自由度の高いモデルとすることが可能となる。そこで載荷関数: f は次式で定義した。

$$f = \left(\frac{T}{\mu_T}\right)^{(5/3)} + \left(\frac{S}{\mu_S}\right)^{(5/3)} - 1 = 0 \quad \begin{array}{ll} T: \text{引張荷重} & \mu_T: \text{引張に対するHardening Parameter} \\ S: \text{せん断荷重} & \mu_S: \text{せん断に対するHardening Parameter} \end{array} \quad (3)$$

このHardening Parameter: μ は、そのモードに対するDamage Parameter: ξ の関数として与えられる。本定式化においてはHardening Parameter: μ を各モードの単独載荷に対する降伏荷重とし、Damage Parameter: ξ は、各モードで生じた塑性変位量とした。また、材料全体のTotal Damage: ξ_{TOTAL} は各モードの塑性変位量の2乗和の平方根で定義される有効塑性変位量とし、それを各モードのDamageに分配する定数としてその段階での荷重率の平方根を用いた。

3. 増分荷重-増分変位関係の定式化

塑性理論に従い、全変位増分は弾性変位増分と塑性変位増分から構成されると仮定する。また、弾性変位増分はフックの法則により荷重増分と関係づけられる。流れ則としてAssociated Flow Ruleを仮定する。

Consistency Conditionを用い、古典塑性理論と同様な展開を行うと弾塑性荷重-相対変位関係を次式のようなマトリックスで得る。

Yasuhiro OHTANI, Yoshitaka MORITO, Yuhshi FUKUMOTO

$$\{dF\}=[K]\{du\}$$

(4)

$$[K]=\begin{pmatrix} K_t & K_{ts} \\ K_{st} & K_s \end{pmatrix} - \frac{1}{h} \begin{pmatrix} H_1 H_2 & H_1 H_3 \\ H_2 H_4 & H_3 H_4 \end{pmatrix}$$

K_t : 引張に対する弾性バネ定数
 K_s : せん断に対する弾性バネ定数
 K_{ts}, K_{st} : 連成バネ定数

$$H_1 = \frac{\partial f}{\partial T} K_t + \frac{\partial f}{\partial S} K_{ts} \quad H_2 = \frac{\partial f}{\partial T} K_t + \frac{\partial f}{\partial S} K_{st}$$

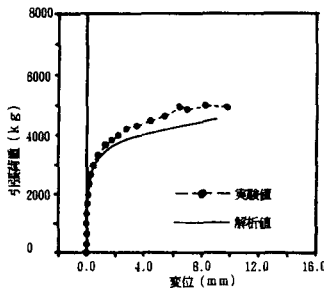
$$H_3 = \frac{\partial f}{\partial T} K_{ts} + \frac{\partial f}{\partial S} K_s \quad H_4 = \frac{\partial f}{\partial T} K_{st} + \frac{\partial f}{\partial S} K_s$$

上式より明らかなように $K_{ts}=K_{st}$ の場合、 $[K]$ は対称マトリックスとなる。

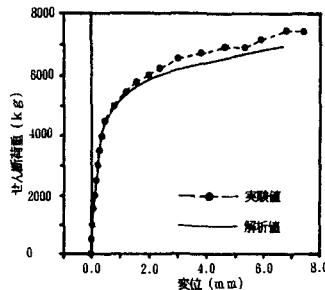
4. 計算例

ここで提案された荷重-変位モデルを用いることにより、任意の载荷経路に対するスタッドアンカーの荷重-変位関係を推定することが可能である。本モデルを使用するに当たり必要となるデータは、スタッドアンカーの引張およびせん断に対する初期弾性バネ剛性 K_t および K_s 、連成バネ剛性 K_{ts} および K_{st} 、降伏荷重(弾性限界荷重) T_y および S_y 、スタッドが破断する場合の引張耐力 T_{us} とコンクリートが破壊する場合の引抜き耐力 T_{uc} およびせん断耐力 S_u 、それから引張力のみが作用したときの引張力-塑性引張変位関係、およびせん断力のみが作用した時のせん断力-塑性せん断変位関係である。ただし、引張力に対する荷重-塑性変位関係はコンクリートの破壊ではなくスタッドの破断に至るものを採用する。また、これらの値は引張力、およびせん断力のみを受けるスタッドアンカーの実験結果から得ることを原則とする。

軸径19mm、全高10cmのスタッド周りに $f_c' = 257 \text{ kg/cm}^2$, $E_c = 2.12 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ のコンクリートを打設して作成されたスタッドアンカーに $T:S=1:1.5$ の荷重比で組合せ荷重を載荷した場合の荷重-変位関係を推定し、実験結果と比較した。ここでは、初期弾性剛性マトリックスの非対角項 K_{ts} および K_{st} を0とした。すなわち、線形弾性領域では引張とせん断は互いに独立であると仮定した。



(a) 引張力-引張変位関係



(b) せん断力-せん断変位関係

図-1 実験値との比較

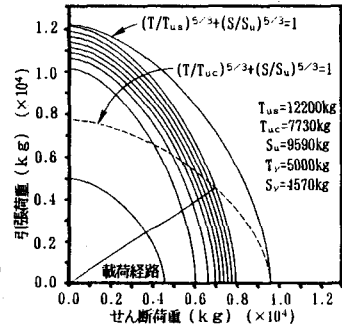


図-2 载荷経路と载荷曲面の遷移

また、実験における塑性変位増分ベクトルと推定計算における载荷曲面との直交性も確認された。

5. まとめ

任意の引張・せん断組合せ荷重下のスタッドアンカーの荷重-変位関係を、Multiple Hardening Modelにより定式化し、解析に適用可能な数学モデルを作成した。また、実験値と比較することにより本モデルの適用性について検討し、その有用性を確認した。

参考文献

- 1) 大谷恭弘, 馬場真吾, 福本晴士: 組合せ荷重を受けるスタッドアンカー, 土木学会第45回年次講演会講演概要集 I-258, pp.546-547, 1990.9
- 2) Y.Ohtani, W.F.Chen: Multiple Hardening Plasticity for Concrete Materials, ASCE, Journal of Engineering Mechanics, Vol.114, No.11, Nov. 1988.