

論文 剛塑性理論を用いた添え筋式重ね継手の付着割裂強度解析

野村 和嗣*¹・町田 篤彦*²・呉 智深*³・原 夏生*⁴

要旨：添え筋とらせん鉄筋を用いた応用重ね継手の付着割裂強度について、剛塑性理論に仮想変位法の応用を適用して、理論式の解析を試みた。この解析は終局破壊モードを設定し、ある仮想変位を与えることによる内部・外部仕事を等しいとおいて終局荷重を求めるものである。その結果、この解析によればコンクリート強度や横補強筋量等が継手耐力に及ぼす影響を推定できることが示された。

キーワード：重ね継手、添え筋、剛塑性理論、仮想変位法、付着割裂強度

1. はじめに

現在ある多くの重ね継手の耐力算定式は、その付着割裂破壊のメカニズムが複雑で、強度に関する因子が多いため、数多くの実験結果を整理して得られた実験式であり、破壊メカニズムに立脚した強度式へのアプローチの研究はあまり行なわれていない。そこで本研究では、通常の実験結果よりもさらにその破壊形式が複雑となる添え筋とらせん鉄筋を用いた応用重ね継手の付着割裂強度について、塑性理論に仮想変位法を適用した新たな継手耐力式を誘導し、継手耐力に及ぼす諸要因の影響を明らかにしようとした。

2. 解析対象供試体

本研究で解析対象とした供試体は文献[1]で用いたものである。すなわち単に突き合わせた主鉄筋の周りに4本の添え筋を配し、その周辺をらせん鉄筋で補強したもので、重ね長さの低減及び、耐力の向上を目的とした応用重ね継手である。

3. 解析概要

3.1 破壊モードの仮定

仮定した終局破壊モードは図-1のようで、対称性から供試体の半分を解析範囲とした。破壊モードは、主鉄筋、添え筋は降伏しておらず、コンクリートには主鉄筋周りにサイドスプリット型の割裂ひび割れと、主鉄筋突き合わせ部（供試体中央部）に横ひび割れが図のように発生すると仮定した。また、らせん鉄筋は割裂ひび割れを拘束する部分で降伏しているとした。この破壊モードとなる条件については文献[1]を参考に、添え筋の総断面積が主鉄筋を充分越えるもの（1.7倍以上）、及びらせん鉄筋のピッチを

*1 首都高速道路公団、工修（正会員）

*2 埼玉大学教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

*3 埼玉大学助教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

*4 前田建設工業（株）技術研究所土木構造研究室研究員、工修（正会員）

4.5cmとするものとした。

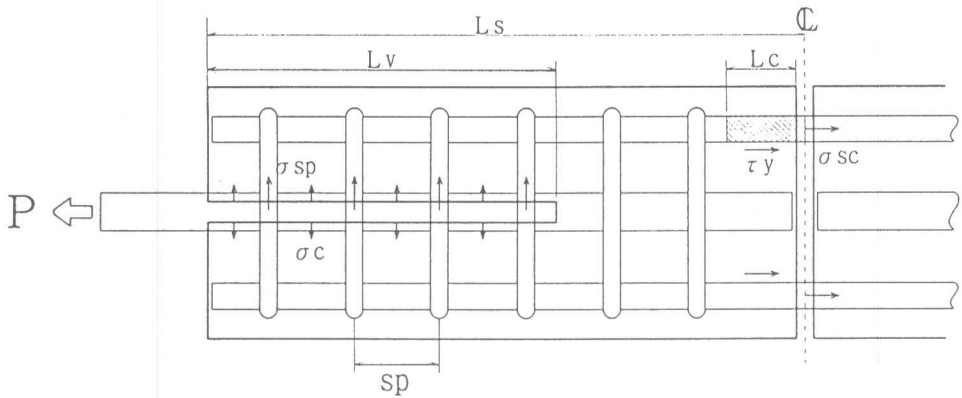


図-1 仮定破壊モード(1)

3. 2 仮想仕事の釣合方程式

仮想変位の原理により、一つの崩壊形式を仮定すればこの状態で外力のなした仕事増分(主筋引き抜き)とそれに抵抗する内部仕事増分が等しいことから次の方程式が成立する[2]。

$$\begin{aligned} \text{外部仕事増分} (\Delta W_{ex}) &= \text{内部仕事増分} (\Delta W_{in}) \\ P \cdot \Delta V_s &= \Delta W_s + \Delta W_{crv} + \Delta W_{crh} \end{aligned} \quad (1)$$

- P : 終局荷重
- ΔV_s : 主鉄筋変位増分
- ΔW_s : 主鉄筋の内部仕事増分
- ΔW_{crv} : 割裂ひび割れ面での内部仕事増分
- ΔW_{crh} : 横ひび割れ面での内部仕事増分

3. 2. 1 主鉄筋の内部仕事増分 ΔW_s

主鉄筋と添え筋の重ね長さ L_s 間における節の数は以下の式で求められる(図-2 参照)。

$$\frac{L_s}{a + u + 2 \frac{h}{\tan \alpha}}$$

(a: 節間距離 u: 節長さ h: 節高さ α : 節角度)

またコンクリートの降伏曲面を図-3のように仮定すると、圧縮すべり面における単位面積当たりのコンクリート内部仕事散逸[3]は、

$$\frac{1}{2} \nu f'_c (1 - \sin \gamma) \Delta V$$

(ν :有効強度係数 f'_c :コンクリート圧縮強度 ΔV :変位増分 γ :破壊面と変位方向との角度)

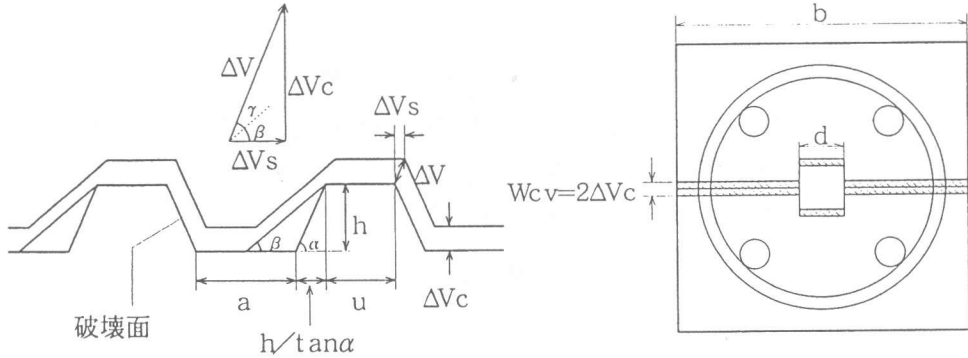


図-2 仮定破壊モード(2)

と表され、ここで ν は文献[4]より $\nu=1$ とする。また ΔV は主鉄筋と破壊面との角度を β (図-2参照)とすると、

$$\Delta V = \frac{\Delta V_s}{\cos(\beta + \gamma)}$$

節がコンクリートと接する高さ($h - V_c$)を考慮し、節1個分の破壊面の面積は

$$\frac{2d(h - V_c)}{\sin \beta}$$

となる(d は主鉄筋幅)。したがって主鉄筋の仕事増分 ΔW_s は以下の式(2)に示される。

$$\therefore \Delta W_s = \frac{Ls}{a + u + \frac{2h}{\tan \alpha}} \cdot \frac{(1 - \sin \gamma)}{\sin \beta \cos(\beta + \gamma)} \nu f'_c d (h - V_c) \Delta V_s \quad (2)$$

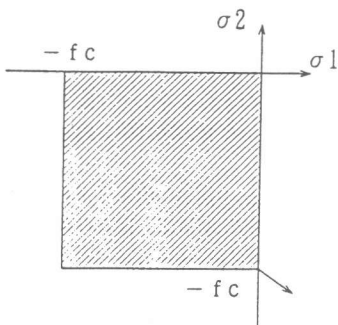


図-3 コンクリート降伏曲面

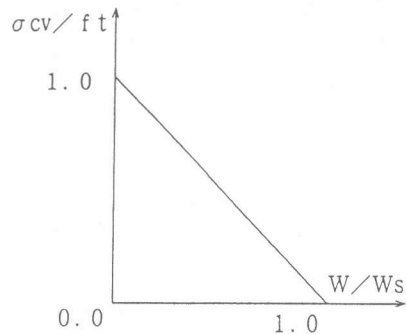


図-4 コンクリート破壊曲線

3. 2. 2 割裂ひび割れ面での仕事増分 ΔW_{cv}

割裂ひび割れ面での仕事増分はコンクリートの引張り力による仕事増分 ΔW_{cv} と、ひび割れの進展を拘束するらせん鉄筋の降伏による仕事増分 ΔW_{sp} とに分けることができる。まず ΔW_{cv} を考えると、コンクリート引張応力が割裂ひび割れ面で一様に分布しているとすることにより、

$$\Delta W_{cv} = \sigma_{cv} \cdot (b-d) L_v \cdot W_{cv}$$

(σ_{cv} :コンクリート引張応力 b :供試体幅 L_v :割裂ひび割れ長さ W_{cv} :割裂ひび割れ幅)

ここでコンクリート引張応力については、破壊力学の概念を用いてコンクリートの破壊曲線を図-4のように仮定することにより次式が得られ、

$$\frac{\sigma_{cv}}{f_t} = 1 - \frac{w}{w_s}$$

(f_t :コンクリート引張強度 w :ひび割れ幅 w_s :限界ひび割れ幅(= $2 G_f / f_t$)(G_f :破壊エネルギー))
これより、 ΔW_{cv} は式(3)で与えられる。

$$\therefore \Delta W_{cv} = 2(b-d) \tan(\beta + \gamma) L_v \left(\frac{f_t}{13} - \frac{w f_t^2}{338 G_f} \right) \Delta V_s \quad (3)$$

次に ΔW_{sp} について考えると、剛塑性理論によりらせん鉄筋の降伏応力が作用しているとして、

$$\Delta W_{sp} = \sigma_{sp} \cdot 2 A_{sp} \cdot L_v / sp \cdot W_{cv}$$

(σ_{sp} :らせん鉄筋応力 A_{sp} :らせん鉄筋断面積 sp :らせん鉄筋ピッチ)

$$\therefore \Delta W_{sp} = \frac{4 \tan(\beta + \gamma) \sigma_{sp} A_{sp} L_v}{sp} \Delta V_s \quad (4)$$

3. 2. 3 横ひび割れ面での仕事増分 ΔW_{ch}

横ひび割れ面での仕事増分にあたって、横ひび割れ幅は許容ひび割れ幅を越えているので、コンクリートの引張り力による仕事の増分は無いものとする。したがってここでは添え筋のすべりによる仕事増分 ΔW_{sl} を考える。 ΔW_{sl} については図-1に示したように添え筋(径 d_{sc}) が L_c の範囲ですべり応力 τ_y を保ちながらひび割れ長さ W_{ch} だけ仕事をするとして、

$$\Delta W_{sl} = \tau_y \cdot 4 \pi d_{sc} L_c \cdot W_{ch}$$

ここで τ_y については岡村の以下の式から求めた[5]。

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

(s:無次元化すべり量=1000 S/D S:すべり量 D:鉄筋径)

$$\therefore \Delta W_{sl} = 4\pi\tau_y d_{sc} Lc \Delta V_s \quad (5)$$

以上式(1)~(5)から、両辺を ΔV_s で割ることにより終局荷重Pが求まり、これを $\pi d Ls$ で除した終局付着応力 τ_{su} が計算される[3]。ここで上界定理により β 、 γ の値を約 2° 刻みで変化させて、付着応力が最小になるときのPを真の終局荷重とした。

4. 解析結果

以上の解析仮定から得られた結果を以下に示す。本解析では破壊状態を仮定したうえでその終局荷重を求めるものであるから、 τ -s関係などの様な挙動課程を解析することは出来ない。したがって本解析で求められるものは、コンクリート強度などの各パラメータを変化させた際の耐力の相異を把握することである。

図-5にコンクリート圧縮強度と終局耐力の関係を示す。ここでは破壊エネルギー G_f を設定することで予想されるひび割れ幅 w について、これを変化させたときの計算値も示している。本解析においてはコンクリートの破壊について簡単なモデルを用いたので、限界ひび割れ幅に近付くにつれて実験値との差が大きくなるが、これらはモデルをより現実的なものとする事で解決出来るものと考えられる。しかしコンクリート強度が継手耐力に及ぼす影響が本解析において良く推定されることが言える。

図-6にはらせん鉄筋のピッチから求められる横方向補強筋量との関係が示される。一般にらせん鉄筋は載荷軸垂直面に対して角度を持ち(つまり $a=0^\circ$ は帯鉄筋とみなす)、その時割裂ひび割れの拘束に対して図-7のような概念があるので、そのことを考慮にいたした解析結果である。本実験に用いたらせん鉄筋の角度が約 15° であることを考えてもやや解析値が実験値と差があるが、実験値と解析値が示すらせん鉄筋のピッチの影響度はほぼ一致している。

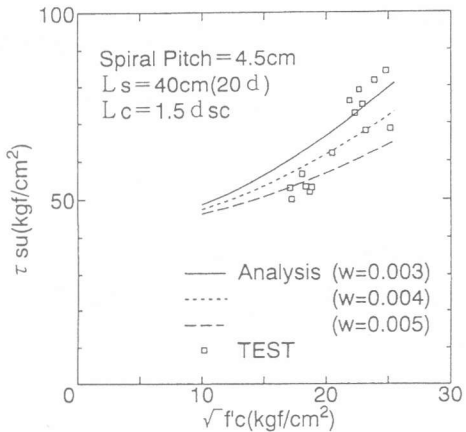


図-5 コンクリート強度と終局強度の関係

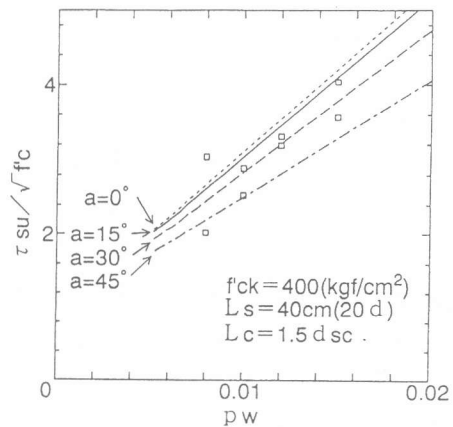


図-6 横補強筋量と終局強度の関係

次に主鉄筋と添え筋の重ね長さの影響についてであるが(図-8)、重ね長が大きくなると付着割裂強度が小さくなるという定性的な評価が本解析からも見られたが、重ね長さが小さいときの解析値と実験値にかなり開きがある。このことは、本継手における重ね長さの低減については継手耐力の面で限界値のあることを示していると考えられる。

5. 結論

(1) コンクリート強度が付着割裂強度に及ぼす影響については本解析で精度良く推定できた。

(2) らせん鉄筋の傾き角度は、継手の耐力に大きく関係する。

(3) 重ね長さの小さい供試体について解析精度が低減することは今後検討すべき事項である。

謝辞

本研究を遂行するにあたって(株)日産建設 児玉淳君(元卒論生)には実験等において多大な御協力を頂いた。ここに感謝する次第である。

参考文献

- [1]野村和嗣・原 夏生・睦好宏史・町田篤彦：プレキャスト型枠コンクリート工法における鉄筋の接合方法における実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp.259-264、1993.6
- [2]藤田 譲・楠田忠雄・川井忠彦：塑性設計法、森北出版、pp.71-109
- [3]Nielsen, M.P.:Limit Analysis and Concrete Plasticity, Prentice Hall, pp.389-397, 1984
- [4]村田憲治・市ノ瀬敏勝・水谷浩：塑性理論と破壊力学を考慮したRC部材の付着割裂解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.2、pp.217-222、1994
- [5]岡村 甫・前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂、pp.176-181、1991

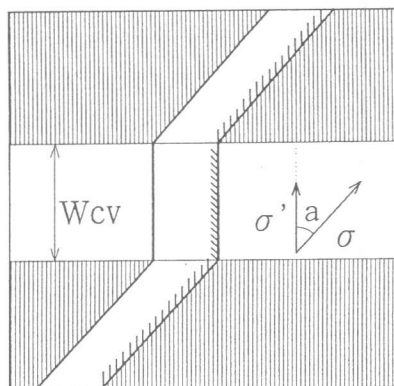


図-7 らせん鉄筋による拘束の概念

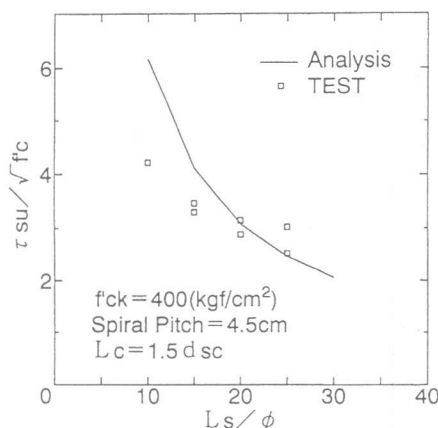


図-8 重ね長さ終局荷重の関係