

論文

[2051] トラスモデルによる RC 有孔梁のせん断強度解析

杉浦光彦*¹・市之瀬敏勝*²

1. 序論

最近, 塑性理論による RC 部材のせん断強度解析が盛んになりつつある。有孔梁に関しても, 日本建築学会の指針[1]に, トラスモデルに基づく設計式が採用された。しかし, この設計式は, 孔が1個だけある場合の解析に基づいており, 孔がいくつか並ぶ場合の応力の流れに関する議論は少ない。本研究では下界の定理を用い, 文献[2]を応用して, 孔を複数個持つ RC 有孔梁のせん断強度を解析する。ここでは主に文献[3]の実験を解析対象とする。肋筋のみによる補強を考え, 斜め筋や特殊金物については考慮外とする。

2. 解析仮定

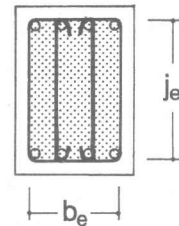
文献[4]と同じく, 図1のようにあばら筋の内側(有効幅 $b_e \times$ 有効せい j_e)だけのコンクリートがせん断強度に寄与すると考える。コンクリートの有効圧縮強度 σ_e は, 文献[4]により, 次式(1)(2)で仮定する。コンクリートの引張強度は無視する。主筋の引張強度と付着強度は十分に強いと仮定する。

$$\sigma_e = 0.85 \sigma_B \quad (\sigma_B \leq 20 \text{ MPa}) \quad (1)$$

$$\sigma_e = 0.4 \sigma_B + 9 \quad (\sigma_B > 20 \text{ MPa}) \quad (2)$$

σ_B : コンクリートの一軸圧縮強度

.....文献[3]の実験の場合 77.5 MPa



3. 孔1個の場合の解析

解析対象の試験体を図2に示す。断面図の b_e と j_e は, あばら筋に囲まれたコンクリートコアの幅とせいを表す。

図1 コンクリートの有効断面

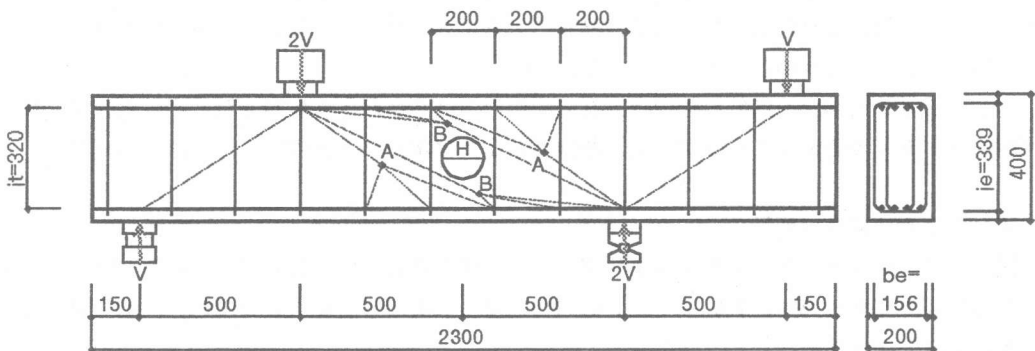


図2 解析対象の試験体(N1)とトラスモデルの概略

*1:名古屋工業大学・大学院生(正会員)

*2:名古屋工業大学助教授・工博(正会員)

図中に斜め線で示すようなストラットを想定する。図中の A, B は、ストラットの分岐点を表す。ストラットの本数や分岐の仕様は計算上のせん断強度が高くなるように試行錯誤により定めた。図2ではストラットを太さのない線で描いたが、コンクリートの有効圧縮強度 σ_e を考慮すると、図3, 図4, 図5のように、ストラットは実際には幅をもつ。図中、長方形の領域は一方的に σ_e の応力を受ける領域、3 角形の領域は二方向に σ_e の応力を受ける領域を表す。

ストラットの圧縮力 R_3, R_4, R_5, R_6, R_9 によって生じる鉛直分力を P_3, P_4, P_5, P_6, P_9 とする。加力点での釣合条件から、せん断力 V_u に関して式(3)を得る。

$$V_u = P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_9 \quad (3)$$

これらのストラットが孔に重ならず、肋筋の応力が降伏強度を超えない範囲内で、せん断力 V_u が最大になるような P_3, P_4, P_5, P_6, P_9 , およびストラットの分岐点の位置を求める。なお、図4は、文献[3]の試験体 N1 (孔径130 mm, $p_w = 0.32\%$, $\sigma_{wy} = 813\text{MPa}$) の解析結果である。図3は、 σ_{wy} を N1 の半分にした場合であり、ストラット R_5 の太さがほとんどゼロになっている。図5は、 σ_{wy} を N1 の1.3倍にした場合である。 σ_{wy} をこれ以上大きくしても、ストラットの形状は図5から変化しない。これは、図5において R_5 と R_6 が孔のすぐ脇で合流し、ストラットの幅がこれ以上広がれなくなるためである。

あばら筋の降伏強度 σ_{wy} を少しづつ変化させた N1 の解析結果を図6に示す。図の縦軸はコアの断面積 $b_e j_e$ と有効強度 σ_e で基準化したせん断強度を示す。横軸の p_{we} とは、あばら筋1組の断面積をあばら筋間隔とコア断面幅 b_e で除した比を示す。図中の黒丸は実験結果であり、解析値は実験の73%の値となった。図中の P_3, P_4 等は、せん断強度 V_u を構成する各ストラットの鉛直分力の大きさを示す。

図6の横軸0.05以下の領域(図3に対応)では、せん断強度 V_u を構成する成分のうち、 P_3, P_4, P_7, P_8 が増大する。ただし、せん断スパン内の4本のあばら筋のうち降伏するのは孔の両脇の2本のみであり、孔から離れたあばら筋の応力は降伏強度未満である。横軸が0.05以上になると、 P_3, P_8 は減少傾向となる。一方、 P_4 (=孔の両脇のあばら筋の引張力) は、なお増大する。つまりこの領域では、孔の両脇の2本のあばら筋のみの強度の増大がせん断強度を増大させる。その後、横軸0.11を超えると、図5のようにストラットの幅がこれ以上広がれないという限界に達し、せん断強度は頭打ちとなる。

なお、日本建築学会の指針[1]では、孔の両側のあばら筋が密に配筋されていると仮定して、連続的なトラスを想定しているが、せん断強度としては本方法とほぼ近似した値となった。

4. 孔2個の場合の解析

図7, 図8のようなトラスモデルを想定する。圧縮力 $R_3, R_4, R_5, R_7, R_8, R_9$ によって生じる鉛直力を $P_3, P_4, P_5, P_7, P_8, P_9$ とする。あばら筋の引張力の釣合、加力点での釣合条件から、次式を得る。

$$P_3 = P_8 \quad (4)$$

$$P_4 = P_5 + P_7 \quad (5)$$

$$V_u = P_3 + P_4 + P_5 + P_9 \quad (6)$$

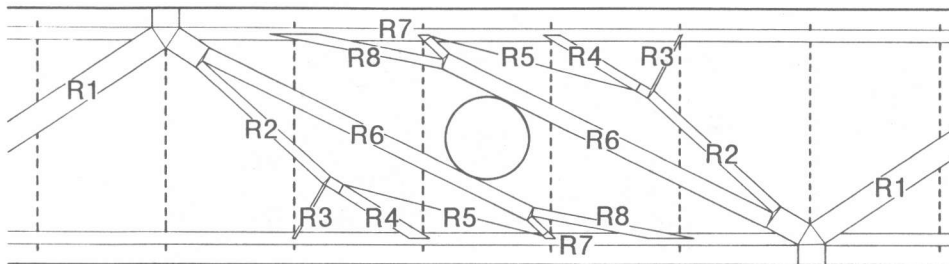


図3 孔1個で $\sigma_{wy}=407$ MPa のトラス詳細 ($p_{we}\sigma_{wy}/\sigma_e=0.04$)

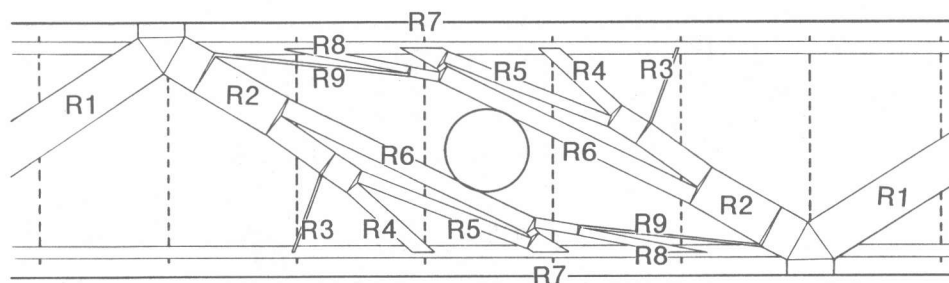


図4 孔1個で $\sigma_{wy}=813$ MPa のトラス詳細 ($p_{we}\sigma_{wy}/\sigma_e=0.08$)

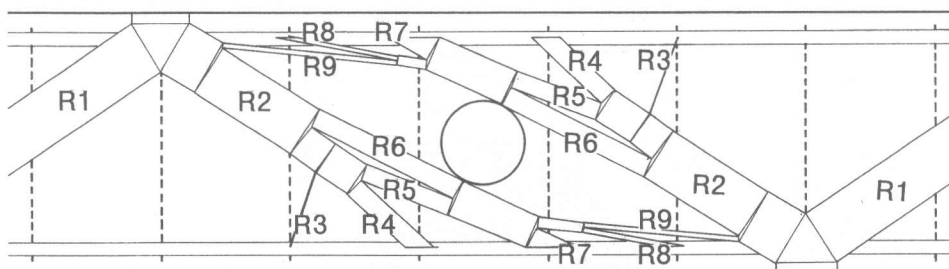


図5 孔1個で $\sigma_{wy} \geq 1027$ MPa のトラス詳細 ($p_{we}\sigma_{wy}/\sigma_e \geq 0.11$)

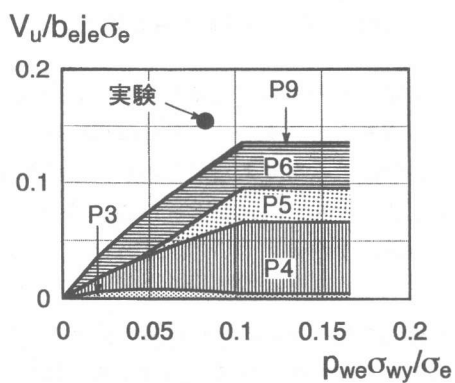


図6 孔1個の梁のせん断強度

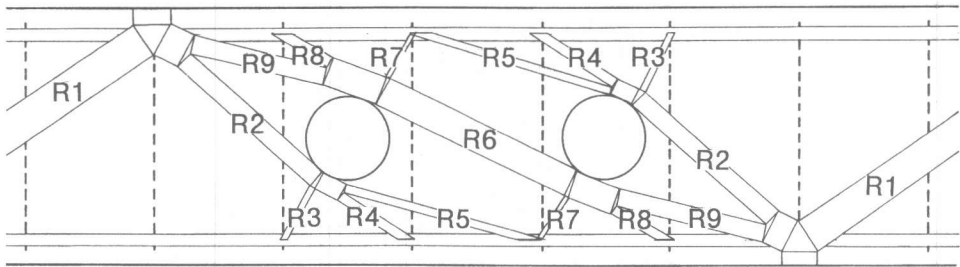


図7 孔2個で $\sigma_{wy}=407 \text{ MPa}$ のトラス詳細 ($p_{we}\sigma_{wy}/\sigma_e=0.04$)

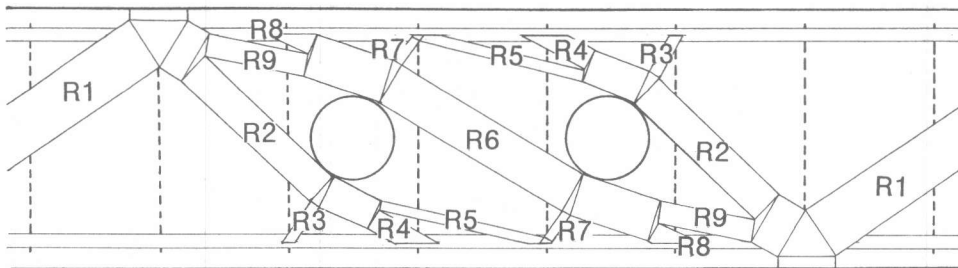


図8 孔2個で $\sigma_{wy} \geq 723 \text{ MPa}$ のトラス詳細 ($p_{we}\sigma_{wy}/\sigma_e \geq 0.07$)

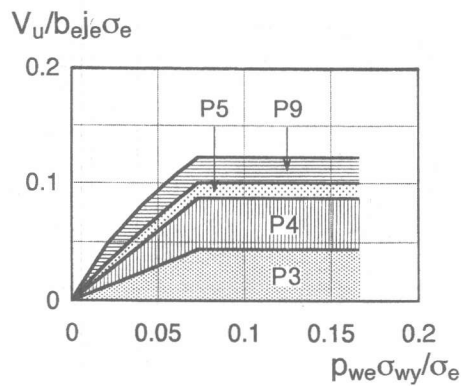


図9 孔2個の梁のせん断強度

ストラットが孔に重ならず、肋筋の応力が降伏強度を超えない範囲内で、せん断強度 V_u が最大になるような P3, P4, P5, P9 およびストラットの分岐点の位置を求める。なお、図7と図8は、図3、図4と同一配筋で孔の数のみを変えた場合の解析結果である。孔1個の解析ではあばら筋の降伏強度を上げるとストラット R3 と R8 の太さが逆に減少する傾向が見られたが、図7→図8ではすべてのストラットの太さが増大している。これは、4本のあばら筋が均等にせん断力を負担しているからである。

あばら筋の降伏強度 σ_{wy} を変化させた N2 の解析結果を図9に示す。 $p_{we}\sigma_{wy}/\sigma_e < 0.07$ の範囲では、せん断スパン内の4本のあばら筋すべてが降伏する。図7がこの範囲でのトラスの状況の1例である。これを超えると、図8のようにストラットの幅がこれ以上広がれないという限界

に達し、せん断強度は頭打ちとなる。N1の解析結果と比較すると、 $pwe\sigma_{wy}/\sigma_e$ の小さい領域では、N2の方が強度が高い。これは、P9の寄与が大きい。つまり、N2ではスパンの中央に孔がないため、あばら筋を介しないで対角線状に流れる応力が大きくなる。しかし、 $pwe\sigma_{wy}/\sigma_e$ の大きい領域では、2つの孔によってストラットが制限されるので、逆にN1よりもやや低い強度となる。N2の例は、孔の中心間距離と直径の比が $400/130 \approx 3$ である。孔の間隔をこの程度離しておけば、孔1個の場合とせん断強度はさほど変わらない、とも言える。

5. 孔3個の場合の解析

図10、図11のようなトラスモデルを想定する。圧縮力R3, R4, R5, R7, R8, R9によって生じる鉛直力をP3, P4, P5, P7, P8, P9とする。あばら筋の引張力の釣合、加力点での釣合条件から、次式を得る。

$$P3 = P8 + P9 \quad (7)$$

$$P4 + P7 = P5 + P7 + P8 \quad (8)$$

$$Vu = P3 + P4 + P5 + P9 \quad (9)$$

ストラットが孔に重ならず、肋筋の応力が降伏強度を超えない範囲内で、せん断強度 V_u が最大になるようなP3, P4, P5, P9およびストラットの分岐点の位置を求める。なお、図10と図11は、図3、図4と同一配筋で孔の数のみを変えた場合の解析結果である。孔1個、2個の場合に比べて、孔の間隔が狭いため、ストラットの傾斜が急になっている。あばら筋の降伏強度を上げるとますます傾斜が急になっていく。

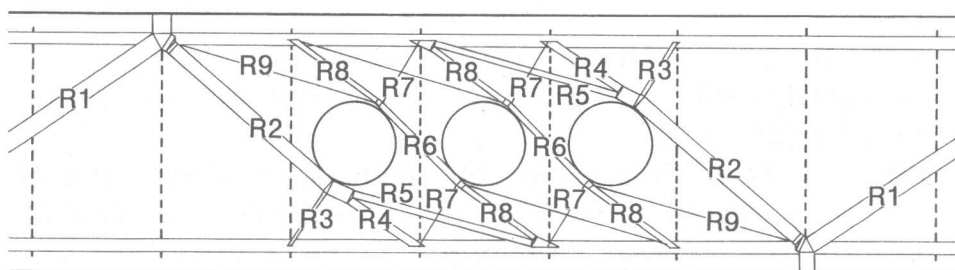


図10 孔3個で $\sigma_{wy}=407$ MPa のトラス詳細 ($pwe\sigma_{wy}/\sigma_e=0.04$)

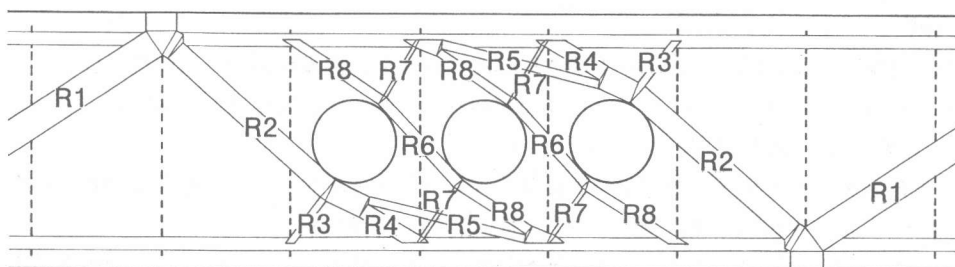


図11 孔3個で $\sigma_{wy}=813$ MPa のトラス詳細 ($pwe\sigma_{wy}/\sigma_e=0.08$)

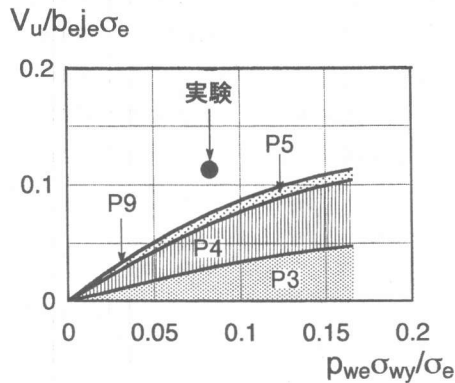


図1.2 孔3個の梁のせん断強度

あばら筋の降伏強度 σ_{wy} を変化させた解析結果を図1.2に示す。文献[3]の実験結果（図中の黒丸）と比べると、解析値は実験の67%の値となった。すべての段階で、孔にはさまれた2本のあばら筋は降伏、孔の外側のあばら筋は降伏点未満であった。このため、N1、N2と異なり、明確な強度の頭打ちは生じなかった。しかし、あばら筋の強度上昇と共に、孔の間を通るストラットが太くなり、その傾きが急にならざるを得ないため、せん断強度の上昇は緩慢になる。なお、図1.2のN3のせん断強度は、図6のN1、図9のN2と比較して、40～70%程度であり、著しく小さい。図4、図8、図1.1の比較より、孔どうしの間隔が小さいと、孔の間を流れるストラットの角度が鉛直に近づき、幅も狭くなるのでせん断強度は低下することがわかる。

6. まとめ

- 1) 本報告の解析結果は、文献[3]の実験結果の7割前後の強度となった。
- 2) 孔どうしの間隔が小さいと、孔の間を流れるストラットの角度が鉛直に近づき、幅も狭くなるのでせん断強度は低下する。
- 3) 部材スパンの中央部に孔がない場合は、あばら筋を介しないで対角線状に流れる応力が大きくなる。そのため、孔の両脇のあばら筋が弱い範囲ではせん断強度が上がる。孔の両脇のあばら筋が強くなると、ストラットの幅による頭打ちが生じ、孔どうしの間隔が問題になる。
- 4) 本解析の範囲内では、孔の間隔を孔径の3倍程度離しておけば、孔1個の場合とせん断強度はさほど変わらない結果となった。

参考文献

- [1] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1990.11
- [2] Marti, P. : Basic Tools of Reinforced Concrete Beam Design, ACI Journal, January-February Vol.82, No.1, 1985 pp.46-56
- [3] 市之瀬敏勝，横尾慎一，杉浦光彦：高強度コンクリートを用いたRC有孔梁のせん断実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.2 1992 pp.249-252
- [4] 市之瀬敏勝，横尾慎一：スパイラル筋を使用したRC梁のせん断強度，日本建築学会構造系論文報告集，No.441, 1992.11, pp.85-91