

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420574

研究課題名(和文) RC造大開孔梁の応力伝達メカニズムの解明と終局せん断耐力式及び配筋設計法の提案

研究課題名(英文) Stress transfer mechanism of RC beams with large web-opening, and proposal of shear capacity evaluation and reinforcing arrangement design method around web-opening

研究代表者

小林 克巳 (Kobayashi, Katsumi)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：40150297

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：開孔周囲補強筋の役割を実験によって明らかにし、それに基づいてせん断力伝達モデルを提案した。斜め補強筋はトラス構造を形成し、独立してせん断力を伝達する。開孔上下の2段梁に形成されるトラス機構とアーチ機構は、斜め補強筋によるせん断力以外のせん断力を伝達する。開孔際縦補強筋は、アーチ機構の圧縮束とつり合うことになる。

提案したせん断力伝達モデルに基づく耐力式によれば、せん断耐力計算値はほぼ一定の余裕度をもって実験結果と対応し、精度よく終局せん断耐力を求めることができる。

研究成果の概要(英文)：The shear force transfer mechanism around the web-opening was experimentally discussed, and the shear force transfer model was proposed. The diagonal bars form a truss structure and carry a part of shear force independently. The truss and arch mechanism of two stage beams upper and lower side of the web-opening carry the other part of shear force. The stirrups on the side of the opening balance with the strut of the arch mechanism.

According to the shear capacity formula based on the proposed shear force transfer model, the calculated shear capacity corresponds to the experimental results with almost constant safety margin. The postulated formula in this study is found to be able to evaluate the shear capacity of RC beams with large web-opening accurately.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：鉄筋コンクリート構造 開孔梁 人通孔 開孔周囲補強筋 終局せん断耐力 応力伝達メカニズム

1. 研究開始当初の背景

RC梁に設ける貫通孔径は梁せいの1/3以下に制限される。人通孔を設ける基礎梁では、孔径の制限から梁せいが決まる場合が生じ、梁せいが必要以上に大きくなって不経済な設計になること、施工コスト増になること等の問題が生じる。梁せいの1/3を超える大開孔梁の補強工法の開発も行われているが、終局せん断耐力が安全側に評価されればよいという考え方だけで、慣用式を用いて設計が行われている。しかし、安全側に評価されるとしても、安全率が一定にならず問題がある。

開孔梁に関する開発研究は、施工の簡略化に主眼がおかれてきたため、メカニズムの解明よりは、実験結果が慣用式による計算値を上回ることだけが重視されてきた。しかし、構造設計の合理化と安全性の向上のためには、応力伝達メカニズムに基づいた理論的な終局せん断耐力の評価が必要なることは言うまでもない。

2. 研究の目的

大開孔梁の終局せん断耐力の評価には経験式が使用される。図1のように、開孔上下に水平補強筋と肋筋を配置して2段梁配筋をし、開孔際縦補強筋と斜め補強筋を配置する方法が一般的であるが、各補強筋の役割を明確にすることなく設計が行われている。せん断破壊は開孔上下2段梁部分に生じるが、その肋筋は評価に含まれず、各補強筋量の組み合わせに応じた一定の設計上の安全率が確保されていない。

本研究は、開孔際縦補強筋、斜め補強筋、開孔上下2段梁配筋の役割と応力伝達メカニズムを明らかにし、それに基づいて終局せん断耐力評価式と配筋設計方法を提案し、設計の合理化と安全性の向上を図ることを目的とする。

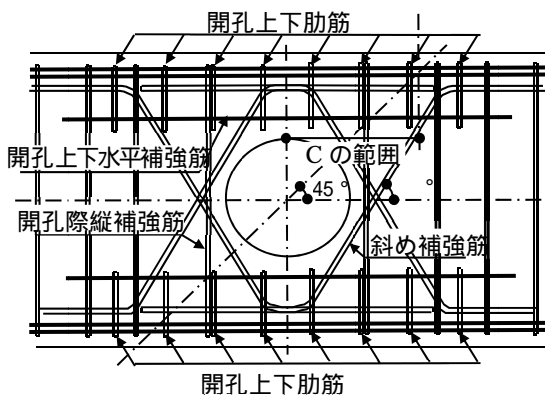


図1 大開孔周囲の補強筋の配置例

3. 研究の方法

- (1) 過去に行った実験(引用文献①)を参考にして応力伝達メカニズムを予測した。予測に基づき、開孔上下2段梁の肋筋、開孔際縦補強筋及び斜め補強筋のいずれかしか無く、一つのメカニズムだけが存在する場合を実験した。実験により各補強筋の役割を明らかにして応力伝達メカニズムを確認し、終局せん断耐力を求める力学モデルを作成した。
- (2) 開孔上下2段梁の肋筋量、開孔際縦補強

- 筋の位置をパラメータにして、応力伝達メカニズムに基づく力学モデルと破壊条件を検証・修正するための実験を実施した。
- (3) 応力伝達メカニズムを表す力学モデルと破壊条件に基づいて、終局せん断耐力を提案した。
- (4) 終局せん断耐力に達した後、徐々に耐力低下を起こすような好ましい性状となる配筋方法を力学モデルから考察し、それを実験によって確認した。
- (5) せん断スパン比が小さくなると終局せん断耐力が大きくなる場合と変化しない場合があることを力学モデルから説明し、実験によって確認した。
- (6) 慣用式による終局せん断耐力計算値が、余裕度にはばらつきはあるとしても、どのような場合に余裕度が小さくなるのか、力学モデルから検討し、注意事項を示した。

4. 研究成果

- (1) 開孔周囲補強筋の役割と応力伝達メカニズム
過去に行った5体の実験結果(引用文献①)に基づいて予測した応力伝達メカニズムは、図5の開孔上下2段梁のトラス機構と図2の梁のトラス機構圧縮束が開孔を避けるようにしてできる、LL区間における見掛けのアーチ機構(ローカルアーチ機構と呼び、開孔際縦補強筋に釣り合う)、および図4の斜め補強筋でできるトラス機構で構成される。

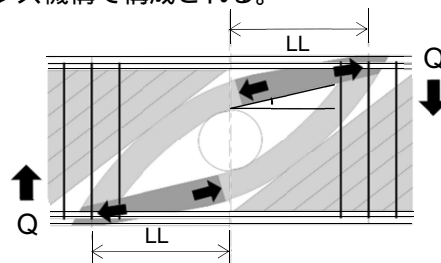


図2 開孔上下2段梁のローカルアーチ機構

梁せい $D=500\text{mm}$ 、幅 $b=180\text{mm}$ 、スパン 1200mm とし、スパン中央で梁せい中央位置に直径 $H=200\text{mm}$ の開孔を1個設けた試験体を製作した。先ず、開孔上下肋筋、開孔際縦補強筋および斜め補強筋のいずれかが配筋され、一つの機構だけが存在する3体の実験を行った。コンクリート圧縮強度は $20\sim 22\text{N/mm}^2$ 、開孔上下肋筋と開孔際縦補強筋 $D6$ および斜め補強筋 $D10$ の降伏点はそれぞれ 387N/mm^2 、 379N/mm^2 であった。梁主筋の $D19$ は $SD490$ を使用した。

開孔上下の肋筋の役割

開孔上下肋筋だけが配筋された場合のせん断力(Q)-相対変位()関係と終局時ひび割れ状況を図3に示す。通常、開孔上下2段梁がせん断破壊するが、それと異なっている。慣用式による計算値に対する実験値の余裕度は4倍以上で、開孔上下2段梁で大きなせん断力伝達が行われていることは明らかである。あたかも曲げ降伏したかの如き性状を示し

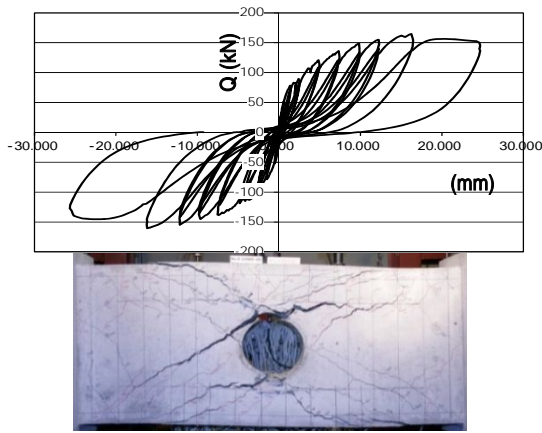


図3 Q-δ関係と終局時ひび割れ状況

ており、この部分をしっかり補強すれば、終局せん断耐力のみならず、最大耐力後の変形能力の確保に役立つことがわかる。

斜め補強筋の役割

引用文献を含め、斜め補強筋のみが配筋されているものを除き、全て斜め補強筋は降伏した。斜め補強筋は独立した機構でせん断力伝達をしていると思われるが、定着部が2段梁内で拘束されていることが重要である。

開孔際縦補強筋の役割

開孔際縦補強筋が開孔縁に近づけば図2のLLが小さくなって、開孔上下2段梁が短スパン化し、終局せん断耐力は上昇するが破壊は急激に生じる。開孔際に縦補強筋がなければLLは大きくなり、一般部の肋筋が開孔際縦補強筋の役割を果たすことになる。ローカルアーチ機構の圧縮束の角度は小さくなり、伝達せん断力は小さくなるが、開孔上下2段梁が長くなるので、最大耐力後も急激に耐力低下することが無くなる。なお、力のつり合いから、圧縮束の破壊が生じれば、開孔際縦補強筋が降伏しなくなることは明らかである。

(2) 応力伝達メカニズムに基づく力学モデルと破壊条件の検証

開孔上下2段梁に D10@50 を配筋し、2段梁のトラス作用だけでコンクリートが破壊条件に達する肋筋量とした。開孔縁から斜め補強筋 1-D10 の折れ曲がり点までの間に開孔際縦補強筋 D10 を一組だけ置き、その位置を開孔縁から 30mm、125mm、220mm とした。開孔縁から 30mm の位置にある D10 を D6 に変え、斜め補強筋を 2-D10 としたものを加えて4体の実験を行った。

開孔上下2段梁肋筋量を多くすれば、開孔際縦補強筋はその位置と量に拘わらず、せん断耐力に影響しないことを確認した。また、開孔上下2段梁部分のせん断ひび割れ幅の拡大が抑制され、最大耐力後の耐力低下が緩やかになることを確認した。大きな終局せん断耐力を得て急激な耐力低下を防ぐためには、開孔上下2段梁肋筋量を多くし、開孔際縦補強筋よりも斜め補強筋を多くするのがよい。

(3) 開孔際縦補強筋位置と終局せん断耐力

開孔際縦補強筋を開孔縁から離して配置し、開孔上下2段梁の長さ(図2のLL)が大きくなるようにすれば、最大耐力後の耐力低下が徐々に起こるようになることが予想され、開孔際縦補強筋の位置をパラメータとした4体の実験を行った。

開孔縁から一定範囲外にある縦補強筋を無視したせん断耐力計算値は実験結果より相当小さくなり、開孔から離れた配置にある縦補強筋も、ローカルアーチ機構の圧縮束および斜め補強筋とのつり合いに考慮すると、実験結果をよく説明できることが分かった。

(4) 終局せん断耐力を求める力学モデル

斜め補強筋のせん断力伝達

斜め補強筋は図4のトラスを形成して引張降伏し、独立してせん断力を伝達する。開孔上下の引張斜材と圧縮斜材の交点A又はBにおける力のつり合いは式(1)となり

$$T = C \quad (1)$$

$$Q_d = 2 \sigma_{dy} \cdot a_d \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

Q_d : 斜め補強筋が伝達するせん断力

α : 斜め補強筋の部材軸に対する角度

σ_{dy} : 斜め補強筋の降伏点応力度

a_d : 斜め補強筋の断面積

となる。ここで、引張斜材と圧縮斜材の力の水平成分は開孔上下2段梁の水平方向に圧縮力を生じさせ、その圧縮応力度 σ_0 は、

$$\sigma_0 = \frac{2T \cdot \cos \alpha}{b \cdot \frac{D-H}{2}} \quad (3)$$

D : 梁せい

b : 梁幅

H : 開孔径

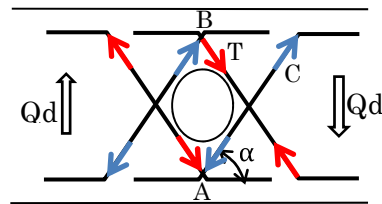


図4 斜め補強筋が形成するトラス機構

開孔上下2段梁のせん断力伝達

図5のように開孔上下に水平補強筋を置き、これと梁主筋を囲むように開孔上下肋筋を配置し、上下2段梁を形成すると、トラス作用によってせん断力を伝達する。開孔上下肋筋が引張降伏すれば、圧縮ストラットの圧縮力鉛直成分と開孔上下肋筋の引張力のつり合いから、

$$\sigma_t = p_{sw} \cdot \sigma_{sy} \cdot (1 + \cot^2 \theta) \quad (4)$$

x : 開孔上下肋筋の間隔

σ_t : トラス作用によって上下2段梁の腹部に生じる圧縮応力度

b : 梁幅

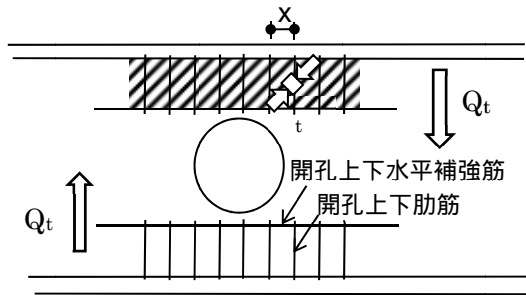


図5 開孔上下2段梁のトラス機構

- ϕ : 開孔上下2段梁の腹部に生じる圧縮応力の水平軸に対する角度
- a_s : 一組の開孔上下肋筋の断面積
- σ_{sy} : 開孔上下肋筋の降伏点応力度
- p_{sw} : 開孔上下2段梁の肋筋比 ($= a_s/b/x$)

ここで σ_t がコンクリートの破壊条件を超えなければ、開孔上下肋筋は降伏するまで引張力を発揮する。一方、 σ_t がコンクリートの破壊条件を超えれば、開孔上下肋筋は降伏せず、圧縮ストラットが先に破壊することになる。

開口上下2段梁の伝達せん断力は以下のように計算される。ただし、 σ_t がコンクリートの破壊条件を超えている時は、(4)式の σ_t をコンクリートの破壊条件で置き換えて、(5)式より Q_s が求まることになる。

$$Q_s = j_s \cdot b \cdot \sigma_t \cdot \sin\phi \cdot \cos\phi \quad (5)$$

$$Q_t = 2Q_s \quad (6)$$

- Q_s : 開孔上下2段梁のうち、開孔上部または下部のトラス作用による伝達せん断力
- Q_t : 開孔上部および下部の2段梁のトラス作用による伝達せん断力
- j_s : 開孔上下水平補強筋と梁主筋間の距離

開孔上下2段梁部分に形成されるローカルアーチ機構

梁のトラス機構におけるウェッジ圧縮束が開孔を避けて開孔上下に現れる部分をアーチ機構の圧縮束に見立ててローカルアーチ機構と呼ぶ。図6より幾何学的に、

$$\tan\theta_1 = \frac{\left(\frac{D-H}{2} - y\right) + \left(\frac{H}{2} - \frac{H}{2}\cos\theta_1\right)}{\frac{H}{2}\sin\theta_1 + LL + \frac{y}{2}\tan\theta_1} \quad (7)$$

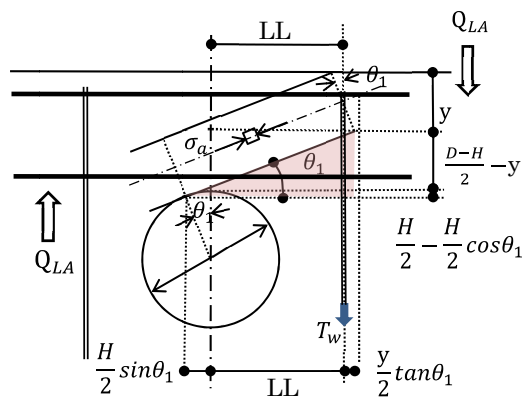
この圧縮束の圧縮力鉛直成分に開孔際縦補強筋の引張力がつり合うとすると、

$$Q_{LA} = \sigma_a \cdot y \cdot b \cdot \tan\theta_1 \quad (8)$$

Q_{LA} が最大になる y が存在するが、 $y = (D-H)/4$ としても殆ど誤差は生じない。 $\tan\theta_1$ は式(7)を解くことによって求まる。開口上下のローカルアーチ機構による伝達せん断力は、

$$Q_a = 2 \cdot \sigma_a \cdot \frac{D-H}{4\cos\theta_1} \cdot b \cdot \sin\theta_1 \quad (9)$$

となる。ここで、 Q_{LA} は開孔際縦補強筋の引張力(T_w)につり合うので、ローカルアーチ機構の圧縮束に生じる圧縮応力度がコンクリ



- D : 梁せい
- H : 開孔径
- LL : 開孔際縦補強筋の開孔中心からの距離
- θ_1 : ローカルアーチ機構圧縮束の材軸に対する角度
- σ_a : ローカルアーチ機構の圧縮束に生じる圧縮応力度
- T_w : 開孔際縦補強筋の引張力
- Q_{LA} : 開孔上部または下部のローカルアーチ機構の伝達せん断力

図6 ローカルアーチ機構の圧縮束と開孔際縦補強筋のつり合い

ートの破壊条件に達するまで、開孔際縦補強筋が順次降伏することになる。開孔際縦補強筋が N 本ある場合には、 T_w はそれらの合力であり、 LL は合力位置となる。

$$a_w = \sum_{i=1}^N a_{wi} \quad (10)$$

$$T_w = \sum_{i=1}^N a_{wi} \cdot \sigma_{wyi} \quad (11)$$

$$LL = \frac{\sum_{i=1}^N (a_{wi} \cdot \sigma_{wyi} \cdot x_{wi})}{T_w} \quad (12)$$

- a_{wi} : i 番目の縦補強筋の断面積
- σ_{wyi} : i 番目の縦補強筋降伏点強度
- x_{wi} : i 番目の縦補強筋の開孔中心からの距離

N が増加すれば a_w 、 T_w が増加し、 σ_a が増加する。 σ_a が破壊条件に達すれば、その時の Q_{LA} がローカルアーチ機構の伝達せん断力となる。

($m+1$)番目から N 番目までの縦補強筋が斜め補強筋の折れ曲り点より外側にある場合、それらの引張力の一部は図7に示す斜め補

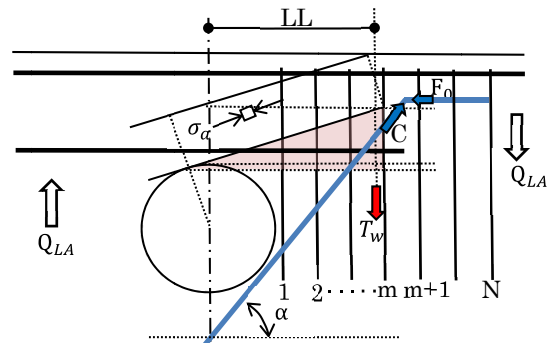


図7 斜め補強筋が形成するトラスの圧縮斜材の鉛直成分につり合う縦補強筋とローカルアーチ機構の圧縮束の鉛直成分につり合う縦補強筋

強筋が形成するトラスの圧縮斜材の鉛直成分につり合わなければならない。式(1)、式(2)より、

$$C = a_d \cdot \sigma_{dy} \quad (13)$$

$$C_v = a_d \cdot \sigma_{dy} \cdot \sin \alpha \quad (14)$$

C_v : 斜め補強筋が形成するトラスの圧縮斜材の鉛直成分

α : 斜め補強筋の水平軸に対する角度

(m+1)番目から N 番目までの縦補強筋の引張力の大きさは、

$$T_{w2} = \sum_{i=m+1}^N a_{wi} \cdot \sigma_{wyi} \quad (15)$$

T_{w2} が C_v より小さい場合には、(m+1)番目から N 番目までの縦補強筋の引張力は全て斜め補強筋が形成するトラスの圧縮斜材の鉛直成分とのつり合いに使われ、ローカルアーチ機構には関与しないことになる。 T_{w2} が C_v よりも大きい場合には、1番目から m 番目までの縦補強筋、および(m+1)番目から N 番目までの縦補強筋の引張力のうち($T_{w2} - C_v$)が、ローカルアーチ機構圧縮束の鉛直成分につり合うことになる。この場合のローカルアーチ機構に関わる縦補強筋の引張力の合力 T_w とその位置 LL は以下のように計算される。

$$T_w = T_{w1} + T_{w2} - C_v \quad (16)$$

$$T_{w1} = \sum_{i=1}^m a_{wi} \cdot \sigma_{wyi} \quad (17)$$

$$LL_1 = \frac{\sum_{i=1}^m a_{wi} \cdot \sigma_{wyi} \cdot x_{wi}}{T_{w1}} \quad (18)$$

$$LL_2 = \frac{\sum_{i=m+1}^N a_{wi} \cdot \sigma_{wyi} \cdot x_{wi}}{T_{w2}} \quad (19)$$

$$LL = \frac{T_{w1} \cdot LL_1 + T_{w2} \cdot LL_2}{T_w} \quad (20)$$

開口上下のコンクリートの破壊条件

σ_t , σ_a , σ_0 のスカラー和が破壊条件に達した時、終局せん断耐力が得られるとする。破壊条件によって、終局せん断耐力計算値の大きさも変わるが、それを決めることは難しい。ここでは、式(21)、式(22)とする。

$$\sigma_t + \sigma_a + \sigma_0 = v_0 \cdot c \cdot \sigma_B \quad (21)$$

$$v_0 = 0.7 - \frac{c \sigma_B}{200} \quad (22)$$

$c \sigma_B$: コンクリートの圧縮強度

v_0 : コンクリートの圧縮強度の有効係数

斜め補強筋量と開口上下肋筋量が多く、 $(\sigma_t + \sigma_0) \geq v_0 \cdot c \cdot \sigma_B$ の場合には、ローカルアーチ機構は存在しない。

$(\sigma_t + \sigma_0) \leq v_0 \cdot c \cdot \sigma_B$ の場合には、式(8)および式(9)の σ_a は、式(23)となる。

$$\sigma_a = v_0 \cdot c \cdot \sigma_B - \sigma_t - \sigma_0 \quad (23)$$

トラス機構における圧縮束の角度

開口上部または下部の2段梁のせん断耐力は、式(5)と式(8)から $Q_S + Q_{LA}$ で表される。

$\cot \theta$ は $Q_S + Q_{LA}$ が最大となるように式(24)~式(26)の範囲内で最大の値を選べばよい。

$$\cot \theta \leq 2 \quad (24)$$

$$\cot \theta \leq \sqrt{\frac{v_0 \cdot c \cdot \sigma_B - \sigma_0}{p_{sw}} - 1} \quad (25)$$

$$\cot \theta \leq \frac{j_s}{\left(\frac{D-H}{2}\right) \cdot \tan \theta_1} \quad (26)$$

開口梁の終局せん断耐力

終局せん断耐力は、式(2)、式(6)、式(10)より

$$Q_u = Q_d + Q_t + Q_a \quad (27)$$

終局せん断耐力の計算手順

終局せん断耐力は図8の手順で計算される。

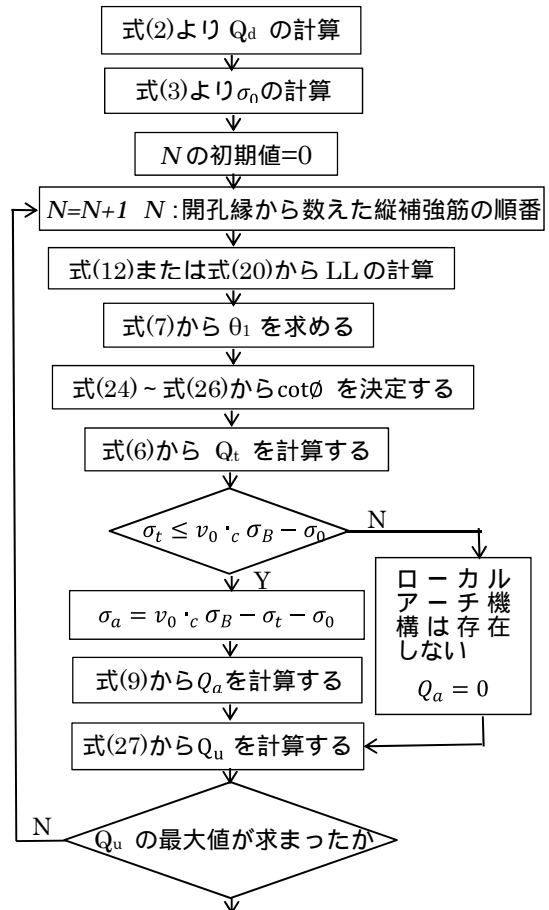


図8 せん断終局耐力の計算手順

(5) 合理的な配筋方法

開口上下2段梁の肋筋だけでコンクリートの破壊条件に達する筋量とすればよいが、実際にそれだけの量を配筋するのは不可能である。2段梁コンクリートは開口際縦補強筋とつり合って破壊条件に達することになるので、2段梁の肋筋を入れすぎず、ローカルアーチ機構の圧縮束につりあう縦補強筋位置を開口縁から離すことが現実的である。ただし、開口近傍に縦補強筋が無いと開口縁ひび割れ幅が拡大して剛性低下が大きくなるので、斜め補強筋を十分に配筋して終局せん断耐力の確保とひび割れ幅制御を行うのが得策である。本研究では、ひび割れ幅制御のた

めの指標を導入して合理的な配筋となる場合とならない場合を実験によって確認した。

(6) 終局せん断耐力に及ぼすせん断スパン比の影響

開孔周囲の配筋が同じで、せん断スパンの異なる3体の実験を行った。ローカルアーチ機構圧縮束につり合う縦補強筋の合力位置(図6、図7のLL)よりせん断スパンが小さくなると、ローカルアーチ機構圧縮束の角度が材端により制約を受けるため、終局せん断耐力は増加する。それ以外は、開孔周囲の応力伝達メカニズムが同じであれば、終局せん断耐力に及ぼすせん断スパン比の影響は現れない。開孔際の縦補強筋は一定量あるのが普通で、それでローカルアーチ機構圧縮束の角度が決まり、多くの場合せん断スパン比の影響が現れなくなると思われる。

(7) 慣用式の検討

図9に実験値と本提案式による計算値を示す。概ね一定の余裕度をもって、実験値と計算値はよく対応している。20%程度の余裕度が生じるのは、破壊条件の他に、開孔上下2段梁のせいを、開孔上下の最小となるところで決めていることによると思われる。

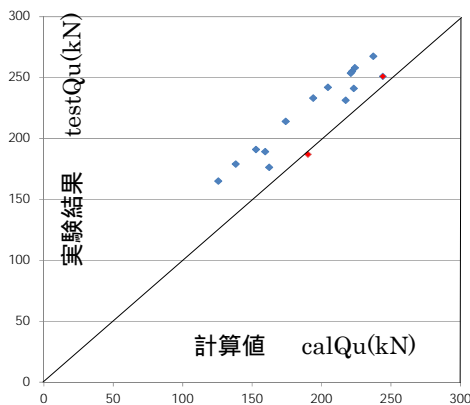


図9 実験値と本提案式による計算値の比較

図10に実験値と開孔上下2段梁のせん断力伝達を考慮しない慣用式による計算値を示す。実験値の計算値に対する余裕度は一定しない。余裕度が小さくなる場合を、本提案式から考察すれば、開孔上下筋筋量が少なく、

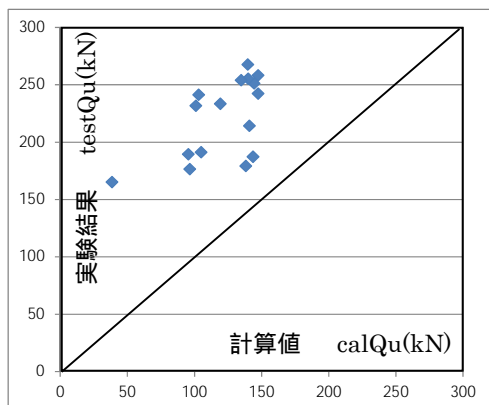


図10 実験値と慣用式による計算値の比較

コンクリート強度が小さい時である。両条件が重なった時は、特に注意が必要である。

(8) まとめ

大開孔梁を対象として、開孔周囲の縦補強筋、斜め補強筋、開孔上下2段梁の筋の役割を明確にした。開孔上下に水平補強筋を置いて2段梁を形成することが最も重要である。

開孔際の縦補強筋は、ローカルアーチ機構圧縮束につり合う。開孔際に縦補強筋が少なければ、一般部筋筋がローカルアーチ機構の圧縮束につり合う縦補強筋の役割を担う。

定着がとれていれば、斜め補強筋は独立した機構でせん断力伝達を考えるとよい。

開孔周囲補強筋の役割に基づいてせん断力式を提案した。せん断耐力計算値は、ほぼ一定の余裕度をもって実験結果と対応している。提案式に基づけば、終局せん断耐力に達した後急激に耐力低下が起こらない配筋、終局せん断耐力に及ぼすせん断スパン比の影響、慣用式を使う場合の注意事項等、多くのことを理論的に説明することができる。

本研究成果が、大開孔梁の合理的で安全な設計に役立つことを願っている。

<引用文献>

- ① 小林克巳、RC造大開孔梁の終局せん断耐力に対する開孔周囲補強筋の役割について、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2、2012、237-238

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4件)

- ① Katsumi Kobayashi, Shear capacity evaluation of footing beams with large web opening for maintenance based on stress transfer mechanism, Proc. of 16th World Conference on Earthquake Engineering, 査読有, 2017, Paper No. 195

小林 克巳、RC造大開孔梁の終局せん断耐力に対する開孔周囲補強筋の役割について(その4)、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、C-2、2016、111-112

小林 克巳、RC造大開孔梁の終局せん断耐力に対する開孔周囲補強筋の役割について(その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、C-2、2015、475-476

小林 克巳、RC造大開孔梁の終局せん断耐力に対する開孔周囲補強筋の役割について(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、C-2、2014、231-232

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 克巳 (KOBAYASHI, Katsumi)
福井大学・学術研究院工学系部門・教授
研究者番号: 40150297