

論文 穿孔の導入による応力場の意図的な変化が RC はりのせん断耐荷機構に及ぼす影響

山田 雄太*1

要旨 : RC 部材に穿孔を導入することで, せん断耐力の増加を図る手法の構築に関する基礎的知見を得るために, 静的載荷実験を行った。鉄筋ひずみに基づき, アーチ機構およびビーム機構の寄与率を理論的に導出する手法を提案し, 実験結果に適用した結果, 支点側の鉛直応力卓越領域において引張鉄筋側に穿孔を有する場合, ビーム機構の寄与率が無穿孔試験体と比較して増加することにより, 無穿孔試験体と同等の荷重を保持することを明らかにした。理論的に導出された圧縮線移動領域内に穿孔を有する場合, 圧縮ストラットの形成が阻害されることで, 無穿孔試験体と比較して, 耐力が 20%程度低下することを確認した。

キーワード : 穿孔, せん断耐力, 耐荷機構分解手法, アーチ機構, ビーム機構, 維持管理

1. 序論

経年劣化により鉄筋腐食ひび割れを生じた RC (鉄筋コンクリート) 構造部材の補修および補強は, 補修材や補強材に外力を分担させることで見かけの部材性能を回復させる方法を用いて行われることが一般的である。しかしながら, 今後さらに増加が見込まれる劣化が進んだ全ての社会基盤構造物に対し, これまで提案されてきた補修および補強方法を適用することは, 時間と費用の制約上, 困難になることが予想される。より効率的な維持管理戦略構築のために, 簡易に部材性能を向上させる方法の提案が求められている。

補修材や補強材に依存せず部材耐力を増加する手法の一つに, RC 部材内に人工埋設物を導入する方法がある。既往の研究では, 人工損傷^{例えは}1)や高引張強度材料²⁾を部材内部に設けることで, ひび割れ進展経路を制御し, 部材の耐力を向上させる方法が提案されている。

人工損傷を有する RC はり部材の疲労挙動に関する研究では³⁾, 荷重点近傍の鉛直応力場の影響が無視できる領域に人工損傷先端を有する場合, 比較的高い応力集中を損傷先端に生じることで耐荷機構が変化した結果, 部材耐力が健全なはりと比較して向上することを明らかにしている。適切な位置に応力集中を引き起こし, ひび割れ発生前の応力場を変化させることができれば, 部材耐力を向上できると考えられる。

部材耐力を向上させる手法として, 構造物からコンクリートコアを抜き取る際, 一般的に用いられるコアドリル等により部材に穿孔を設けることで, 意図的に応力場を変化させる手法を提案する。コアドリルを用いる利点は, 人工埋設物を設置する手法と比較して時間的コストを低減できる点に加え, 穿孔切削部と鉄筋との干渉を容易に回避できる点である。これらの利点は, 既設構造部材への適用範囲を拡大すると考えられる。本手法の適用

により, 耐荷機構を意図的に変化させることで, 劣化した部材耐力の向上が期待できる。また, 劣化した部材が曲げ破壊先行の破壊形態を呈するためには, 提案する手法の適用により, せん断耐力を向上させる必要がある。

本研究では, 穿孔の導入により部材のせん断耐力を向上する手法の構築に関する基礎的知見を得ることを目的として, 静的載荷実験を行い, 穿孔位置が健全な部材のせん断耐荷機構に及ぼす影響の解明を試みた。

2. 穿孔位置が静的耐力及び破壊性状に及ぼす影響

2.1 実験概要

試験体の諸元を図-1 および表-1 に示す。はり理論の適用範囲内である鉛直応力非卓越領域(B 領域)と適用範囲外である鉛直応力卓越領域(D 領域)に存在する穿孔の影響を明らかにするため, B 領域および D 領域を有するせん断スパン比(a/d)が 3.0 のスレンダービームを実験の対象とした。D 領域は, 支点および荷重点からはり軸方向に有効高さの 1/2 離れた位置と定義した³⁾。

確実にせん断破壊先行の破壊形態を呈するよう, 試験体には, 主引張鉄筋及び主圧縮鉄筋として高強度鉄筋 USD785D13 をはり軸直角方向に 3 本配置した。せん断補強筋は, SD295AD6 をはり軸方向に 120mm 間隔で配置した。

有効高さの約 1/10 である直径 22mm の塩化ビニル製パイプを型枠内に配し, 打設から 7 日後にパイプを除去することで, はり軸直角方向に貫通した穿孔を導入した。

支点および荷重点には, 厚さ 20mm, 幅 50mm の載荷板を設置し, 4 点曲げの荷重条件下で静的載荷を行った。載荷速度は 0.5-1.0kN/秒の範囲に収まるよう制御した。

2.2 実験結果

図-2 に各試験体の荷重変位図を示す。図中の荷重はせん断耐力を 2 倍した値である。全ての試験体において, 荷

*1 日本大学 理工学部土木工学科 助手 (正会員)

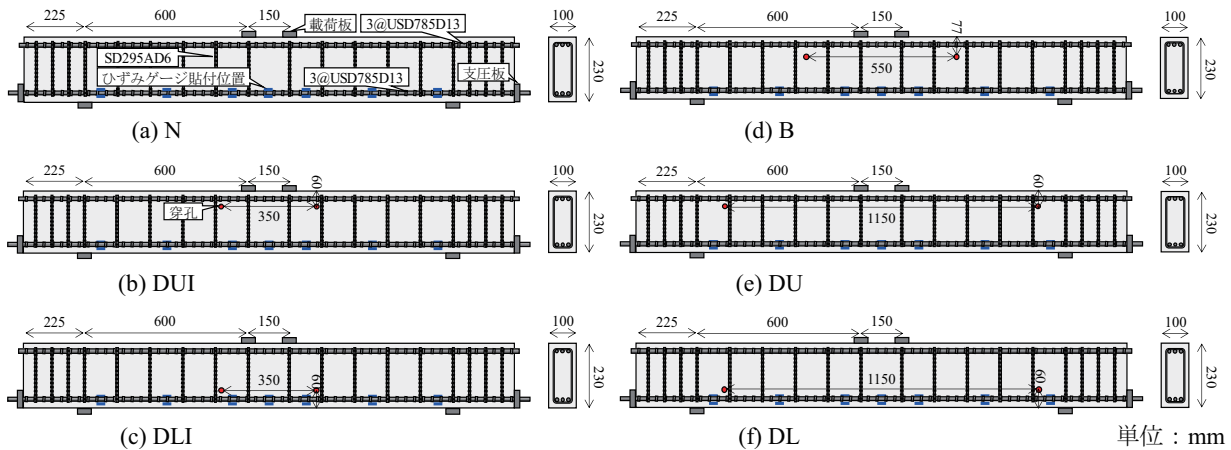
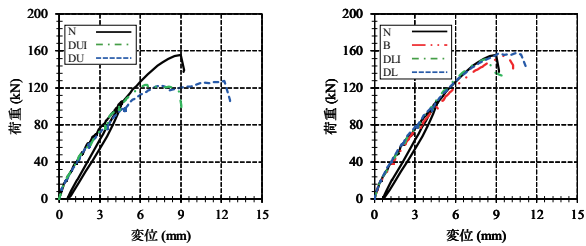


図-1 試験体諸元

表-1 実験ケース

試験体名	穿孔位置	主鉄筋比(%)	せん断補強筋比(%)	コンクリートの圧縮強度(MPa)	耐力(kN)	ビーム機構におけるコンクリート寄与分の最大値(kN)	アーチ機構寄与分の最大値(kN)
N	-			34.0	155.8	54.0	116.1
DUI	載荷点側のD領域上部	1.70	0.47	31.6	123.3	48.0	91.2
DLI	載荷点側のD領域下部			31.6	151.7	58.0	107.7
B	B領域上部			32.8	155.4	47.7	113.6
DU	支点側のD領域上部			32.8	127.5	47.2	94.3
DL	支点側のD領域下部			32.8	157.2	93.0	79.5



(a) N, DUI, DU (b) N, B, DLI, DL
図-2 荷重変位図

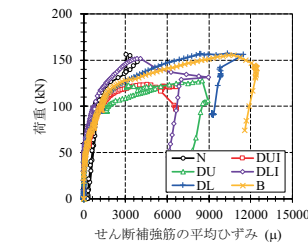


図-3 せん断補強筋の平均ひずみと作用荷重の関係

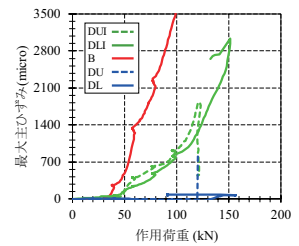


図-4 穿孔周囲の最大主ひずみと作用荷重の関係

重が 110kN 付近に至るまでは、穿孔の無い N と比較して剛性に大きな変化は認められないが、D 領域上部に穿孔を有する DUI および DU では、120kN 付近で剛性が低下し、終局に至った(図-2(a))。一方、D 領域下部に穿孔を有する DLI および DL では、終局に至るまで、N と同等の剛性ならびに耐力を保持した(図-2(b))。B 領域に穿孔を有する B では、120kN 付近で剛性が僅かに低下したものの、N と同等の耐力を保持した。はり断面内の圧縮領域に存在する穿孔は、耐力の低下に寄与する可能性を示した。

図-3に各試験体におけるせん断補強筋の平均ひずみと作用荷重の関係を示す。平均ひずみは、せん断スパン内に配した計 8 本のせん断補強筋の鉛直方向中央部に貼付したひずみゲージによる計測値を平均化することで得た。

いずれのケースにおいても、作用荷重が約 40kN に到達した後、ひずみが増加し、1600 μ 付近から増加量が大きくなる傾向を示した。いずれの試験体も作用荷重が約 40kN に到達した後、斜めひび割れを生じ、1600 μ 付近で降伏したと考えられる。せん断補強筋に用いた

SD295AD6 の引張試験から得た降伏強度は、329MPa であった。

図-4に各試験体における穿孔周囲の最大主ひずみと作用荷重の関係を示す。最大主ひずみは、穿孔近傍のせん断スパン側に貼付したひずみゲージの測定値から算出した。作用荷重に対する最大主ひずみの大きさは、B, DUI と DLI, DU と DL の順に大きな値を示したことから、穿孔の周辺には、B 領域、載荷点側の D 領域、支点側の D 領域の順に大きな応力が作用していることが推定できる。

図-5に各試験体における終局時のひび割れ分布図を示す。全ての試験体において、荷重が 40kN 付近に到達した後、斜めひび割れを生じ、新たに形成される斜めひび割れの進展により破壊に至ったことから、斜め引張破壊を呈したと考えられる。

穿孔を有する試験体では、載荷に伴い進展するひび割れが穿孔を通過するか、穿孔付近に形成されたことから、せん断スパン内に導入された穿孔は応力場の変化に寄与することが確認された。

実験結果から、有効高さの 1/10 程度の直径を有する穿

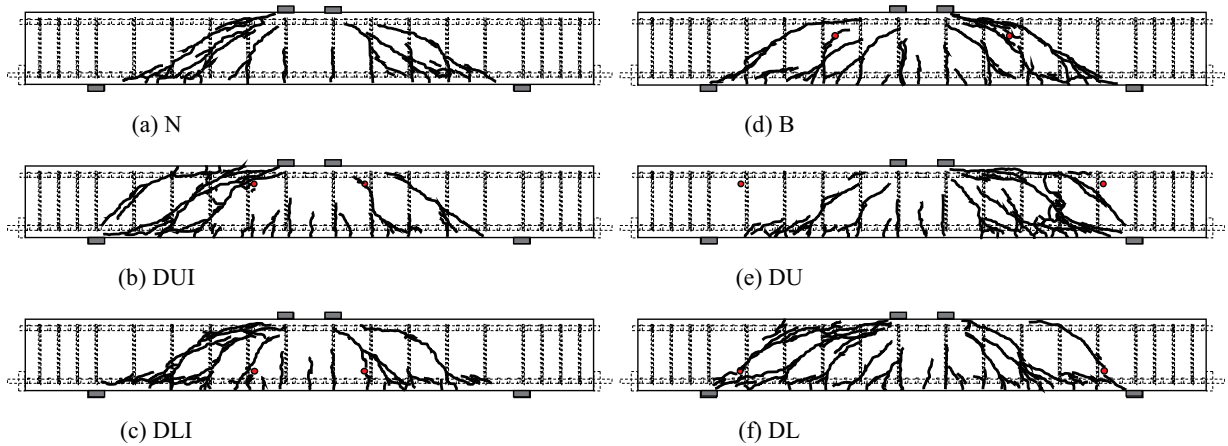


図-5 終局時のひび割れ分布図

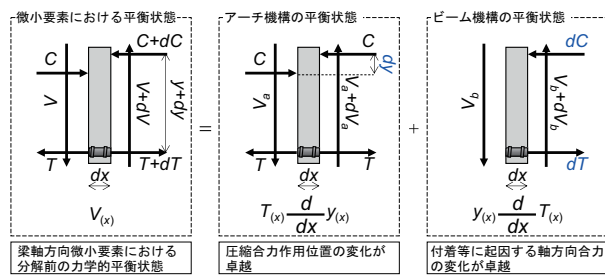


図-6 せん断耐荷機構の概念図

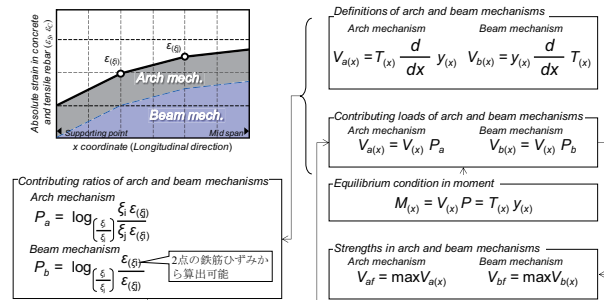


図-7 耐荷機構寄与分の導出過程に関する概略図

孔が、RC はりの耐力および破壊性状に及ぼす影響は比較的小さいと考えられるが、同様の耐力および破壊性状を示した場合においても、穿孔の導入により耐荷機構が変化した可能性がある。

穿孔位置が耐荷機構に及ぼす影響を解明するために、鉄筋ひずみと作用荷重から耐荷機構の荷重寄与分を算出する手法を提案し、実験結果へ適用した。

3. 耐荷機構に及ぼす穿孔位置の影響

3.1 耐荷機構寄与率の導出

(1) アーチ機構およびビーム機構の定義

はりに作用するせん断力はアーチ機構とビーム機構による荷重寄与分として分解できることが知られている⁴⁾。図-6に梁軸方向微小要素の平衡状態に着目したアーチ機構およびビーム機構の概念図を示す。微小要素に作用する平衡状態を考慮すれば、アーチ機構は圧縮合力作用位置の変化が卓越する耐荷機構であり、ビーム機構は鉄筋-コンクリート間の付着力等に起因する軸方向合力の変化が卓越する耐荷機構であることが理解できる。アーチ機構およびビーム機構は、断面の力学的平衡状態、もしくは断面に作用するモーメントの一階微分に微分連鎖則を適用することで求めることができる。

断面内における引張合力作用位置の変化に関する影響を無視すれば、断面内の作用モーメントは以下の式で示される。

$$M_{[T,y]} = T_{(x)}y_{(x)} \quad (1)$$

ここに、 M : 断面における作用モーメント、 T : 軸方向引張力、 y : 断面内のモーメントアーム長、 x : 部材軸方向座標である。

せん断力は、梁軸座標に対するモーメントの一階微分で与えられることから、アーチ機構寄与分とビーム機構寄与分の和として、次のように記述できる。

$$V_{(x)} = T_{(x)} \frac{dy_{(x)}}{dx} + y_{(x)} \frac{dT_{(x)}}{dx} \quad (2)$$

ここに、 V : せん断力である。式(2)における右辺第一項が荷重に対するアーチ機構寄与分であり、右辺第二項が荷重に対するビーム機構の寄与分である。すなわち、

$$V_{a(x)} = T_{(x)} \frac{dy_{(x)}}{dx} \quad (3)$$

$$V_{b(x)} = y_{(x)} \frac{dT_{(x)}}{dx} \quad (4)$$

ここに、 V_a : アーチ機構寄与分、 V_b : ビーム機構寄与分である。

式(3)および式(4)からも、アーチ機構は圧縮合力作用位置が変化した際にのみ生じる機構であり、ビーム機構は軸方向合力が変化した際にのみ生じる機構であることが確認できる。実際には、はりに生じるひび割れや鉄筋の付着状態に応じて、各耐荷機構の寄与分が変化する。ビーム機構にはトラス理論におけるせん断補強筋寄与分が含まれることに加え、各耐荷機構の寄与分はせん断補強

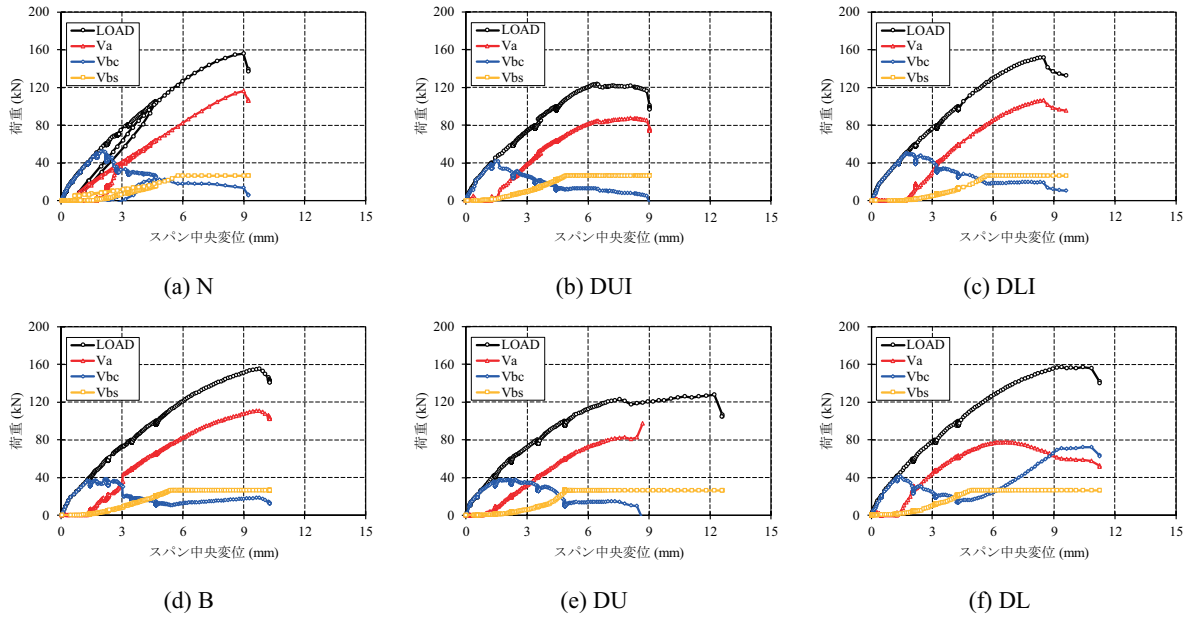


図-8 荷重変位関係に対するアーチ機構およびビーム機構の寄与分の推移

筋の拘束効果による影響を受けるものと考えられる。

(2) 実験結果に基づく新たな耐荷機構分解手法

実験結果に基づき耐荷機構を分解する手法は既往の研究(例えば5)により提案されたものが存在するが、本研究では、新たな耐荷機構の分解手法を提案する。本手法の適用により、耐荷機構の寄与率を鉄筋ひずみのみから導出することができる。

図-7に耐荷機構寄与分導出の過程を示す。各耐荷機構の荷重に対する寄与率の存在を仮定すれば、各耐荷機構の寄与分は以下の式で表すことができる。

$$V_{a(x)} = P_a V_{(x)} \quad (5)$$

$$V_{b(x)} = P_b V_{(x)} \quad (6)$$

ここに、 P_a ：アーチ機構の寄与率、 P_b ：ビーム機構の寄与率である。

はりに集中荷重が作用している場合、断面内の作用モーメントは以下の式で表すことができる。

$$M_{[T,y]} = V_{(x)} x \quad (7)$$

以上の式を連立すれば、 y および T に関する以下の一階線形常微分方程式を得る。

$$\frac{dy_{(x)}}{dx} - \frac{P_a}{x} y_{(x)} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{dT_{(x)}}{dx} - \frac{P_b}{x} T_{(x)} = 0 \quad (9)$$

これを解き、以下の式を得る。

$$y_{(x)} = y_{(\xi)} \left(\frac{x}{\xi} \right)^{P_a} \quad (10)$$

$$T_{(x)} = T_{(\xi)} \left(\frac{x}{\xi} \right)^{P_b} \quad (11)$$

ここに、 ξ ：部材軸方向座標である。

式(10)および式(11)は、 $\xi = \xi_1$ 、 $\xi = \xi_2$ の時のについてもそ

れぞれ成立することから、ビーム機構の寄与率に関する以下の式が導かれる。

$$P_b = \log \left(\frac{T_{(\xi_2)}}{T_{(\xi_1)}} \right) \frac{\xi_1}{\xi_2} \quad (12)$$

ここに、 $i \neq j$ である。

アーチ機構の寄与率は以下の式で求められる。

$$P_a = 1 - P_b \quad (13)$$

また、任意の座標における圧縮合力の作用位置は以下の関係で与えられる。

$$y_{(\xi)} = \frac{V_{(\xi)}}{T_{(\xi)}} \xi \quad (14)$$

式(12)は、式(14)を式(10)に代入することによっても得られる。

$T_{(\xi)}$ を算出するために用いられる鉄筋の断面積および弾性係数は通常、はり軸方向に対して一定であるから、式(12)は次式を用いて書き改めることができる。

$$P_b = \log \left(\frac{\varepsilon_{(\xi_2)}}{\varepsilon_{(\xi_1)}} \right) \frac{\xi_1}{\xi_2} \quad (15)$$

ここに、 ε ：鉄筋ひずみである。

式(13)および式(15)を式(6)および式(7)に代入することで、荷重に対するアーチ機構寄与分およびビーム機構寄与分を得ることができる(図-7)。

はり軸方向の各断面において、アーチ機構およびビーム機構の寄与分は異なることから、式(15)により得たビーム機構寄与率をスパン内で平均化し、作用荷重に対するアーチ機構およびビーム機構の寄与分を算出した。

3.2 荷重変位関係における耐荷機構の推移

図-8に荷重変位関係に及ぼすアーチ機構およびビーム機構の寄与分を示す。図中の V_a はアーチ機構の荷重寄与分、 V_{bc} はビーム機構におけるコンクリートの荷重寄与分、

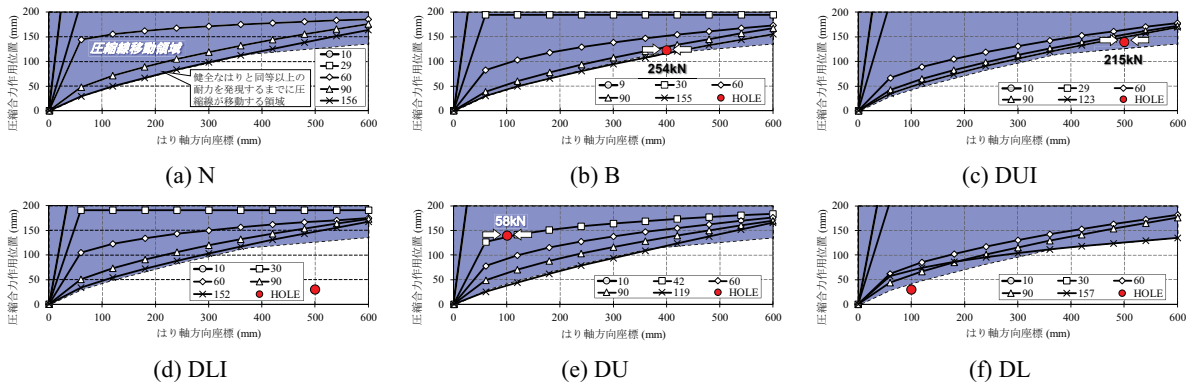


図-9 圧縮合力作用線の推移と穿孔位置の関係

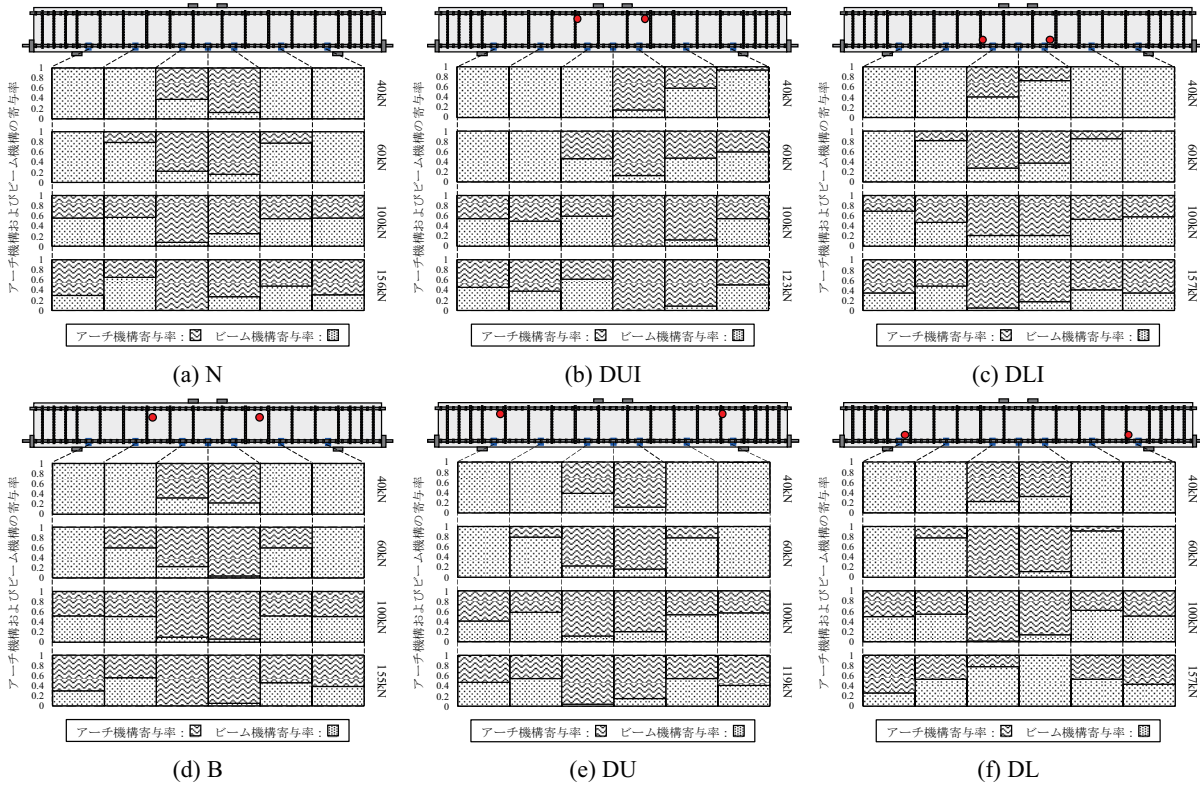


図-10 はり軸方向断面に対するアーチ機構およびビーム機構寄与率の推移

V_{bs} はビーム機構におけるせん断補強筋の荷重寄与分を示す。 V_{bs} は、図-3 に示したせん断補強筋の平均ひずみから、トラス理論に基づき算定した。せん断補強筋の算定に用いた仮想トラスの部材角は、中立軸における主応力角の弾性理論解である 45° とした。せん断補強筋の荷重寄与分は、一軸引張試験から得た鉄筋の降伏強度以上の応力に抵抗しないことを仮定し、図中にプロットした。 V_{bc} は、 V_b が V_{bs} と V_{bc} の線形和で与えられることを仮定し、算出された V_b から V_{bs} を差し引くことで算出した。 V_{bc} の推移に着目すると、全ての試験体における V_{bc} の第一ピークが約 40kN であることから、斜めひび割れは荷重約 40kN で生じたことが推定できる。耐荷機構の分解により推定された斜めひび割れ発生荷重と、実験で確認された斜めひび割れ発生荷重は概ね一致することから、本手法による耐荷機構分解手法の妥当性が認められる。

各試験体の耐荷機構寄与分に着目すると、DUIおよびDUでは、作用荷重 120kN 付近で V_a が穿孔の無い N と比較して低下するのに対し、DLIおよびBでは、 V_a の最大値は N と同程度である約 110kN に到達することが確認できる。一方、DLでは、 V_a の最大値は N と比較して低下するのに対し、 V_{bc} が第一ピークを迎えた後、最大値が 93kN まで回復した。DUIおよびDUでは、曲げ変形に伴う軸方向圧縮力が作用する領域に穿孔が導入されたことで圧縮ストラットの形成を阻害し、N と比較して V_a の最大値が低下したと考えられる。DLIおよびBでは、軸方向圧縮力が作用しない領域に穿孔が導入されたことで、圧縮ストラットの形成に及ぼす影響は小さく、 V_a の最大値が N と同等に保持されたと考えられる。

一方 DL では、はりの曲げ変形を増長させる位置に穿孔を有することで、スパン中央に作用する鉛直応力が N と比較して増加し、鉄筋-コンクリート間の機械的な付着が増加した結果、斜めひび割れ発生以降の V_{bc} が回復したと考えられる。

上述の仮説を証明するため、圧縮合力作用位置およびはり軸方向断面に対する耐荷機構寄与率の推移を算出した。

3.3 圧縮線移動領域と穿孔位置の関係

図-9に断面内における圧縮合力作用位置と穿孔位置の関係を示す。図中の原点は、はり軸方向に対し支点位置を示し、鉛直方向に対し引張鉄筋位置を示す。凡例の数字は作用荷重を示す。圧縮合力作用位置は、式(10)および式(14)から算出した。圧縮合力作用位置を軸方向に連ねた線を圧縮線と呼ぶ。図中の圧縮線移動領域は、各試験体における最大荷重時の圧縮線を包含する領域として定めた。

圧縮線移動領域と穿孔位置の関係に着目すると、穿孔が圧縮線移動領域外に存在する B, DLI, DL では、圧縮ストラットの形成に及ぼす穿孔の影響は小さく、耐力が穿孔の無い N と同等に保持されたことが推察される。一方、穿孔が圧縮線移動領域内に存在する DUI, DU では、圧縮ストラットの形成を妨げ、N と比較して耐力の低下に大きな影響を及ぼしたと考えられる。

圧縮線と穿孔位置の関係に着目すると、圧縮線は荷重の増加に伴うアーチ機構の発現により、はりの下縁方向へ移動するが、DU を除き、穿孔位置より下部に位置する圧縮線は存在しないことが確認できる。穿孔位置に圧縮線が存在する時の穿孔部におけるはり軸方向圧縮力を鉄筋に作用した引張力から推定すると、DUI および B でそれぞれ 215kN, 254kN であったのに対し、DU では 58kN であった(図-9(b), (c), (e))。このことから、穿孔位置において 200kN 程度の圧縮力が作用した時、はり は終局を迎えることが推察される。従って、DU では、穿孔位置に圧縮線が存在する時、穿孔部が受ける圧縮力が比較的小さいため、圧縮線のはり下縁方向への移動を許したのに対し、DUI では、圧縮線が穿孔位置に到達すると同時に穿孔部が破壊することではり が終局を迎え、圧縮線の移動が穿孔位置で停止したと考えられる。

3.4 軸方向断面に対する耐荷機構の推移

図-10 にはり軸方向断面に対する耐荷機構寄与率の推移を示す。各試験体のはり軸方向に対する寄与率は、100kN まで概ね同様の傾向で推移し、載荷点側の D 領域におけるアーチ機構の寄与率が卓越して推移することが確認できる。しかしながら、DL では、最大荷重時において、載荷点側の D 領域におけるビーム機構の寄与率が回

復した(図-10(f))。これは、3.2 に述べた仮説の通り、他の試験体と比較して相対的に大きな鉛直荷重をスパン中央に受けることで鉄筋-コンクリート間の機械的な付着が増加した結果であると考えられる。

本研究における実験では、穿孔の導入による耐力の増加は確認できなかったものの、応力場の変化に起因する耐荷機構の変化が確認できた。耐荷機構を適切に制御することができれば、穿孔の導入による耐力の増加も期待できると考えられる。耐荷機構の制御を実現するためには、穿孔径、穿孔数、穿孔形状およびせん断補強筋の拘束効果が穿孔周辺の応力場に与える影響を明らかにしていく必要がある。

4. 結論

直径が有効高さの 1/10 程度の穿孔を有する RC はりを対象とした静的載荷実験の結果から以下の結論を得た。

- 1) 鉄筋ひずみからアーチ機構およびビーム機構の寄与率を理論的に導出する手法を構築し、実験結果に適用した結果、鉛直応力卓越領域において引張鉄筋側に穿孔を有する場合、ビーム機構の寄与率が無穿孔試験体と比較して増加することにより、無穿孔試験体と同等の荷重を保持することを明らかにした。
- 2) 断面内におけるはり軸方向圧縮合力の作用位置を連ねた圧縮線が移動し得る範囲内に穿孔を有する場合、圧縮ストラットの形成を阻害することで耐力が無穿孔試験体と比較して 20%程度低下した。

参考文献

- 1) Pimanmas, A. and Maekawa, K.: Control of Crack Localization and Formation of Failure Path in RC Members Containing Artificial Crack Device, Journal of Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE, V-52, No.683, pp.173-186, Aug.2001.
- 2) 小林薫, 佐々木尚美: RC 部材に引張強度の高い領域を付与してせん断破壊制御を行うための基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.7-12, 2014.
- 3) 山田雄太, 千々和伸浩, 岩波光保: 引張主鉄筋に沿う人工損傷の長さがせん断補強筋の無い RC はりの疲労耐荷機構に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2, Vol.73, No.3, pp.323-336, 2017.8.
- 4) Park, R., Paulay, T.: Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, New York, pp.276-287, 1975.
- 5) 中村英佑, 渡辺博志: せん断補強鉄筋を有する RC はりのせん断耐荷機構に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.731-741, 2008.