5 せん断力を受ける鉄筋コンクリート部材

5.1 概説

鉄筋コンクリート構造物の破壊形態におい て,最も慎重に扱わなければいけないのは, せん断力による破壊,すなわちせん断破壊で ある。なぜなら,せん断破壊は,曲げ破壊よ り脆性的で,構造物そのものの形状保持が困 難であり,人や物の安全性に対し直接危害を 及ぼす可能性があるためである。図 5-1 に示 す阪神淡路大震災での高架橋の倒壊はまさに



図 5-1 阪神淡路大震災での RC橋脚の倒壊¹⁾

この破壊形態の恐ろしさを物語っている。せん断破壊は,せん断力が卓越する箇 所で発生するものであるが,一般にせん断力単独の作用によるものではなく,曲 げモーメントとの組み合わせ応力下で発生するものである。その特徴は,一般に 斜めひび割れと呼ばれるひび割れの発生を伴うものであり,引張鉄筋の降伏後に コンクリートが圧壊する曲げ破壊に比べ脆性的である。従って,このような破壊 形態を防ぐために,通常せん断力に対する部材の抵抗力(せん断耐力)が曲げ耐 力を上回るように設計する必要がある。

本章では,はじめに,鉄筋コンクリートはりに外力が作用する際のせん断応力 状態を示す。次いで,せん断補強鉄筋をもたない鉄筋コンクリートはりに作用す るせん断力について,これに抵抗する要因を整理し,それぞれの分担力とその耐 荷機構について述べる。また,これらの要因を定式化したせん断耐力算定式につ いて説明する。次に,せん断補強鉄筋を配置した鉄筋コンクリートはりのせん断 破壊を取り上げ,古典的なトラス理論を解説することによりせん断補強鉄筋によ り受け持たれるせん断力を算出する。また,これと前述のトラス作用以外によっ て抵抗するせん断力の足し合わせによりトータルのせん断耐力を算定する。最後 に,ウェブコンクリートの斜め圧縮破壊について解説すると共に,モーメントシ フトの概念とその意義について論じる。

5.2 鉄筋コンクリートはりにおけるせん断応力

コンクリートはひび割れ発生前であればほぼ弾性体とみなすことが出来るため,



等分布荷重を受ける等質弾性体はりの主応力線図 図 5-2 その応力状態を考える際には第一章で示した弾性体の応力状態を参考にすると良 い。図 5-2 に弾性体はりの主応力線図を示す。図中の実線が主引張応力線, 点線 が主圧縮応力線である。図より、曲げモーメントが卓越する支間中央部付近では、 主応力線がはりの下縁からほぼ垂直に進展しているが, せん断力が卓越する支点 付近では上方に向かうにつれ、主圧縮応力線の傾きが緩やかになっていることが わかる。また,主引張応力線は主圧縮応力線と垂直に交わっている。圧縮に強く 引張に弱いコンクリートは、この主引張応力線とほぼ直角にひび割れが発生する と考えられる。言い換えれば主圧縮応力線にほぼ沿ってひび割れが発生すること になる。すなわち、ひび割れ発生まではほぼ弾性体とみなされるコンクリートは りを考えると,曲げモーメントが卓越する支間中央付近ではコンクリート下縁か らほぼ垂直に上方に伸びる曲げひび割れが発生し、せん断力が卓越する支点付近 では、コンクリート下縁より支間中央に向かって次第に斜めに伸びるひび割れが 発生することになる。これらのひび割れに対してコンクリートのみで抵抗するこ とは不可能なため,鋼材により適切に補強する必要がある。

図 5-3 に単純支持された等方弾性体はりに 2 点載荷した際の曲げモーメント図 およびせん断力図,並びに曲げモーメント M に対する曲げ応力分布およびせん断 力 V に対するせん断応力分布を示す。図より,曲げモーメントは載荷点間で最大



図 5-3 弾性体はりの断面力図と応力分布図

となり,支点に向かうにつれ直線的に減少し,支点で0になる。一方,せん断力 は載荷点間で0となり,支点から載荷点までの間(せん断スパン a)で等しい値 を示す。曲げモーメントMに対する断面内の曲げ応力 は,断面2次モーメント をI,中立軸からの距離をyとすると, =(M/I)・yで表される。すなわち,中立 軸からの距離に比例し分布することになる。一方,せん断力Vに対する断面内の せん断応力 は,断面1次モーメントをG,断面の幅をb,断面2次モーメント をIとすると, =VG/(bI)で表される。ここで,Gは中立軸からの距離yの2 次式で表されるため,その分布は図に示されるよう,上下縁で0,中立軸で最大 となる放物線を描く。

以上の弾性体はりの応力分布を参考にし,弾性理論に基づき鉄筋コンクリート はりの応力分布を考える。コンクリート断面の幅を b,有効高さを d,鉄筋の断 面積を Asとする。鉄筋とコンクリートのヤング係数比を n=Es/Ecとすると,これ を考慮した鉄筋の換算断面は nAsで表される。コンクリート上縁から中立軸まで の距離は x とする。さらに,コンクリートのせん断応力を考える際,以下の仮定 を設ける。

コンクリートは弾性体とする。

コンクリートの引張応力は無視する。



以上の仮定に基づき,力の釣り合いとひずみの適合条件からコンクリート断面 内のせん断応力分布を求めると,図 5-4 に示す通りとなる。すなわち,コンクリ ート上縁で0,中立軸まで放物線上に増加し,中立軸上で最大(=V/(bjd))と なり,中立軸からコンクリート下縁まで一定で推移することになる。ここで,jd は鉄筋の引張合力とコンクリートの圧縮合力との間の距離である。

5.3 せん断補強鉄筋をもたないはりのせん断耐荷機構

コンクリートと軸方向鉄筋のみで構成され る鉄筋コンクリートはりにせん断力が作用し, 斜めひび割れが発生したとする。図 5-5 にそ のような状況下におけるフリーボディを取り 出し,力の釣り合いを考える。図より,作用 せん断力Vは以下の要因により分担されると 考えられる。

 $V = V_{cz} + V_a + V_d$

ここで,

Vcz: 圧縮部のコンクリートに作用するせん断 力

Va:ひび割れ面の骨材のかみ合いによって伝 達されるせん断力(Vaの鉛直成分:Vay) Va:軸方向鉄筋のダウエル作用



図 5-5 せん断力の分担に寄 与する要因に関する概念図

圧縮部のコンクリートに作用するせん断力は圧縮部の面積に依存する。ここで, コンクリート断面の幅 bwが一定であれば,コンクリート上縁から中立軸までの距 離 x に依存することになる。従って, この要因は中立軸の位置を左右する鉄 筋比 pwやコンクリート強度 fcと密接 に関係すると考えられる。次に,ひび 割れ面の骨材のかみ合いによって伝達 されるせん断力は,ひび割れ幅に依存 すると考えられる。すなわち,ひび割 れ幅が大きいほど骨材のかみ合い作用



図 5-6 骨材のかみ合い作用とダウ エル作用の概念図

が低下し,逆にひび割れ幅が小さければ大きな骨材のかみ合い作用が期待できる と考えられる。従って,この要因はひび割れ幅に関係する前述の鉄筋比 pw やコ ンクリート強度fcの影響を受けると考えられる。さらに、この要因は、寸法効果 と呼ばれる骨材の寸法と部材寸法との相対的な関係に依存することが知られてお り,一般に骨材寸法に対してコンクリート断面の有効高さが大きいほどこの要因 が小さくなると考えられる。最後に、ダウエル作用とは、一般に線材と考えられ る軸方向鉄筋にも実際には曲げ剛性があり、ひび割れ面においてせん断力により 相対変位が生じればこれに抵抗する機構である。このようにダウエル作用が軸方 向鉄筋の曲げ剛性,あるいは発生する相対変位(ひび割れ幅)に関係するとすれ ば,これも前述の鉄筋比 pwやコンクリート強度 f。に影響されると考えられる。 骨材のかみ合い作用及びダウエル作用の概念図を図 5-6 に示す。また,骨材のか み合い作用やダウエル作用に影響を及ぼすひび割れ幅は軸圧縮力が作用すれば小 さくなり、軸引張力が作用すれば大きくなるため、せん断力の分担を考える際、 軸力の影響も考慮する必要がある。以上のことから, せん断力に影響を及ぼす主 たる要因として,鉄筋比 pw,コンクリート強度 f。,部材の有効高さ d,さらには 軸力 N が挙げられる。

これらの要因とは別に,鉄筋コンクリートはりの破壊形態そのものに影響を及 ぼす要因としてせん断スパン比が挙げられる。せん断スパン比とは,せん断スパ ン a をはりの有効高さ d で除した値(a/d)である。前述の図 5-3 より,せん断ス パン a が増加すると,せん断力は p/2 一定に対して,曲げモーメントは a に比例 して増加する。すなわち,せん断スパン a が大きいと,曲げモーメントが卓越し, 結果,曲げ破壊が先行することになる。一方, a が小さいと逆に曲げモーメント は小さくなり, せん断力の影響が卓越し, せん断破壊が先行することになる。せん断スパン比はせん断スパン a を有効高さ d で除して無次元化した値であり, この値が大きいものほど細長いはりとみなすことができる。曲げ破壊とせん断破壊の境界については研究者により多少見解が異なるが, 概ね 5.5-6.5 程度であると考えられる^{2).3)}。

以上のことから, せん断補強鉄筋をもたない鉄筋コンクリートはりのせん断力 は, コンクリート強度 f_c, 鉄筋比 p_w, 有効高さ d, 軸力 N, せん断スパン比 a/d に依存すると考えられる。これらの要因がせん断力に及ぼす影響を理論的に定式 化できればそれに越したことはないが, 残念ながら現段階ではその域に達してい ないため,多くの実験結果から得られた以下の経験式に基づき評価されている⁴⁾。

$$V_c = 0.20 f_c^{1/3} (100 p_w)^{1/3} d^{-1/4} (0.75 + \frac{1.4}{a/d}) b_w d$$

ここで,

f_c:コンクリートの圧縮強度(MPa)

pw=As/(bwd):引張鉄筋比

d:有効高さ,d^{-1/4}で表される際のdの単位は[m],

a/d: せん断スパン比

bw:ウェブの幅(長方形断面の場合,断面の幅)

なお,上式は斜め引張破壊を前提とした比較的細長いはりに対して適用可能で あることに留意する必要がある。また,上式は実験結果に基づく経験式,すなわ ち実験結果に最も合うよう各項(各係数)をフィッティングさせた結果であるこ とから,左辺と右辺では単位(次元)が合っていないことに留意する必要がある。 せん断補強鉄筋をもつはりのせん断耐荷機構 5.4.1 せん断補強鉄筋の種類

一般に大きなせん断力が作用した場合,せ ん断補強鉄筋なしでせん断力に抵抗すること は困難である。従って,せん断力が卓越する 箇所には適切にせん断補強鉄筋を配置する必 要がある。せん断補強鉄筋は,スターラップ と折曲鉄筋に大別される。このうち,スター ラップは部材軸と垂直に,軸方向鉄筋を囲む

ようにある間隔ごとに配置された鉄 筋で,図5-7のようにU型と閉合型 に分けられる。一方,折曲げ鉄筋は, 本来曲げモーメントにより発生する 引張に抵抗する目的で配置されてい る軸方向鉄筋の一部を折り曲げ,せ ん断力に対して抵抗させることを目 的としたものである。図5-8より, 等分布荷重を受ける単純支持された 鉄筋コンクリートはりでは,支間中 央で曲げモーメントが最大となり,



せん断力は0となる。従って,軸方向鉄筋は支間中央での曲げモーメントに対し て抵抗できるよう,必要量を配置する必要がある。一方,曲げモーメントは,支 点に向かうにつれ,減少することから,支点近くでは支間中央で必要とされる軸 方向鉄筋量は必ずしも必要ではなくなる。逆に,せん断力は支点に向かうにつれ, 増加するため,軸方向鉄筋の一部を折曲げ,斜め引張応力の方向にほぼ沿って, 言い換えれば斜めひび割れの方向とほぼ直角に鉄筋を配置したものが折曲げ鉄筋 である。

せん断補強鉄筋の機能として,本来の斜めひび割れ発生後に主引張応力に抵抗し,せん断耐力を増加させる目的以外にも,斜めひび割れ幅の拡大の拘束(骨材のかみ合い作用 Vaの低下を抑制),斜めひび割れが圧縮側に進展することの拘

束(圧縮部のコンクリートに作用するせん断力 Vezの低下の抑制),斜めひび割 れが引張鉄筋に沿って進展することの拘束(ダウエル作用 Va の低下を抑制お よび引張鉄筋の付着破壊の防止)といった副次的な効果も期待される。さらにス ターラップには軸方向鉄筋を所定の位置に配置する組立鉄筋としての機能も期待 できる。

5.4.2 せん断破壊の形態

鉄筋コンクリートはりの破壊形態を考える場合,断面力のうち曲げモーメント により破壊(曲げ破壊)するか,せん断力により破壊(せん断破壊)するかを検 討する必要がある。両者は主としてせん断スパン比 a/d により区別され,概ね a/d=5.5~6.5を境に,これより大きければ曲げ破壊,小さければせん断破壊と考 えることが出来る。さらに,せん断破壊の形態は,斜め引張破壊,せん断圧縮破 壊,ウェブ圧縮破壊,および二次的な破壊(付着破壊)に大別される⁵⁾。以下, それぞれの破壊形態について説明する。

斜め引張破壊

せん断力の卓越する箇所に発生する斜め引張力に伴う斜めひび割れの進展によ り破壊する形態であり, a/d=2.5~6.5 程度の比較的細長い(スレンダーな)はり に見られる一般的な破壊形態である。斜めひび割れの発生過程により,曲げせん 断ひび割れとウェブせん断ひび割れに大別される。ここで,曲げせん断ひび割れ とは,支点と載荷点間に発生する曲げひび割れが,その後載荷点に向かって斜め ひび割れとして進展するものであり,一般的な形態といえる。一方ウェブせん断 ひび割れは曲げひび割れとは独立に,ウェブ中央に斜めひび割れが発生し進展す るもので,軸圧縮力の卓越した PC 部材やウェブの極端に薄い RC 部材に発生す る破壊形態といえる。

(2) せん断圧縮破壊

せん断スパン比 a/d=1.5~2.5 程度のはりに対する一般的な破壊形態である。斜 めひび割れが形成されても直ちに破壊には至らず,斜めひび割れ上部のコンクリ ートと引張鉄筋がタイドアーチ的な耐荷機構を形成する。最終的には載荷点付近 で斜めひび割れ上部のコンクリートが圧壊し,破壊に至る。

(3) ウェブ圧縮破壊

せん断スパン比 a/d 1.5 程 度のディープビームと呼ばれる はりに見られる破壊形態である。 曲げひび割れは見られず、支点 と載荷点を結ぶ直線付近に斜め ひび割れが発生し,次第に圧縮 破壊する。前述のタイドアーチ というよりタイ付きのストラッ ト構造に近い耐荷機構と言える。 タイドアーチ的耐荷機構および タイドストラット的耐荷機構の 概念図を図 5-9 に示す。



(4) 二次的な破壊(付着破壊)

図 5-9 せん断耐荷機構の概念図 斜めひび割れの張鉄筋側への進展に伴い,引張鉄筋に沿った割裂ひび割れが発

生し、これにより引張鉄筋とコンクリートの付着が失われ付着破壊(定着破壊) が誘発される現象である。

5.4.3 せん断補強鉄筋をもつはりのせん断力の分担

せん断補強鉄筋をもつはりでは,前述の, 圧縮部のコンクリートに作用する せん断力 V_{cz}, 骨材のかみ合い作用 V_a,

ダウエル作用 Va に加え,せん断補強 鉄筋による作用 Vs が考えられる。すなわ ち,せん断力 V は

 $V=V_{cz}+V_a+V_d+V_s$

により評価されると考えられる。しかし ながらこれら4つの要因は各荷重段階で 同様に作用するわけではないことに留意 する必要がある。図5-10 に各荷重段階 におけるせん断力の分担の概念図を示す ²⁾。図より,曲げひび割れ発生前までは,



図 5-10 せん断補強鉄筋を持つ はりのせん断力の分担の概念図

コンクリートのみ Vcz でせん断力に対して抵抗し,ダウエル作用 Va 及び骨材のか み合い作用 Vay はひび割れ発生後に出現すると考えられる。さらにせん断補強鉄 筋(スターラップ)による作用は斜めひび割れ発生以降に初めて期待され,せん 断補強鉄筋の降伏後は,ダウエル作用,骨材のかみ合い作用は共に減少し,せん 断補強鉄筋とコンクリートのみで抵抗することになる。

5.4.3 トラス理論

トラス理論とは、斜めひび割れが発生したはりを静定トラスでモデル化する考 え方である。従って,破壊形態が斜め引張破壊型であることが前提条件として挙 げられる。すなわち, 圧縮コンクリートは圧壊しない, 引張鉄筋は降伏しな い, せん断補強鉄筋は降伏する, ウェブコンクリートは斜め圧縮破壊しない ことが前提条件となる。以上の条件に基づき、スターラップおよび折曲鉄筋をも つ鉄筋コンクリートはりをモデル化した概念図を図 5-11 に示す。図より , は圧 縮部のコンクリートで、これを上弦材とみなす。上弦材の位置は圧縮合力の作用 位置に一致する。 は引張鉄筋で,これを下弦材とみなす。下弦材の位置は引張 合力の作用位置に一致する。 はせん断補強鉄筋(スターラップまたは折曲鉄筋) であり、これを引張腹材とみなす。ここで、スターラップは垂直材、折曲鉄筋は 斜材となる。最後に は斜めひび割れが発生しているウェブコンクリートでこれ を圧縮斜材とみなす。以上のことから、トラスの高さは、圧縮合力と引張合力の 作用位置の距離ということになり, z=jd=d-x/3(d:有効高さ,x:コンクリート 上縁から中立軸までの距離)で表される。また上弦材と下弦材はともに水平(す なわち両者は平行)となる。せん断補強鉄筋の部材軸とのなす角度をとすると、 スターラップでは 90°, 折曲鉄筋では例えば 45°となる。また, 斜めひび割れ の部材軸となす角度は (45°)で表すこととする。

以上に基づき, せん断補強鉄筋により受け持たれるせん断力 Vsを算出する。



スターラップを用いた場合

折曲鉄筋を用いた場合

図 5-11 トラス理論の概念図



図 5-12 せん断補強鉄筋により受け持たれるせん断耐力 Vs の算出方法 以上の結果より,斜めひび割れが =45°で発生した場合,せん断補強鉄筋と してスターラップを用いると, =90°となり,上式にこれらの値を代入すると, スターラップにより受け持たれるせん断耐力 Vsは,Vs = Awfwyjd/s で与えられる。 一方,折曲鉄筋を用いた場合, =45°とすると,上式より折曲鉄筋による受け 持たれるせん断耐力 Vs は,Vs = 2Awfwyid/s で与えられる。

トラス理論では当初, せん断補強鉄筋をもつ鉄筋コンクリートはりのせん断耐 カVはV=Vsと考えられていたが, その後の研究によりこれでは過小評価である ことが解明され,現在は前述のVcを加算し, Vy=Vs+Vcにより,鉄筋コンクリー トはりのせん断耐力を評価することとしている。ここで,

Vy: せん断耐力

Vs:トラス作用によって抵抗するせん断力(トラス理論により算出)

V_c:トラス作用以外によって抵抗するせん断力(実験データに基づく経験式によ り算出)

である。

5.4.4 ウェブコンクリートの斜め圧縮破壊

ウェブコンクリートの斜め圧縮破壊とは,斜めひび割れ間のウェブコンクリートが圧縮強度に達し破壊する現象である。このような破壊形態は,斜め引張破壊 以上に脆性的であるため,これを避ける必要がある。前述のトラス理論に従い, ウェブコンクリートの圧縮耐力より,このような破壊形態に対するせん断耐力を 算出する。その概念図を図 5-13 に示す。



斜め圧縮材C_dの受圧面積: $b_w \ell \sin \theta$ 斜め圧縮材C_dの圧縮耐力: $C_d = f_{wc} b_w \ell \sin \theta$ $= f_{wc} b_w jd(\cot\theta + \cot\alpha)\sin\theta$

ここで, f_{wc}は斜め圧縮材の圧縮強度 このときのせん断耐力: $V_{wc} = C_d \sin \theta$ $= f_{wc} b_w j d (\cot \theta + \cot \alpha) \sin^2 \theta$

図 5-13 斜め圧縮破壊に対するせん断耐力の算出方法

ここで,部材軸に対するひび割れの角度を =45°,せん断補強鉄筋としてス ターラップを使用(=90°)することとし,これらの値を上式に代入すると, せん断耐力 Vwc は

$$V_{wc} = \frac{1}{2} f'_{wc} b_w j d$$

で表される。上式より,このような破壊形態は,ウェブの幅の薄い部材(bwが小 さい部材)で特に留意する必要がある。コンクリート標準示方書[構造性能照査 編]⁶⁾では,f_{wc}を安全側に評価し,以下の式によりせん断耐力式を算出することとしている。

 $V_{wc} = 1.25 \sqrt{f_c} b_w jd$

ここで重要なのは、このような脆性的な破壊を避けるため、せん断補強鉄筋の受け持つせん断力を、ウェブコンクリートの圧縮破壊耐力よりも小さくしておくことである(Vs < Vwc)。これにより、スターラップの降伏後、ウェブコンクリートの圧縮破壊が生じることとなり、いわゆる斜め引張破壊先行型のはりを設計することが可能となる。

5.4.5 モーメントシフト

モーメントシフトとは,斜めひび 割れの発生に伴い,軸方向鉄筋の引 張力が曲げ理論によって算出される 値よりも増加することを考慮したも のである。曲げ理論に前述のトラス 理論を加味して軸方向鉄筋の引張力 を算定した結果,各断面に発生する モーメントは支点からの距離xに有 効高さdを加えた断面におけるモー



図 5-14 モーメントシフトの概念図

メントを適用することにより十分安全側に評価されることが明らかにされている。 従って,設計時にもモーメントシフトを考慮した検討がなされている。以上のモ ーメントシフトに関する概念を図 5-14 に示す。 【例題】(1)前述の断面(d=68cm,b=50cm,As=25.7cm²)を有するせん断補強 鉄筋をもたない鉄筋コンクリートはり(コンクリートの圧縮強度f'c=24MPa,鉄 筋 SD295)のせん断抵抗力を求めよ。ただし,a/d=5.6 とする。(2)次に D13 の スターラップ(SD295)を U 型に 250mm ピッチで配筋した際のスターラップの せん断抵抗力を求めよ。(3)さらに,ウェブコンクリートの斜め圧縮破壊に対する せん断抵抗力を求めよ。

(1)せん断補強鉄筋をもたない鉄筋コンクリートはりのせん断抵抗力は次式により算出できる。

$$V_c = 0.20 f_c^{1/3} (100 p_w)^{1/3} d^{-1/4} (0.75 + \frac{1.4}{a/d}) b_w d$$

ここで,

fc=24MPa

 $p_w=A_s/(b_wd) = 25.7 \times 10^2/(500 \times 680) = 0.00756$

d=0.68m

 $Vc = 0.20 \times (24) \frac{1}{3} \times (100 \times 0.00756) \frac{1}{3} \times (0.68) - \frac{1}{4} \times (0.75 + 1.4/5.6) \times 500 \times 680$ = 1.96 × 10⁵N=196kN

(2)スターラップによるせん断抵抗力はトラス理論から次式により算出できる。

$$\begin{split} V_s &= A_w f_{wy} \frac{z \cot \theta + z \cot \alpha}{s} \\ z = z \overline{c}, &= 45^\circ, &= 90^\circ, z = \mathrm{jd} \quad (7/8) \mathrm{d} \ \varepsilon \ \overline{s} \ \varepsilon \ \varepsilon \ \overline{s} \ \varepsilon \ \overline{s} \ \varepsilon \ \overline{s} \ \varepsilon \ \varepsilon \ \overline{s} \ \overline{s} \ \varepsilon \ \overline{s} \ \varepsilon \ \overline{s} \ \overline{s} \ \varepsilon \ \overline{s} \ \overline{s} \ \overline{s} \ \varepsilon \ \overline{s} \$$

Aw:スターラップ(D13)の断面積。U字型としていることから2×(スターラ ップ1本当たりの断面積)

fwy:スターラップの降伏強度

 $Vs=2 \times 126.7 \times 295 \times (7/8) \times 680/250=1.78 \times 10^5 N=178 kN$

(3) ウェブコンクリートの斜め圧縮破壊に対する抵抗力は次式により算出できる。

$$V_{wc} = 1.25\sqrt{f_c} b_w jd = 1.25\sqrt{f_c} b_w \frac{7}{8} d$$

 $=1.25 \times (24)^{1/2} \times 500 \times (7/8) \times 680 = 1.82 \times 10^{6}$ N = 1820kN