



8. せん断



構成

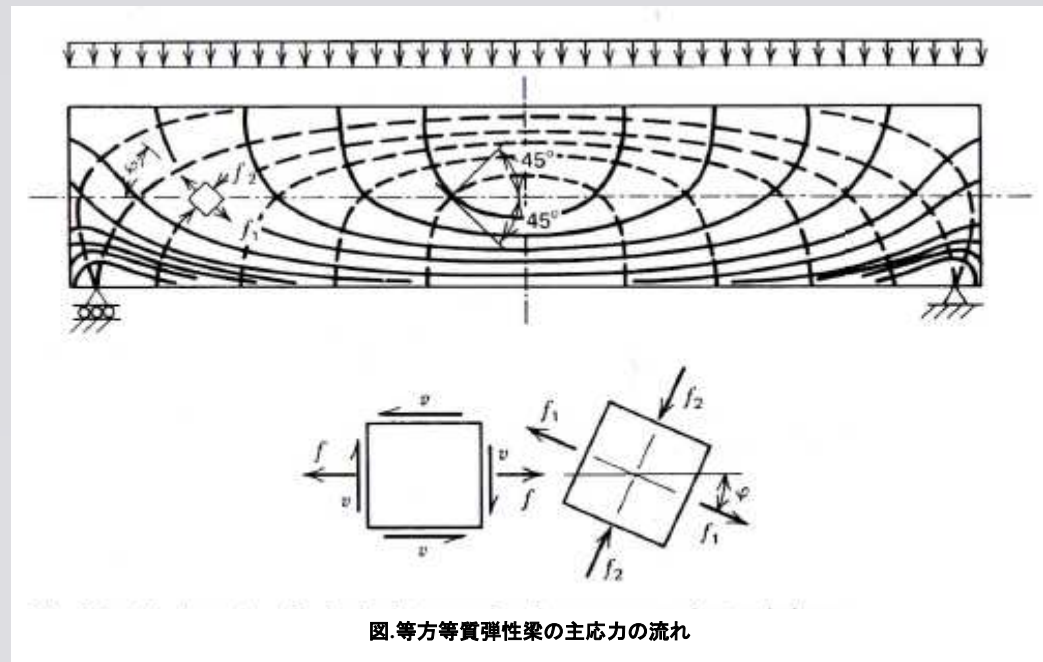
1. ウェブ補強筋のない鉄筋コンクリート梁のせん断抵抗機構
2. ウェブ補強筋を有する鉄筋コンクリート梁のせん断抵抗機構



1. ウェブ補強筋のない鉄筋コンクリート梁のせん断抵抗機構

曲げとせん断の組合せ下での弾性主応力コンタとひび割れ

- 引張縁：部材軸直交方向の曲げひび割れ
- せん断力の大きくなるウェブ部：部材軸と 45° 方向の引張主応力
⇒斜めひび割れ
- 斜ひび割れは一般に曲げひび割れの延長として発生



せん断スパンでの釣合い

- 鉛直力： $V = V_c + V_a + V_d$

V_c ：圧縮ゾーンでのせん断

V_a ：骨材噛合せ

V_d ：鉄筋のダウエル作用

- モーメント：

$$M = xV = jd(T + V_d \cot \alpha)$$

ダウエル力無視できる場合は、 $M = jdT$

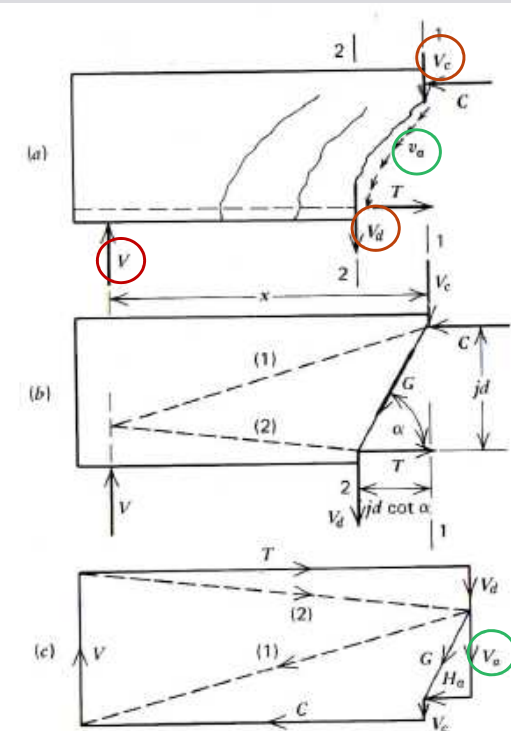


図7.6 梁せん断スパンでの力の釣合い

モーメントシフト

- $M = xV = jd(T + V_d \cot \alpha)$
- 支持点から $(x - jdcot\alpha)$ の距離にある曲げ補強筋の引張力は、同じく x の距離にある断面のモーメントに支配される
- α が 45° より少し小さければ $jdcot\alpha \approx d$



曲げ補強筋の引張力分布を考慮する
⇒モーメントシフト

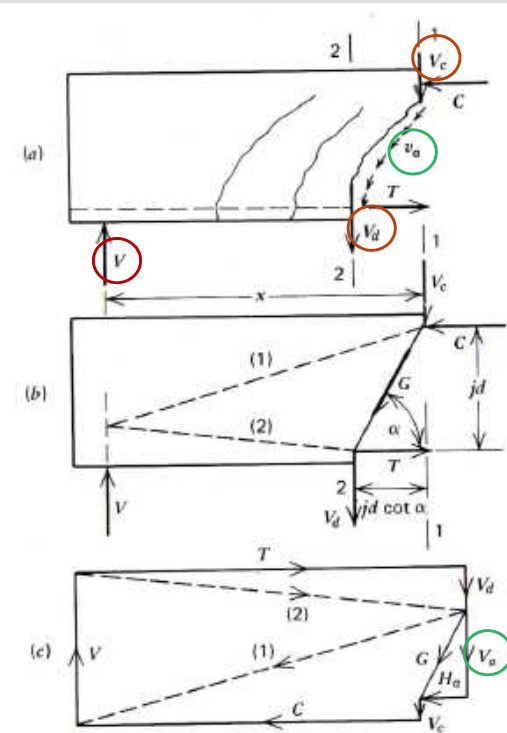


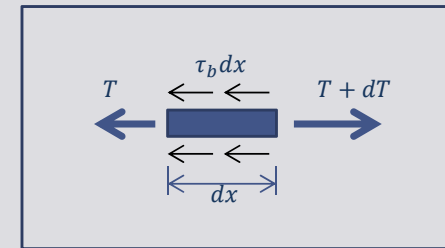
図7.6梁せん断スパンでの力の釣合い

せん断力とモーメントの関係

- $V = \frac{dM}{dx} = \frac{d}{dx}(Tjd) = jd \frac{\partial T}{\partial x} + T \frac{\partial(jd)}{\partial x}$
- アーム長一定のとき ($T \frac{\partial(jd)}{\partial x} = 0$) :

$$V = jd \frac{\partial T}{\partial x} = jd \tau_b$$

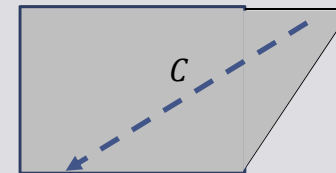
鉄筋引張力変化⇒曲げ部材の挙動⇒**梁作用**



- 付着がないとき ($jd \frac{\partial T}{\partial x} = 0$) :

$$V = T \frac{\partial(jd)}{\partial x} = C \frac{\partial(jd)}{\partial x}$$

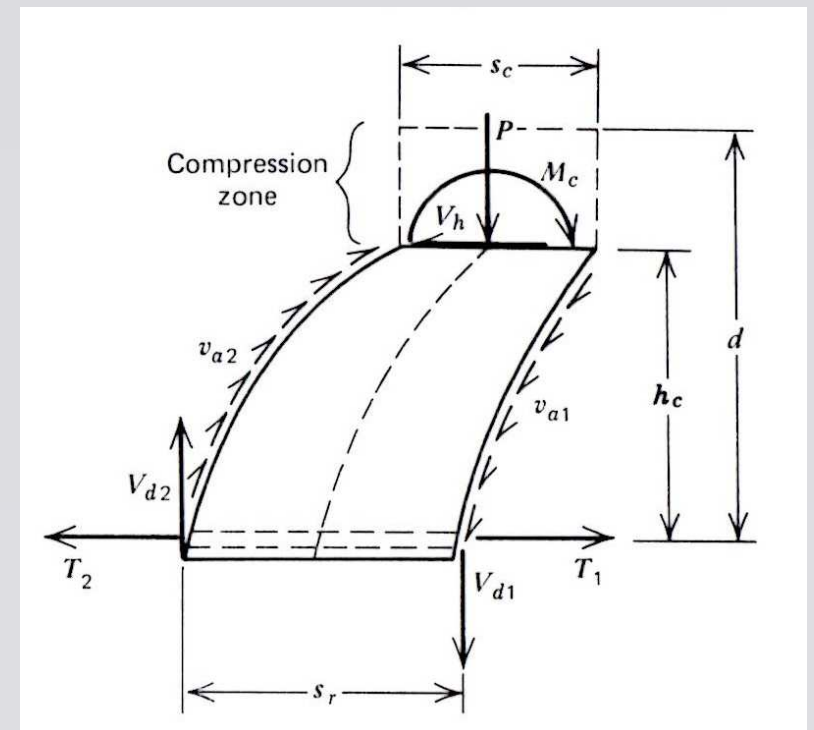
傾きを有する内部圧縮力⇒**アーチ作用**



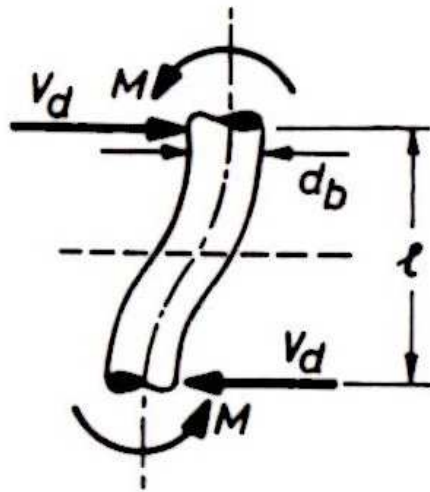
斜めひび割れ間ブロック コンクリート片持ち梁の挙動

■片持ち梁の作用力

- 1) 曲げ補強筋の引張力の差：付着力 $\Delta T = T_1 - T_2$
- 2) ひび割れ面：骨材噛合せ作用によりせん断応力 v_{a1} と v_{a2}
- 3) 曲げ補強筋にダウエル力： V_{d1} と V_{d2}
- 4) コンクリート片持ち梁の固定端反力： P 、 V_h 、 M_c

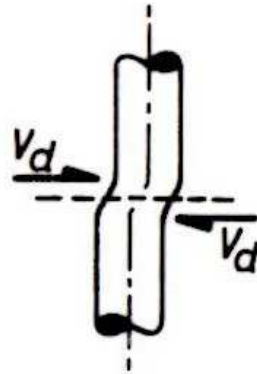


ダウエル力とは



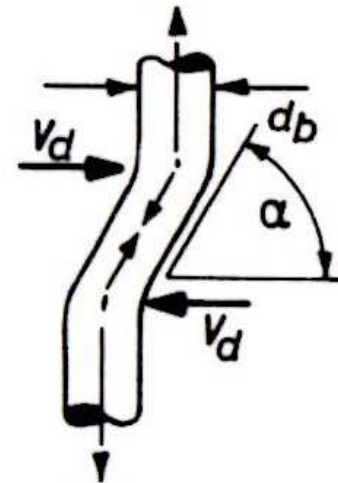
曲げ

$$V_d = \frac{2M}{l} = \frac{4d_b}{3\pi} \frac{A_s f_y}{l}$$



せん断

$$V_d = \frac{A_s f_y}{\sqrt{3}}$$

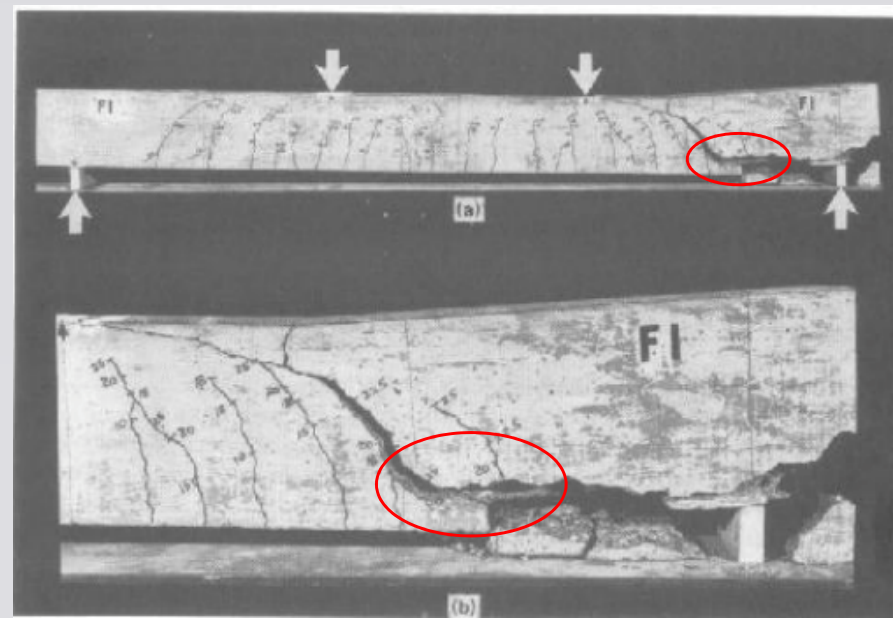


折れ曲がり (キンキング)

$$V_d = A_s f_y \cos \alpha$$

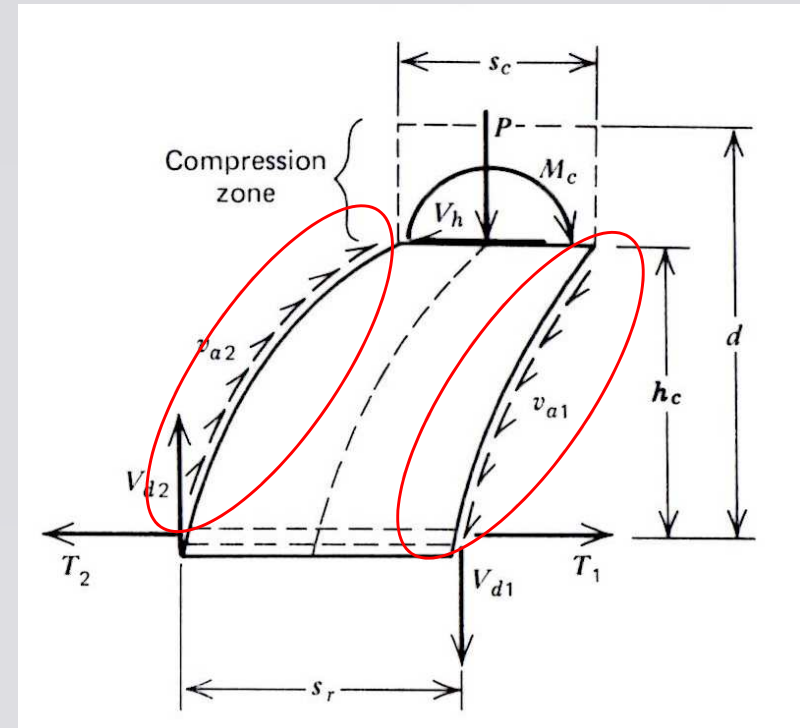
ダウエル力と付着割裂ひび割れ

- 曲げ補強筋からかぶりコンクリートに支圧力が作用
- かぶりコンクリートが支圧割裂破壊
- 割裂ひび割れによりダウエル作用効果は低下



骨材噛合せ作用

- 曲げひび割れ面にせん断変位
- 粗骨材粒子が噛みあってせん断力が伝達





梁作用の3つのメカニズム

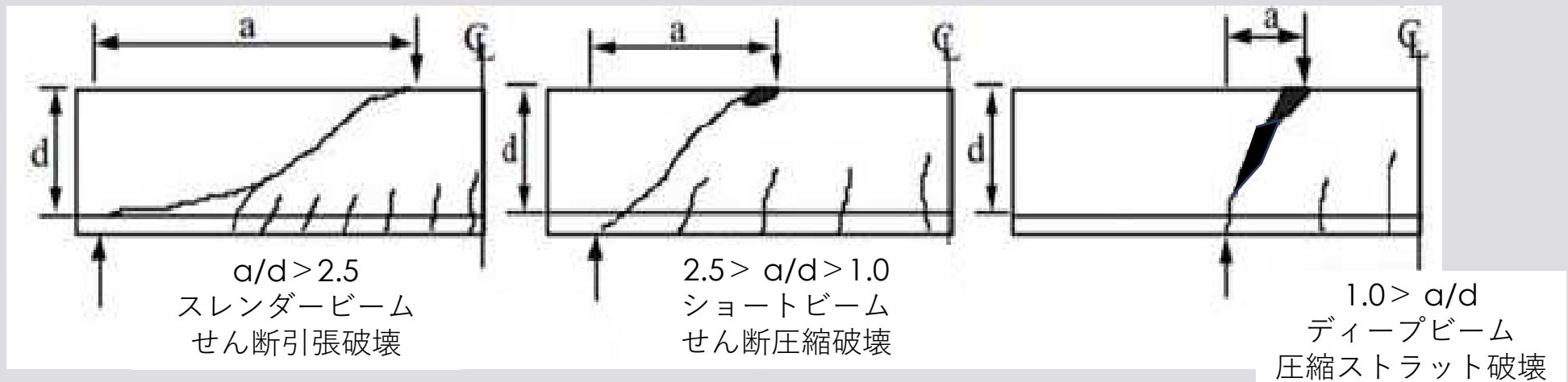
- ダウエル作用
- 骨材噛合せ作用
- 片持ち梁固定端曲げ作用

} 一般にはどれか一つが壊れると破壊する



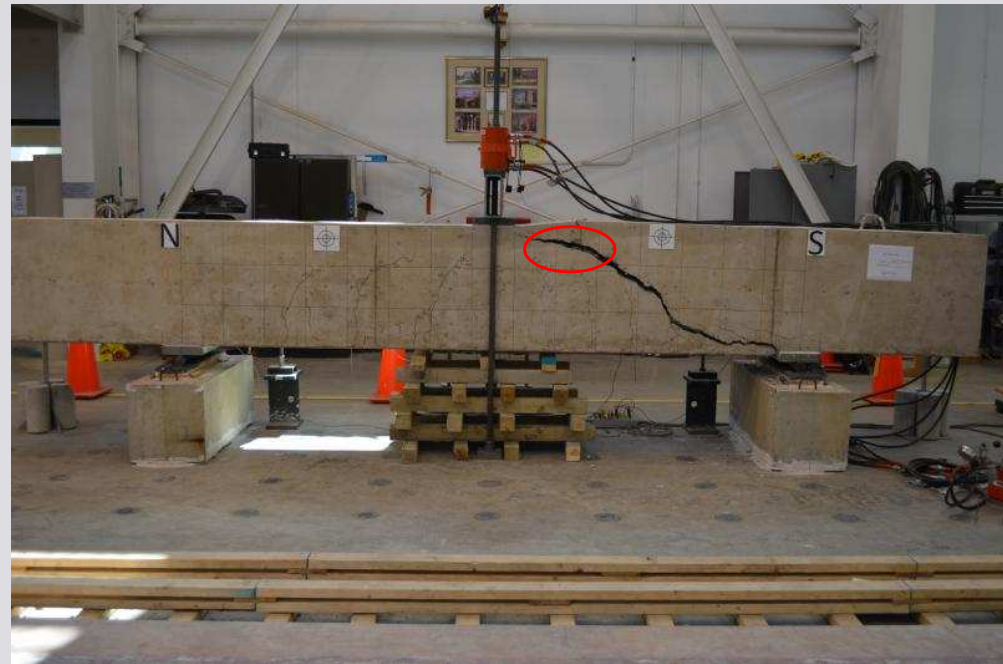
ウェブ補強筋のない鉄筋コンクリート梁
のせん断破壊モード

せん断スパン比とせん断破壊モード



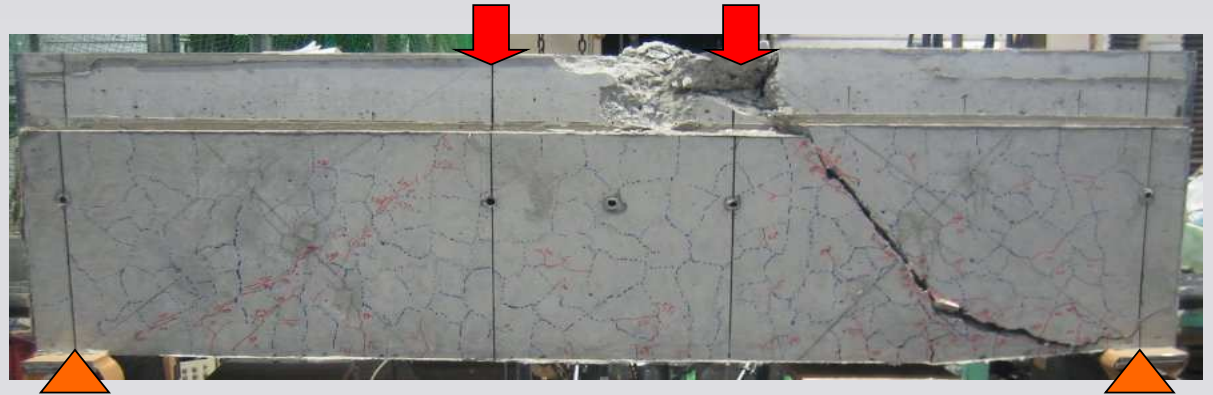
せん断引張破壊

- 片持ち梁固定端：曲げひび割れ成長
- 梁作用



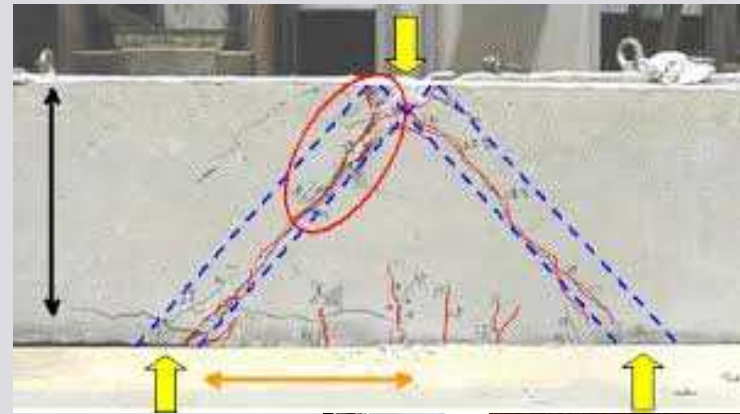
せん断圧縮破壊

- 斜めひび割れが圧縮ゾーン内まで成長し、圧壊
- 梁作用とアーチ作用が混在



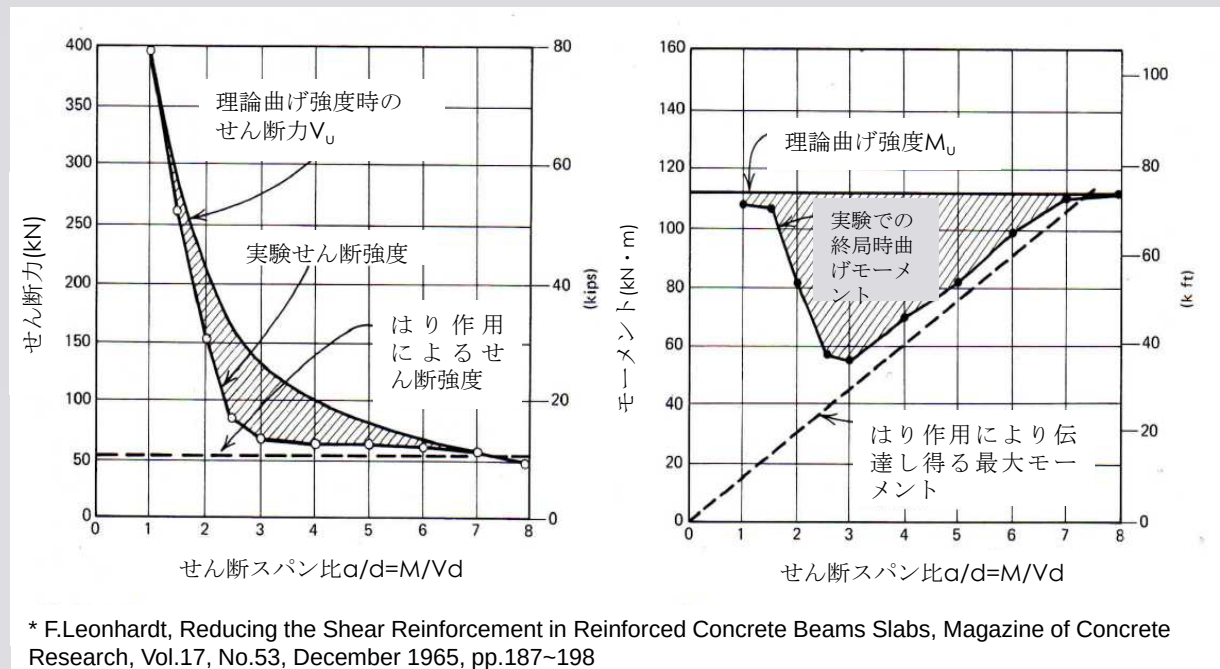
圧縮ストラットの破壊

- 圧縮線の傾きが立つ： a/d が2以下
- アーチ作用が卓越：強度はかなり高くなる。
- 最終破壊は斜め圧縮ストラットの圧壊



せん断スパン比 a/d とせん断強度 －LeonhardtとWalther*の実験

- 鉄筋比2%の同一断面
- $3 < a/d < 7$ ：梁作用メカニズム
- $1.5 < a/d < 3$ ：せん断圧縮破壊
アーチ作用混在
- $a/d < 1.5$ ：圧縮ストラット破壊



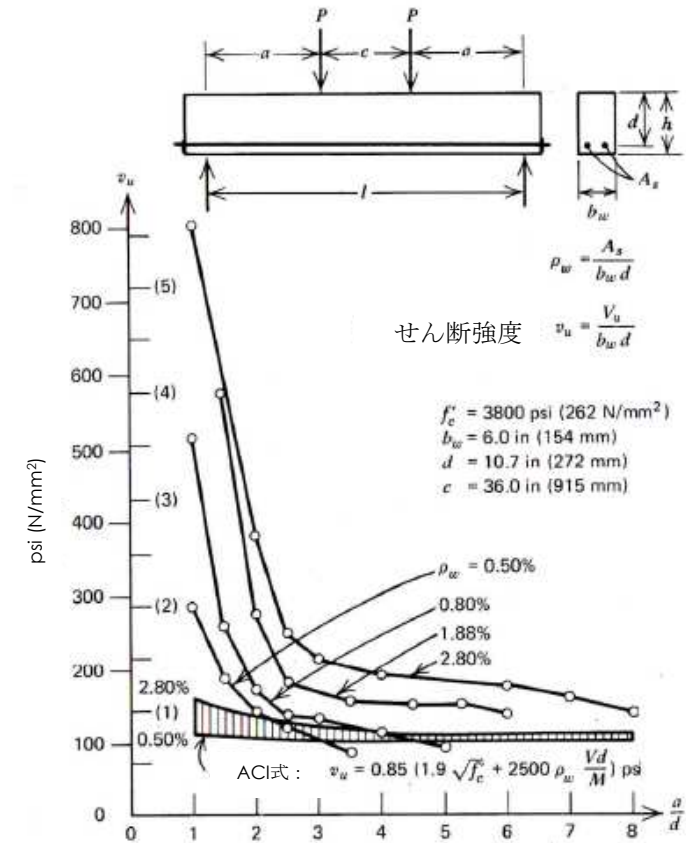
Kaniの実験*

ー 曲げ補強筋量変化

- 補強量の増加にともない曲げひび割れ間隔が狭くなる



- 骨材噛合せ作用やダウエル作用による抵抗が大きくなる



* G.N.J.Kani: Basic Facts Concerning Shear Failure, Journal ACI, Vol.63, June 1966, pp.675~692



設計基準でのコンクリートせん断耐力の 取扱い

土木学会 & 鉄道標準：せん断耐力（せん断引張）

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d$$

$$f_{vcd} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{cd}} \text{ N/mm}^2 \text{ ただし } f_{vcd} \leq 0.72 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度(N/mm²)

$$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d} \text{ (d:mm) ただし、 } \beta_d \leq 1.5$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p_v} \text{ ただし、 } \beta_p \leq 1.5$$

$$p_v = A_s / (b_w \cdot d)$$

$$\beta_n = 1 + 2M_0 / M_{ud} \text{ (} N'_d \geq 0 \text{ の場合) ただし } \beta_n \leq 2$$

$$\beta_n = 1 + 4M_0 / M_{ud} \text{ (} N'_d < 0 \text{ の場合) ただし } \beta_n \geq 0$$

N'_d : 軸方向圧縮力

道示：せん断耐力（せん断引張）

$$S_c = c_c c_e c_{pt} \tau_c b d$$

c_c ：正負繰返し作用を考慮する係数（タイプⅠ地震動：0.6、タイプⅡ地震動：0.8）

c_e ：断面有効高さdに対する補正係数（1000mm以下：1.0、3000mm：0.7、5000mm：0.6、10000mm以上：0.5）

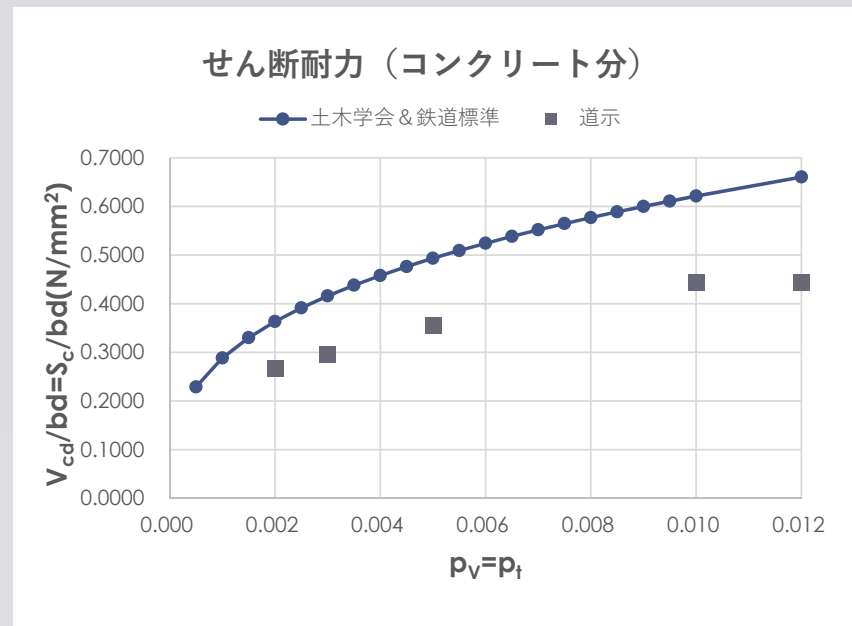
c_{pt} ：引張鉄筋比に関する補正係数（ $p_t=0.2\%$ ：0.9、 $p_t=0.3\%$ ：1.0、 $p_t=0.5\%$ ：1.2、1.0%以上：1.5）

$\sigma_{ck}(N/mm^2)$	21	24	27	30
$\tau_c(N/mm^2)$	0.33	0.35	0.36	0.37

せん断耐力（せん断引張）評価式の比較

■対象

- $f'_{cd} = 30\text{N/mm}^2$
- $d = 1000\text{mm}$
- 軸力なし



土木学会 & 鉄道標準：せん断圧縮破壊耐力

$$V_{dd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d \quad (\text{土木学会})$$

$$V_{dd} = (\beta_d \cdot \beta_n + \beta_w) \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d \quad (\text{鉄道標準：軸力、せん断補強筋の影響})$$

$$\beta_w = 4.2 \sqrt[3]{100 p_w} \cdot \left(\frac{a}{d} - 0.75 \right) / f'_{cd} \quad \text{ただし } \beta_w \geq 0$$

$$f_{dd} = 0.19 \sqrt{f'_{cd}} \quad (N/mm^2)$$

$$f'_{cd} : \text{コンクリートの設計圧縮強度} (N/mm^2)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d} \quad (d: mm) \quad \text{ただし、} \beta_d \leq 1.5$$

$$\beta_p = \frac{1 + \sqrt{100 p_v}}{2} \quad \text{ただし、} \beta_p \leq 1.5$$

$$p_v = A_s / (b_w \cdot d)$$

$$\beta_a = \frac{5}{1 + (a/d)^2}$$

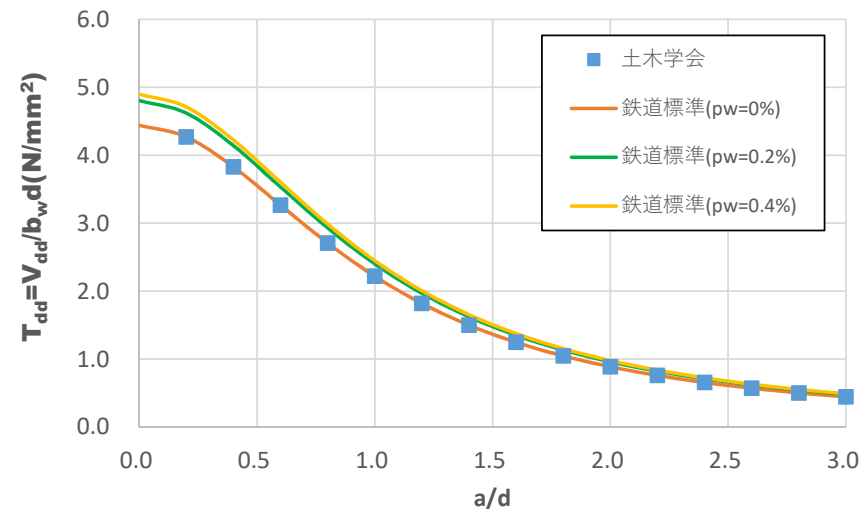
せん断圧縮破壊耐力評価式の比較

■対象

- $f'_{cd} = 30\text{N/mm}^2$
- $p_v = 0.5\%$
- $d = 1000\text{mm}$
- 軸力なし

※ 道示： a/d の影響は考慮しない

せん断圧縮破壊耐力



土木学会 & 鉄道標準：腹部斜め圧縮破壊耐力

$$V_{wcd} = f_{wcd} \cdot b_w \cdot d$$

$$f_{wcd} = 1.25\sqrt{f'_{cd}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

ただし、 $f_{wcd} \leq 9.8 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ (土木学会)

$f_{wcd} \leq 7.8 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ (鉄道標準)

f'_{cd} ：コンクリートの設計圧縮強度(N/mm²)

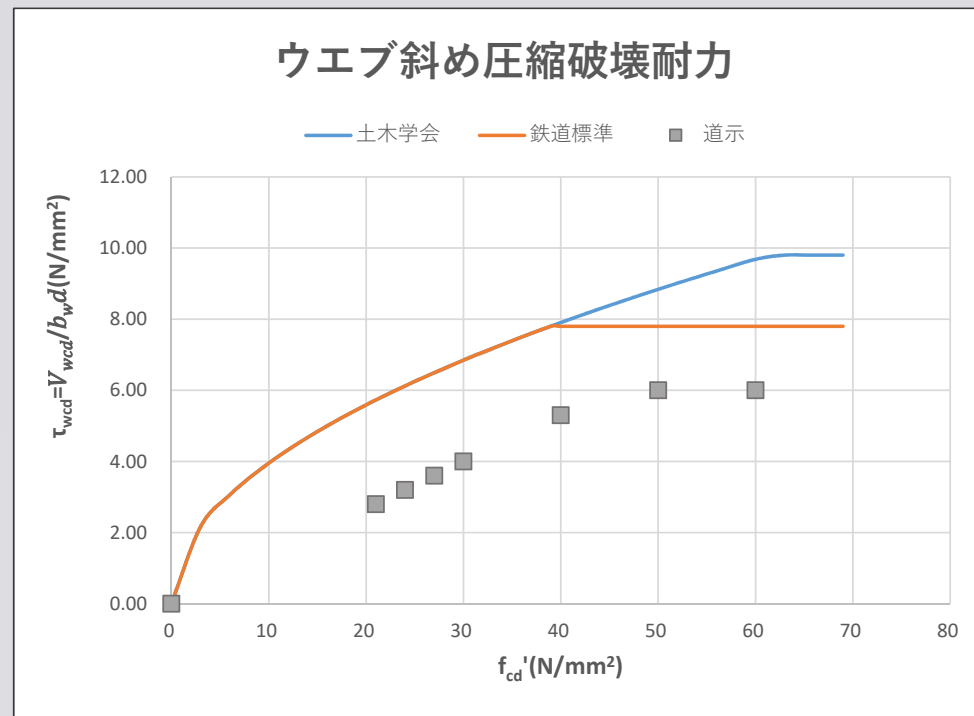


道示：腹部斜め圧縮破壊耐力

$$S_{uc} = \tau_{max} \cdot b_w \cdot d$$

$\sigma_{ck}(N/mm^2)$	21	24	27	30	40	50	60
$\tau_{max}(N/mm^2)$	2.8	3.2	3.6	4.0	5.3	6.0	6.0

ウェブ斜め圧縮破壊耐力評価式の比較

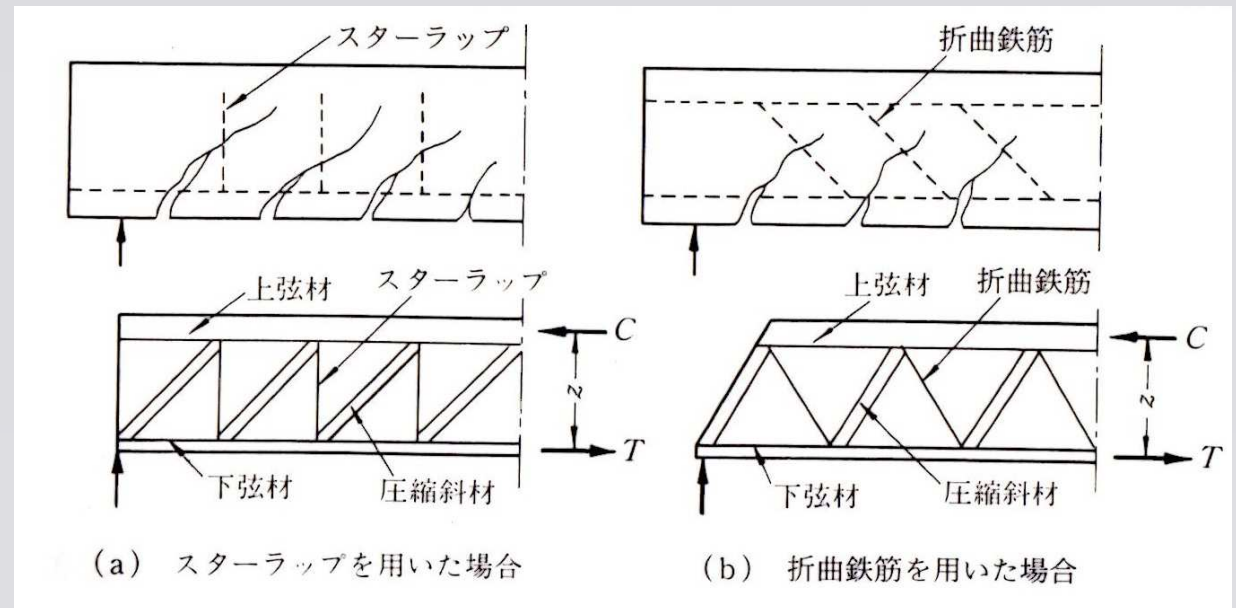




2. ウェブ補強筋を有する鉄筋コンクリート梁のせん断抵抗機構

トラスメカニズム

- コンクリート圧縮部 = 上弦材
- 軸方向鉄筋 = 下弦材
- 斜めひび割れ間コンクリート = 圧縮斜材
- スターラップ、折れ曲げ筋 = 引張斜材



$$Z = jd$$

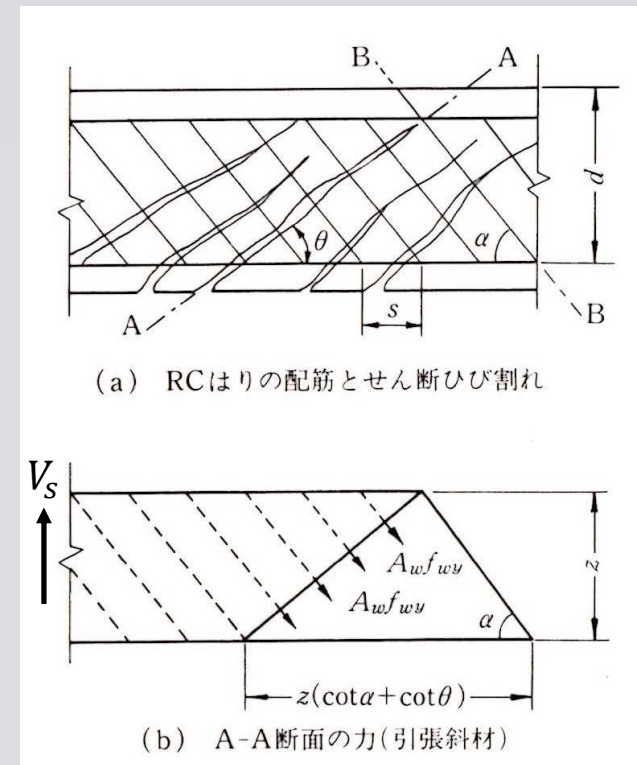
せん断補強鉄筋の負担せん断力

- ひび割れ面A-Aを横切るせん断補強筋本数

$$n = \frac{z(\cot\alpha + \cot\theta)}{s}$$

- せん断補強筋の降伏時せん断抵抗 V_s

$$V_s = A_w f_{wy} \frac{z(\cot\alpha + \cot\theta)}{s} \sin\alpha$$



////////////////////

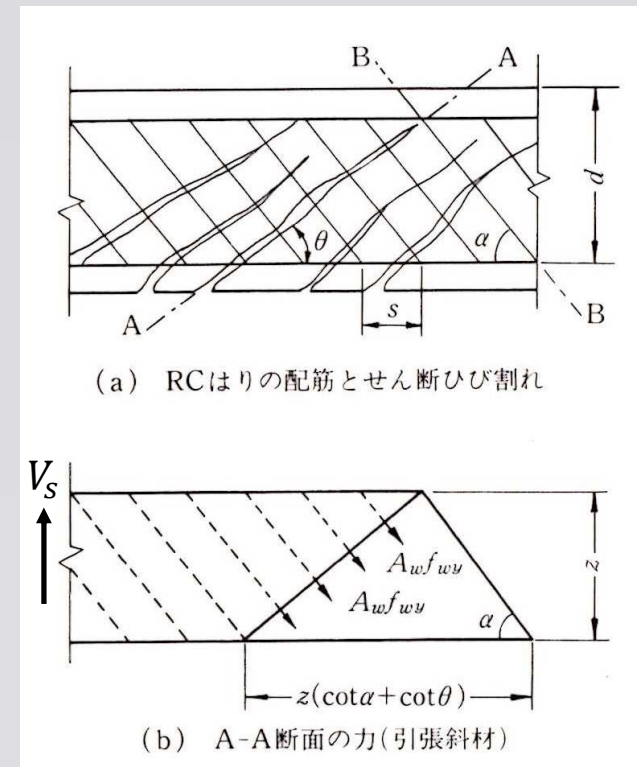
$\theta = 45^\circ$ のとき

$$\begin{aligned} V_s &= A_w f_{wy} \frac{z(\cot\alpha + \cot 45^\circ)}{s} \sin\alpha \\ &= A_w f_{wy} \frac{z(\cot\alpha + 1)}{s} \sin\alpha = A_w f_{wy} (\sin\alpha + \cos\alpha) \frac{z}{s} \end{aligned}$$

従って、

$$\begin{aligned} \tau_s &= \frac{V_s}{bd} = \frac{1}{1.15} \frac{A_w}{bs} f_{wy} (\sin\alpha + \cos\alpha) \\ &= \frac{1}{1.15} p_w f_{wy} (\sin\alpha + \cos\alpha) \end{aligned}$$

A_w : セン断補強筋断面積、 f_{wy} : セン断補強筋降伏強度



(a) RCはりの配筋とせん断ひび割れ

(b) A-A断面の力(引張斜材)

////////////////////

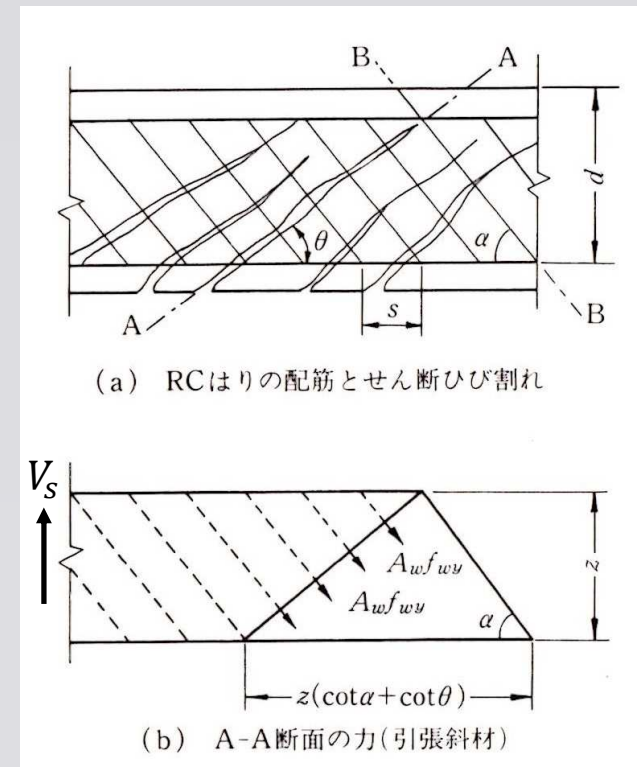
$\theta = 45^\circ \& \alpha = 90^\circ$ のとき

$$V_s = A_w f_{wy} (\sin 90^\circ + \cos 90^\circ) \frac{z}{s} = A_w f_{wy} \frac{z}{s}$$

$$\tau_s = \frac{V_s}{bd} = \frac{1}{1.15} p_w f_{wy} (\sin 90^\circ + \cos 90^\circ)$$

$$= \frac{1}{1.15} p_w f_{wy}$$

A_w : せん断補強筋断面積、 f_{wy} : せん断補強筋降伏強度



圧縮斜材の応力

■鉛直力の釣合い

$$A_w f_{wy} \frac{z(\cot\alpha + \cot\theta)}{s} \sin\alpha = b\sigma'_c \frac{Z}{\sin\alpha} \sin\theta = b\sigma'_c Z \frac{\sin\theta}{\sin\alpha} = V_s$$

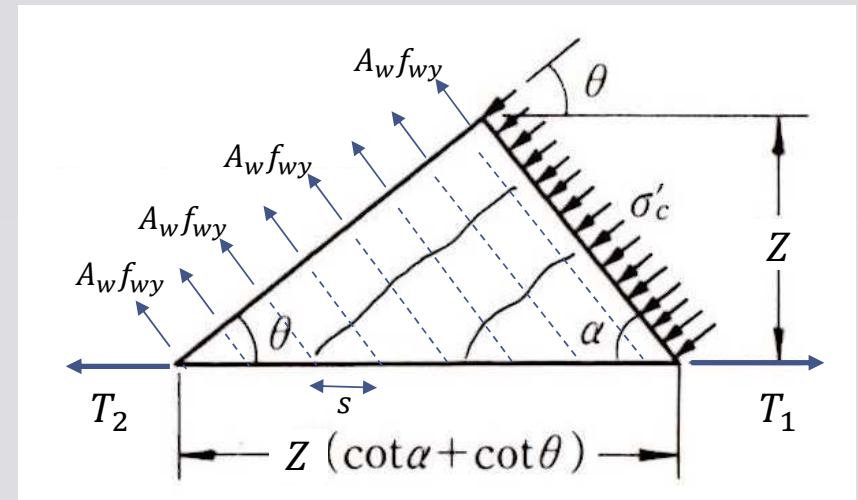
従って、

$$\tau_s = \frac{V_s}{bd} = \frac{1}{1.15} \frac{\sin\theta}{\sin\alpha} \sigma'_c$$

$$\therefore \sigma'_c = 1.15 \frac{\sin\alpha}{\sin\theta} \tau_{sy}$$

$$\theta = 45^\circ \text{のとき} : \sigma'_c = 1.15\sqrt{2} \times \sin\alpha \times \tau_{sy}$$

$$\theta = 45^\circ, \alpha = 90^\circ \text{のとき} : \sigma'_c = 1.15\sqrt{2} \times \tau_{sy}$$





ウェブ補強筋を有する棒部材のせん断耐力に関する設計基準での取扱い

土木学会 & 鉄道標準

$$V_y = V_c + V_s$$

$$V_s = A_w f_{wy} \frac{z(\cot\alpha + 1)}{s} \sin\alpha = A_w f_{wy} (\sin\alpha + \cos\alpha) \frac{z}{s}$$

($\theta = 45^\circ$ を仮定している)

V_y : せん断補強筋を用いた棒部材のせん断耐力

V_c : せん断補強筋を用いない棒部材のせん断耐力 (コンクリート分)

V_s : せん断補強筋が受け持つせん断耐力 (補強筋分)

道示

$$P_s = S_c + S_s$$

せん断補強筋が受け持つせん断耐力（補強筋分）：

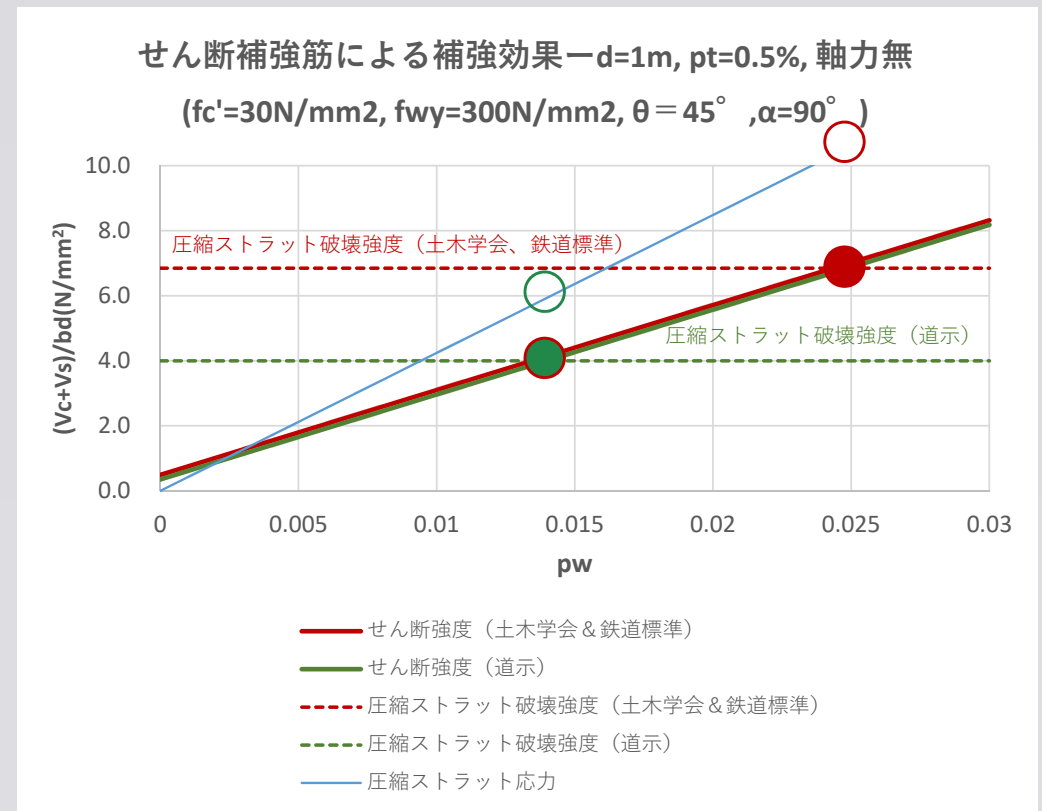
$$S_s = A_w \sigma_{sy} \frac{d(\sin\alpha + \cos\alpha)}{1.15s} = A_w \sigma_{sy} (\sin\alpha + \cos\alpha) \frac{Z}{s}$$

（ $\theta = 45^\circ$ を仮定している）

すなわち、土木学会 & 鉄道標準と同様の式となる

せん断補強筋による補強効果の例

- 補強量の増加によりせん断耐力増大
 - 限界がある = 圧縮ストラットの破壊
 - ・土木学会 & 鉄道標準 : $p_w \cong 0.025$
 - ・道示 : $p_w \cong 0.013$
 - 圧縮ストラット破壊時のストラット応力
 - ・土木学会 & 鉄道標準 : $\sigma_c' \cong 11\text{N/mm}^2$
 - ・道示 : $\sigma_c' \cong 6\text{N/mm}^2$
- ⇒ 応力分布の違い、局所化



曲げ補強筋規定へのせん断の影響

■断面 1 の圧縮中心周りのモーメント

$$M_1 = T_2 Z + T_w s/2 + V_a Z \cot \theta$$

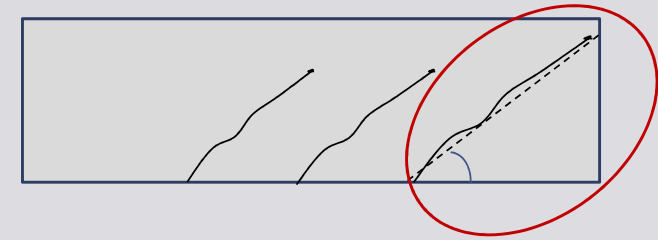
$$\therefore T_2 = \frac{M_1}{Z} - \frac{T_w s}{2Z} - V_a \cot \theta$$

■せん断補強筋がない場合

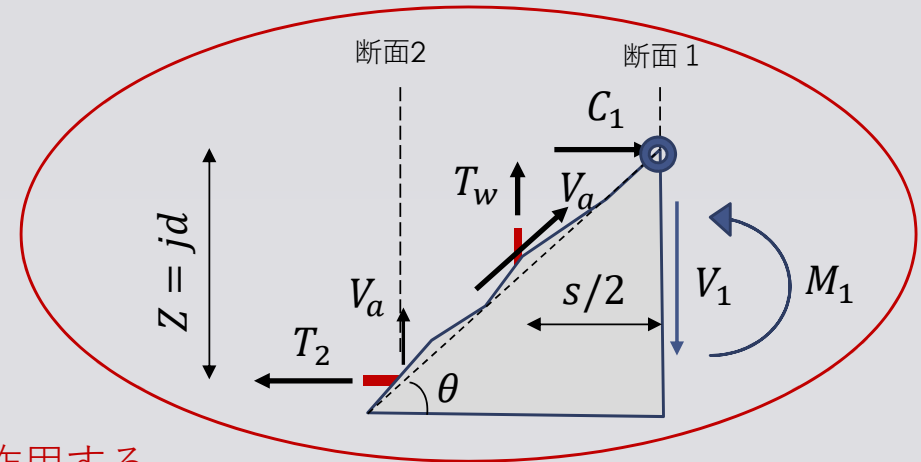
$$T_2 = \frac{M_1}{Z} - V_a \cot \theta$$

■鉄筋のダウエル効果を見做すと

$$T_2 = \frac{M_1}{Z}$$



右側3角形ブロックの力の作用



断面2の鉄筋には断面1のモーメントに対する引張力が作用する

モーメントシフト：軸方向鉄筋の定着長

- 着目する断面の鉄筋引張力は $l_s = d(\cong Z)$ だけ離れた断面のモーメントに対して設計しなければならない

