

論文

[2077] 高強度せん断補強筋を用いた鉄筋コンクリートはりのせん断抵抗に関する研究

西浦範昭^{*1}・楨谷栄次^{*2}・新藤健太^{*3}

1. 研究目的

最近の鉄筋コンクリート造建物の高層化に伴い材料強度は上昇する傾向にあり、多くの鉄筋メーカーから電炉・高炉を問わず、多様な強度の鉄筋が開発され生産に至っている。コンクリートに関しても超高強度コンクリート等が使用可能となってきた。前述した様に、このような社会的背景の基に鉄筋コンクリート造建物の高層化に対して、高強度鉄筋をせん断補強筋として用いることは、建物の高層化に対して断面の縮小と普通鉄筋では実施困難となるようなせん断補強を可能にすることができ、コストの低減および労働力の削減があげられ工期の短縮などの面についても有利である。しかし普通鉄筋と比べると粘りがなく鉄筋降伏以後の靱性保証効果などの問題点があり、高強度せん断補強筋を一般化するためには多くの基礎データの検討が必要であろう。

そこで本研究では、高強度鉄筋($\sigma_{wy}=8000\text{kg/cm}^2$)が鉄筋コンクリートはり部材のせん断補強筋としての適用に対して、その補強効果、せん断耐力、破壊性状、変形状および既往の終局せん断強度式の適応性等に関する基礎データを得ることを目的とし、鉄筋コンクリートはり部材のせん断実験を行った。以下に得られた成果を報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

表1に試験体一覧を示す。

試験体は総数6体であり、図1にその形状、配筋の一例を示す。

a) 固定要因…試験体断面は、はり幅(b)×はり成(D)=20cm×40cm、試験体区間160cmでせん断スパン比(a/D)2.0であり、載荷方法は一方向単調載荷とする。主筋は上端・下端とも5-D22で、せん断破壊を先行させるために焼き入れ加工をした高強度鉄筋($\sigma_y=8000\text{kg/cm}^2$)を使用する。あばら筋は、高強度鉄筋($\sigma_{wy}=8000\text{kg/cm}^2$)を使用し、形状は全て溶接閉鎖形である。

表1 試験体一覧

NO.	試験体名	せん断補強筋径	載荷方法	せん断スパン比 a/D	コンクリート 設計基準強度 F _c (kg/cm ²)	せん断補強筋比 P _w (%)	補強筋量 P _w ・σ _{wy} (kg/cm ²)	スタースラップ 加工形状
1	S10-M-2.0-21-40-I	D10	一方向 単調載荷	2.0	210	0.40	32.0	閉鎖型
2	S10-M-2.0-21-59-I					0.59	47.2	
3	S10-M-2.0-21-89-I					0.89	71.2	
4	S10-M-2.0-36-40-I				360	0.40	32.0	
5	S10-M-2.0-36-59-I					0.59	47.2	
6	S10-M-2.0-36-89-I					0.89	71.2	
共通諸要因								
断面		b×D=20×40 (cm)			主筋(焼き入れ) : σ _{sy} =9000 (kg/cm ²)			
有効長さ		d=33.6 (cm)			引張鉄筋比 : P _T =2.88 (%) (5-D22)			
せん断スパン比		a/D=2.0			せん断補強筋 : σ _{wy} =8000 (kg/cm ²) (D10)			

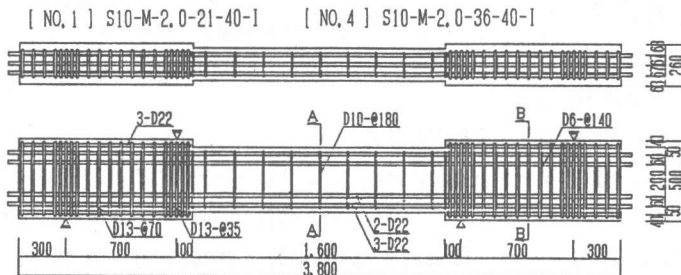


図1 形状、配筋の一例

*1西松建設㈱、工修 (正会員) *2関東学院大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

*3関東学院大学大学院建築学専攻 (正会員)

b)変動要因…コンクリート設計基準強度・せん断補強筋比の2シリーズとする。コンクリート設計基準強度(F_c)は、210, 360 kg/cm^2 の2種類であり、せん断補強筋比(P_w)は、0.40, 0.59, 0.89%の3種類とする。

2.2使用材料

表2に使用材料の成績一覧を示す。

a)鉄筋…降伏強度は主筋のD22で、8707 kg/cm^2 であり、せん断補強筋のD10で、8465 kg/cm^2 であった。

b)コンクリート…実験時のコンクリート圧縮強度は、 $F_c=210$ シリーズのNo. 1, 2およびNo. 3で207, 216 kg/cm^2 であり、 $F_c=360$ シリーズのNo. 4, 6およびNo. 5で298, 332 kg/cm^2 であった。コンクリートはレディミクストコンクリートであり、試験体No. 1とNo. 2、No. 4とNo. 6がそれぞれ同一バッチでNo. 3とNo. 5は個々のバッチである。また、打ち込み方向は全試験体共に縦打ちで行った。

2.3載荷方法および測定方法

a)加力方法…加力はテストベットの試験体を設置し、球座を取り付けた加力ビームを介して300tアムスラー型試験機を用いて逆対称モーメントが生じるように載荷する。載荷は一方向単調載荷とし、変形量は梁部材の降伏に対する保証変形角である1/50radとし、変形量 $\delta=32\text{mm}$ まで載荷する。

b)測定方法…図2に変位測定装置図を示す。荷重およびせん断力はオイルジャッキピストン先端に取り付けた300tロードセルにより、鉄筋のひずみは、主筋、あばら筋各々に貼付したワイヤーストレインゲージ(2mm長)により各々測定した。

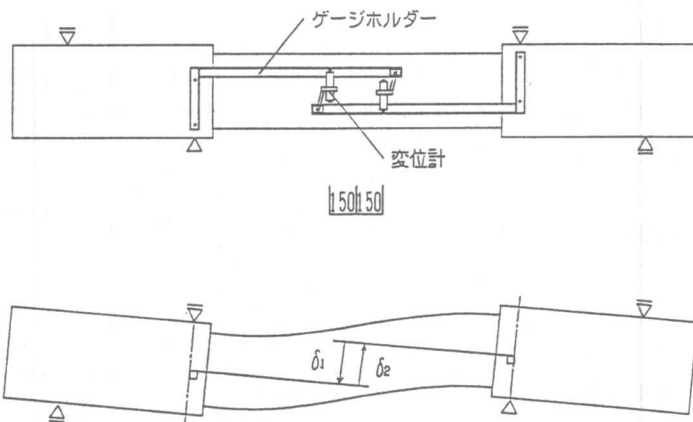


図2 変位測定装置図

3. 実験結果

3.1 Q- δ 曲線および破壊形式

表3に実験結果一覧を示す。全試験体共に主筋の降伏は見られなかった。また、図3に $F_c=210$ シリーズを、図4に $F_c=360$ シリーズのQ- δ 曲線をそれぞれ示した。図5に $F_c=210$ シリーズの最大荷重時のきれつ図を示した。破壊形式は $F_c=210$ および360シリーズの両シリーズ共に大差なく、全試験体共に危険断面位置の圧縮側コンクリート部分の圧壊によるせん断圧縮破壊であった。図4において、試験体No. 6は、変位32mmでは荷重が最大に達していないように見受けられるが、一旦除荷後実験は40mmまで載荷し、変位32mm時の荷重が最大値になることを確認している。せん断初きれつ発生以後最大荷重時まではコンクリート強度およびせん断補強筋比 P_w の増加に伴って剛性が高くなる傾向にあった。

表2 使用材料の機械的性質

NO.	コンクリート設計基準強度 F_c (kg/cm^2)	圧縮強度平均 (kg/cm^2)	鉄筋径	降伏強度 (kg/cm^2)	平均 (kg/cm^2)
1	210	207.7	D10	8592	8465
2		207.7		8634	
3		216.3		8169	
4	360	298.6	D22	8870	8707
5		332.3		8600	
6		298.6		8650	

表3 實驗結果一覽

NO.	曲げ初ひび割れ			せん断初ひび割れ			最 大 耐 力			破壊モード
	eQmc (t)	e τ mc (kg/cm ²)	e δ mc (mm)	eQsc (t)	e τ sc (kg/cm ²)	e δ sc (mm)	eQsu (t)	e τ su (kg/cm ²)	e δ su (mm)	
1	4.69	7.98	0.81	5.84	9.93	1.15	27.59	46.92	27.01	せん断圧縮破壊
2	4.10	6.97	0.65	6.28	10.68	1.37	29.69	50.49	31.89	せん断圧縮破壊
3	6.57	11.17	0.61	6.22	10.58	0.54	37.77	64.23	24.15	せん断圧縮破壊
4	2.04	3.47	0.18	5.08	8.64	1.07	34.03	57.87	25.43	せん断圧縮破壊
5	4.70	7.99	0.37	5.42	9.22	0.55	44.84	72.26	28.96	せん断圧縮破壊
6	2.26	3.84	0.33	3.21	5.46	0.64	46.50	79.08	31.95	せん断圧縮破壊

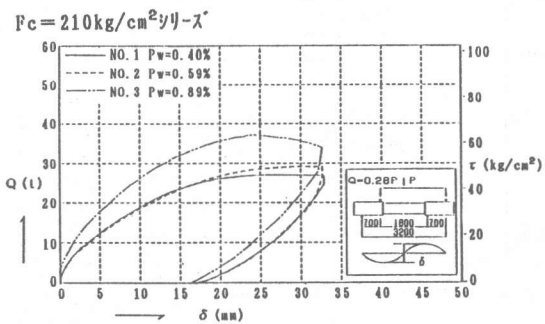


図3 Fc210シリーズQ- δ 曲線

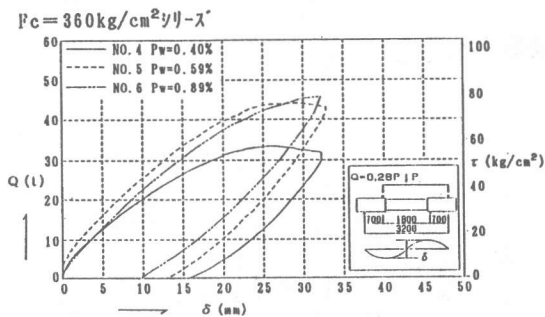


図4 Fc360シリーズのQ- δ 曲線

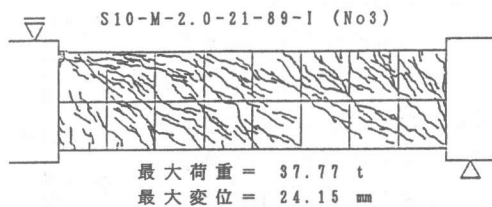
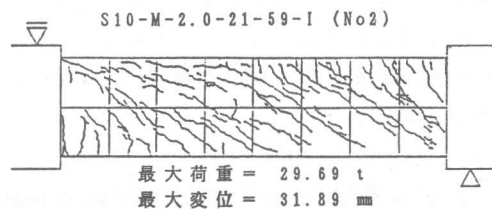
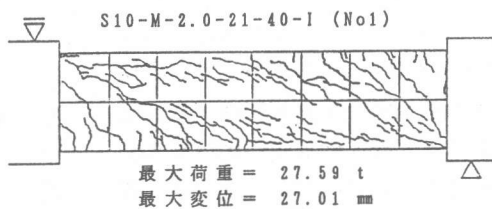


図5 Fc210シリーズの
最大荷重時のきれつ図

3.2 せん断補強効果

図6にせん断補強筋比 $P_w=0.4$ シリーズを、図7にコンクリート強度 F_c210 シリーズのせん断補強筋のひずみ分布を示した。全試験体共にせん断補強筋は降伏に至っておらず、せん断補強筋比 P_w の少ないものほどせん断力の分散がなされておらずヒンジゾーン前後のせん断補強筋のひずみ量が目立っており、部材中央部のひずみ量が小さい。このことは部材中央部分での負担せん断力の大き

半をコンクリートで負担していることが判る。このことはきれつ図よりも部材中央部においてきれつが発生していないことからもうかがえる。また、コンクリート強度が上昇すると、そのひずみ量は全体に増加している。また、それに伴って最大耐力も増加している。つまりコンクリート強度を増加することによって、高強度せん断補強筋をより有効に利用できることが確認できる。また図7の右側のピーク値で比較すると、コンクリート強度が一定でせん断補強筋比 P_w が増加するにしたがって、せん断補強筋のひずみ量は減少の傾向にある。せん断補強筋比 P_w を増加することによってせん断力が一様に分散され、せん断補強筋一本一本の負担が少なくなり、部材としてのせん断耐力は上昇しているものの鉄筋はその降伏強度を残存したまま破壊に至っていることが判る。

3.3 せん断耐力とせん断補強筋量 $P_w \sigma_{wy}$ の関係

図8にせん断耐力とせん断補強筋量 $P_w \sigma_{wy}$ の関係を示した。せん断補強筋量の増加により、せん断耐力は増加する傾向にある。また、同じせん断補強筋量であってもコンクリート強度が高くなるとそのせん断耐力も増加している。

4. 既往算定式の適応

式(1)に大野・荒川mean式⁽²⁾を、式(2)に終局強度型耐震設計指針式(A法, 非靱性)⁽¹⁾を示す。図9に実験値と大野・荒川mean式との比較を、図10に実験

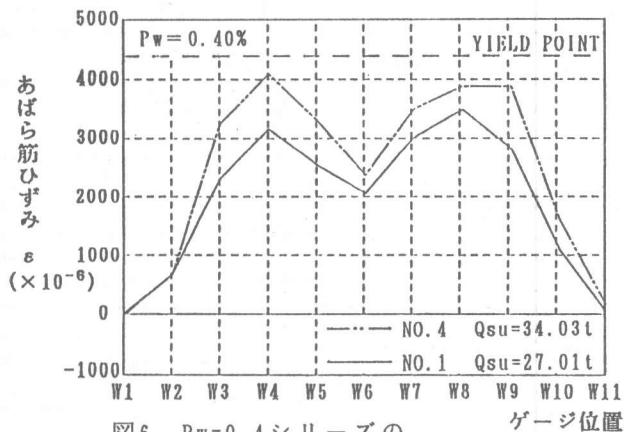


図6 $P_w=0.4$ シリーズのせん断補強筋のひずみ分布図

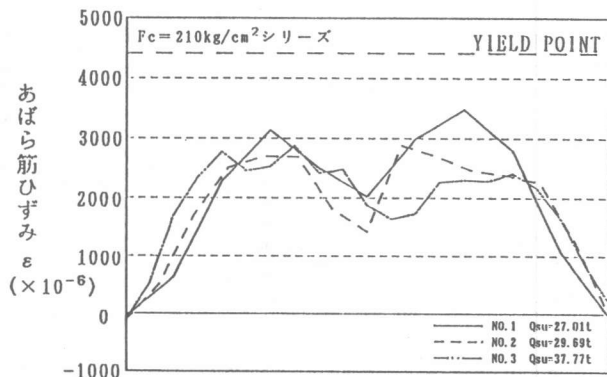


図7 F_c210 シリーズのせん断補強筋のひずみ分布図

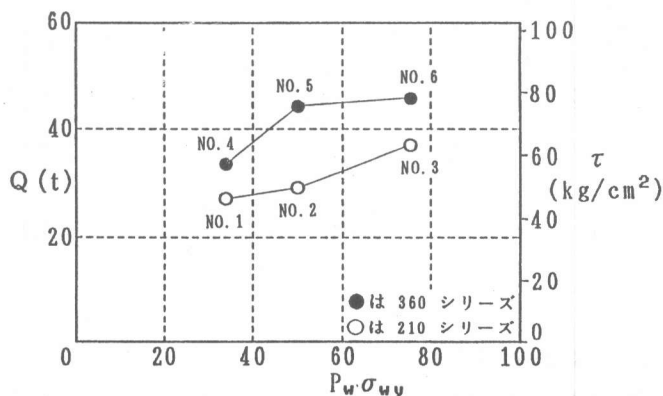


図8 せん断耐力とせん断補強筋量 $P_w \sigma_{wy}$ の関係

値と指針式(A法, 非靱性)との比較を示した。また、図9, 10の関係をせん断補強筋比の関係について表した物をそれぞれ図11, 12に示した。大野・荒川mean式との比較では、全ての試験体共に充分安全側に評価している。しかし、せん断補強筋量($P_w \sigma_{wy}$)とコンクリート強度が増加すると、実験値/計算値は、210シリーズの場合1.55~1.73であり、360シリーズの場合1.79~2.07になる。これより算定式は、実験値より大きく離れていく傾向にあり、使用材料の高強度化に対して対応されていない。指針式(A法, 非靱性)との比較では、

式(1): 荒川mean式

$$Q_{su1} = \left(\frac{0.115 k_u k_p (180 + F_c)}{M/Q d + 0.12} + 2.7 \sqrt{P_w \cdot \sigma_{wy}} \right) b \cdot j$$

式(2): 終局強度型耐震設計指針式

$$Q_{su3} = b \cdot j \cdot l \cdot P_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b \cdot D \cdot \nu \cdot F_c / 2$$

$$\tan \theta = \sqrt{(l/D)^2 + 1} - l/D$$

$$\beta = \{(1 + \cot^2 \phi) P_w \cdot \sigma_{wy}\} / (\nu F_c)$$

ただし $\sigma_{wy} > 25 F_c$ のとき $\sigma_{wy} = 25 F_c$

$P_w \sigma_{wy} \geq \nu F_c / 2$ のとき $P_w \sigma_{wy} = \nu F_c / 2$ とする。

$$\nu = 0.7 - F_c / 2000$$

$\cot \phi$ の値は下式による値のうち最小のものとする。

$$\cot \phi = 2.0$$

$$\cot \phi = j \cdot l / (l \cdot \tan \theta)$$

$$\cot \phi = \sqrt{\nu F_c / (P_w \sigma_{wy})} - 1.0$$

【記号】

k_u : 断面寸法による補正係数 k_p : 引張鉄筋比による補正係数

F_c : コンクリートの設計基準強度 P_w : せん断補強筋比

σ_{wy} : せん断補強筋の降伏点強度 b : はりの幅 j : 応力中心距離

l : 主筋中心間距離 D : はりの全せい L : はりの内法長さ

ϕ : トラス機構のコンクリート圧縮束の角度

ν : コンクリート圧縮強度の有効係数

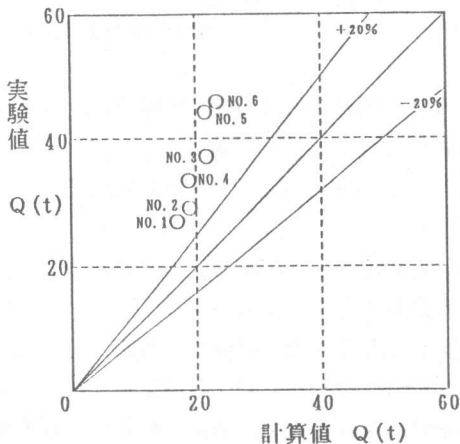


図9 実験値と大野・荒川mean式との比較

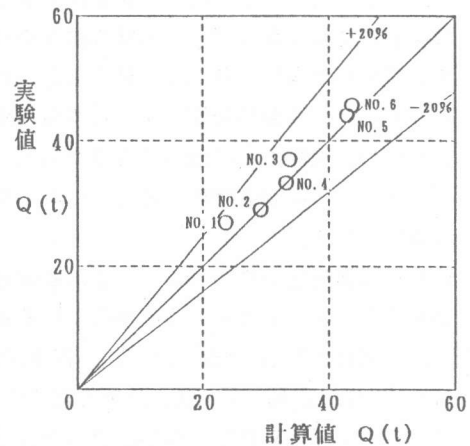


図10 実験値と指針式(A法, 非靱性)との比較

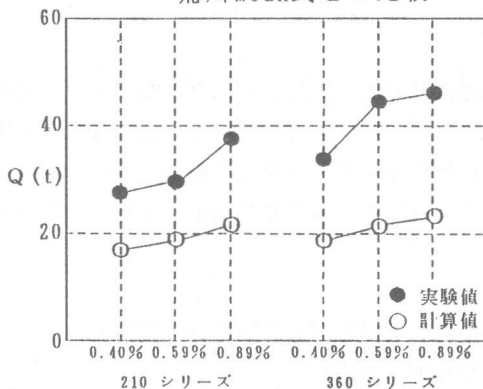


図11 実験値と大野・荒川mean式との比較

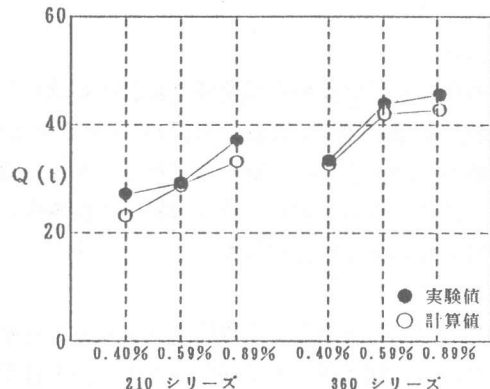


図12 実験値と指針式(A法, 非靱性)との比較

終局時耐力を非常によく評価しており、比較値は1.02～1.17で全て安全側に評価している。傾向も45°の右上がりの直線でコンクリート強度が上昇してもせん断補強筋量 P_w が w_y が増加しても評価している。図13に指針式(A法, 非靱性)の計算より求めたトラス作用とアーチ作用における負担せん断力の比関係を示した。全試験体共にせん断補強筋比0.4%以外の物は全てトラス作用でせん断力を負担しており、アーチ作用による負担せん断力はない。なお、せん断補強筋のひずみ分布図やき裂図より確認できたアーチ作用の効果の期待できたせん断補強筋比0.40%のものでもその負担率は5%にも至っていない。

5. 結論

- コンクリート強度が一定でせん断補強筋比 P_w が増加するにしたがって、せん断補強筋のひずみ量は減少の傾向にあり、またせん断力が一様に分散され、せん断補強筋一本一本の負担が少なくなり、部材としてのせん断耐力は上昇しているものの鉄筋はその降伏強度を残したまま破壊に至っていることが認められた。
- コンクリート強度を増加することによって、高強度せん断補強筋をより有効に利用できることが確認できる。
- せん断補強筋量の増加により、せん断耐力は増加する傾向にある。また、同じせん断補強筋量であってもコンクリート強度が高くなるとそのせん断耐力も増加している。
- 今回の実験に対し、指針式(A法, 非靱性)により充分終局強度耐力を評価できる。
- 指針式(A法, 非靱性)では、高強度鉄筋に対してアーチ作用が $P_w=0.40\sim0.89\%$ において、約4%以下しか評価されていない。アーチ作用における負担せん断力の評価については、変形量、アーチの軸ひずみ、アーチ幅などの適合条件を考慮した展開が望まれる。

【謝辞】

本研究は(社)建築研究振興協会に設けられた高強度鉄筋SPR785の開発に関する研究委員会(委員長 園部泰寿 筑波大教授)の研究活動において、シアスパン比1.5をもつRCはりのせん断実験シリーズ⁽³⁾の一貫として行われた。なお、研究を進めるにあたって御指導頂いた同研究委員会各位、御協力戴いた東京理科大学松崎研究室の方々、並びに鉄筋を提供して戴いた東京鉄鋼株式会社に深く感謝致します。

【参考文献】

- 1)(社)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」
- 2)(社)日本建築学会：「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」
- 3)小曾根茂雄・松崎育弘ほか：高強度電炉鉄筋の開発に関する研究(その3、その4)、日本建築学会大会学術講演梗概集、北陸大会、pp.499-502、1992.8

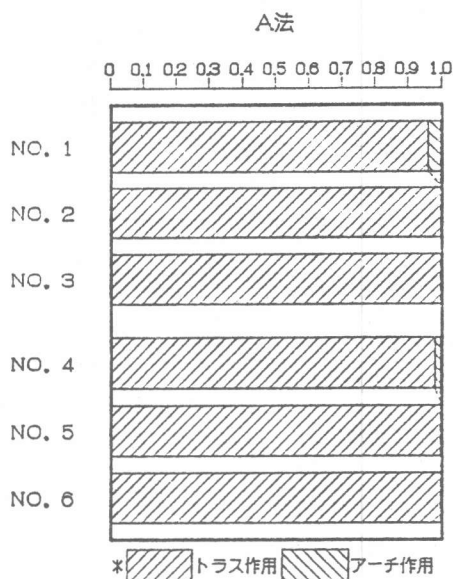


図13 トラス作用とアーチ作用の比関係