論文　鉄筋腐食したRC梁部材のせん断耐力の評価法に関する考察

小川　哲史[*1]・金久保　利之[*2]・八十島　章[*3]・大屋戸　理明[*4]

要旨：鉄筋の腐食がせん断耐荷性能に及ぼすメカニズムを考慮した終局せん断耐力の評価式を構築することを目的とし，メカニズムを考慮した評価式（日本建築学会終局強度型指針式）のアーチ機構およびトラス機構に含まれるコンクリート有効係数およびせん断補強鉄筋の降伏強度の補正を考察した。トラス機構に直接影響を与えるせん断補強鉄筋の腐食について，より明確にするためにせん断補強鉄筋の腐食を切削により模擬した鉄筋コンクリート梁の載荷実験を行った。実験の結果，せん断補強鉄筋の全体降伏および局部破断でトラス機構の耐力が評価できることを示した。

キーワード：鉄筋腐食，せん断耐力，切削，トラス機構，アーチ機構

1. はじめに

既存の鉄筋コンクリート（以下，RC）構造物を長期的に供用していくためには，構造物の劣化における構造性能の低下を定量的に評価し，劣化の度合いに見合った補修や補強の判断が重要となる。

構造物の劣化の中でも鉄筋の腐食はRC構造物の耐荷性状に影響を及ぼす代表的な劣化要因として挙げられ，鉄筋の腐食によるRC構造物の性能の低下を定量的に評価することを目的とした研究は多数なされている[例えば1)]。その中でもせん断耐荷性能に関する研究に着目すると，鉄筋の腐食がせん断耐力に及ぼす影響は，せん断補強鉄筋と引張鉄筋の腐食の影響が懸念され，電食や屋外暴露などにより実際に鉄筋を腐食させたRC梁部材の載荷実験により，鉄筋の腐食がせん断耐力に及ぼすメカニズムが検討されている[例えば2)]。

しかし，定量的な評価方法に至っては劣化指標である鉄筋の質量減少率と耐力値の関係から低減係数を定め，せん断耐力評価式に乗じて補正する手法などが試みられているが，鉄筋の腐食による影響をそのメカニズムに基づいて評価するまでには至っていないのが現状である。また，評価する際に用いられるせん断耐力式には，コンクリート標準示方書に採用されているRC棒部材のせん断耐力式[3)]が主として用いられるが，この式では，せん断補強鉄筋の量に関わらずアーチ機構によるせん断耐力負担分が一定であり，アーチ機構とトラス機構の両者が鉄筋腐食により影響を受ける際の定量的な評価に結びついているとは言い難い。

そこで本研究では，鉄筋の腐食がせん断耐荷性状へ及ぼすメカニズムを考慮し，鉄筋の腐食によるRC梁部材のせん断耐力評価式を構築することを目的とし，せん断耐荷性能のメカニズムを考慮した日本建築学会終局強度型指針のせん断耐力式[4)]を用いて検討を行った。検討後，まずは，せん断補強鉄筋の腐食がトラス機構に与える影響をより明確にするために実験を行い検証した。

2. 腐食したRC梁の終局せん断耐力評価式の考察

2.1 検討に用いたせん断耐力評価式

メカニズムを考慮したRC部材のせん断耐力を評価する方法として日本建築学会の終局強度型指針式[4)]がある。せん断耐力V_uは，式(1)に示すようにアーチ機構による耐力V_a(式(2))とトラス機構による耐力V_t(式(3))の和で評価される。

$$V_u = V_a + V_t \quad (1)$$

$$V_a = \nu \cdot \sigma_{CB}(1-\beta) \cdot b \cdot h/2 \cdot \tan\theta \quad (2)$$

$$V_t = p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot j_t \cdot \cot\varphi \quad (3)$$

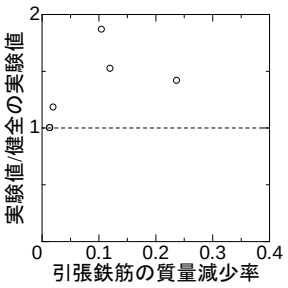
ここで

b　：梁の断面幅
j_t　：主鉄筋中心間距離
h　：梁の断面高さ
σ_{CB}　：コンクリートの圧縮強度
p_w　：せん断補強鉄筋比※
ν　：コンクリート圧縮強度の有効係数(=$1.70\sigma_{CB}^{-0.33}$)
σ_{wy}　：せん断補強鉄筋の降伏強度※
θ　：アーチの圧縮束の角度
φ　：トラスの圧縮束の角度
β　：= $\{(1+\cot^2\varphi)\, p_w \cdot \sigma_{wy}\}/(\nu \cdot \sigma_{CB})$

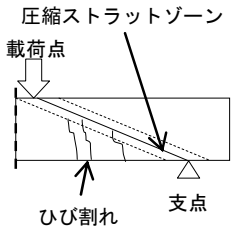
2.2 引張鉄筋の腐食による影響

既往の実験による，せん断破壊したせん断補強鉄筋のない試験体の耐力実験値と引張鉄筋の平均質量減少率の関係[5)]を**図－1**に示す。耐力実験値は，同一の健全試験体の実験値で基準化している。試験体の緒元については，**表－1**に示すものと同様の試験体（後述2.3参照）であ

*1 筑波大学大学院　システム情報工学研究科　学士（工学）　(学生会員)
*2 筑波大学大学院　システム情報工学研究科准教授　博士（工学）　(正会員)
*3 筑波大学大学院　システム情報工学研究科助教　博士（工学）　(正会員)
*4 鉄道総合技術研究所　コンクリート構造主任研究員　博士（工学）　(正会員)



図－1 耐力比と質量減少率[5]



図－2 圧縮ストラット

り，せん断スパン比を 3.0 としたせん断補強鉄筋を配していない試験体である。

引張鉄筋が腐食した場合のせん断力への影響は，既往の研究によると耐力と鉄筋の質量減少率には明確な関係がなく，アーチ機構の耐力が増加する傾向にあることが指摘されている[2]。引張鉄筋が腐食すると，それにともなって引張鉄筋に沿って腐食ひび割れが発生し，引張鉄筋とコンクリートの付着性能が劣化することが知られている。付着性能の劣化は，**図－2** に示すような載荷点と支点を結ぶ圧縮ストラットゾーンにおけるひび割れ性状を変化させる。健全なコンクリート部材では，ひび割れが圧縮ストラットを跨いで発生することでコンクリートの圧縮強度に有効係数 $\nu(\leqq 1)$を設け，圧縮強度を低減している(式(2))。引張鉄筋の腐食によってひび割れ性状が変化し，圧縮ストラットの有効強度が増加すると考え，アーチ機構（式(2)）のコンクリートの有効係数の補正を行えば，引張鉄筋の腐食による影響が評価できると考えられる。有効係数 ν の補正方法については検討中であるため本稿では記していないが，今後，コンクリートと引張鉄筋の付着劣化の程度によるアーチ機構の耐力増加分について実験を行い，引張鉄筋の腐食による影響を考慮した有効係数を検討していく予定である。

2.3 せん断補強鉄筋の腐食による影響

検討対象とした試験体[5]を**表－1** に示す。検討対象とした試験体は既往の研究により行われたせん断補強鉄筋および引張鉄筋を腐食させた試験体[5]の中からせん断破壊した試験体のみを抜粋して示している。試験体は実際の構造部材に近いスケールを意図した大型の試験体で，幅 300mm，有効高さ 400mm の長方形断面を持つせん断破壊先行型の単純梁形式のものである。試験体のパラメータはせん断スパン比で，それぞれをシリーズ別に分類した。配筋については，引張鉄筋に D29(SD490)を 4 本，圧縮鉄筋に D16 を 2 本，せん断補強鉄筋に D10(SD345)を 200mm 間隔でそれぞれ配筋している。テストピースによるコンクリートの圧縮強度試験結果は 21.0MPa である。

試験体の主要なパラメータである腐食の程度は，比較用の健全試験体として打設後から室内に約 1 年間静置した試験体，電食により鉄筋を腐食させた試験体（通電時間を小中大の 3 水準に設定）の 4 種類である。

せん断補強鉄筋が腐食した場合の影響はトラス作用の耐力に直接影響する。したがって，検討対象としたせん断破壊した試験体の実験値[5]から，健全としたアーチ機構の計算値を差し引いたトラス機構の耐力増加分ついて検討を行う。各試験体における耐力値の一覧[5]を**表－2** に示す。トラス機構の耐力比とせん断補強鉄筋の質量減少率の関係を**図－3** に示す。トラス機構の耐力は，同一の試験体のトラス機構の耐力値で基準化している。**図－3** より，せん断補強鉄筋の質量減少率の増加にともなってトラス機構の耐力が減少することが確認できる。

腐食鉄筋の弾性限や引張強度は，平均質量減少率では

表－1 せん断補強鉄筋の腐食による影響の検討対象とした試験体[5]

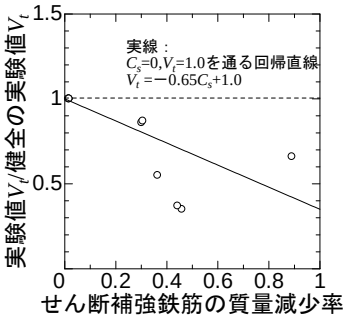
試験体シリーズ	腐食方法	部材断面 $b\times h$ (mm)	j_t (mm)	d (mm)	a (mm)	a/d	引張鉄筋 (種類)	せん断補強鉄筋 (種類)	σ_{CB} (MPa)
1	健全	300×450	350	400	1200	3.0	4-D29 (SD490)	D10@200 (SD345)	21.0
	電食小								
	電食中								
2	健全				1000	2.5			
	電食中								
3	健全				800	2.0			
	電食中								
4	健全				600	1.5			
	電食小								
	電食大								

b:部材幅 h:部材高さ j_t:主鉄筋中心間距離 d:有効高さ a:せん断スパン σ_{CB}:テストピースの圧縮強度試験結果

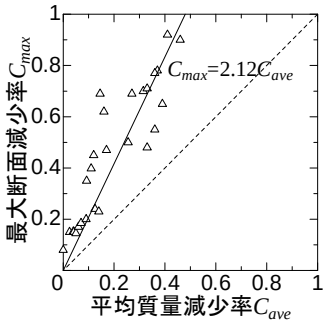
表-2 検討対象とした試験体の V_t 値の一覧 [5)]

試験体シリーズ	腐食方法	平均質量減少率		a/d	p_w (%)	耐力実験値 V(kN)	耐力計算値(kN)				破壊形式
		C_s	C_t				V_a (計算値)	$V_t=V-V_a$	V_t 比[*1]	V_u (式(4))[*2]	
1	健全	0.014	0.02	3.0	0.24	612	207	405	1.00	585	せん断破壊
	電食小	0.301	0.095			555	207	348	0.86	452	
	電食中	0.459	0.187			350	207	143	0.35	327	
2	健全	0.017	0.014	2.5		747	244	503	1.00	622	
	電食中	0.364	0.121			520	244	276	0.55	454	
3	健全	0.017	0.014	2.0		831	298	533	1.00	676	
	電食中	0.442	0.124			496	298	198	0.37	477	
4	健全	0.017	0.014	1.5		939	380	559	1.00	758	
	電食小	0.306	0.102			866	380	486	0.87	668	
	電食大	0.89	0.31			749	380	369	0.66	582	

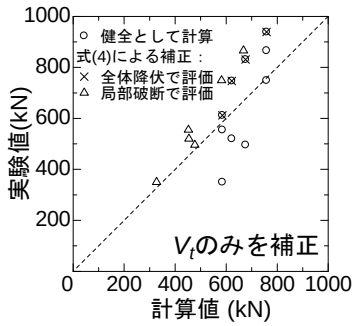
C_s:せん断補強鉄筋 C_t:引張鉄筋 *1 健全試験体に対する比 *2 式(4)による補正を行った耐力計算値



図－3 V_t 比と質量減少率の関係



図－4 C_{max} と C_{ave} の関係 [6)]



図－5 実験値と計算値（V_t 補正）の関係

なく最大断面減少率に支配される。実際の構造物から採取された鉄筋（D10 以下）の平均質量減少率と最大断面減少率の関係 [6)]を，**図－4** に示す。実構造物における鉄筋の腐食は場所によって一様ではなく，最大断面減少率 C_{max} は平均質量減少率 C_{ave} の 2 倍ほどになっている。鉄筋の降伏比（降伏強度／引張強度）が最大断面減少率により低下した最大強度の比より大きいと，鉄筋の全体が降伏（全体降伏）することなく，最大の断面減少位置で破断（局部破断）し引張強度に至る [6)]。

これより，せん断補強鉄筋の腐食の影響はトラス機構において，腐食鉄筋が健全鉄筋の降伏強度を維持できなくなった時点で低下すると仮定し，せん断補強鉄筋の降伏強度を補正する。腐食鉄筋の降伏強度を次式で与える。

$$\sigma_{wc} = \min\{\sigma_{wy},\ (1\text{-}2.12C_s)\cdot\sigma_{wu}\} \qquad (4)$$

ここで

σ_{wc}：補正後の降伏強度

σ_{wy}：健全鉄筋の降伏強度

C_s：せん断補強鉄筋の平均質量減少率

σ_{wu}：健全鉄筋の引張強度

なお，せん断補強鉄筋の断面積には公称断面積を用いる。

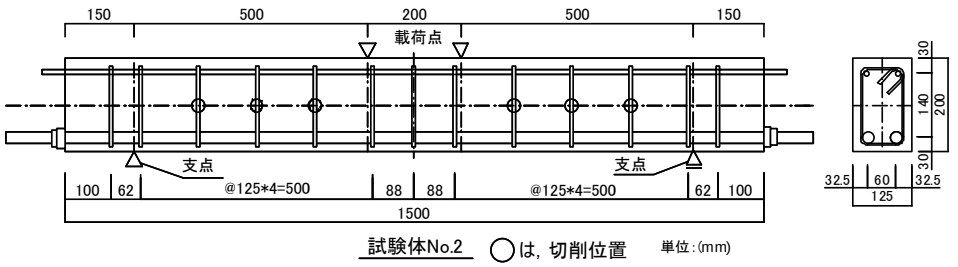
せん断耐力の実験値と，式(1)による健全として計算した計算値および式(4)によるトラス機構の補正を行った計算値の関係を**図－5** に示す。なお，式(4)による補正した計算値については，全体降伏で評価された試験体と局部破断で評価された試験体をそれぞれプロットしている。補正した計算値は実験値に近づいている傾向が確認できる。

以上より，せん断補強鉄筋の平均質量減少率から最大断面減少率を推測し，降伏強度を補正することでトラス機構の耐力を評価することができたが，最大断面減少率を指標として，より明確に全体降伏と局部破断で耐力が評価できるかを確認するための実験を行った。

3. 実験概要

3.1 試験体

試験体配筋を**図－6** に，試験体一覧を**表－3** に示す。試験体は全 3 体で，断面幅 125mm，有効高さ 170mm の長方形断面を持つスパン 1200mm（せん断スパン 500mm）のせん断破壊先行型の単純梁形式のものである。配筋については，引張鉄筋に D22（SD490 ネジ節）を 2 本，圧



図－6 試験体配筋

縮鉄筋に D16 を 2 本，せん断補強鉄筋に D10（SD295）を 125mm 間隔で配した試験体である。なお，引張鉄筋の端部は，定着用ナットで固定した。試験体のパラメータである腐食の程度は，試験体 No.1 は健全，No.2 は，せん断スパン内のせん断補強鉄筋の中央部を局所的に 20%切削し，せん断補強鉄筋の全体降伏を，No.3 は 40%切削し局部破断を意図した試験体である。

使用したコンクリートの材料試験結果を**表－4** に示す。なおテストピースの養生は現場気中とした。

3.2 加力および計測項目

加力は，**図－6** に示す位置を載荷点，支点として 2MN ユニバーサル万能試験機を用いて一方向単調載荷実験を行った。測定項目は荷重，せん断補強鉄筋の歪，引張鉄筋の歪，載荷点たわみである。

3.3 切削による鉄筋腐食の模擬

腐食鉄筋を模擬して作製した切削鉄筋の概要を**図－7** に示す。腐食における最大断面減少率を模擬するために，局所的に健全時の断面積の 20%および 40%になるように切削した。なお，切削鉄筋にはビニールテープを巻いて付着を絶縁している。

切削鉄筋の引張試験における歪の測定方法を**図－8** に示す。歪の測定には，**図－8** に示すように切削部の裏表（歪 1,2）および切削部より下 30mm の健全部の位置（歪 3,4）に歪ゲージを貼り付けて歪を測定した。また，平均的な歪を測定するために検長が鉄筋径の 24 倍になるように取り付けた変位計により変形量を測定した。歪は変形量を検長で除した平均歪である変位歪，および歪 1,2 の平均について求めた。応力は鉄筋の引張力を公称断面積で除して求め，変位歪および歪 1,2 のそれぞれの変形区間での見掛けの降伏強度および弾性係数を算出した。

切削鉄筋の材料試験結果を**表－5** に，切削鉄筋の変位歪による応力－歪関係を**図－9** に示す。全体として，最大断面減少率による強度低下や伸びの低下が模擬できていることが確認できた。

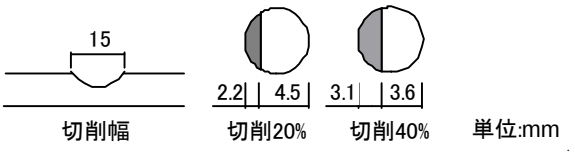
最大断面減少率が 20%の切削鉄筋の場合では，切削部の歪 1 が早期に降伏し，その後，歪 2 が曲げの影響を受けて遅れて降伏し全体の剛性が低下する。さらに荷重が増加すると歪 3,4 が降伏し，鉄筋全体が降伏することに

表－3 試験体一覧

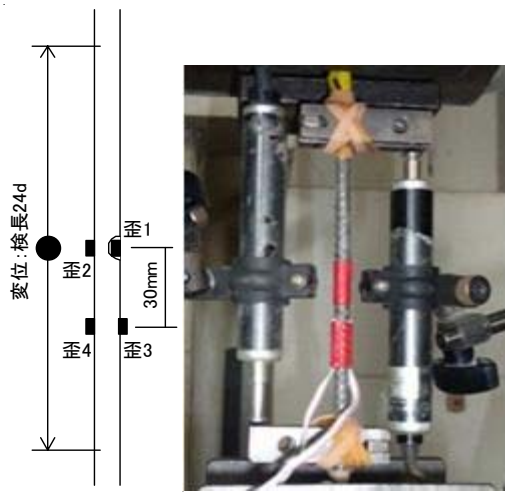
試験体 No.	引張鉄筋	せん断補強鉄筋 切削率	備考
1	2-D29(SD490)	D6(SD295) -	健全
2		D6(SD295) 20%	全体降伏
3		D6(SD295) 40%	局部破断

表－4 コンクリートの材料試験結果

使用試験体 No.	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
1～3	24.1	2.28	23.9



図－7 切削鉄筋概要

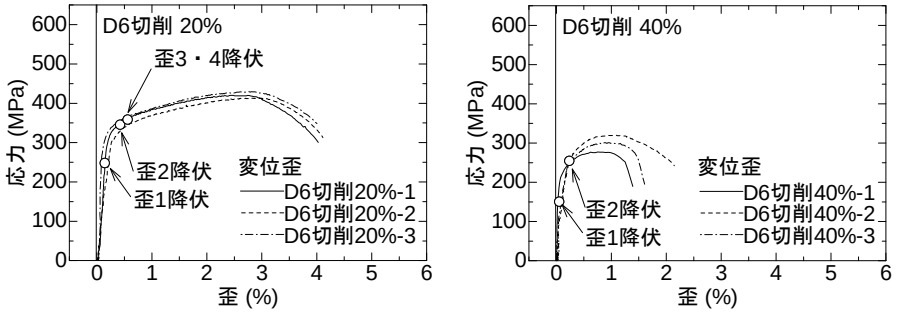


図－8 歪の測定状況

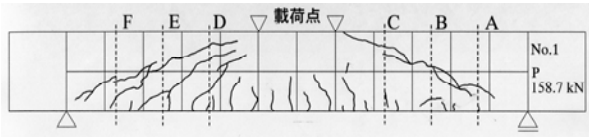
表－5 鉄筋の引張試験結果

種別	使用試験体 No.	降伏強度*(MPa)		弾性係数(GPa)		引張強度 (MPa)	引張強度比（切削/健全）
		変位歪算出	歪 1,2 算出	変位歪算出	歪 1,2 算出		
D6-健全	1	360	352	197	189	499	－
D6-切削 20%	2	343	267	181	128	418	0.84
D6-切削 40%	3	285	154	109	84	297	0.59

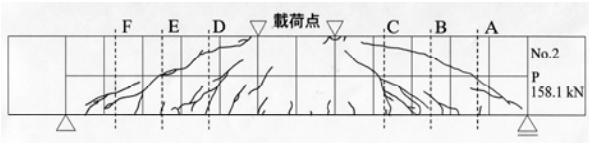
* 0.2%オフセット耐力



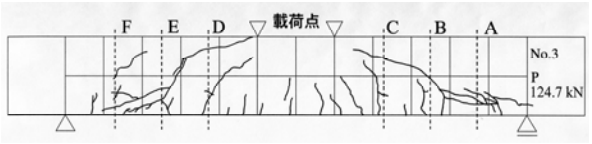
図－9 切削鉄筋の応力－歪（変位歪）関係



(a) 試験体 No.1（破壊スパン：右側）



(b) 試験体 No.2（破壊スパン：左側）



(c) 試験体 No.3（破壊スパン：左側）

図－10 試験体のひび割れ性状（最大荷重時）

より破断した。

最大断面減少率が 40%の切削鉄筋の場合では，最大断面減少率が 20%の場合と同様に切削部の降伏まではほぼ同じ挙動を示すが，その後は健全部の歪 3,4 が降伏することなく，最大断面減少位置で破断した。

4. 実験結果

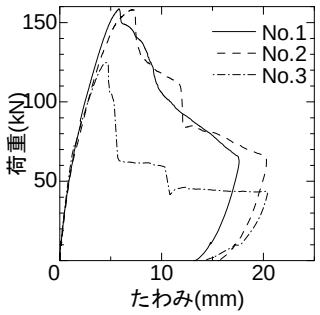
4.1 ひび割れ性状

最大荷重時における試験体のひび割れ性状を**図－10** に示す。図中には，腐食対象のせん断補強鉄筋位置を黒破線で示した。

全ての試験体ともに，せん断スパン区間内にせん断ひび割れが顕著に発生した。せん断ひび割れが圧縮側のコンクリートに貫通後，最大荷重に到達し，せん断破壊した。ひび割れのパターン（分散性や形状等）については，全試験体ともに顕著な差が見られなかったが，No.3（切削率 40%）については E 点のせん断補強鉄筋が切削部で破断しコンクリートが剥落した。

4.2 荷重－たわみ関係

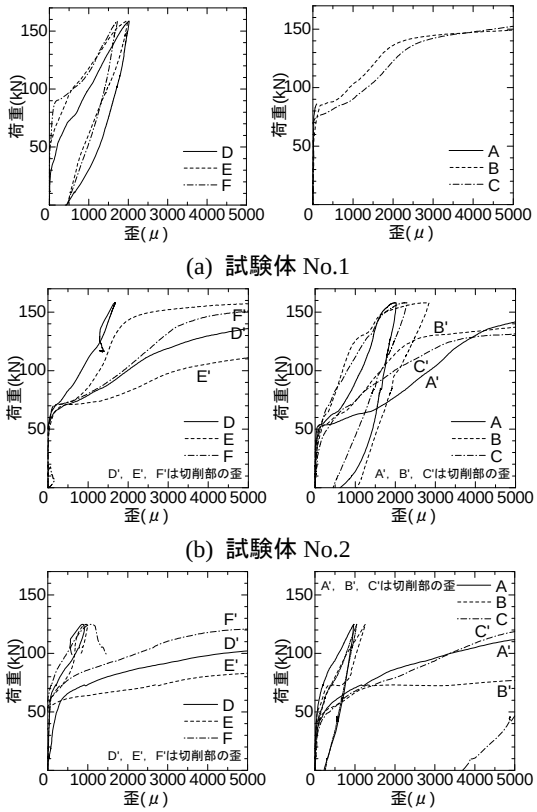
全試験体の荷重－たわみ関係を**図－11** に，実験値の一覧を**表－6** に示す。なお，最大荷重は健全な試験体 No.1



図－11 荷重－たわみ関係

表－6 実験値一覧

試験体 No.	せん断ひび割れ発生荷重(kN)	最大荷重 (kN)
No.1	72.7	158.7
No.2	70.5	158.1
No.3	61.1	124.7



(a) 試験体 No.1

(b) 試験体 No.2

(c) 試験体 No.3

図－12 試験体のせん断補強鉄筋の歪

と No.2（切削率 20%）との比較では耐力に差が見られず，せん断補強鉄筋の腐食模擬（切削）による影響は見られなかった。No.3（切削率 40%）では，耐力低下が生じていることが確認できる。これは，せん断補強鉄筋の局部破断によりトラス機構分の耐力が低下し，全体の耐力が低下したと考えられる。

4.3 せん断補強鉄筋の歪

各試験体のせん断補強鉄筋の歪と荷重の関係を**図－12** に示す。ここで示した歪は，健全な試験体（No.1）では，せん断補強鉄筋の中央部の歪を，せん断補強鉄筋の中央部を局所的に切削した試験体（No.2，No.3）については，切削部（A'等）と健全部（切削部から下 30mm の位置）の歪を示している。

No.2 の試験体では，せん断破壊を生じたスパンのせん断補強鉄筋 D,E,F についてみると，切削部である D’, E’, F’の降伏が先行した後に健全部分の E，F 部分の降伏が確認できる。これにより，せん断補強鉄筋の全体降伏が確認できる。

No.3 の試験体では，せん断破壊を生じたスパンのせん断補強鉄筋 D,E,F についてみると切削部である D’,E’,F’が降伏し，健全部の D,E,F が降伏する前に切削部 E’が局部破断しせん断破壊に至った。これにより，局部破断を確認することができる。

表－7 実験値および計算値一覧

試験体 No.	実験値 (kN)	計算値 (kN)	実験値/計算値	備考
1	158.7	152	1.04	健全
2	158.1	152	1.04	全体降伏
3	124.7	138	0.90	局部破断

4.4 せん断耐力の評価

実験結果による耐力実験値とトラス機構を補正した計算値の一覧を**表－7** に示す。計算値はすべて実験値とおおむね対応しており，せん断補強鉄筋の最大断面減少率を指標として，全体降伏および局部破断を考えることでトラス機構の耐力を評価できると考えられる。なお，No.3 の試験体において実験値に対する計算値の比は 0.90 であり，局部破断により梁全体の変形性能が変化し，計算値が実験値を過大評価する傾向が現れる可能性はある。

5. まとめ

鉄筋の腐食が耐荷性状に及ぼすメカニズムを考慮したせん断耐力式を提案した。実験によりせん断補強鉄筋の最大断面減少率を指標として，全体降伏および局部破断でトラス機構の耐力を評価できることを確認できた。

今後，コンクリートと引張鉄筋の付着劣化の程度によるアーチ機構の耐力増加分について実験を行い，引張鉄筋の腐食による影響を考慮した有効係数を検討していく予定である。

参考文献

1) 大屋戸理明ほか：鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響，土木学会論文集，部門 E，vol.62，No.3，pp542-554，2006.8
2) 佐藤義孝ほか：せん断補強鉄筋および主筋の腐食が RC 部材のせん断耐荷特性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，vol.25，No.1，2003
3) コンクリート標準示方書構造性能照査編，土木学会，2002
4) 鉄筋コンクリート構造物の終局強度型耐震設計指針・同解説，日本建築学会，1990
5) 大屋戸理明：腐食した鉄筋のコンクリート部材の力学性能の評価，第 4 章，筑波大学学位論文，pp100-133, 2007,3.
6) 大屋戸理明ほか：実構造物の調査結果に基づく腐食鉄筋の力学性状の評価，土木学会論文集，部門 E，vol63，No.1，pp143-155，2007