論文　軸力を導入した鉄筋コンクリート梁のせん断耐力向上についての実験と解析

鄭慶玉*1・深尾篤*2・森田嘉満*3・松井繁之*4

要旨：鉄筋コンクリートのせん断耐力は梁軸圧縮力の導入によって一般的に向上することが報告されている．本研究では，軸力導入手法として外ケーブルに着目し，せん断耐力の向上を確認するため２５体の供試体についてせん断破壊実験を行った．実験要因としては，外ケーブルの導入軸力およびせん断補強筋の量を採用した．実験結果に対して，既存のせん断耐力式による計算値および拡張した修正圧縮場理論による解析解との比較考察を行った．

キーワード：せん断耐力，外ケーブル，せん断ひび割れ角度，修正圧縮場理論

１．はじめに

現在，外ケーブル構造に関する研究の大半は曲げ補強に関するものであり，せん断耐力，偏向部そして外ケーブル定着体に関する研究は十分に行われていないのが現状である．せん断耐力に関しては，外ケーブルを適用した場合，一般的に向上することが報告されている[1)]．これは曲げ上げ配置された外ケーブルの鉛直分力によるせん断力の低減分と鉄筋コンクリート部材に軸力を導入することによって，ひび割れ進展を防ぎ部材内部の応力分布が変化するためと考えられている．また，このことは鉄筋コンクリート部材に導入する軸力が大きくなるにつれて，せん断ひび割れの角度は小さくなる現象からも容易に推察できる．

本研究では，前述の２つのせん断耐力向上効果をもたらす因子のうち，特に外ケーブルにより導入される軸力に着目した．軸力とせん断耐力向上度の関係を定性的・定量的に評価するため基礎的な実験を行い，既存の棒部材のせん断耐力式と拡張した修正圧縮場理論を用いた解析解との比較考察を行った．

２．実験概要

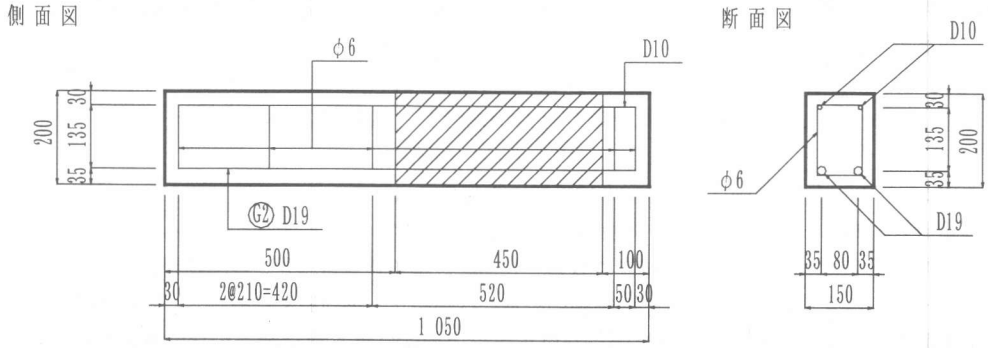
２．１　供試体

本実験で用いた実験供試体の概要を**図－１**に示す．図中のハッチング部分がせん断スパンとなる．供試体のせん断補強筋量をパラメーターとするが，せん断力のコンクリート分担量とせん断補強筋の分担量を明確にする目的で，せん断補強筋にφ６の丸鋼を用いた．せん断補強筋の配置は，せん断スパン内に０，４，５本の本数となるように３種類用意し，**図－１**中のハッチング部に配置した（**図－３**参照）．梁の引張側には引張鉄筋としてD19鉄筋を２本，圧縮側には主鉄筋としてD10鉄筋を２本配置した．外ケーブル鋼材としてはＰＣ鋼棒 SBPR 930/1080Ｂ種１号を用い，必要に応じて導入張力を変化させた．使用鋼材の機械的性質を**表－１**に示す．コンクリートの圧縮強度は49.7N/mm²,44.0 N/mm²の２種類，ヤング係数はそれぞれ 3.31 × 10⁴N/mm²，3.21 ×

表－１　鋼材の機械的性質

種　類	断面積 (mm2)	降伏強度 (N/mm2)	引張強度 (N/mm2)	弾性係数 (N/mm2)
φ６	28.27	230	270	1.78×10^5
D10	71.33	380	510	2.06×10^5
D19	286.5	380	510	2.06×10^5
PC鋼棒	415.5	1046	1140	1.96×10^5

*１オリエンタル建設株式会社工務部設計チーム　係長　工修（正会員）
*２オリエンタル建設株式会社滋賀工場　主任
*３オリエンタル建設株式会社工務部設計チーム　部長
*４大阪大学大学院教授　工学研究科土木工学専攻　工博（正会員）



図－1　供試体概要

10^4N/mm^{2}であった．

2．2　実験装置

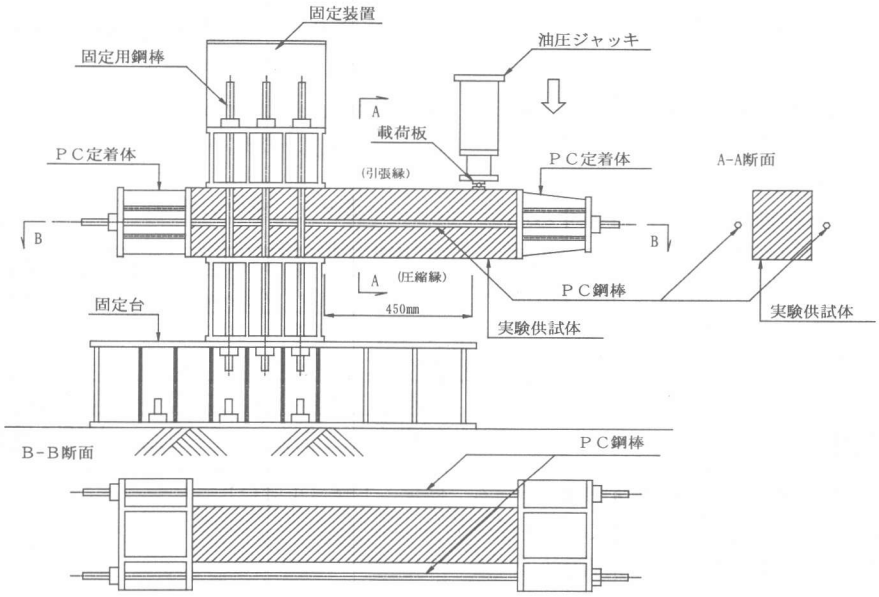
今回実験で使用した実験装置を**図－2**に示す．実験は固定装置を用いて供試体を片持ち梁の状態にし，油圧ジャッキを用い載荷板を通じて荷重をかける方法で行った．外ケーブルによる軸力導入は，供試体の両端にセットしたＰＣ鋼棒の端部ネジにナット回転を与える方法で行った．**図－1**の供試体を上下逆にして固定装置にセットした．

2．3　実験要因

実験パラメーターを**表－2**に示す．本実験は導入プレストレス及びスターラップ量がせん断耐力に及ぼす影響を調べることを目的としている．３種類のせん断補強筋を有する供試体について軸圧縮応力を0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0(N/mm^2)の５種に変化させた．せん断スパン(a/d)はせん断耐力に影響を及ぼす重要な要因の一つである．今回の実験では，2.73（一定）の条件下で行った．T-0 シリーズは同一条件で１体，T-4・T-5 シリーズは２体づつの合計２５体の供試体を用意した．

2．4　測定項目

主な測定項目は，コンクリートの部材軸方向



図－2　実験装置

表－2　実験要因

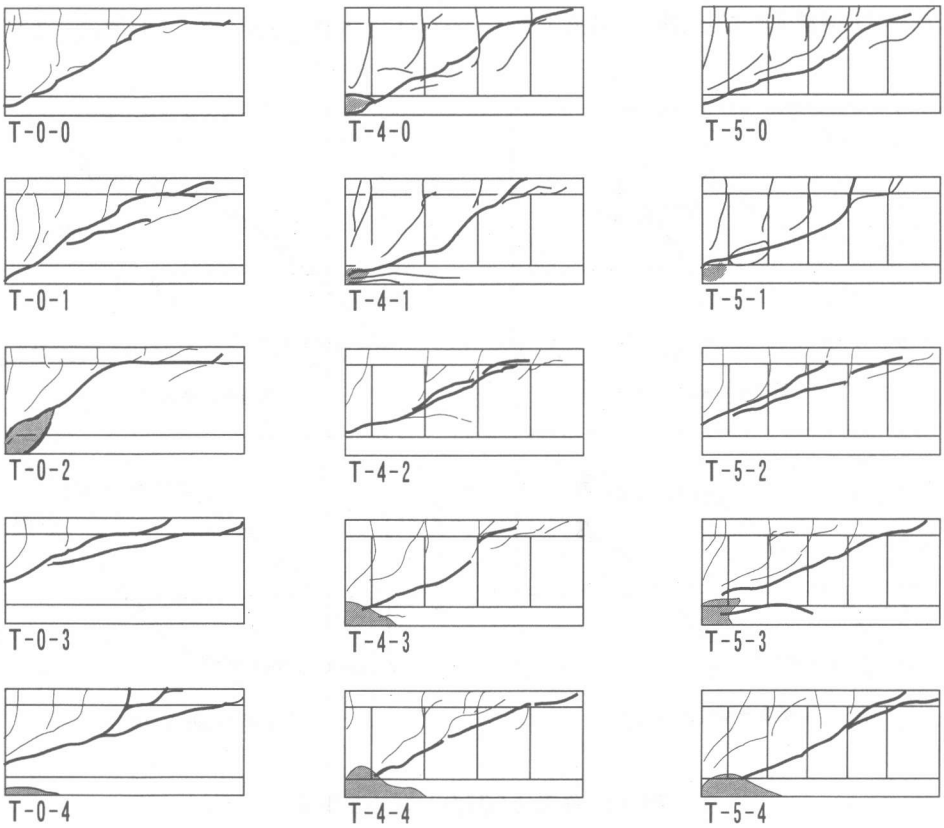
供試体名	スターラップ本数（本）	せん断補強筋比 γ(%)	圧縮強度 (N/mm^2)	コンクリート導入応力 (N/mm^2)
T-0-0	0	0.000	49.7	0.0
T-0-1			49.7	1.0
T-0-2			49.7	2.0
T-0-3			44.0	3.0
T-0-4			44.0	4.0
T-4-0	4	0.377	49.7	0.0
T-4-1			49.7	1.0
T-4-2			49.7	2.0
T-4-3			49.7	3.0
T-4-4			44.0	4.0
T-5-0	5	0.503	49.7	0.0
T-5-1			49.7	1.0
T-5-2			49.7	2.0
T-5-3			44.0	3.0
T-5-4			44.0	4.0

ひずみ・各せん断補強筋のひずみ・外ケーブルの増加張力・供試体の変位であり，ひび割れ進展等は目視観察および写真撮影により行った．

3．実験結果および考察

3．1　破壊性状

図－3に本実験で得られたせん断領域（図－1ハッチング部分）における全ひび割れ性状を示す．図の左側は固定端であり，右側が載荷点である．図－3において太い線のひび割れは破壊時に支配的となったひび割れを示し，ハッチングされた領域はせん断圧縮型破壊により圧壊または剥離した部分を示す．また，図中にはせん断補強筋と軸方向筋を併せて作図した．せん断補強筋を有しないT-0シリーズでは，軸力を与えない供試体に関しては部材軸に対してほぼ45°の斜めひび割れを形成しせん断破壊した．そして，高軸力を与えるにつれて斜めひび割れ角度は小さくなることが確認できた．このシリーズの供試体は，斜めひび割れ進展後に引張鉄筋に沿った付着破壊後のかぶりコンクリートの剥離破壊が顕著であった．T-4，T-5シリーズの



図－3　せん断領域ひび割れ状況

供試体では，せん断補強筋の配置個所から曲げひび割れが数本発生し，その供試体の固定点下方に向う支配的なせん断ひび割れの進展後，せん断破壊へと至った．全体のひび割れ性状から，せん断補強筋の有無がひび割れ性状に大きく影響することが確認できた．また，軸力の導入レベルが高い供試体ではせん断補強筋の有無に関わらず，せん断圧縮型の破壊を呈した．

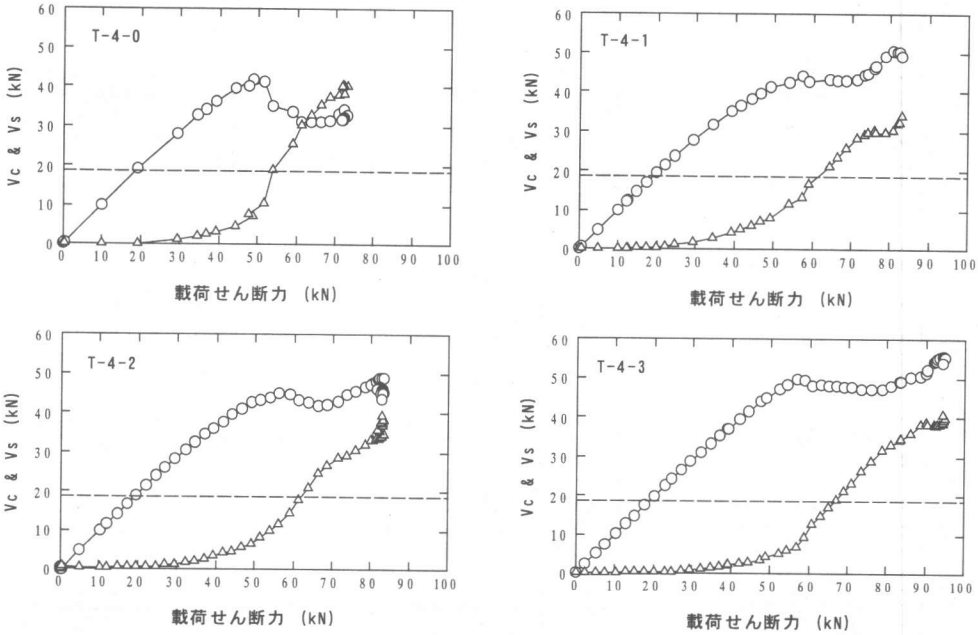
3．2　コンクリートおよびせん断補強筋の分担せん断力

今回の実験では，せん断力のコンクリート分担成分とせん断補強筋分担成分を明確にすることも目的としている．せん断補強筋に添付したひずみゲージから得られる鉄筋の軸方向引張力の合計したものを Vs，全体のせん断力 V から Vs を差し引いたものを Vc とした．同一設計基準強度および同一せん断補強筋量の T-4-0～T-4-3 供試体の Vs と Vc の関係を表すグラフを**図－4**に示した．各供試体とも載荷当初はコンクリートが全せん断力を分担し，Vc が最大値に達する前にせん断補強筋にせん断力が分担されていくのが確認できる．軸力が導入されなかったT-4-0ではVcは最大値を迎えた後に低下する結果となった．しかし，軸力が導入されたT-4-1～T-4-3 供試体に関して，Vc は最大値後一旦低下するが再び分担力は増加した．これは外ケーブルにより導入された軸力により，せん断ひび割れ形成後の骨材の噛み合い効果が引き出された結果と思われる．終局時の Vs の値に４供試体とも大きな差が現れなかった．軸力の導入如何に関わらず，せん断補強筋がある最終の状態に至っていることが想定できる．なお，図中の破線はせん断耐力式で計算される Vs 値を表したものである．

3．3　既存のせん断耐力式との比較

本実験による結果と既存のせん断耐力式から得られる計算値との比較考察を行う．せん断耐力式の算定には土木学会コンクリート標準示方書による式と修正圧縮場理論による解析手法を用いた．各算定式および解析手法の概要を以下に示す．

（1）土木学会コンクリート標準示方書[2)]



図－4　作用せん断力と Vc&Vs 関係

（ｉ）せん断ひび割れ発生荷重算定式

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \qquad (1)$$

$\beta_d = \sqrt[4]{1/d}, \beta_p = \sqrt[3]{100 p_w}$

$\beta_n = 1 + M_o / M_d (N_d \geqq 0), 1 + 2M_o / M_d (N_d \leqq 0)$

M_o：デコンプレッションモーメント

M_d：曲げ破壊モーメント

$f_{vcd} = 0.20\sqrt[3]{f'_{cd}} \qquad p_w = A_s / (b_w \cdot d)$

f_{cd}:コンクリートの設計圧縮強度

b_w:ウェブ厚　d:有効高

γ_b:部材係数

（ii）せん断耐力算定式

$$Vyd = Vcd + Vsd + Vped \qquad (2)$$

$$Vsd = Awfwyd / s_s \cdot d / 1.15 \qquad (3)$$

$$Vped = P_p \cdot \sin\alpha \qquad (4)$$

A_w:せん断補強筋断面積

f_{wyd}:せん断補強鉄筋の降伏強度

S_s:せん断補強鉄筋の配置間隔

P_p:軸方向緊張材の有効引張力

α:軸方向緊張材と部材軸のなす角度

（2）修正圧縮場理論[3)]

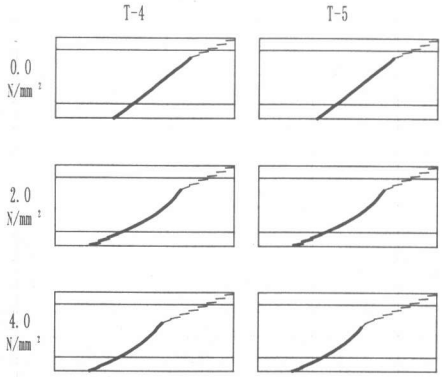
修正圧縮場理論は，コンクリート部材のひび割れの発生した部分をマクロ的にとらえ，その要素内の平均応力・平均ひずみに対して力の釣り合い条件および変形の適合条件を用いて解く理論である．本理論においては，ひび割れ角度や軸力の影響が合理的に考慮されている．今回は，軸力・曲げ・せん断力が同時に作用する供試体を考慮するため，断面を２０層に分割し解析を行った．従来のアルゴリズムに対してより高速化をはかった中村等が提案した拡張した修正圧縮場理論[4)]を用いた．**表－３**に各供試体の実験値と上述の解析手法による解析解をまとめた．表中の Vcd，Vsd は土木学会コンクリート標準示方書より得られた計算値を示し，ＭＣＦＴは修正圧縮場理論より得られた解析解を示す．T-0 シリーズのせん断ひび割れ荷重の実験値は目視観察による値を採用し，T-4，T-5 シリーズではせん断補強筋に貼ったひずみゲージによるひずみ値から軸力を算定し，せん断補強筋の分担力を求め，全せん断力との差の最大値を採用することにした．せん断ひび割れ荷重に着目すると，実験値は軸力の導入量の増加にともない大きくなることが確認できた．土木学会式の算定値および修正圧縮場理論による解析解も同じ傾向を示しており，実験値の値ともほぼ等しくなった．修正圧縮場理論による解では，同じ軸力の導入量であっても供試体のせん断補強筋量の違いにより値が異なる結果となった．また，導入軸力によりひび割れ角度が小さくなることが確認できた．Vc がピークを迎えたときのひび割れ進展状況の中で代表的なものを**図－５**に示

表－３　実験値と計算値の比較

供試体名	せん断ひび割れ荷重 (kN)						終局荷重(kN)				
	PC応力変化 (N/mm²)	Vcd ①	MCFT ②	実験値 ③	計算値と実験値の比較 ①/③	計算値と実験値の比較 ②/③	PC応力変化 (N/mm²)	Vsd ④	①+④ ⑤	実験値 ⑥	⑥−⑤
T-0-0	−	37.8	41.7	39.2	0.964	1.064	−	0.0	37.8	60.0	22.2
T-0-1	0.1	40.7	44.1	39.2	1.038	1.125	0.5	0.0	40.7	68.0	27.3
T-0-2	0.1	43.6	46.1	44.1	0.989	1.045	0.4	0.0	43.6	75.0	31.4
T-0-3	0.1	44.6	47.6	45.4	0.982	1.048	0.3	0.0	44.6	72.2	27.6
T-0-4	0.4	47.4	42.2	49.0	0.967	0.861	0.5	0.0	47.4	69.1	21.7
T-4-0	−	37.8	43.0	41.7	0.906	1.031	−	18.8	56.6	73.0	16.4
T-4-1	0.1	40.7	45.0	44.2	0.921	1.018	0.4	18.8	59.5	83.0	23.5
T-4-2	0.2	43.6	47.4	44.8	0.973	1.058	0.6	18.8	62.4	83.0	20.6
T-4-3	0.0	46.5	48.9	49.9	0.932	0.980	0.2	18.8	65.3	94.9	29.6
T-4-4	0.0	47.4	45.5	48.2	0.983	0.944	0.1	18.8	66.2	79.3	13.1
T-5-0	−	37.8	42.1	42.2	0.896	0.998	−	25.0	62.8	75.3	12.5
T-5-1	0.0	40.7	44.6	41.5	0.981	1.075	0.3	25.0	65.7	84.9	19.2
T-5-2	0.0	43.6	46.9	43.5	1.002	1.078	0.2	25.0	68.6	90.5	21.9
T-5-3	0.0	44.6	44.4	44.6	1.000	0.996	0.3	25.0	69.6	76.1	6.5
T-5-4	0.0	47.4	45.9	47.4	1.000	0.968	0.1	25.0	72.4	80.3	7.9

す．図の太い線は形成されたクラックを示し，細い線はひび割れていない層の主応力の方向を示す．今回の実験でT-0-4供試体のみ軸力の増加に対してせん断ひび割れ荷重は相対的に小さい結果となった．この原因については今後の検討を要する．

次に，終局荷重に着目すると，実験値では導入軸力の違いにより差異が現れたが，ある一定の傾向を示すものではなかった．実験で高軸力を導入した供試体はせん断圧縮型の破壊性状を呈しており，軸力以外にコンクリート強度が大きく影響をおよぼしたためと思われる．土木学会のせん断耐力式の算定値（⑤）と実験値を比較すると，せん断補強筋を有しないT-0シリーズでは斜めひび割れ形成後の付着破壊が起り，軸方向筋によるダウエル効果が顕著となるため，その差は著しく大きくなった．**表―3**中の（⑥-⑤）に着目すると，T-0シリーズの値が最も大きく，T-4，T-5シリーズの順に小さくなった．このことからせん断補強筋がダウエル効果を抑制していることが判断できる．T-4，T-5シリーズでもせん断ひび割れ荷重の近似と比してその差は大きくなった．土木学会の算定式は，実験式と45°トラス理論を組み合わした修正トラス理論による算定式である．ところが**図―3**のひび割れ性状からも確認できるが，決してひび割れ角度は45°で一定とはならない．また，(2)式の*Vsd*はせん断ひび割れに交差するせん断補強筋の降伏を想定しているが実験では降伏しなかったせん断補強筋も確認されている．ところがトラス理論でせん断力を分担すると計算される数以上のせん断補強筋がせん断力を分担しているため，実験値は計算値を上回る結果となった．さらに，(2)式は斜め引張破壊を想定しての式であるが，高軸圧縮力下の供試体はほとんどせん断圧縮破壊を呈しており，これも大きな要因と考えられる．今回，修正圧縮場理論を用いて終局時のせん断耐力を解析するに至っていない．解析では引張鋼材の降伏によりせん断破壊のモードが現れず，また解析解が収束しなかったためである．この点については今後の検討を要する．



図－5　ひび割れ進展図

4．まとめ

今回，軸力を導入した鉄筋コンクリート梁のせん断耐力向上効果に関する実験解析を行い以下のことが確認できた．

① せん断ひび割れ発生荷重に関して，土木学会コンクリート標準示方書の式，および修正圧縮場理論による解析解は良い近似を示すことが確認できた．また，修正圧縮場理論により解析されるひび割れ角度は，導入軸力の増加にともない小さくなった実験結果と同じ傾向を示した．

② せん断耐力式に関しては，実験値と算定式の間には大きな差が現れたが，その要因を推定することができた．

参考文献）

1）例えば，田辺忠顕，檜垣勇，梅原秀哲，二羽淳一郎：コンクリート構造，朝倉書店，1985

2）コンクリート標準示方書（平成8年版）設計編，土木学会，1996

3）Collins,M.P. and Mitchell, D : Prestressed Concrete Structures, PRENTICE HALL, Inc,1991

4）中村　光・檜貝　勇：拡張した修正圧縮場理論によるＲＣはり断面のせん断耐荷力評価，土木学会論文集，No490, V-23,pp157-166,1994.5