

論文 PC 鋼棒を面外方向にあと施工したせん断補強効果

田中 浩一*1・江尻 譲嗣*2

要旨：地下カルバートのような壁状の RC 構造物を面外方向にせん断補強するには、壁を削孔してあと施工でせん断補強筋を配置する方法がある。省力化するためには削孔 1 箇所あたりのせん断負担を増加させることが必要である。その方法の一つはせん断補強筋の高強度化である。そこで両端に機械式定着を設けた PC 鋼棒をせん断補強筋として用いた場合の力学的挙動を実験で確認した。その結果、用いる機械式定着の支圧面積比は 10 以上が必要であること、また、PC 鋼棒のせん断負担分は断面の有効高さが大きくなるほど大きくなり、トラス理論値の 80%程度を上限と考えるとよいことがわかった。

キーワード：せん断, 耐震補強, 機械式定着, 高強度帯鉄筋, PC 鋼棒

1. はじめに

古い設計基準で建設された地下カルバートでは、許容できるコンクリートのせん断負担が高かったため、せん断補強筋がない場合がある。まれに隅角部近傍の常時土圧によるせん断力が高い部分においては、折り曲げ鉄筋でせん断力に抵抗する配筋がなされている場合もある。しかしながら、折り曲げ鉄筋は一方向に対してせん断抵抗するものの、逆側に対してはせん断補強効果がない。したがって、地震時のような繰返し荷重に対してはせん断破壊する可能性がある¹⁾。

橋梁における耐震一次部材である柱の耐震補強のように柱外周を取り囲むようなせん断補強は、このような地下構造物の耐震補強として適用することはできない。その理由は、壁を拘束する補強を行うには、その地下構造物背面の地盤を撤去する必要があるためである。それは工費や工期が膨大になるだけでなく、都市部の地下カルバートであれば地上にビルや道路などがあり、掘削は事実上不可能と言えるためである。

このような地下構造物の面外せん断補強工法について、既往の研究がある。例えば山村らの研究²⁾では、壁を削孔して、その孔に鉄筋を差し込む方法である。差し込む鉄筋はストレートであるため、通常のスターラップや帯鉄筋のように主鉄筋を取り囲んでいないためにせん断補強効果はフック等を有する通常のせん断補強筋を用いた場合に比べて 60%程度になるとしている。

主鉄筋を取り囲んでいないせん断補強筋のせん断補強効果に関する研究として、せん断補強筋の不完全定着の影響に関する既往の研究もある。例えば、前川らの研究³⁾では、アルカリ骨材反応による膨張に伴い帯鉄筋が折り曲げた位置で破断した場合、残存するせん断耐力を評価する方法を示している。それは有効高さを定着長さ分減じて評価する方法である。その実験結果では、せん

断補強筋の寄与分はトラス理論値の半分程度であった。

これらの研究に共通することは、定着が不完全であっても、異形鉄筋であればせん断補強効果があることである。そしてせん断耐力がトラス理論値よりも小さくなる理由は、定着部の不完全さであると言える。

このような壁のせん断補強を省力化するためには削孔本数の低減が必要である。そのためにはせん断補強筋の先端部における定着を改善することと、せん断補強筋自身を高強度化することが必要である。例えば、削孔後に挿入するせん断補強筋は、両端部に機械式定着を設けた PC 鋼棒が良いと言える。PC 鋼棒をコンクリート中へ定着することを意図したものとして、中空 PC 鋼棒を使用したアバット装置を必要としないプレテンション方式⁴⁾がある。しかしながら、この方法に使用する機械式定着具⁵⁾は大型なので、削孔径を大きくする必要があり、工期や工事費用の観点、ならびに既存構造物の主鉄筋切断リスクが高まる点から好ましくない。加えてポストテンションを与えるための機構が複雑であり部品数が多く、価格が高価という課題がある。

そこで、PC 鋼棒に用いる機械式定着は小さいものを直列に複数個取り付け支圧面積を大きくする方法を考えた(図-1 参照)。このように機械式定着を直列に並べた場合の定着性状、ならびに、これをせん断補強筋として用いた場合のせん断補強効果に関する既往の研究は、管見した限り見つからない。本研究では、コンクリートブロックへ定着した複数個の機械式定着を有する PC 鋼棒の引き抜き実験を行い、その定着体の性状を調べて、PC 鋼棒に用いる直列配置の機械式定着体の仕様を決める。その後、両端部に複数個の機械式定着を設けた PC 鋼棒をあと施工によりせん断補強筋として配置した梁のせん断実験を行い、そのせん断補強効果を定量的に把握して、せん断耐力評価式を提案する。

*1 大林組本社技術研究所構造技術研究部 博士 (工学) (正会員)

*2 大林組本社技術研究所構造技術研究部 博士 (工学) (非会員)

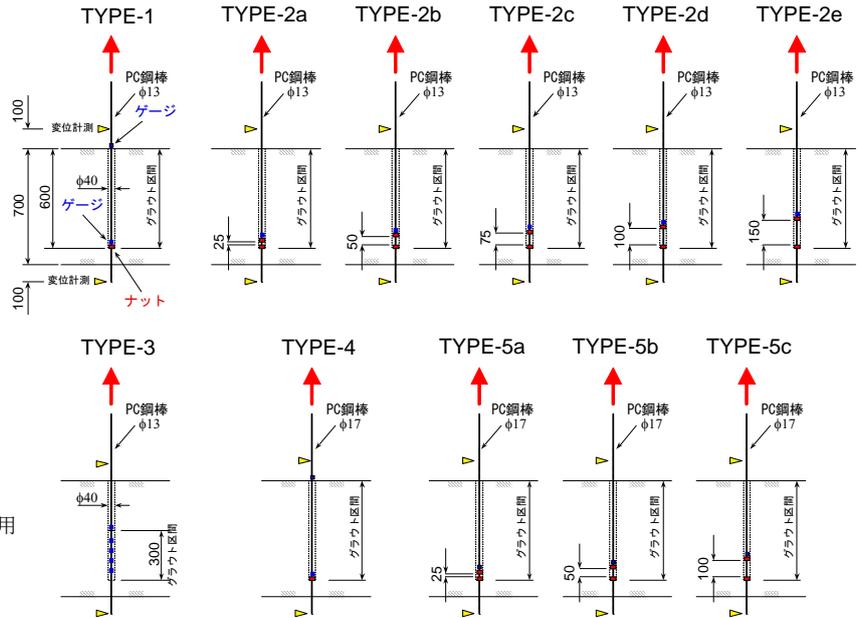
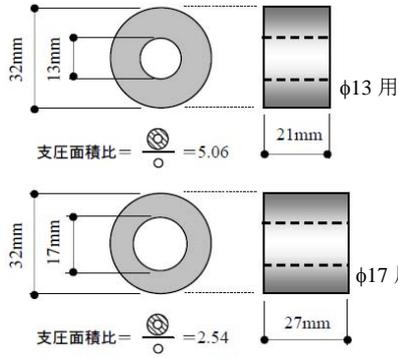


図-1 PC 鋼棒に用いた機械式定着と付着実験の概要

2. 定着体の実験

2.1 定着体の形状

(1) 支圧面積比

PC 鋼棒 φ13 用と φ17 用に用いる機械式定着具の直径はいずれも 32mm とした。PC 鋼棒 φ13 および φ17 の場合、このナット一つあたりの支圧面積比はそれぞれ 5.0、2.5 である。村上らの研究⁹⁾では、機械式定着具の支圧面積比は 2.0~6.0 の範囲であれば、鉄筋 (SD345) の降伏荷重程度で引き抜いても定着部の破壊性状に変化がないと報告されている。PC 鋼棒 (C 種) は鉄筋 (SD345) の約 3 倍の降伏強度を有するので、この定着体に必要な支圧面積比の最小値は 6.0 (2.0×3) 程度と予想できる。支圧面積比とは図-1 に示したようにコンクリートの支圧を受ける面積を鉄筋断面積で除した値である。一方、鉄筋 (SD345~SD490) に用いる一般的な既存の機械式定着具は、支圧面積比が約 5.0 である。そこで、PC 鋼棒に φ13 を用いた場合にナット一つあたりの支圧面積比が 5.0 となるように、ナットの直径を 32mm とした。一方、PC 鋼棒 φ17 では支圧面積比は 2.5 となるが、端部に取り付けるナット個数を φ13、φ17 とも 2 個ずつとすると、φ17 における支圧面積比の総和は 5.0 (2.5×2 個) となり、前述した村上らの研究結果における支圧面積比の最小値 (2.0×3=6.0) に近い値となる。そこで、ナットの直径は 32mm に統一した。

2.2 試験体の製作

(1) 削孔方法

補強を模擬するため、コンクリートブロックを製作した後、ドリルにより削孔を行った。機械式定着の直径が 32mm であり、その間を無収縮グラウトで充てんできるように、削孔径は 40mm とした。

表-1 付着実験のパラメーター

試験体	PC 鋼棒	ナット個数	ナット間距離
TYPE-1	φ13	1	-
TYPE-2a	φ13	2	25
TYPE-2b	φ13	2	50
TYPE-2c	φ13	2	75
TYPE-2d	φ13	2	100
TYPE-2e	φ13	2	150
TYPE-3	φ13	0	-
TYPE-4	φ17	1	-
TYPE-5a	φ17	2	25
TYPE-5b	φ17	2	50
TYPE-5c	φ17	2	100

(2) モルタルの充てん方法

複数個の機械式定着を有する PC 鋼棒を図-1 のように配置したあとに上方よりグラウト材を注入した。用いたモルタルはプレミックスタイプの無収縮モルタルで、結合材と細骨材の重量比は 1.0 : 1.0 である。これを水材料比で 20% とした。

(3) PC 鋼棒の付着

機械式定着による定着性状を確認するため、機械式定着のない区間にはネジ山加工を施さないだけでなく、撥水材を塗布して、充てんするモルタルとの付着力 (膠着力) を取り除いた。

(4) パラメーター

パラメーターは PC 鋼棒の直径と機械式定着の有無、個数ならびに機械式定着間の距離である (表-1)。

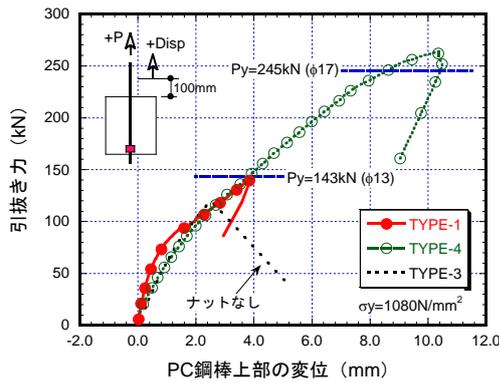
2.3 荷重方法

PC 鋼棒の降伏強度となる荷重まで単調荷重を行った。

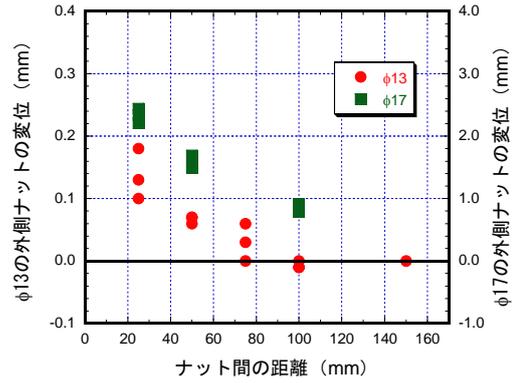
2.4 実験結果

(1) 機械式定着が 1 個の場合

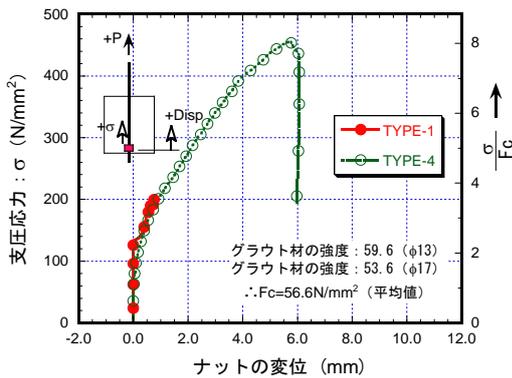
PC 鋼棒上部の変位の一例を図-2 に示す。いずれの



図一 引抜き力と PC 鋼棒上部の変位



図四 機械式定着の間隔と PC 鋼棒下端の変位



図三 引抜き力と PC 鋼棒下端の変位

の縦軸はφ13 の場合の値、右の縦軸はφ17 の場合の値である。いずれの場合も機械式定着の間隔が大きくなるほど、ピーク荷重時における PC 鋼棒下端の変位は小さくなる傾向にある。直列にした機械式定着が各々定着効果を発揮するには上下ともモルタルにめり込んで支圧応力を発生させたほうが良い。そのような観点から、機械式定着間の距離はφ13 では75mm 以下と言える。またφ17 の場合はφ13 の場合に比べて支圧応力が高いため、めり込み量が10倍以上となる。

(3) 機械式定着がない場合

機械式定着を設けずにネジ山加工のみを施した場合、図一に示すように降伏強度の84%で抜け出した。このことから、前述の機械式定着を有した場合に降伏荷重まで抜け出しが生じない理由は付着力ではなく、この機械式定着の支圧により定着が改善されたためである。

PC 鋼棒の場合も降伏荷重まで荷重低下は生じない。このことから、マッシュなコンクリート中、すなわち大きな拘束応力が期待できるコンクリート中へ定着する場合、支圧面積比が2.5の機械式定着が1つあれば PC 鋼棒のように高強度であっても定着できることがわかった。また、PC 鋼棒下端の変位と荷重を総支圧面積で除した支圧応力との関係を図一に示す。同図の右縦軸には充てんしたモルタルのシリンダー強度で支圧応力を除した値を示した。PC 鋼棒下端の変位とは、機械式定着がモルタルにめり込んだ深さである。ピーク荷重時の PC 鋼棒下端変位はφ13 では1.0mm 未満であるのに対してφ17 では6.0mm 程度となっている。したがって、支圧面積部分においてモルタルは粉体化圧壊⁶⁾していると予想される。

(2) 機械式定着が複数個の場合

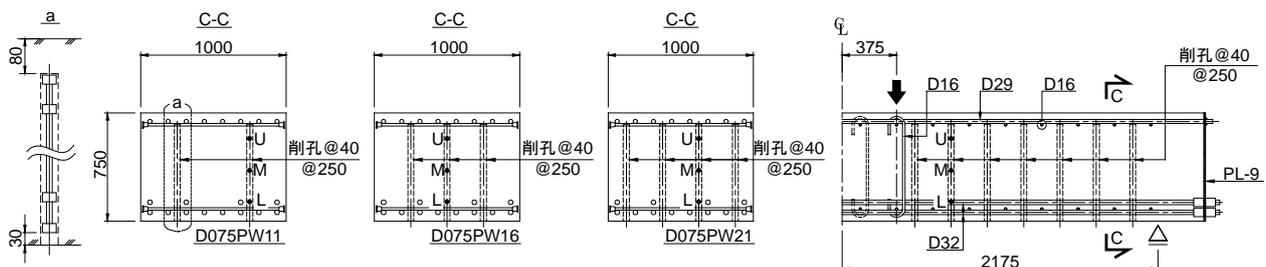
機械式定着が複数個の場合でも、PC 鋼棒の降伏強度に相当する荷重まで荷重低下は生じなかった。ピーク荷重に達したときの PC 鋼棒下端の変位を図一に示す。左

3. せん断実験

3.1 試験体の製作

(1) 削孔方法

試験体の構造配筋図の一例を図一に示す。左側のせん断スパンでは上から削孔し、右側のせん断スパンでは下からコアドリルで削孔した。削孔先端の処理はドリルにより行った。削孔深さは主鉄筋と8mm 離れた位置に機械式定着が来るように管理した。すなわち削孔は貫通していない。それは、実際の施工では、削孔奥行き方向の主鉄筋を傷つけないことや地下水などの漏水を防ぐことに留意するべきと考えたためである。



図五 せん断試験体の構造配筋図と加力方法 (断面高さ 750mm の例)

(2) 形状寸法と配筋

いずれの試験体も断面の幅は 1000mm とした。一方、断面高さは 500mm, 750mm, 1000mm の 3 種類とした。前述のように削孔深さを主鉄筋より手前としたため、通常のせん断補強筋のようにコンクリートストラット着地点である主鉄筋を取り囲んでいない。この不完全な配筋がせん断耐力へ影響を及ぼすと予想される。しかし、断面高さが大きくなると、機械式定着の位置が中立軸より上方の圧縮領域となる本数が多くなり、せん断補強効果が大きくなる、という仮説を考えたためである。主鉄筋はせん断破壊が先行するように異形 PC 鋼棒 (D32: SBPD1080/1230) を用いた。また壁状構造物を模擬するため配筋 (D16: SD345) の端部には機械式定着を設けた。PC 鋼棒に用いた機械式定着は図-1 に示したものと同一のものである。せん断実験に用いた機械式定着間の距離は $\phi 13$, $\phi 17$ とも 50mm とした。これは、付着実験で複数個の機械式定着が直列で同時に挙動すると考えられる間隔 75mm 以下を考慮して定めた。PC 鋼棒の定着はプレグラウト方式、すなわち予めモルタルを削孔へ注入した後に PC 鋼棒を挿入して定着した。

(3) 使用材料

試験体に用いたコンクリートの配合を表-2 に、コンクリートとモルタルの材料試験結果を表-3 に示す。また、使用した各種鋼材の材料試験結果を表-4 に示す。

3.2 載荷方法

いずれの載荷もせん断スパン比 (a/d) を 2.61 として 2 点集中単調載荷とした。

3.3 実験結果

(1) せん断耐力

実験で得られたせん断耐力を表-5 に示す。D075 シリーズの結果から、挿入した PC 鋼棒が増加するとともに

せん断耐力は増加し、せん断補強筋を有しない場合の約 2 倍程度まで高まることがわかった。

表-2 コンクリートの配合

水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	W/C (%)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	粗骨材 最大寸法
168	276	61	813	1026	20mm

*空気量: 4.5% **セメントの種類: H

表-3 コンクリートとモルタルの材料試験結果

試験体	材料	コンクリート			モルタル せん断スパン左 (せん断スパン右)	
		材令 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	材令 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)
D050PW16		37	31.9	23.5	18 (15)	75.5 (78.2)
D075PW00		28	32.4	23.2	9 (6)	-
D075PW11		29	32.4	23.1	10 (7)	80.6 (72.8)
D075PW16		30	29.3	22.3	11 (8)	-
D075PW21		33	31.7	23.3	14 (11)	89.9 (81.4)
D100PW16S		44	33.9	24.1	23 (20)	78.3 (73.2)
D100PW16B		42	32.8	23.8	25 (22)	-

表-4 PC 鋼棒の材料試験結果

材料	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
主鉄筋: D32 (SBPD1080/1230)	1159	1293	200
せん断補強筋: $\phi 13$ (SBPR1080/1230)	1234	1309	207
せん断補強筋: $\phi 17$ (SBPR1080/1230)	1201	1290	207

表-5 せん断実験の結果一覧

試験体	断面幅 B (mm)	断面高さ D (mm)	有効高さ d (mm)	せん断 補強筋比 p_w (%)	せん断 スパン比 a/d	挿入した PC鋼棒	せん断耐力		計算値(内訳)		低減係数 $\frac{V_u - V_c^{cal}}{V_s^{cal}}$
							(実験値) V_u (kN)	(計算値) V_u^{cal} (kN)	V_c^{cal} (kN)	V_s^{cal} (kN)	
D050PW16-S10	1000	500	440	0.16	2.61	2- $\phi 13^*$ @180	609	996	387	609	0.36
D075PW00	1000	750	667	0.00	2.61	-	561	530	530	0	-
D075PW11-S10	1000	750	667	0.11	2.61	2- $\phi 13$ @250	985	1195	530	665	0.68
D075PW16-S10	1000	750	667	0.16	2.61	3- $\phi 13$ @250	1112	1510	513	997	0.60
D075PW21-S10	1000	750	667	0.21	2.61	4- $\phi 13$ @250	1389	1856	526	1330	0.65
D100PW16-S10	1000	1000	905	0.16	2.61	3- $\phi 13$ @250	1837	2011	658	1353	0.87
D100PW15-M05	1000	1000	905	0.15	2.61	2- $\phi 17$ @300	1381	1944	658	1286	0.56

* 端部のみネジ切りが可能なPC鋼棒長さより短いため、全ネジのPC鋼棒を使用した。

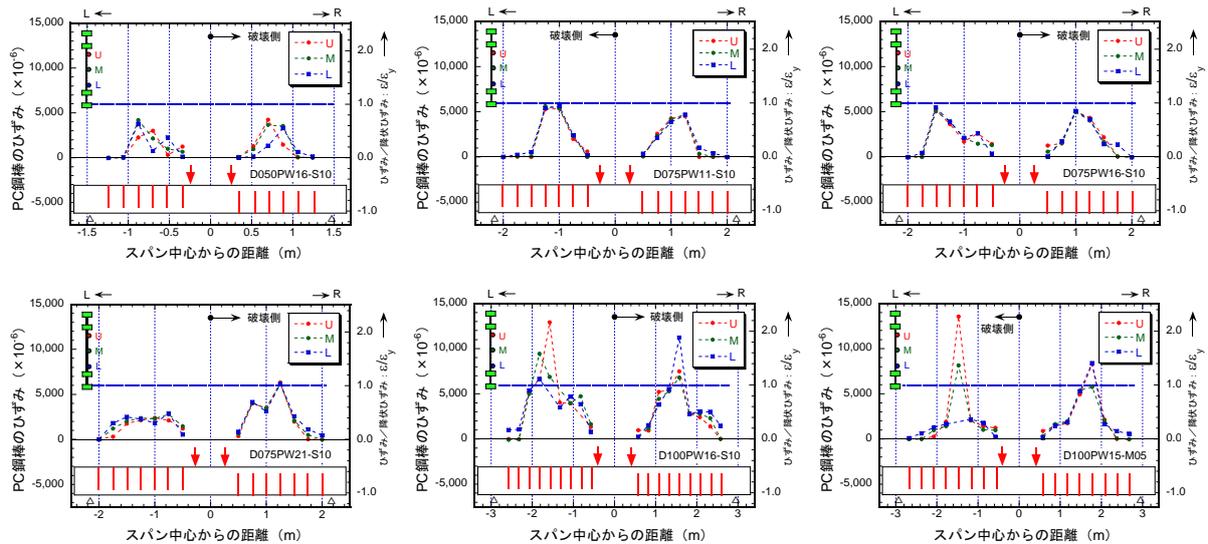


図-6 PC 鋼棒のひずみ分布

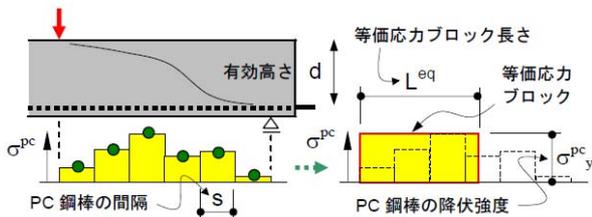


図-7 PC 鋼棒の応力ブロックとその長さ

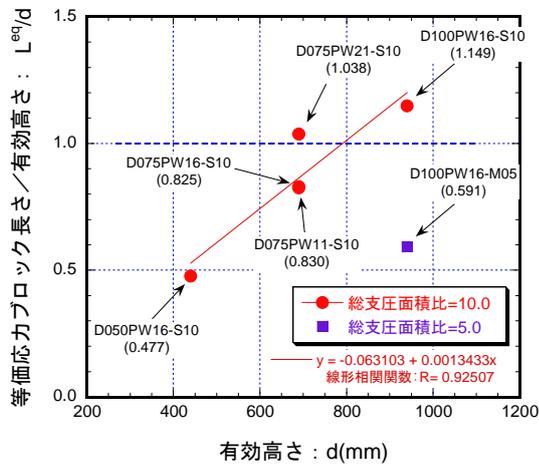


図-8 PC 鋼棒の応力ブロックと有効高さの関係

(2) PC 鋼棒のひずみ分布

せん断破壊した荷重における PC 鋼棒のひずみ分布が図-6 である。ナット配置部分以外にネジ加工が施されていない D075 シリーズや D100 シリーズでは PC 鋼棒の深さ方向でバラツキがない。このことから内側ナット間の PC 鋼棒はアンボンド状態であるといえる。また D075 シリーズでは降伏ひずみ近傍まで、D100 シリーズでは降伏ひずみを大きく超える部分がある。

(3) PC 鋼棒の応力ブロック

前述のひずみ分布を定量的に比較するため、図-7 に

示すような破壊した側のせん断スパン中の PC 鋼棒応力ブロックをもとめ、その総和を材料試験で得た PC 鋼棒降伏強度で除すと応力ブロックの長さ（以下、等価応力ブロック長さ）になる。この値を有効高さで除した値と有効高さとの関係を図-8 に示す。なお、この値はせん断スパン全長にわたる PC 鋼棒応力を積分した値が分子となっているので、コンクリートストラット角度を 45 度としたトラス理論値における PC 鋼棒のせん断負担とは異なるが、PC 鋼棒のせん断寄与の程度を異なる有効高さと同列に比較することができる。

総支圧面積比が 10.0 の場合（φ 13 の場合）、有効高さが大きくなるとこの値も大きくなる傾向がある。一方、D100 シリーズの総支圧面積比が 5.0 の場合（φ 17 の場合）、この値は総支圧面積比が 10.0 の場合とかけ離れている。このことから PC 鋼棒をせん断補強筋として用いる場合、支圧面積比は 5.0 では不十分といえる。

(4) PC 鋼棒のせん断寄与

せん断耐力の計算値⁷⁾と実験値との関係を D075 シリーズについて整理したものが図-9 である。PC 鋼棒量とせん断耐力は比例関係がある。しかしながら、計算値のような勾配ではない。コンクリートのせん断負担分 (V_c) はあと施工でせん断補強筋を挿入しても変化しないと考えると PC 鋼棒のせん断寄与が変化したことになる。

PC 鋼棒の塑性化を仮定した PC 鋼棒のせん断寄与 (V_s) を用いて実際のせん断寄与を表すには、図-9 から帯筋比の一次式、すなわち V_s の一次式 ($\alpha \times V_s$, α : 低減係数) で表すことができると考えてよい。

低減係数を次式でもとめて、表-5 に示した。

$$\alpha = \frac{V_u^{\text{exp}} - V_c^{\text{cal}}}{V_s^{\text{cal}}} \quad (1)$$

ここに、

V_u^{exp} : せん断耐力の実験値

V_c^{cal} : コンクリートが負担するせん断力の計算値

V_s^{cal} : PC鋼棒が負担するせん断力の計算値

($\sigma_y=1080\text{N/mm}^2$ として計算)

この低減係数と断面の有効高さ (d) との関係を図-10に示す。有効高さとともに低減係数が大きくなるのが分かる。これを直線で近似すると以下の(2)式で表すことができる。なお、今回の実験パラメーター以上の有効高さについては、断面高さが大きくなるほど低減係数が大きくなるのが実験で確認できたことから、現状では(3)式のように観察された最大値で一定で評価すればよいと著者は考えている。

$$\alpha = 0.001 \cdot d - 0.05 \quad (400\text{mm} \leq d \leq 900\text{mm}) \quad (2)$$

$$\alpha = 0.85 \quad (900\text{mm} < d) \quad (3)$$

これを用いてあと施工でPC鋼棒をせん断補強に用いた場合のせん断耐力 (V_u) は(4)式で評価できる。

$$V_u = V_c^{cal} + \alpha \cdot V_s^{cal} \quad (4)$$

ただし、 V_s^{cal} 算定にPC鋼棒の0.2%耐力規格値を用いた。その理由は、実験においてPC鋼棒降伏の有無が混在していたためである。この点における是非に関しては、今後の課題としたい。

4. まとめ

地下構造物における壁などの面外せん断に対する補強を目的に、複数個の機械式定着をPC鋼棒両端部に取り付けたものをせん断補強筋としてあと施工する場合のせん断補強効果を確認するために、機械式定着の特性とせん断耐力を実験で確認した。

その結果、以下のことがわかった。

- (1) 拘束が期待できるコンクリートブロック中では、支圧面積比が2.5でもPC鋼棒降伏強度まで抜け出さない。
- (2) 複数個の機械式定着を直列した場合、機械式定着の間隔は75mm以下にすると良い。下限値は今後の課題である。
- (3) PC鋼棒両端部に複数個の機械式定着を取り付けて、それをせん断補強筋としてあと施工した場合、せん断耐力はPC鋼棒の量が増えるほど大きくなるが、PC鋼棒の塑性化を仮定した設計値には達しない。
- (4) 補強された部材のせん断耐力は、有効高さの一次関数で表す低減係数をPC鋼棒のせん断負担に乘じ、これとコンクリートのせん断負担との和で評価できる。

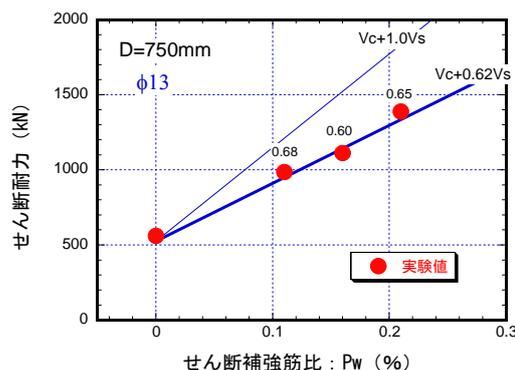


図-9 せん断耐力と帯筋比との関係

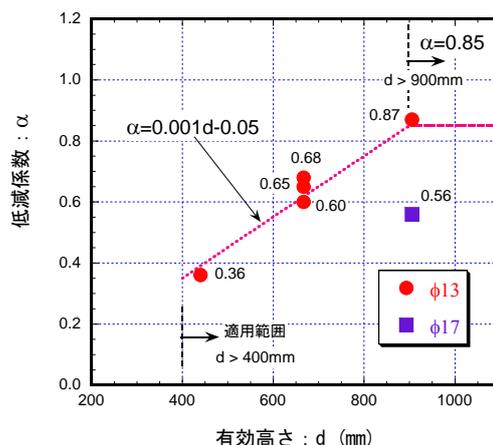


図-10 有効高さ と低減係数との関係

参考文献

- 1) 曾良岡宏ほか：地中ボックスカルバートの変形性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.3, pp.1123-1128, 2001.7
- 2) 山本賢輔，清宮理：開削トンネル擁壁部のせん断力に対する鉄筋差込による耐震補強効果，土木学会論文集，No.777/VI-65, pp.37-51, 2004.12
- 3) 前川宏一ほか：せん断補強筋の定着不良がRCはりのせん断耐力に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.2, pp.973-978, 2004.7
- 4) 今井昌文ほか：中空PC鋼棒を用いたプレテンション方式の定着に関する研究，土木学会論文集，No.679/VI-51, pp.81-92, 2001.6
- 5) 土木学会：鉄筋定着・継手指針[2007年版]，p.11, 2007.8
- 6) 村上雅英ほか：引き抜き試験によるはり主筋の機械式定着耐力の評価，コンクリート工学論文集，第8巻，第2号，pp.1-10, 1997.7
- 7) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.132-135, 2008