

論文 あと施工せん断補強に用いる PC 鋼棒を太くした場合の補強効果

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。著者らは、両端に機械式定着を設けた PC 鋼棒 (φ13) をせん断補強筋として用いた場合の補強効果を実験で確認してきた。本研究では、より太い PC 鋼棒 (φ17, φ19) を用いた場合について、せん断実験を行った。その結果、各 PC 鋼棒の直径に応じた低減係数を用いることにより、そのせん断補強効果を評価できることがわかった。

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の壁は、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。希に隅角部近傍の常時土圧による作用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している場合もある。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橋脚の耐震補強のように橋脚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既往の研究として、前川らのせん断補強筋の不完全定着の影響に関する研究³⁾や、岡本らのあと施工せん断補強筋の研究⁴⁾がある。岡本らの研究は、鉄筋の先端に機械式定着を圧着させて、山村らの研究よりもあと施工したせん断補強筋の引張負担を高めて補強効果を改善させている。しかしながら、あと施工せん断

補強筋は主鉄筋を取り囲んでいないため、そのせん断負担を 100%見込むのではなく、80%程度と見込んで設計することとなっている。

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、その理由は、主鉄筋を取り囲んでいないあと施工せん断補強筋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。

そこで著者らは、あと施工するせん断補強筋として、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て支圧面積を大きくする方法を考えた (図-1 参照)。これを用いた場合の定着性状とせん断補強効果について前回報告⁵⁾した。本研究では、削孔一か所あたりの補強効果をさらに高めるために PC 鋼棒の断面積を増加させた場合のせん断補強効果を確認する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。

2. せん断実験

2.1 パラメーター

パラメーターは PC 鋼棒の直径、機械式定着の有無やせん断補強筋比、削孔内部のプライマー処理の有無である (表-1)。

2.2 PC 鋼棒と定着体形状

(1) 使用する PC 鋼棒

前回の研究⁵⁾では φ13 の PC 鋼棒を使用した。そこで本研究では φ17, φ19 を用いることとした。

*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)

表-1 試験体一覧

試験体	断面幅 B (mm)	断面高さ D (mm)	有効高さ d (mm)	各スパン			せん断 スパン比 a/d	あと施工せん断補強			グラウト	
				スパン L (mm)	せん断 スパン a (mm)	等曲げ スパン am (mm)		せん断 補強筋比 pw (%)	挿入した PC鋼棒	支圧面積比	方向 鉛直: ↓ 水平: →	プライマー 処理
D075PW00	1000	750	667	4350	1800	750	2.61	0.00	—	—	—	—
D075PW16-M12P	1000	750	667	4350	1800	750	2.61	0.16	2-φ17 @280	12.0	↓	○
D075PW24-M12P	1000	750	667	4350	1800	750	2.61	0.24	3-φ17 @280	12.0	↓	○
D075PW24-M12N	1000	750	667	4350	1800	750	2.61	0.24	3-φ17 @280	12.0	↓	—
D075PW10-L14P	1000	750	667	4350	1800	750	2.61	0.10	1-φ19 @280	13.8	↓	○
D075PW20-L14P	1000	750	667	4350	1800	750	2.61	0.20	2-φ19 @280	13.8	↓	○
D100PW16-M12P	1000	1000	905	5800	2450	900	2.61	0.16	2-φ17 @280	12.0	↓	○
D100PW16-M12N	1000	1000	905	5800	2450	900	2.61	0.16	2-φ17 @280	12.0	→	—
D100PW20-L14P	1000	1000	905	5800	2450	900	2.61	0.20	2-φ19 @280	13.8	↓	○
D100PW20-L14N	1000	1000	905	5800	2450	900	2.61	0.20	2-φ19 @280	13.8	↓	—

(2) 支圧面積比

PC 鋼棒に用いた機械式定着を図-1 に示す。村上らの研究⁶⁾では、機械式定着具の支圧面積比（機械式定着具の支圧面積／鉄筋の断面積）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。一方、PC 鋼棒を用いた前回の研究⁵⁾では、PC 鋼棒φ13 に用いる機械式定着具の支圧面積比⁵⁾（機械式定着具の総支圧面積／PC 鋼棒の断面積）は、拘束が十分期待できるコンクリート中への定着性状は、村上らの研究で得た知見と同様に支圧面積比は5程度で十分であった。しかしながら、せん断補強をする観点では10以上が必要であることが分かった。これはせん断補強するせん断スパンにおけるコンクリートは圧縮と引張を受けるので、引張応力が作用しないコンクリート中での定着強度が発揮できないため生じた差異と考えられる。

そこで、本研究で使用するφ17、φ19に対して支圧面積比が10以上となるような機械式定着をそれぞれ与えた。その詳細を図-1 に示す。φ17、φ19 に使用した機械式定着の外径はいずれも45mm、支圧面積比はそれぞれ12.0（6.0×2個）、13.8（4.6×3個）とした。機械式定着を離れた距離はいずれも60mmとした。

2.2 試験体の製作

(1) 削孔方法

梁試験体の形状寸法を図-2 に示す。補強を模擬するため、梁試験体を製作した後、削孔径53mmのコアドリルにより行った。

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。削孔先端の処理は専用のコアビットにより行った。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の漏水を防ぐために貫通させないので、これを模擬した。

(2) モルタルの充てん方法

用いたモルタルは結合材と細骨材の重量比が1.0:1.0のプレミックスタイプの無収縮モルタルである。

下向きにグラウトした場合には、水材料比で20%とし、J14 ロート値で8秒程度にして使用した。横向きにグラウトした場合には、水材料比を17%とし、簡易フロー試験値で70mm値程度の硬練りにして使用した。硬練りとした理由は、削孔へグラウトした後にモルタルが流れ出さないようにするためである。

モルタルを充てんする前に、削孔内部を目粗せずにプライマー処理を行ったものと、削孔内部をワイヤーブラシにより目粗して入念にグラウトした場合の2種類とした。プライマー処理にはアクリル系の材料を使用した。

従来から打継部の旧コンクリート側には入念な打継処理が必要であることが知られている。近年の打継用材料がこの種のせん断補強に適しているか、すなわち充分吸水された湿式コア削孔した後の打継界面に有効かも確認するためである。

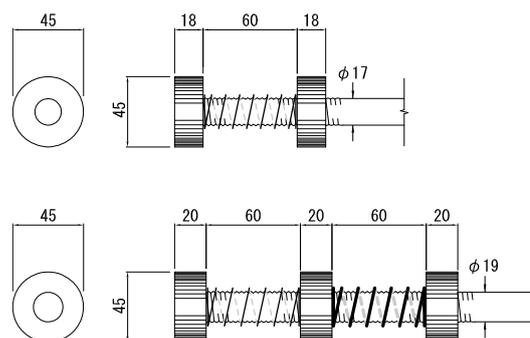


図-1 機械式定着の形状寸法

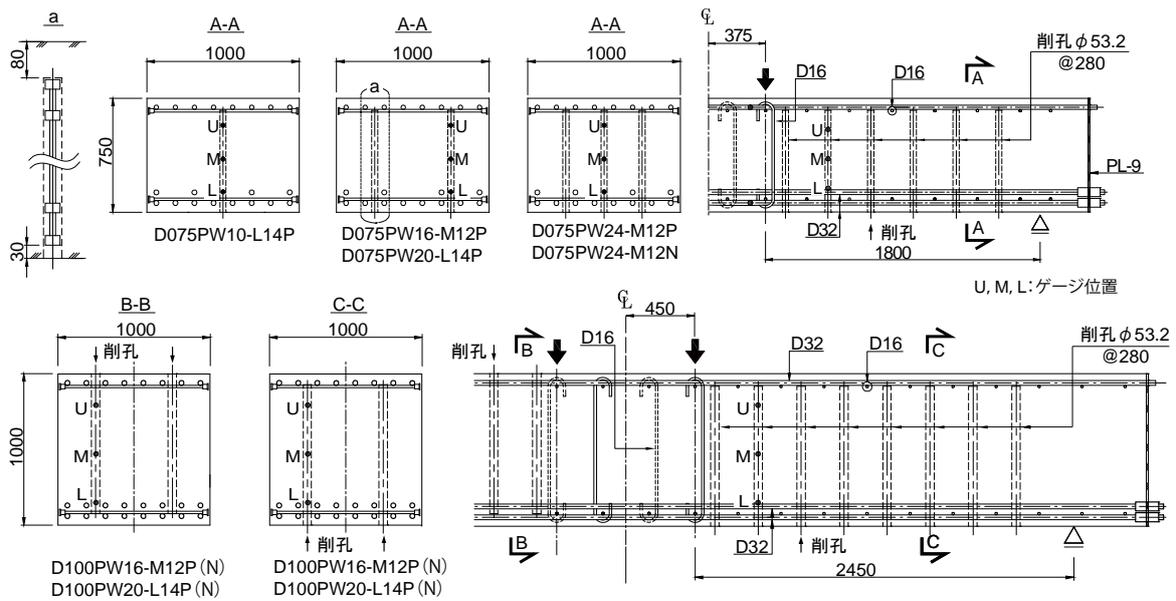


図-2 梁試験体の形状寸法

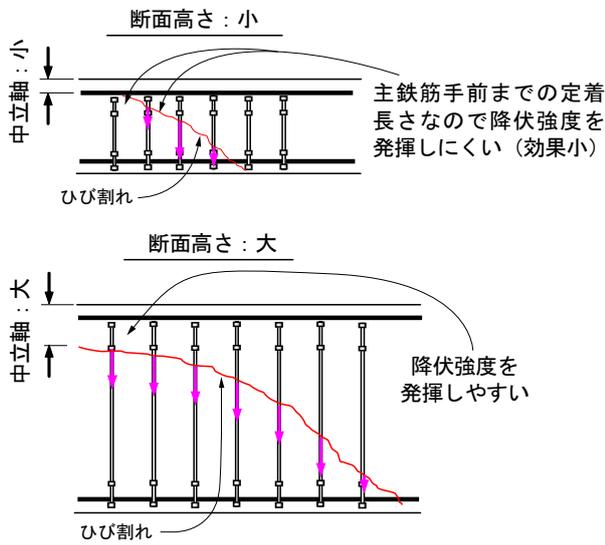


図-3 断面高さが与える影響の仮説

(3) 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 750mm, 1000mm の 2 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、図-3 に示すように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、前回の実験結果でもその傾向が認められたためである。

主鉄筋はせん断破壊が先行するように異形 PC 鋼棒 (SBPD1080/1230) を用いた。また壁状構造物を模擬するため配力筋 (D16 : SD345) の端部には機械式定着を設けた。いずれの試験体も削孔内部にグラウトを行った

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 (日)	コンクリート		モルタル せん断スパン左 (せん断スパン右)	
		圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	材令 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)
D075PW00	28	32.4	23.2	- (-)	-
D075PW16-M12P	54	26.9	-	32 (25)	86.6 (79.1)
D075PW24-M12P	21	32.2	-	15 (8)	80.7* (73.3)*
D075PW24-M12N	39	37.9	26.6	16	95.7
D075PW10-L14P	20	30.9	27.0	14 (8)	80.7 (73.3)
D075PW20-L14P	55	27.8	-	13 (7)	80.7* (73.3)*
D100PW16-M12P	46	26.3	23.2	24 (17)	85.0 (77.0)
D100PW16-M12N	41	36.9	-	25 (15)	89.5 (80.9)
D100PW20-L14P	49	27.1	-	25 (18)	85.0** (77.0)**
D100PW20-L14N	42	36.0	-	28 (18)	89.4 (80.8)

*: D075PW10-L14Pより推定した値。**: D100PW20-L14Pより推定した値。

表-4 鋼材の材料試験結果

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)	1169	1299	197
せん断補強筋: φ17 (SBPR1080/1230)	1201	1286	205
せん断補強筋: φ19 (SBPR1080/1230)	1206	1285	205

表-5 実験結果

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	プライマー 処理	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)	
D075PW00	1000	750	667	0.00	2.61	—	—	561	530	530	0	—
D075PW16-M12P	1000	750	667	0.16	2.61	2-φ17 @280	○	969	1514	498	1016	0.46
D075PW24-M12P	1000	750	667	0.24	2.61	3-φ17 @280	○	1057	2052	529	1523	0.35
D075PW24-M12N	1000	750	667	0.24	2.61	3-φ17 @280	—	1343	2081	558	1523	0.52
D075PW10-L14P	1000	750	667	0.10	2.61	1-φ19 @280	○	745	1156	522	634	0.35
D075PW20-L14P	1000	750	667	0.20	2.61	2-φ19 @280	○	1050	1772	504	1268	0.43
D100PW16-M12P	1000	1000	905	0.16	2.61	2-φ17 @280	○	1601	1996	618	1378	0.71
D100PW16-M12N	1000	1000	905	0.16	2.61	2-φ17 @280	—	1749	2070	692	1378	0.77
D100PW20-L14P	1000	1000	905	0.20	2.61	2-φ19 @280	○	1444	2345	624	1721	0.48
D100PW20-L14N	1000	1000	905	0.20	2.61	2-φ19 @280	—	1908	2407	686	1721	0.71

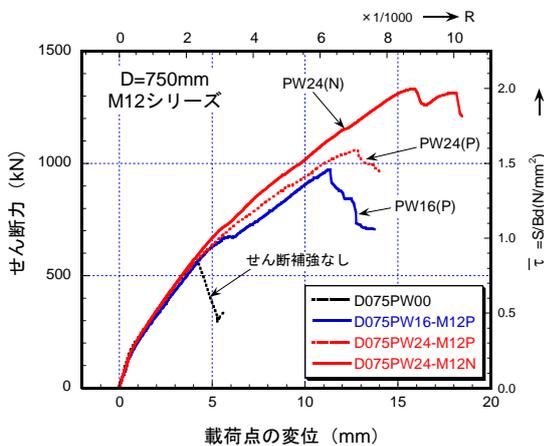


図-4 せん断力-変位関係 (D075 シリーズ (M12))

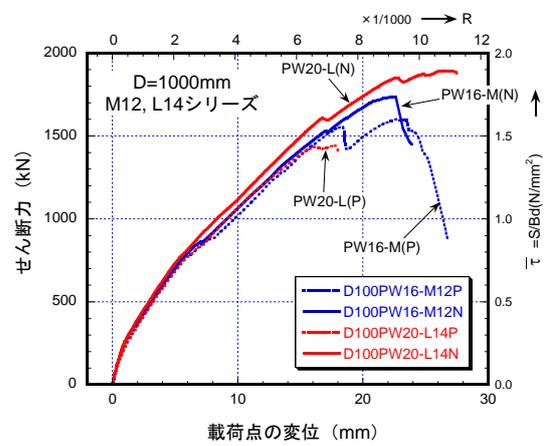


図-6 せん断力-変位関係 (D100 シリーズ)

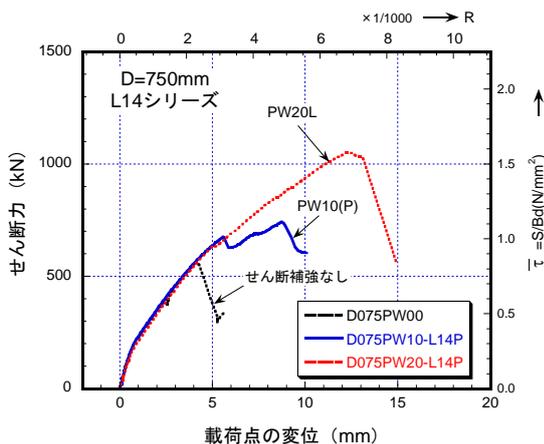


図-5 せん断力-変位関係 (D075 シリーズ (M14))

あとにあと施工せん断補強筋を挿入した。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。

(4) 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。

2.3 荷重方法

いずれの荷重もせん断スパン比 (a/d) を 2.61 として 2 点集中単調荷重とした (図-2 参照)。

3 せん断実験の結果

3.1 せん断耐力

実験で得られたせん断力-変位関係を図-4~6 に、せん断耐力を表-5 に示す。D075 シリーズの結果から、PC 鋼棒を挿入するとせん断耐力は増加し、せん断補強効果があることがわかる。しかしながら、同一のせん断補強筋比にもかかわらず、プライマー処理を行ったほうがせん断耐力は低い。このことから、プライマー処理は、この工法においては使用しないほうが良いと言える。

3.2 PC 鋼棒のせん断負担挙動

(1) PC 鋼棒のひずみ分布

せん断破壊した荷重における PC 鋼棒のひずみ分布の一例を図-7 に示す。ゲージ位置は図中に示すようにナット近傍と補強筋中央である。いずれの場合も PC 鋼棒の深さ方向でひずみにバラツキがない。このことから内

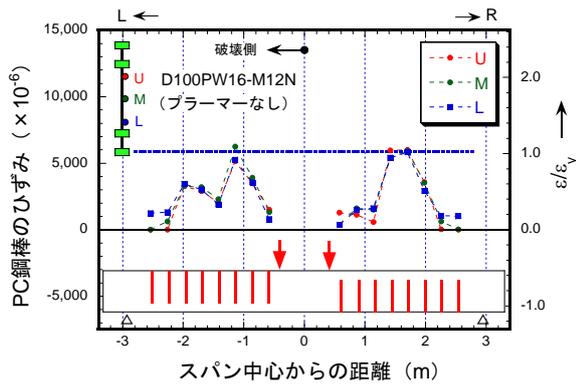


図-7 PC 鋼棒のひずみ分布 (D075PW16-M12P)

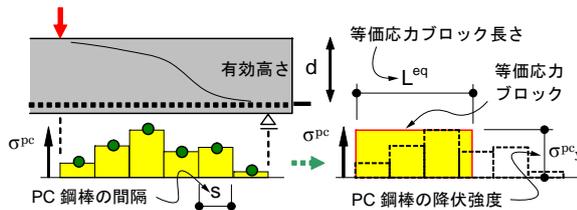


図-8 PC 鋼棒の応力ブロックとその長さ

側ナット間の PC 鋼棒はアンボンド状態といえる。

φ17 の場合、断面高さが 750mm では PC 鋼棒のひずみは降伏ひずみに達していないが、断面高さが 1000mm では降伏ひずみを超えた。一方、φ19 の場合、断面高さが 1000mm でも降伏ひずみは超えていなかった。

(2) 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-8 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降伏応力を縦軸としたブロックの長さ (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-9 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。

PC 鋼棒が φ17、φ19 のいずれの場合も、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。またプライマー処理の有無を比較すると、プライマーを用いないほうが大きい。特にせん断補強筋比が 0.24% と高い場合ではこの傾向が顕著であった。

このことから、本工法においてプライマー処理を用いるとせん断補強効果が低下し、前述したとおり、せん断耐力を低くしていると思われる。したがって、削孔内部の処理は、ワイヤーブラシで入念に目粗した後にグラウトするほうがモルタルとコンクリートとの一体化が良いと言える。プライマー処理では、モルタルとコンクリ

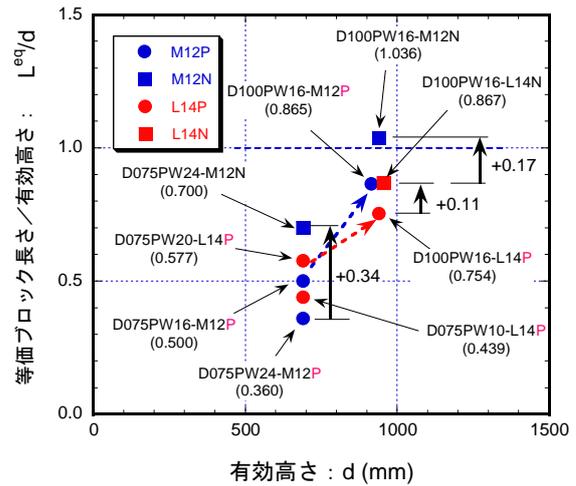


図-9 PC 鋼棒の応力ブロックと有効高さの関係

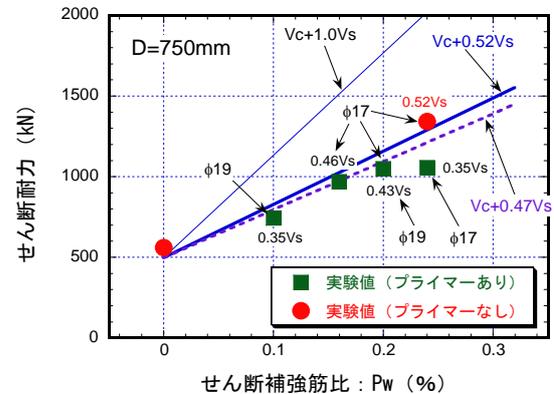


図-10 せん断耐力とせん断補強筋比 (D=750mm)

ートとの間に薄いアクリル被膜が形成されるため、旧コンクリートの吸水による打継強度低下は防止できるものの、コアドリルによる削孔面のように凹凸が少ないコンクリート表面ではモルタルとコンクリートとの本来的打継せん断強度は阻害されているといえる。

3.3 せん断耐力評価式

せん断耐力とせん断補強筋比との関係の一例を図-10 に示す。図中にはせん断耐力計算値⁷⁾とせん断補強筋比との関係も合わせて示す。せん断補強筋比 (PC 鋼棒の量) とせん断耐力は比例関係がある。しかしながら、PC 鋼棒の塑性化を仮定した計算値のような勾配ではない。また、梁断面高さが大きいほうが PC 鋼棒のせん断負担が大きいの。コンクリートのせん断負担分 (Vc) はあと施工でせん断補強筋を挿入しても変化しないと仮定すると、PC 鋼棒のせん断負担が低下しており、その程度は断面高さが大きくなると改善することがわかる。

そこで、PC 鋼棒の塑性化を仮定した PC 鋼棒のせん断負担 (Vs) に低減係数 ($\alpha \times Vs$, α : 低減係数) を用いて実際のせん断負担を表すことができる。

低減係数を次式で算定し、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)

$\phi 17$ における低減係数と断面の有効高さ (d) との関係を図-11に示す。有効高さとともに低減係数が大きくなる傾向があるが、プライマー処理の有無で値は大きく異なる。そこでプライマー処理がない場合を代表点として直線で近似すると以下の(2)式、(4)式で表すことができる。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、(5)式のように観察された最大値で一定で評価すれば安全側となると著者らは考えている。

($\phi 17$ の場合)

$$\alpha = 0.001 \cdot d - 0.15 \quad (600\text{mm} \leq d \leq 900\text{mm}) \quad (2)$$

$$\alpha = 0.75 \quad (900\text{mm} < d) \quad (3)$$

($\phi 19$ の場合)

$$\alpha = 0.001 \cdot d - 0.20 \quad (600\text{mm} \leq d \leq 900\text{mm}) \quad (4)$$

$$\alpha = 0.70 \quad (900\text{mm} < d) \quad (5)$$

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。

$$V_u = V_c^{cal} + \alpha \cdot V_s^{cal} \quad (6)$$

(2) ~ (6) 式を用いて算定したせん断耐力計算と実験値との対比を図-12示す。提案した低減係数を用いて算定したせん断耐力はプライマー処理を行った場合には危険側の評価となる。したがって、本工法では削孔内部のプライマー処理をしない前提ならば、この評価式を使用してよいと考えている。

4. まとめ

PC鋼棒 $\phi 17$ 、 $\phi 19$ の両端部に複数個の機械式定着を取り付けたせん断補強筋をあと施工した場合のせん断補強効果を実験により確認し、以下のことがわかった。

- (1) 今回使用したせん断補強筋をあと施工した場合、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。
- (2) あと施工後のせん断耐力を評価するには、用いたPC鋼棒 $\phi 17$ 、 $\phi 19$ それぞれに対応する低減係数をPC鋼棒の塑性化を仮定したせん断負担に乘じ、これとコンクリートのせん断負担との和で評価できる。ただし、プライマーは使用しない場合に限る。

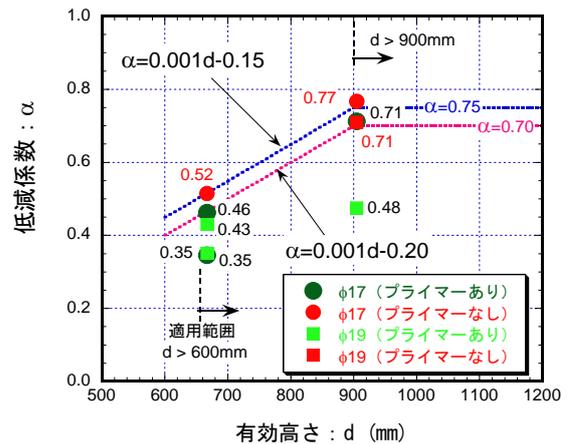


図-11 低減係数と有効高さの関係

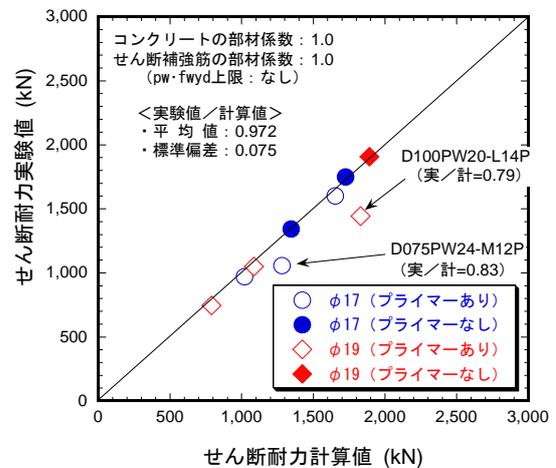


図-12 せん断耐力の計算値と実験値

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) 岡本晋ほか：後施工プレート定着型せん断補強鉄筋を使用した部材の性能確認試験—高強度鉄筋の適用—，土木学会年次大会，V-489, pp.973-974, 2009.9
- 5) 田中浩一ほか：PC鋼棒を面外せん断方向にあと施工したせん断補強効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.2, pp.1039-1044, 2010.7
- 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