

既設コンクリート構造物のせん断補強工法の開発

Post-Head-barによる後施工せん断補強工法の開発

三桶 達夫*¹・堀口 賢一*¹・大友 健*¹・加納 宏一*¹・田中 良弘*²

Keywords :Post-Head-bar, Head-bar, existing structures, seismic reinforcement, shear reinforcement, shear capacity

後施工プレート定着型せん断補強鉄筋, Head-bar, 既設構造物, 耐震補強, せん断補強, せん断耐力

1. はじめに

旧耐震設計法によって設計され現在供用されているコンクリート構造物においては、現在の耐震設計法に示されるL2地震動に相当する地震力を受けた場合に、部材のせん断耐力・じん性が不足することが想定される。特に、供用中の地下構造物では、補強工事を構造物の内側からしかできず、実際にせん断補強を行なうことが難しいのが現実である。そこで、既開発の「Head-bar」(プレート定着型せん断補強鉄筋、建技審証 第0408号)の技術を応用して、地下構造物に効果的なせん断補強を施す手法を開発した。

本工法は、背面に地盤などがあり、片側からしか施工できない既存構造物(たとえばカルバート)の内面からレッグドリルにて削孔を行ない、その孔内に可塑性グラウトを先充填し、その後に先端を特殊処理したPost-Head-bar(後施工プレート定着型せん断補強鉄筋)を差し込み硬化させることで、せん断補強鉄筋と構造躯体を一体化し部材のせん断耐力を向上させ、地震時のじん性の確保を図るものである。このPost-Head-barによるせん断耐力の向上・じん性の向上効果を検証するために各種の静的繰返し加力試験を実施し定量的に評価を行った。本報告はPost-Head-barの開発に関わる実験およびその評価について報告するものである。

2. 技術の概要

「Post-Head-bar」(ポストヘッドバー)は、供用中のコンクリート構造物にせん断補強を行なうための後施工タイプのプレート定着型せん断補強鉄筋(図-1)で

ある。既存構造物の表面からレッグドリルにて削孔を行ない、その孔内にPost-Head-barを差し込み、グラウトで固定することにより、構造躯体と一体化をはかり、部材のせん断耐力を向上させ、じん性を確保する。

Post-Head-barの差込み側には、従来のHead-barと同様に矩形プレートを摩擦接合し、埋込み側には削孔径により大きさを調整した小型の丸形プレートを摩擦接合する。このプレートの先端突起部によって、孔内での後施工せん断補強鉄筋先端の定着性を増大させることが、Post-Head-barによるせん断補強の効果を確実にする機構である。また、施工後のPost-Head-barそのものはすべて構造物内に設置されかぶり部分によって腐食に対する抵抗性が確保されるので、せん断補強後の構造物に対しても、補修前の状態と同様のメンテナンスで対応することが可能である。

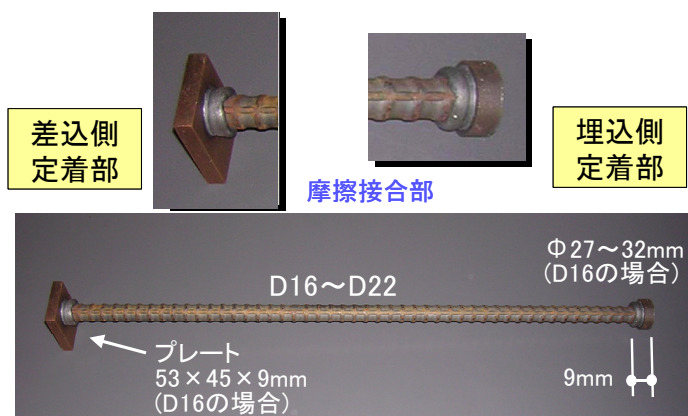


図-1 Post-Head-bar

Fig.1 Post-Head-bar

*1 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室

*2 技術センター土木技術開発部

3. 開発の趣旨と目標

3.1 開発の趣旨

1980年以前の土木学会コンクリート標準示方書に従った部材設計では、1)コンクリートの許容せん断力が 0.9N/mm^2 と大きく取られていること、2)部材断面の大きい実際の構造物ではコンクリートのせん断強度が試験体のそれより小さくなる事が反映されていないこと、3)コンクリートのせん断力がその許容せん断力を超えるとすべてのせん断力をせん断補強鉄筋で受け持つという規定が設けられていたことから、断面を大きくし最小鉄筋量のせん断補強をするのが経済的な設計になると考えられていた。したがって、この時以前に設計された構造物では、せん断鉄筋量が相当に小さく、当時の設計上では曲げ破壊モードとなるはずのものが、実際にはせん断破壊モードとなるものが相当数存在している。

また、旧耐震設計法によって設計され現在供用されているコンクリート構造物においても、現在の耐震設計法においてレベル2地震動に相当する地震力を受けた場合に、部材のせん断耐力・じん性が不足することが想定される。特に、図-2に示すように、供用中の地下構造物（背面が地盤に接する地下または半地下構造物）では、補強工事を構造物の内側からしかできないので、実際にせん断補強を行なうことが難しい。

さらに、構造物自体が供用状態にある制約条件によって、部材の片側からの施工しかできない場合なども想定される。

従来から、耐震補強の一つの方法として、図-3に示すように、部材表面に鋼板を貼付けこれを差筋で固定する方法も行なわれてきている。しかし、この方法では、せん断耐力は大きくなるが、曲げ耐力も増してしまい、曲げ破壊先行にならず構造物の耐震安全性の向上が望めなかった。

Post-Head-bar は、このような従来方法では補強が

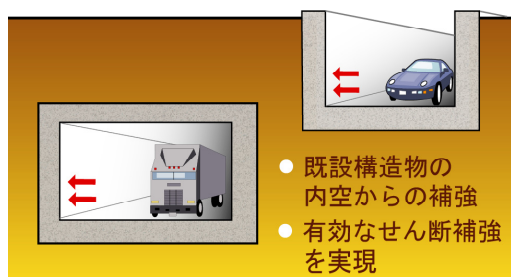


図-2 補強対象構造物の例

Fig.2 Example of object structures

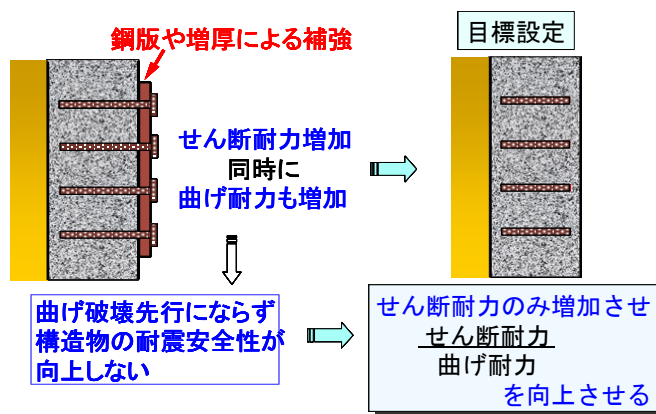


図-3 従来の補強方法との相違点

Fig.3 Differences of ordinary reinforcement method

難しいとされていた供用中の既設構造物に対して、部材の片側からのみの施工が可能で、かつせん断耐力のみを向上して、せん断耐力/曲げ耐力の比を向上させ、さらに地震時のじん性の確保を図ることができる後施工せん断補強用の鉄筋として開発されたものである。

3.2 開発の目標

3.2.1 Post-Head-bar の施工性の確保

背面に地盤などがあり、片側からしか施工できない部材のせん断補強に適用できることを目標とし、Post-Head-bar を用いた施工手順と使用機材を明らかとし、事前調査、削孔、Post-Head-bar の設置、仕上げなど各々の手順が部材の片側のみから施工するために適切な方法であることを検討した。また、狭窄な空間や複雑な部位において、大型機材によらずに短時間に施工できる作業の容易さと迅速性の検討を行った。

3.2.2 Post-Head-bar 後施工によるせん断耐力の向上

Post-Head-bar 後施工によるせん断耐力の向上分を定量的に評価するため、せん断筋のない梁試験体に所定の方法で Post-Head-bar を後施工したせん断破壊モードの梁試験体に対して、正負交番繰返し静的加力試験を行なった。この時、Post-Head-bar の設置は、埋込み先端が主鉄筋位置の場合と、主鉄筋の手前の場合の双方を評価した。

この結果から、Post-Head-bar を後施工することにより部材のせん断耐力が向上すること、Post-Head-bar のせん断耐力向上の効果を、土木学会コンクリート標準示方書に示されるせん断耐力式において、通常せん断補強鉄筋により受け持たれるせん断耐力と比較して後施工せん断補強による有効率を評価した。また、この有効率が適用できる部材の厚さ範囲について検討を行った。

4. 施工方法の確認

片側からの補強のみに制約される部材について、水平方向あるいは鉛直下向きに Post-Head-bar を差し込む手順、鉛直上向きに Post-Head-bar を差し込む手順を設定し、この工事に必要な施工手順を確認した。

水平方向あるいは鉛直下向きに Post-Head-bar を差し込む場合（グラウト先注入工法）および鉛直上向きに Post-Head-bar を差し込む場合（グラウト後注入工法）の各々の工法における施工手順を図-4 に、設置方法の例を図-5～図-7 に示す。

施工要素は、(1) 削孔の位置出し、(2) 削孔、(3) グラウト先注入と Post-Head-bar の設置（後注入工法の場合）、(4) 注入準備と Post-Head-bar の設置およびグラウト後注入、(5) 仕上げである。

(1) 孔位置出し

Post-head-bar を差し込むためには、差込み側の壁面かぶり部に設置されている主筋・配力筋を避けた場所に削孔位置を定める必要がある。電磁波を利用したRCレーダによれば、壁面表面部の配筋の探査は容易であるので、この主筋・配力筋を避けての削孔位置の決定が可能である。

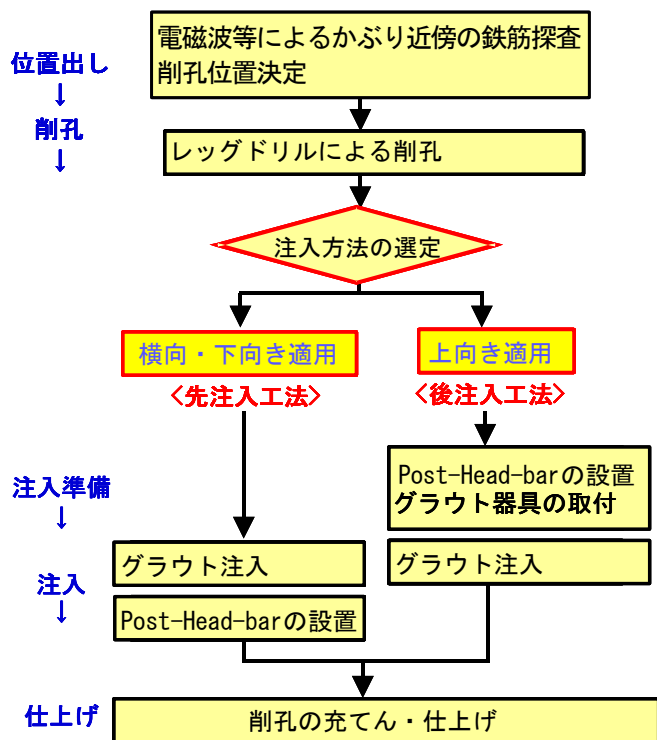


図-4 Post-Head-bar の施工手順
Fig.4 Procedure of Post-Head-bar

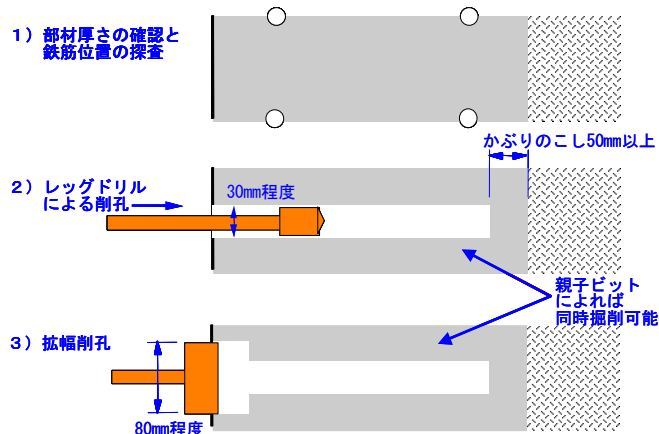


図-5 鉄筋探査及び削孔
Fig.5 Searching for steel bars and drilling method

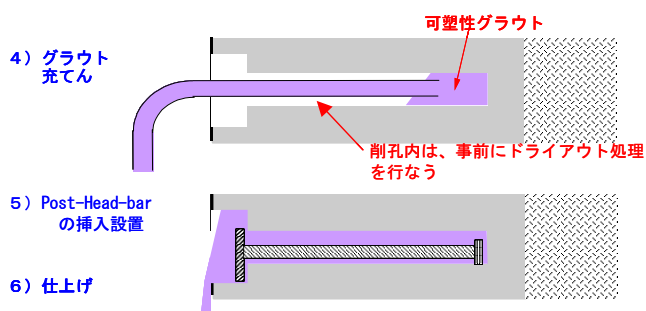


図-6 グラウト先注入工法の手順
Fig.6 Procedure of pre-grouting method

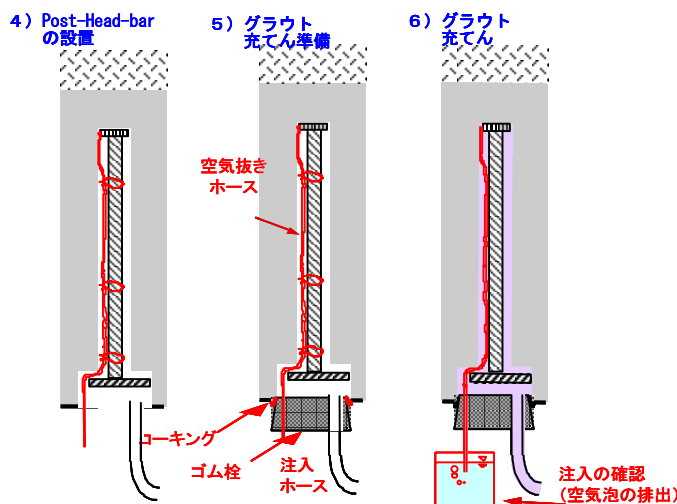


図-7 グラウト後注入の手順
Fig.7 Procedure of post-grouting method

(2) 削孔

削孔は図-8 に示すレグドリルにより行なう。レグドリルによる削孔は、以下のような特徴がある。

- ・ 切削ではないので、鉄筋を切断することがない（鉄筋に当たった時点で停止可能）。
- ・ ロッドの向きと貫入深さが作業中にわかるので、掘削方向と掘削深さの精度が確保できる。

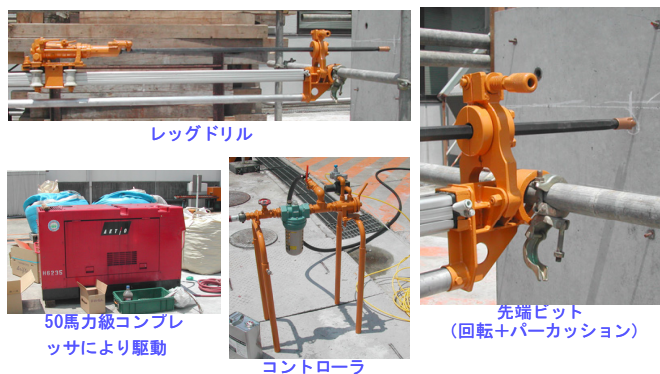


図-8 レッグドリル削孔設備
Fig.8 Equipment of drilling machine

- ・掘削孔内部が凸凹のある仕上がりとなる。高圧空気で清掃すれば異物の付着もない。
- ・コンプレッサによる空気圧で駆動するので、掘削部・制御部が軽量小型であり人力による取扱いが容易（1人で運搬、運転が可能で、かつ掘削位置の移動が容易）。駆動源であるコンプレッサは比較的大きいが、100m程度以上離れた位置に設置できる。
- ・ロッド長を小さくすれば、さらに狭い空間で施工可能である。
- ・掘削速度が速い（ $\phi 30\text{mm}$ で $30\text{cm}/\text{分}$ 以上）。
- ・掘削に水を使用しない。
- ・掘削屑を回収することができる（図-9）。
- ・掘削反力が小さい（水平 50kgf ）ので、架台などの支保が軽微（人力での掘削も可能）
- ・大径削孔および、親子ビットによる可変孔径での削孔も容易である。

したがって、駆動源が入らない狭い空間で、水が流せないような環境においても、最小の作業員数で、比較的軽微な仮設により（あるいは仮設なしでも）効率の良い掘削が可能である。そして、既設の鉄筋を切断することなく精度の良い位置・方向に、所定の深さに削孔が可能で、かつ削孔内を凸凹で清浄に仕上げられる。すなわち、施工性と Post-Head-bar を定着固定する性能の双方の観点からレッグドリル削孔は適した方法であると確認された。

なお、油圧により駆動するタイプのレッグドリルもあるが、馬力が大きいので、掘削速度はコンプレッサの3倍程度（ $\phi 30\text{mm}$ で $90\text{cm}/\text{分}$ ）である。狭窄でない施工部位への適用であればこれが有効である。バックホーに取り付けることで支保を必要としないタイプの機材もある。

(3) グラウト先注入と Post-Head-bar の設置（先注入工法の場合）

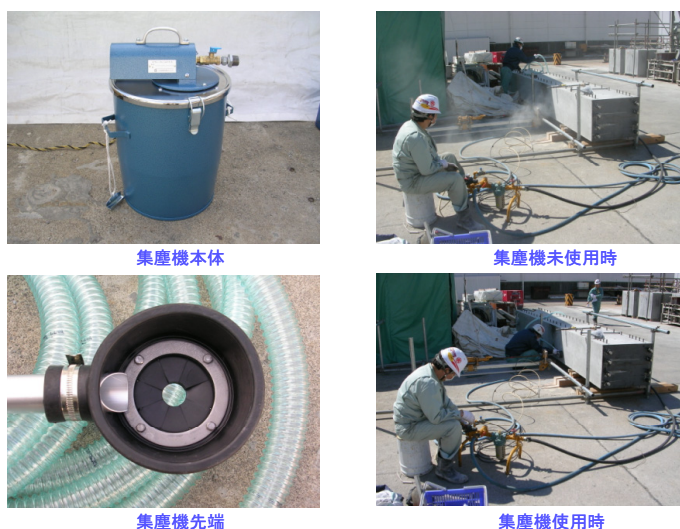


図-9 掘削屑の回収装置
Fig.9 Equipment of dust catcher

グラウト先注入工法の場合、図-10 に示すように、削孔内に可塑性グラウトを充てんし Post-Head-bar を差込むだけで、Post-Head-bar の配置を完了する。削孔内面は、グラウト注入前に湿潤状態にするかあるいはドライアウト防止剤を散布し、注入材が吸湿されないようにする。

Post-Head-bar の配置が水平向きあるいは下向きであれば、注入グラウトの可塑性によって、削孔からグラウトがたれないので、この方法によって容易に Post-Head-bar の削孔内への固定が可能であることを確認した。

可塑性グラウトが表-1 に示すものであれば、図-11 に示すように、削孔内に設置した Post-Head-bar の先端定着部までグラウトが充実し、Post-Head-bar とコンクリート躯体が一体となっていることを確認した。



図-10 可塑性グラウト注入と Post-Head-bar 配置
Fig.10 Pre-grouting and inserting of Post-Head-bars

表-1 グラウト材の性能

Table.1 The performances of grout

グラウト材種類	水セメント比 (%)	テーブルフロー値 (mm)	J ₁₄ ロート流下時間 (秒)	ブリーディング率 (%)	膨張収縮率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)					
						3時間	1日	3日	7日	28日	
グラウト先注入工法 (可塑性グラウト)	1日硬化型	45.0	195	—	0	+0.05	—	10.0	—	50.3	70
	即時硬化型	45.0	195	—	0	+0.05	4.5	9.0	—	45.2	63.1
グラウト後注入工法 (流動性グラウト)	1日硬化型	32.5	—	4.8	0	+0.85	—	29.6	45.1	56.5	65.4
	即時硬化型	29.0	—	4.4	0	+0.18	17.5	27.8	42.5	52.7	61.0

圧縮強度は標準養生による結果である。コンクリート

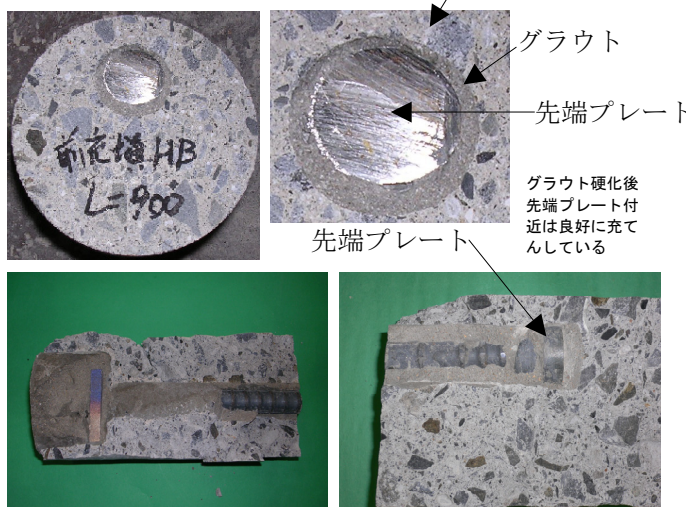


図-11 先充填工法の充てん状況

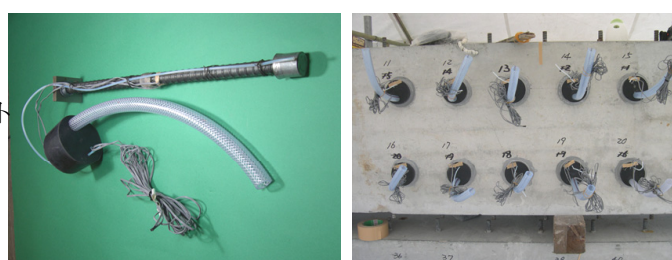
Fig.11 Results of pre-grouting

可塑性グラウトはプレミックス材料であり、施工現場では、所定量の水を混ぜてハンドミキサで混合するだけで所定の性質のものが使用できる。所要のグラウト量も少量で、手押しグラウトポンプで注入可能であるので、最小限の設備と人員での Post-Head-bar の設置が可能である。

(4) 注入準備と Post-Head-bar の配置およびグラウト後注入 (後注入工法の場合)

グラウト後注入工法の場合、図-12 に示すように、Post-Head-bar 先端定着部に空気抜きを配置した注入器具を用意し、これを削孔部分に取り付けた後に高流動性のグラウトを空気との置換えによって充てんする。この時、あらかじめ配置した Post-Head-bar が削孔の中心部に配置されるように、差込み側の矩形プレートをスペーサとして使用する。削孔内面は、グラウト注入前に湿潤状態にするかあるいはドライアウト防止剤を散布し、注入材が吸湿されないようにする。

グラウト注入時に、図-13 に示すように、空気抜き



Post-Head-bar とグラウト注入用ホース/空気抜きチューブ

Post-Head-bar を挿入し、ゴム栓を取りつける

図-12 グラウト後注入工法の器材とその配置方法

Fig.12 Equipment of pre-grouting and its method

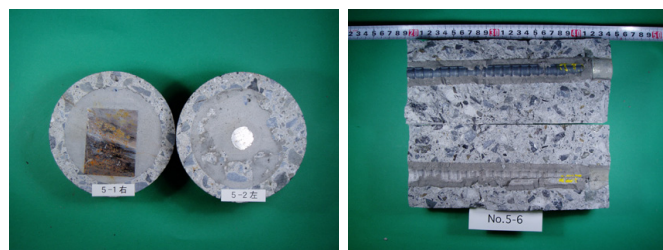


手押しポンプによりグラウトを充てんする

グラウトの充てん確認はエア抜きチューブ先端からのグラウトの漏出で確認可能

図-13 グラウト後注入工法の施工性と注入確認方法

Fig.13 Confirmation of post-grouting method



グラウト硬化後に注入口付近を切断良好に充てんされている

グラウト硬化後に先端付近を割製良好に充てんされている

図-14 グラウト後注入工法の充てん状況

Fig.14 Results of post-grouting

からの空気の排出とグラウトの流出を確認することによってグラウトの充てんを確認する。

実際に削孔内に設置した Post-Head-bar は、図-14 に示すように先端定着部から全体までグラウトが充実

表-2 断面修復材の物性

Table.2 Physical properties of repairing material

断面修復材種類	水粉体比 (%)	テーブルフロー値 (mm)	可使時間 (20°C)	固化時間	厚塗り性	硬化収縮性 (%)	熱膨張性 (1/°C)	圧縮強度 (材齢28日) (N/mm ²)	静弾性係数 (材齢28日) (×10 ⁴ N/mm ²)	コンクリートとの付着強度 (材齢28日) (N/mm ²)
ポリマーセメントモルタル	16	172	約60分	6時間15分	異常なし	0.035	1.7×10 ⁻⁵	43.9	1.92	2.37

固化時間・厚塗り性・硬化収縮性・熱膨張性は、日本道路公団「断面修復材の品質規格」における試験方法による。

圧縮強度・静弾性係数・付着強度は温度20°C、相対湿度60%の気中養生による結果である。

し、Post-Head-bar とコンクリート躯体が一体となっていることをコアボーリングによる調査により確認した。高流動性グラウトはプレミックス材料であり、施工現場では、所定量の水を混ぜてハンドミキサで混合するだけで所定の性質のものが使用できる。所要のグラウト量も少量で、手押しのグラウトポンプで注入可能であるので、先注入工法に比べれば、やや多くの器材と人員を必要とはするが、この方法によっても確実な Post-Head-bar の設置が可能であることを確認した。

(5) 仕上げ

グラウト先注入工法については、先注入の可塑性グラウトがたれない程度に抑えた後に、またグラウト後注入工法においては、グラウト栓を取り除いた後に、断面修復モルタルによって、削孔部分の充てん復旧を行なう。表-2 に断面修復材の使用と性能を示す。この断面修復モルタルも、プレミックス品であり、施工現場において必要な量を即時に練り混ぜて作ることができる。施工も左官仕上げによるので容易である。断面修復の専用モルタル材料であるので、品質の信頼性は高い。上向き施工においては、はく落防止を考慮することが必要な場合には、はく落防止性能が確認された材料によって仕上げを行なう。

5. 部材性能の確認

5.1 実験目的

今回の実験目的は以下の通りである。

(1) せん断補強筋配置後のせん断耐力評価試験

Post-Head-bar を設置することにより部材のせん断耐力が向上すること。Post-Head-bar のせん断耐力向上の効果を、土木学会

コンクリート標準示方書に示されるせん断耐力式において、通常のせん断補強筋に対する有効率を定量的に確認すること。

(2) Post-Head-bar の先端定着位置の評価

Post-Head-bar を主筋の位置まで配置した場合と、主筋手前に留めた場合では同等の補強効果が得られることの確認および、地震に対応した加力を想定した場合、Post-Head-bar と寸切り鉄筋の補強量の比較を定量的に行うこと。

5.2 試験方法

5.2.1 試験ケース

試験ケースは静的繰返し交番荷重を行ったシリーズ1と単調荷重を行ったシリーズ2に分類した。シリーズ1では、Post-Head-bar によりせん断補強を行なった梁試験体3体 (CASE1, CASE2, CASE3) および差し筋によりせん断補強を行なった梁試験体1体 (CASE4) に対して交番繰返し加力試験を行なった。

CASE1 は Post-Head-bar 先端の埋込み深さを埋込側の主筋位置とし、CASE2~CASE4 は Post-Head-bar 先端の埋込み深さを埋込側の主筋前面から 5mm 手前でとめた。また、CASE3 は CASE2 の 1.5 倍のせん断補強を行い曲げ破壊モードとした。

シリーズ2では、シリーズ1のCASE1と同じ補強条件の試験体CASE5、CASE4でPost-Head-bar先端の埋込み深さを埋込側の主筋位置にした試験体CASE6、に対

表-3 各ケースの試験体の緒元

Table.3 The factors of test specimen of each cases

実験	試験体	補強量	補強ピッチ	埋込側の先端位置	圧縮強度 (N/mm ²)
シリーズ1	CASE1	2列	D16@300×@200	主筋位置	31.2
	CASE2	2列	D16@300×@200	主筋手前	32.1
	CASE3	3列	D16@200×@200	主筋手前	32.3
差し筋	CASE4	2列	D16@300×@200	主筋手前	31.2
シリーズ2	CASE5	2列	D16@300×@200	主筋位置	47.7
	CASE6	2列	D16@300×@200	主筋位置	50.6

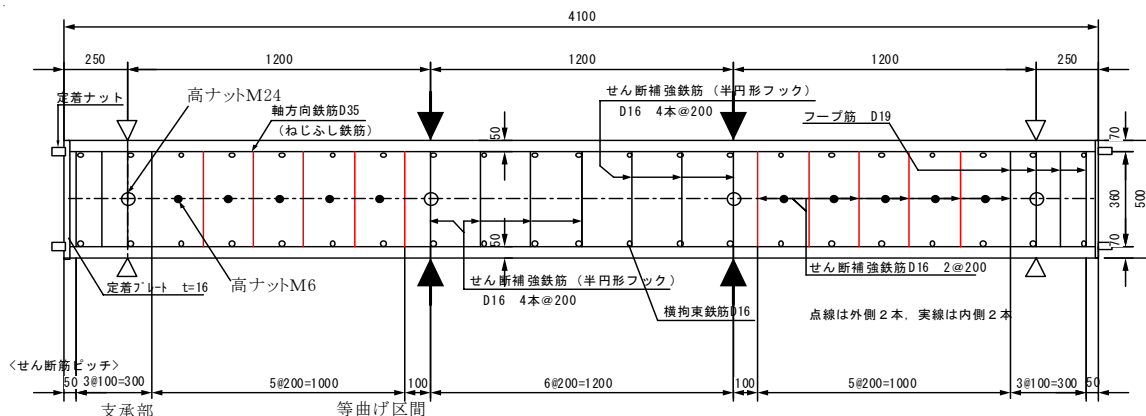


図-15 試験体一般図

Fig.15 The model of test specimen

して、単調荷重試験を行なった。

シリーズ 1 と 2 の配筋条件は同じであるが、シリーズ 1 のコンクリートの圧縮強度は約 32N/mm²、シリーズ 2 のコンクリートの圧縮強度は約 50N/mm²である。

各ケースの試験体緒元を表-3 に、試験体及び補強方法を図-15 に、荷重要領を図-16 に示す。シリーズ 1 の CASE1~CASE4 の荷重にはアクチュエータ（変位制御式）を用い、シリーズ 2 の CASE5~CASE6 の荷重には油圧ジャッキを用いた。また、各試験ケースにおける試験体断面図を図-17 に示す。

5.2.2 荷重ステップ

荷重は、CASE1~4 は静的交番繰返し荷重で各 δy ごとに 1 回づつ繰返し荷重を行った。CASE5~6 は単調漸増荷重とした。

5.2.3 計測項目

計測項目は、荷重、変位およびたわみ、区間変位、主鉄筋軸方向鉄筋および横方向鉄筋のひずみなどとした。

5.3 実験結果

5.3.1 荷重-変位関係

シリーズ 1 の実験における、Post-Head-bar を主鉄筋の位置まで配置して後施工のせん断補強を行なった梁試験体の CASE1 と、Post-Head-bar 先端の埋込み深さを主鉄筋前面から 5mm 手前に留めて配置し後施工のせん断補強を行なった CASE2 については、図-18、図-19 に示すように、荷重とスパン中央でのたわみ関係において、おおむね同じような履歴を示していた。埋込み先端位置が主鉄筋手前のほうが、わずかに大きい変形をした後に破壊した。

図-20 には、Post-Head-bar 先端の埋込み深さを主鉄筋前面から 5mm 手前に留めて配置した状態で 3 列のせん断補強を行なった試験体 CASE3 における荷重-変

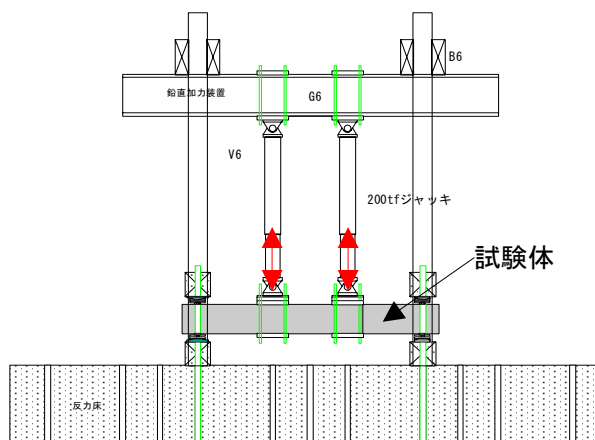


図-16 試験体荷重図

Fig.16 The loading plan of test specimen

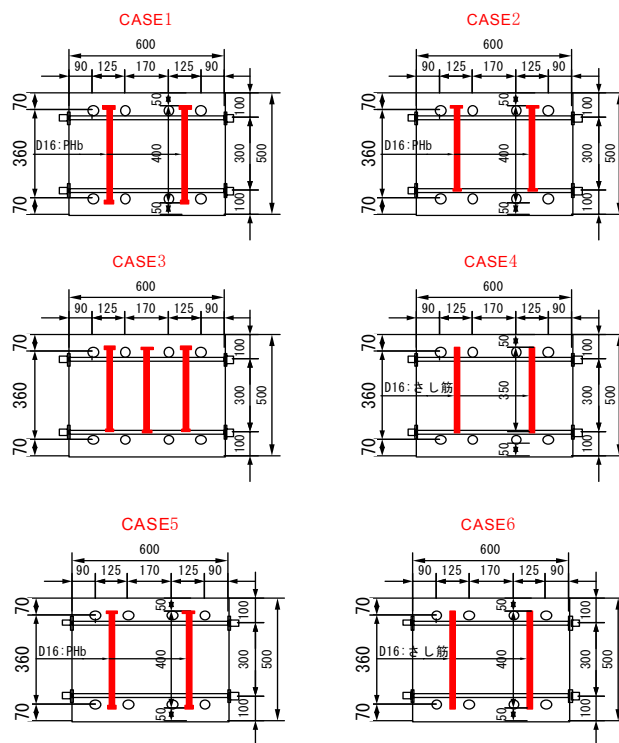


図-17 試験体断面図

Fig.17 The cross section diagram of test specimens

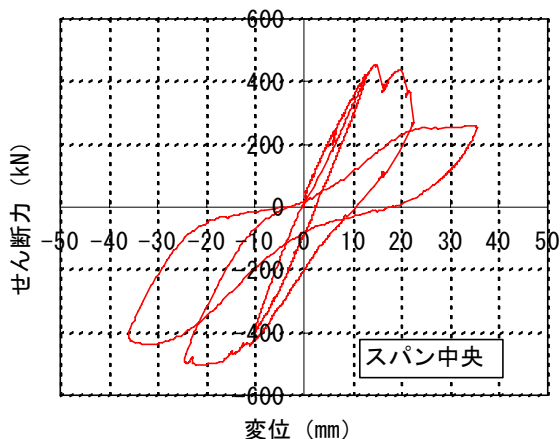
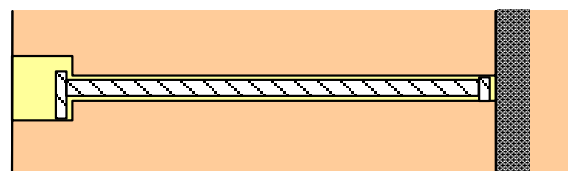
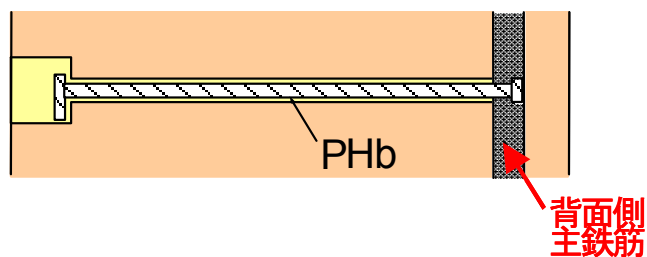


図-18 CASE1

Fig.18 CASE1

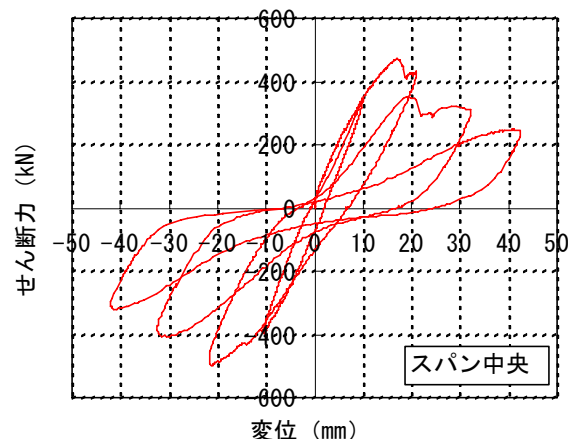


図-19 CASE2

Fig.19 CASE2

位関係を示す。Post-Head-bar を主鉄筋の手前に留めて配置した場合であっても、必要なせん断耐力以上の Post-Head-bar の補強を行なえば、梁の曲げじん性が確保できるほどの補強効果が得られた。

5.3.2 Post-Head-bar の有効性の評価

Post-Head-bar は通常の方法でせん断補強せず、既設構造物を後からせん断補強するために、土木学会コンクリート標準示方書[構造性能照査編]のせん断耐力式におけるスターラップが受け持つせん断力 V_{sd} を 100%見込むことは困難と考えられる。そこで、土木学会コンクリート標準示方書[構造性能照査編]のせん断耐力式を設計の基本として、Post-Head-bar の実験から得られたせん断耐力との比較から、Post-Head-bar によるせん断耐力の有効性を評価した。

表-4 は、Post-Head-bar 2 列により補強した状態で、Post-Head-bar がせん断降伏することによって破壊した試験体 (CASE1, CASE2, ここで CASE2 は Post-Head-bar の埋込み位置が主鉄筋の手前の場合) について、設計上のせん断耐力と実際に実験で得られたせん断耐力を比較したものである。

設計せん断耐力 V_{yd} は、土木学会コンクリート標準示方書に示される棒部材の設計せん断耐力式 ($V_{yd}=V_{cd}+V_{sd}$, V_{cd} : せん断補強鉄筋を用いない場合のせん断耐力, V_{sd} : スターラップのせん断耐力) の考え方を基本的に適用する。Post-Head-bar によって受け

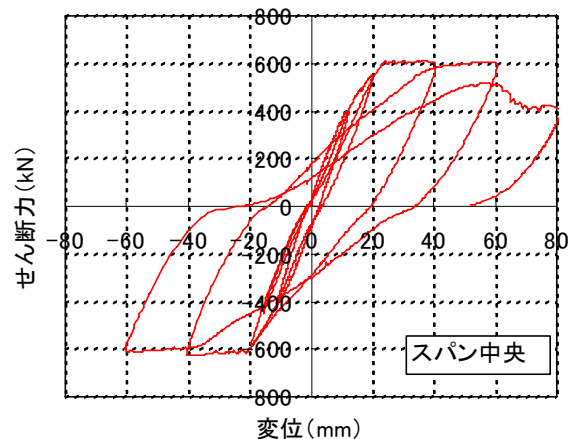


図-20 補強量大きい場合の荷重-変位関係 (ケース3)

Fig.20 The bending failure mode (CASE3)

持つせん断耐力 V_{phb} は、せん断実験によって求められたせん断耐力 V_{exp} から、コンクリートのみにより受け持つせん断力 V_{cd} を差し引いて求められる。

単調載荷実験の結果も併せて、せん断補強に Post-Head-bar を用いた場合と差し筋を用いた場合の、せん断耐力に対する寄与分の評価を行った。

評価はせん断耐力: V_y のうちコンクリートによる寄与分: V_c をコンクリート標準示方書のせん断耐力式より算定し、実験結果によるせん断耐力 V_y より V_c を差し引き、実験時におけるせん断補強筋のせん断耐力分担分を算定し、計算によるせん断筋の分担分と比較することにより行った。

表-4 実験結果比較

Table.4 Comparison of experimental results

実験ケース		試験体緒元			実験せん断耐力(kN) V _{exp}	設計耐力(kN) (安全係数:1.0) (V _{yd} =V _{cd} +V _{awd})			PHb受持せん断耐力 V _{phb}	計算値 曲げ耐力 (kN)	有効係数 β _{aw}	寸切りによる β _{aw} 低減
		P-H-b 補強量	P-H-b 先端 深さ			V _{cd}	V _{awd}	V _{yd}				
交番 載荷	CASE1	P-H-b	2列	主筋位置	480	229	285	514	251	648	0.88	0.67
	CASE2	P-H-b	2列	主筋手前	486	230	286	516	256	648	0.90	
	CASE4	寸切り	2列	主筋手前	396	229	276	505	166	648	0.60	
単調 載荷	CASE5	P-H-b	2列	主筋位置	550	264	278	541	286	650	1.03	0.75
	CASE6	寸切り	2列	主筋位置	486	269	280	549	217	643	0.77	

表-4には、交番載荷試験・単調載荷試験の各々の試験によって得られた Post-Head-bar 補強試験体と寸切り鉄筋補強試験体の耐力と、これから算定したせん断補強鉄筋の有効係数 β_{aw} を示す。これは、せん断耐力 V_{yd} のうち V_{cd} をコンクリート標準示方書式(安全係数・材料係数:1.0)を用いてを求め、後施工せん断補強による耐力の増大分 V_{phb} をコンクリート標準示方書式から求まる V_{awd} との比率として算出したものである。

Post-Head-bar 補強試験体と寸切り鉄筋補強の効果を比較すると、単調載荷の場合においては、Post-Head-bar の有効率が 1.00 以上であるのに対して寸切り鉄筋では 0.75 に低下している。しかしながら、交番繰返し加力を行なった場合には、Post-Head-bar 補強において、有効率が 0.90、寸切り鉄筋で 0.60 と両者ともに、単調載荷の場合に比べ低下している。

地震時に相当する交番繰返し載荷試験の結果より、Post-head-bar と寸切り鉄筋補強の場合の有効係数 β_{aw} の比は 1:0.67 となった。地震の作用に対応した加力を想定した場合、Post-Head-bar が寸切り鉄筋に対してより有効となることが明らかである。いいかえれば、Post-Head-bar と同じせん断補強効果を期待するならば、後施工するせん断鉄筋量は、寸切り鉄筋を使用すると 1.5 倍必要になるという結果が得られた。

単調載荷の場合、交番載荷に対して耐力の絶対値が大きく、また Post-Head-bar に対する寸切り鉄筋の耐力低下比率が小さくなるが、実際の地震加力は、当然のことながら交番作用となるので、この観点からも Post-Head-bar が有効であることが推察される。

5.3.3 Post-Head-bar の補強設計方法

Post-Head-bar の有効係数を考慮した補強設計方法を以下に示す。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{phb}$$

$$V_{phb} = \beta_{aw} V_{awd}$$

$$= \beta_{aw} [A_{aw} f_{awyd} (\sin \alpha_{aw} + \cos \alpha_{aw}) / S_{aw}] z / \gamma_b$$

ここに、V_{cd}:せん断補強鋼材を用いないせん断耐力

V_{sd}:既存のせん断補強鋼材により受け持たれるせん断耐力

V_{phb}:Post-Head-barにより受け持たれるせん断耐力

V_{awd}:Post-Head-barを通常のスターラップとみなして受け持たれるせん断耐力

β_{aw}:Post-Head-barのせん断耐力向上への有効性をあらわす係数(0.8とする)

A_{aw}:単位長さあたりの区間 S_{aw}における Post-Head-barの総断面積

f_{awyd}:Post-Head-barの設計降伏強度で 400N/mm²以下とする

α_{aw}:Post-Head-barが部材軸となす角度

S_{aw}:Post-Head-barの配置間隔

z:圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で一般に d/1.15

γ_b:一般に 1.10 としよ

5.4 Post-Head-bar と寸切り鉄筋の相違に関する考察

5.4.1 鉄筋先端定着不良に基づくせん断耐力算定法

Post-Head-bar と寸切り鉄筋による補強の相違を、アルカリ骨材反応を受けて破断したせん断補強鉄筋のせん断耐力評価に用いたのと同じ方法(参考文献:土木学会アルカリ骨材反応対策小委員会報告書, 2005.9)により検討した。

スターラップが破断した場合は、定着不良が生じ斜めひび割れに交差する鉄筋がすべりなどの影響で、定着区間において全強度を発揮できないために、せん断補強効果が低下すると考えられる。この効果を以下のように考慮し、定着不良が生じた場合のせん断耐力をトラスモデルにより評価している。

鉄筋降伏時の定着長さは、式(1)で示される。

$$l_y = \phi \frac{f_{wy}}{4f_{bok}} \quad (1)$$

ここで、l_yは定着長さ、f_{wy}はスターラップの降伏応力、φはスターラップ径、f_{bok}は付着強度である。

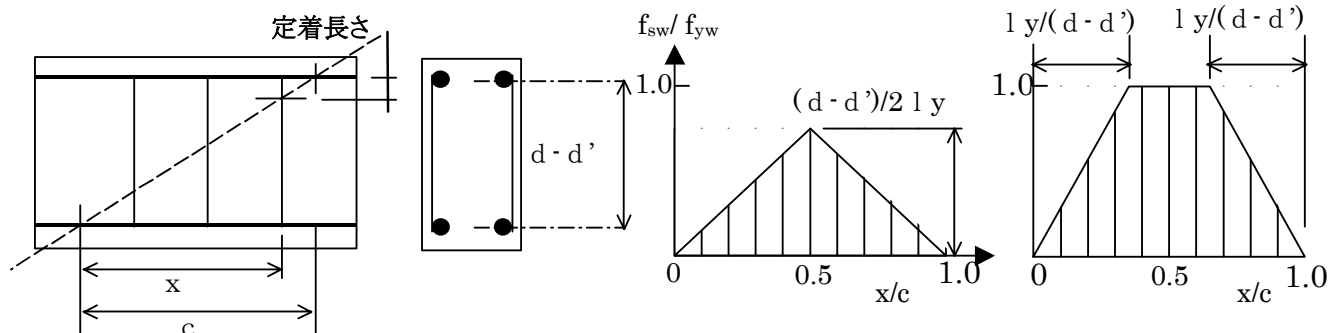


図-21 斜めひび割れ内の破断したスターラップ応力

Fig.21 Stress of broken stirrup caused by shear cracks

斜めひび割れに交差するスターラップを考えたとき、斜めひび割れが破断位置にある場合は、そのスターラップは応力を負担することができず、一方、破断位置から定着長さ l_y だけ離れたスターラップの位置では、付着作用により十分な定着性能が確保されていると判断され降伏応力を発揮できると仮定できる。また破断位置から定着長さ l_y 以下の範囲にある場合には、応力は負担できるが定着性能が低下しているため、一部の応力のみが負担できると仮定した。その場合、定着長さによって伝達できる応力を線形で仮定したのが図-21に示す概念図である。この仮定に基づけば、平均化した破断した鉄筋の負担応力 (ηf_{wy}) は、応力低下率を η として次式で表すことができる。

$$\eta = \frac{d-d'}{4l_y} \quad \text{if } (d-d') \leq 2l_y \quad (2)$$

$$\eta = 1 - \frac{l_y}{d-d'} \quad \text{if } (d-d') \geq 2l_y$$

一部のせん断補強鉄筋のみが破断している場合には、その破断割合 α を考慮すると、破断したスターラップを含む有効せん断補強効果割合 γ は式(3)となり、せん断補強効果は式(4)で表すことができる。

$$\gamma = \eta \alpha + (1 - \alpha) \quad (3)$$

$$\rho_{w,eff} f_{wy} = \rho_w f_{wy} (\eta \alpha + (1 - \alpha)) \quad (4)$$

最終的にスターラップを有する部材のせん断耐力を、トラス理論に基づきコンクリート標準示方書式で評価した。

5.4.2 Post-Head-bar と寸切り補強のせん断有効率 β の算定

式(3)の有効せん断補強効果率 β_{aw} を、コンクリート標準示方書に記載されている方法に適用した場合に

妥当な結果が得られるかを、ここで行なったはり試験の条件について検討した。

検討に際しては、付着強度はコンクリート標準示方書内に記載されている式(5)を用い、せん断耐力はせん断補強鋼材が配置されていない場合のせん断耐力 (V_c) と、圧縮斜材の角度を 45 度と仮定した古典的トラス理論に基づくせん断補強鋼材に受け持たれるせん断力 (V_s) の和として表した。 V_c については示方書式を用いた (いずれについても安全係数・材料係数: 1.0)。また Post-Head-bar の応力低下率 η の計算には式(6)を用いた。

式(6)は式(2)の第2項の $l_y/(d-d')$ に係数 1/2 を乗じたものであるが、これは、Post-Head-bar の矩形プレート側においては、せん断補強鉄筋材端までせん断耐力に対して有効に作用できるとの仮定によるものである。

$$f_{bok} = 0.28f'_c{}^{2/3} \quad (5)$$

$$\eta = 1 - (l_y / (d-d')) / 2 \quad (6)$$

ただし、普通丸鋼の場合は 40%の値を用る。

土木学会コンクリート標準示方書を適用する場合は、 V_s を算定する際に式(3)の有効せん断補強効果率 β_{aw} を乗じて、せん断補強効果のみを低下させることとした。今回の実験結果に土木学会コンクリート標準示方書に記載されている方法を適用した場合の評価結果を表-5に示す。

ここで、Post-Head-bar を用いて補強したはりでの計算においては、Post-Head-bar 先端の定着特性に関する実験結果から定着長を 5D とし、寸切り筋を用いて補強したはりでの計算においては、アルカリ骨材反応対策小委員会の検討結果(前出)を参照して定着長を両端 9D とし、各々計算を行った。

これらの前提に基づいて計算したせん断耐力 V_u, cal

表-5 鉄筋先端定着不良に基づくせん断耐力算定法の適合性

Table.5 Compatibility of the shearing yield computation method which is based on the steel bars anchorage malfunctions

実験ケース	試験体緒元		Vc (kN)	fbok (N/mm ²)	ly (mm)	d-d' (mm)	η	α	β	Vs (kN)	Vu,cal (kN)	Vu,exp (kN)	Vu,cal/Vu,exp
	P-H-b 補強量	P-H-b 先端深さ											
交番 載荷	CASE1	P-H-b 主筋位置	229	2.8	96	430	0.89	1	0.89	253	483	480	1.01
	CASE2	P-H-b 主筋手前	230	2.8	96	430	0.89	1	0.89	253	484	486	1.00
	CASE4	寸切り 主筋手前	229	2.8	144	360	0.60	1	0.60	166	395	396	1.00
単調 載荷	CASE5	P-H-b 主筋位置	264	3.1	96	430	0.89	1	0.89	247	510	550	0.93
	CASE6	寸切り 主筋位置	269	3.8	144	360	0.60	1	0.60	168	437	486	0.90

は、実験で得られたせん断耐力 Vu, exp と、交番載荷試験については同等になった。ここで得られたせん断補強効果の係数 β_{aw} は妥当な値であるものと推察される。単調載荷の場合には、交番載荷試験に比べて、せん断耐力そのものが大きく評価されているので、計算したせん断耐力 Vu, cal は実験で得られたせん断耐力 Vu, exp よりも小さく見積もられている。

5.5 Post-Head-bar の有効係数に及ぼす影響要因

本実験の結果については、(2)に示す式がよく適合することがわかったので、この式を用いて、関係パラメータのうち、部材の厚さおよび Post-Head-bar の径が有効係数に及ぼす影響を検討した。部材の厚さは 300mm から 1500mm の範囲で変化させた。Post-Head-bar の径については、先端定着性能試験（付属資料-3）において先端定着性能を確認（鉄筋全強定着可能を確認）している D16、D19、D22、D25 の 4 種類とした。これらを組み合わせて変化させて算出した β_{aw} を図-22 に示す。部材厚が大きくなれば、有効係数 β_{aw} は大きくなる傾向にあり、壁厚 1500mm ではおよそ 0.95 となる。部材の大きさが大きい時には Post-Head-bar の径は β_{aw} の大小に影響しないが、壁厚が小さい場合には、Post-Head-bar の径が大きいほうが β_{aw} が小さくなる傾向が顕著となることが明らかとなった。

6. まとめ

Post-Head-bar は背面に地盤などがあり、片側からしか施工できない狭窄な空間や複雑な部位において、大型機材によらずに短時間に施工でき、作業が容易であり、施工性において非常に有効な補強方法である。

またその補強効果も、従来の差し筋補強と比較して、非常にせん断補強効果の高い補強工法であることが今回の開発によって明らかとなった。

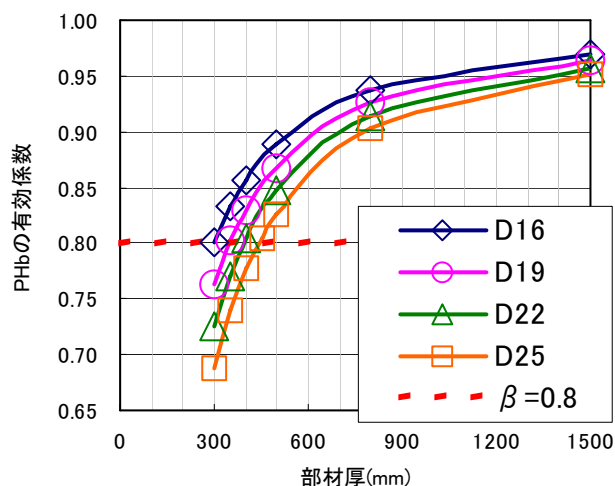


図-22 有効係数の部材厚による変化

Fig.22 The change of effective factor with the component thickness

参考文献

- 1) 土木学会：土木学会アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，コンクリートライブラリー-124 pp. II-91～II-96，2005.9
- 2) 土木研究センター：プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」，建設技術審査証明報告書，2005.12
- 3) 土木学会編：コンクリート標準示方書「構造性能照査編」，2002，pp.66-69
- 4) 田中良弘，加納宏一，趙唯堅，：プレート定着型せん断補強鉄筋のコンクリート拘束効果，JCI，Vol22，No.3，2000，pp.583-588