

後施工プレート定着型せん断補強鉄筋による 耐震補強工法の展開

Post-Head-bar 工法の施工実績と適用範囲の拡大

岡本晋^{*1}・三桶達夫^{*1}・堀口賢一^{*1}・岡本修一^{*2}・中條基^{*3}・府川徹^{*3}

Keywords : existing structures, seismic reinforcement, shear reinforcement, Post-Head-bar, application example, large-diameter reinforcing bar; high-strength reinforcing bar

既設構造物、耐震補強、せん断補強、後施工プレート定着型せん断補強鉄筋、施工例、太径鉄筋、高強度鉄筋

1. はじめに

1980 年以前の土木学会コンクリート標準示方書にしたがって設計された構造物では、せん断補強鉄筋の許容応力度を大きく見積もっていたため、せん断補強鉄筋量が少なく、当時の設計上で曲げ破壊モードとなるはずが、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、1995 年兵庫県南部地震以前の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、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・じん性能が不足することが懸念されている。

一方、2005 年に中央防災会議で東海地震および東南海・南海地震に対する「地震防災戦略」¹⁾が策定され、これを受け 2006 年度に「下水道地震対策緊急整備事業」²⁾が定められ、下水道地震対策が緊急かつ重点的に推進されつつある。

しかし、背面が地盤に接する供用中の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、施工上の制約などから実際にせん断補強を行なうことが難しいのが現状である。

このような状況の中、既に国内外で 1,700 万本以上の使用実績がある既開発の「Head-bar」（プレート定着型せん断補強鉄筋、建技審証 第 0408 号）³⁾の技術を応用して、従来方法では補強が難しいとされていた、背面に地盤などがある供用中の既設構造物に対して、図-1 に示すように部材の片側（内空側）からの施工

が可能で、かつせん断耐力を効率的に向上させることができる後施工タイプのせん断補強工法（以下、Post-Head-bar 工法と称する）^{4)~7)}を開発した。この工法は既設構造物の表面から削孔した孔内に、両端を特殊処理した Post-Head-bar を差しこみ、モルタル充てん材により固定することで構造躯体と一体化させ、部材のせん断耐力とじん性の向上を図るものである。

Post-Head-bar は既に建設技術審査証明（後施工プレート定着型せん断補強鉄筋、建技審証 第 0522 号）⁸⁾を取得しており、この中で SD295・SD345 の D16・D19・D22 に適用できることが証明されている。

Post-Head-bar を用いた耐震補強工法は 2007 年度から実物件に適用されており、2008 年 3 月までの実施適用物件についてその概要を既に報告⁹⁾しているが、ここでは 2009 年 4 月までの実施適用物件について報告する。

また、Post-Head-bar 工法の更なる効率化を図るために実施した、太径の鉄筋¹⁰⁾や高強度の鉄筋¹¹⁾を使用した場合の設計法を確立するための、壁を模したはり状試験体の正負交番載荷試験結果について報告する。



図-1 補強対象構造物の例

Fig.1 Example of objective structures

*1 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室

*2 土木本部土木技術部

*3 成和リニューアルワークス(株)

2. Post-Head-bar 工法の適用実績

2.1 Post-Head-bar 工法の施工手順

図-2に横向き施工の標準的な施工手順を示す。

2.1.1 削孔の位置出し

RC レーダなどを使用し、図-3に示すように内空側の主鉄筋・配力鉄筋を避けた場所に Post-Head-bar 設置用の削孔位置を定める。

2.1.2 削孔

最初に、Post-Head-bar を奥側主鉄筋位置まで挿入するための削孔を行い、続いて、手前側の矩形プレートが設置される部分の拡大削孔を行う。

削孔は図-4に示すベンチャードリルにより行うことを標準とする。その他に、特殊コアドリルなどによる削孔も、作業空間等の制約条件に応じて採用することが可能である。削孔にベンチャードリルを使用した場合の主な利点は、①切削ではないので鉄筋を切断しない、②削孔に水を使用しない、③集塵機使用により削孔中の粉塵発生を極力抑えることが可能、④制御部が軽量小型であり人力による取扱いが容易、⑤ロッド

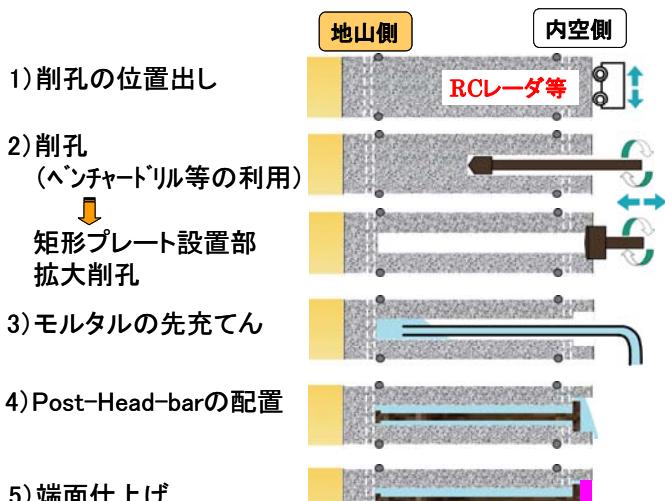


図-2 施工手順

Fig.2 Reinforcement steps

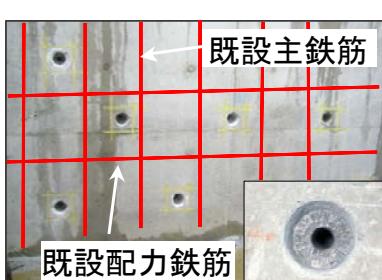


図-3 削孔位置および削孔状況

Fig.3 Location of holes

長を短くすることにより、さらに狭い空間での施工が可能、⑥削孔速度が速い、である。

2.1.3 モルタルの先充てんと Post-Head-bar の配置

削孔後、図-5に示すように孔内清掃を行うとともに図-6に示すように孔内湿潤を行う。

孔内清掃・湿潤後、図-7に示すようにホースの先端から PHb モルタルを削孔内に完全に充てんした後、図-8に示すように Post-Head-bar を挿入し余分に漏れたモルタルを除去することにより、Post-Head-bar の設置を完了する。PHb モルタルは、Post-Head-bar 専用に開



図-4 ベンチャードリル

Fig.4 Drilling machine



図-5 孔内清掃

Fig.5 Cleaning of holes



図-6 孔内湿潤

Fig.6 Humidification of holes



図-7 モルタルの充てん

Fig.7 Filled by mortar

発されたプレミックス材料である。施工現場では、所定量の水に投入し混練することにより所定の性能を發揮することができる。

2.1.4 端面仕上げ

最後に、図-9に示すように、断面修復材によって、拡大削孔部の充てん復旧を行う。この断面修復材もプレミックス材料であり、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。



図-8 Post-Head-bar の挿入

Fig.8 Insert Post-Head-bar to hole filled by mortar

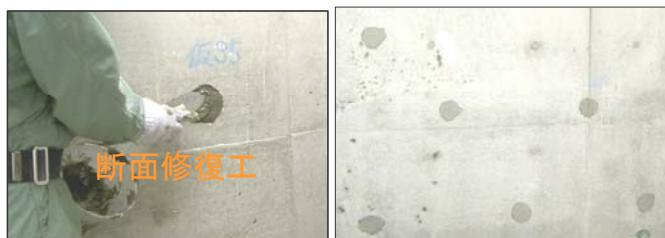


図-9 拡大削孔部の充てん（断面修復材使用）

Fig.9 Restore of surface by restoration mortar

2.2 適用構造物

後施工プレート定着型せん断補強鉄筋（Post-Head-bar）を用いた耐震補強工法は、2007年浄化センターの地下構造物の壁・床版に適用したのを皮切りに2009年4月までに表-1に示すように30件の工事に適用されており、施工中のものを含めて合計42,000本以上の実績がある。

施工実績の内訳を見ると、下水処理場関連施設（浄化センター・ポンプ場）が施工件数の7割を占めている。その他、浄水場、水門、道路・鉄道トンネルなどに適用されている。

対象部位と施工方向は壁の横向き施工と床版の下向き施工が多い。

対象部材厚さは、最大で水門の底版の3,000mmのものがあるが、これを除けば400mm～1,800mmの範囲となる。

表-1 施工実績(2009年4月現在)

Table1 Number of application

対象施設		施工件数	対象部材	Post-Head-barの鉄筋径
道路	空港アクセス地下道	1件	壁	D22
浄化センター	最終沈殿池他	13件	壁、床版はり	D16, D19, D22
ポンプ場	ポンプ室他	8件	壁、床版はり	D16, D19, D22
鉄道	地下駅舎部	2件	壁	D22
	トンネル部	2件	壁	D16, D22
浄水場	配水池他	2件	壁、床版	D16
水門	津波対策用防潮水門他	2件	壁、床版	D22

施工中案件を含む 合計：30件 42,000本以上

2.3 実施工状況

表-1に示した施工実績のうち、代表例として新千歳空港の地下道耐震対策工事にPost-Head-barを適用した例¹²⁾について、施工状況を図-10に示す。この例では、地盤改良による方法、部材厚を厚くする方法、部材のせん断耐力を高める方法を検討した結果、道路車線数を確保しつつせん断耐力を確保できる方法として、部材のせん断耐力を高める方法であるPost-Head-bar工法が採用された。

また、別工事ではあるが、図-11に下向き施工状況と狭隘部における施工状況を示す。Post-Head-bar工法はこのように下向き施工、狭隘部での施工にも対応できる工法である。



(a) 削孔状況

(b) 施工終了時の状況

図-10 Post-Head-bar の施工事例

Fig.10 Example of application

3. 太径鉄筋と高強度鉄筋のPost-Head-barを適用した場合の性能確認

3.1 太径・高強度のPost-Head-barの必要性

Post-Head-bar工法は、建設技術審査証明で適用範囲がSD295・SD345のD16・D19・D22と規定されてい



図-11 下向き・狭隘部における施工状況

Fig.11 Examples of application

る。しかし、より太径の Post-Head-bar や高強度の Post-Head-bar が使用できれば、1 本当たりのせん断補強性能が上がり、施工本数を減らすことから施工費を含めたトータルコストが安くなる。また、主鉄筋や配力鉄筋が輻輳している場合など、SD345・D22 の Post-Head-bar を使用しても必要本数を設置することが困難な状況であっても、より太径や高強度の Post-Head-bar を使用できれば適用範囲が広がる可能性が出てくる。

そこで、コストダウン・適用範囲の拡大を目指して、これまでの SD345 より高強度の Post-Head-bar や D22 より太径の Post-Head-bar を適用した場合の性能を検証した。

3.2 太径・高強度鉄筋の Post-Head-bar を適用した部材の載荷試験

3.2.1 対象とする太径・高強度鉄筋の範囲

本工法が既設地下コンクリート構造物の耐震補強で使用されることから、補強対象構造物の一般的な鉄筋径を考慮して、太径鉄筋としては D25・D29・D32 を対象とする。また、高強度鉄筋としては、コンクリート標準示方書¹³⁾の「せん断補強鉄筋の設計降伏強度を

400N/mm²以下に制限する」という規定から SD390 を対象とした。なお、ここでは太径で高強度鉄筋による Post-Head-bar も対象に含む。

3.2.2 試験ケースと試験体

表-2 に試験ケースを、図-12 に試験体の一例として標準配置の試験体を示す。標準配置のケースでは太径鉄筋として SD345 の D29 を使用して、Post-Head-bar の間隔が有効高さの半分以下となる範囲でせん断破壊先行となるように、せん断スパン 2m の区間に Post-Head-bar を 35cm ピッチで 2 本づつ、12 本配置した。また、標準配置 1 と標準配置 2 では 3.2.3 に示すように加力方法が異なる。

高強度のケースでは、SD390 で D25 の Post-Head-bar を図-12 における Post-Head-bar の設置位置に配置した。

補強鉄筋なしのケースではせん断スパンの区間 ($L=2m$) にはせん断補強鉄筋を配置しなかった。

せん断スパンが短いケースではせん断スパンを 1.45 m とし、この区間に Post-Head-bar を 35cm ピッチで 2 本づつ、8 本配置した。

千鳥配置のケースでは、せん断スパン 2m の区間に Post-Head-bar の設置位置を部材軸方向に交互にずらし千鳥で 11 本配置した。

なお、試験体のコンクリートの圧縮強度はケース毎

表-2 試験ケース

Table2 Test cases

ケース名	Post-Head-barの有無	Post-Head-barの呼び径	Post-Head-barの種類(強度)	せん断スパン比	Post-Head-barの配置方法
標準配置 1	有	D29	SD345	2.7	平行
標準配置 2		D25	SD390		
高強度		—	—	—	
補強鉄筋なし	無	—	—	2.0	平行
せん断スパン短	有	D29	SD345		
千鳥配置	—	—	—	2.7	千鳥

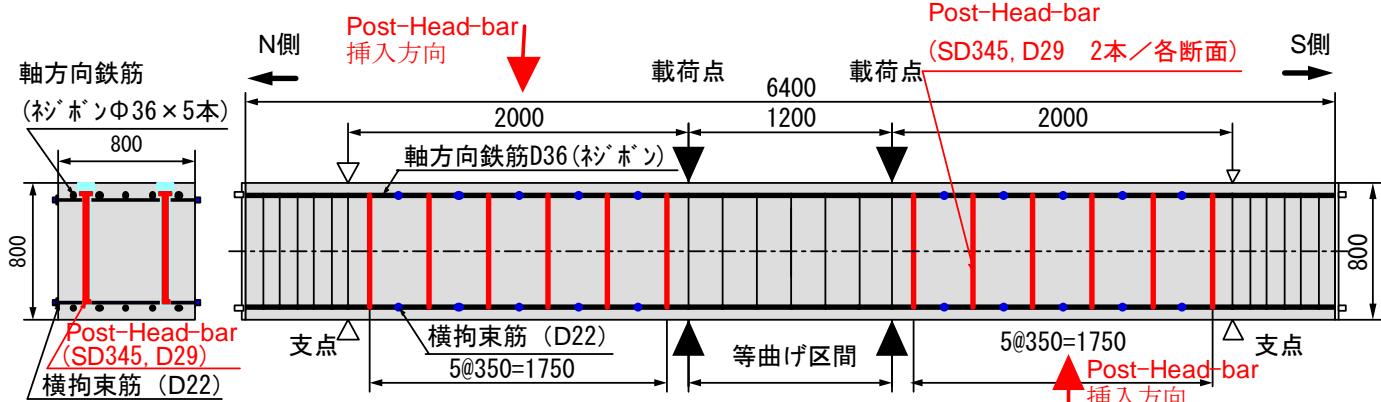


図-12 試験で使用した壁を模したはり状試験体（標準配置の試験体）

Fig.12 An example of test specimen

に異なり、 $31.1\text{N/mm}^2 \sim 38.3\text{N/mm}^2$ であった。

また、Post-Head-bar は載荷方向により性能が異なることがないように、N 側では上側から挿入し、S 側では下側から挿入した。

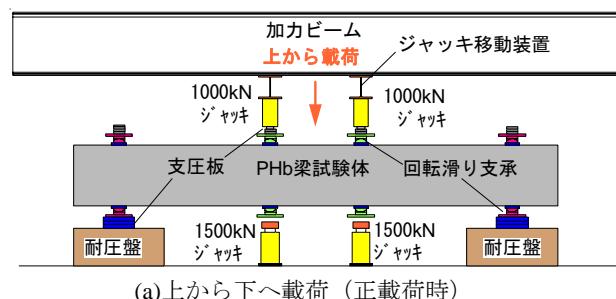
さらに、Post-Head-bar は、試験体を横倒しにして、横向きで施工し PHb モルタルを使用して固定し、断面修復材は使用していない。

3.2.3 載荷方法

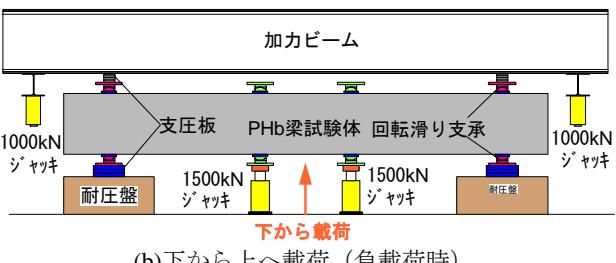
試験は、2点支持・2点載荷の正負交番で実施した。図-13 に載荷方法を示す。上から載荷する場合（以下、正載荷と呼ぶ）は、1000kN ジャッキ 2台で加力ビームに反力を取り載荷した。下から載荷する場合（以下、負載荷と呼ぶ）は、床置きの 1500kN ジャッキ 2台で

載荷した。

標準配置 1 のケースでは、Post-Head-bar の正負の降伏荷重まで載荷し、その時の降伏変位 δ_y をもとに、 $2\delta_y$, $3\delta_y$ と載荷したところ、図-15 に示すように、せん断スパン中央から載荷点に向かうひび割れが卓越し、標準配置 2 のケースよりも最大荷重が小さくなつた。その後実施した標準配置 2、高強度、せん断スパン短、千鳥のケースではコンクリート標準示方書式で部材係数 γ_b を 1.0 とした場合のせん断耐力の 70%まで正負交番で載荷した後、正負それぞれ最大荷重まで載荷した。また、補強鉄筋なしのケースでは予測された V_c の $1/4$, $1/2$ まで正負交番で載荷した後、正負それぞれ最大荷重まで載荷した。



(a) 上から下へ載荷 (正載荷時)



(b) 下から上へ載荷 (負載荷時)

図-13 載荷方法
Fig.13 Loading method

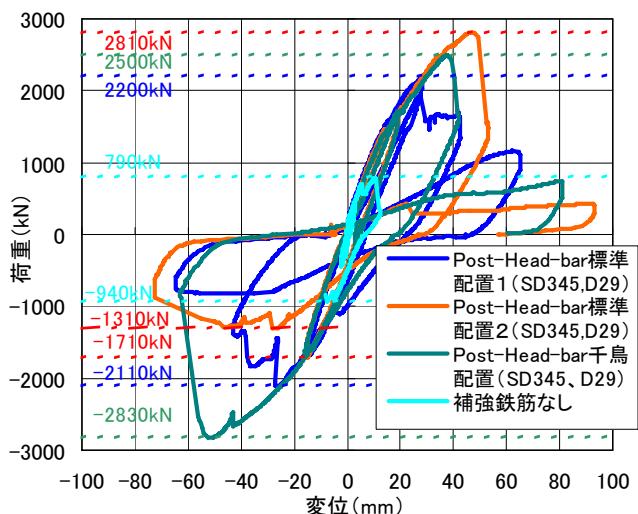


図-14 太径鉄筋を利用した場合の載荷履歴

Fig.14 Force-displacement relation using large diameter Post-Head-bar

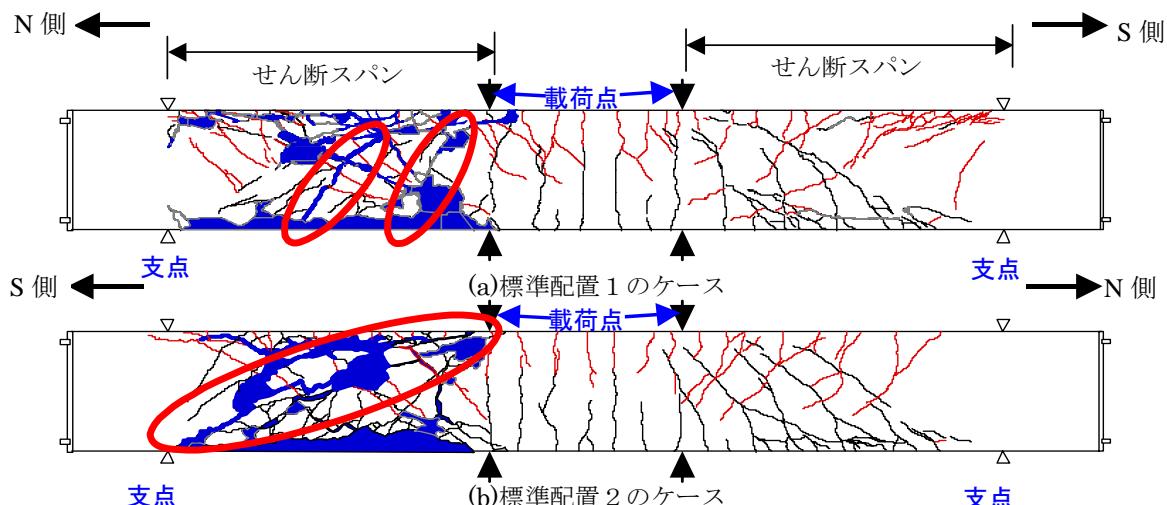


図-15 太径鉄筋を利用した場合の試験終了時における試験体の状況
Fig.15 Comparison of test specimens after loading using large diameter Post-Head-bar

3.2.4 試験結果

(1) 太径 (D29) の Post-Head-bar を使用した場合の基本的挙動

太径 (D29) の Post-Head-bar を使用した場合の基本的挙動として、標準配置 1, 2, 千鳥配置および補強鉄筋なしの結果を比較する。

各ケースの載荷履歴を図-14 に示す。せん断補強なしの場合、最大荷重が 940kN であったのに対し、標準配置 1 では 2200kN、標準配置 2 では 2810kN、千鳥配置では 2830kN であり、いずれも最大荷重時にせん断破壊が生じた。

正載荷後の負載荷では、特に標準配置 2 のケースで耐力が増えず、1310kN がピークとなった。この値は Post-Head-bar が 100% 有効に働くと考えた時に、せん断クラックが 45° 方向に生じた場合のせん断耐力 1752kN の約 75% で、Post-Head-bar 自体が有効に働いていないと考えられる。

また、図-15 に標準配置 1 と標準配置 2 の試験終了時の試験体のひび割れ発生状況を示す。標準配置 2 のケースでは正載荷時に支点から載荷点に向けて発生

したせん断ひび割れが卓越しているのに対して標準配置 1 のケースではせん断スパン中央から載荷点に向けて発生したせん断ひび割れが卓越していた。標準配置 1 のケースではせん断ひび割れがまたぐせん断補強鉄筋の本数が少なかったため最大荷重が標準配置 2 や千鳥配置のケースを下回ったものと考えられる。

(2) せん断スパン比の影響

太径 (D29) の Post-Head-bar を使用した標準配置 2 のケースをせん断スパン比を変更したせん断スパン短のケースと比較して図-16 に載荷履歴を示す。

せん断スパン比が 2.0 のケースでは、2.7 のケースに比べて剛性が大きく変形量が小さくなる。また、最大荷重 2610kN は、図-13 に示したせん断スパン比が 2.7 の場合における最大値 2200~2830kN の範囲に入っており、せん断スパン比が 2.7 から 2.0 に減少しても最大荷重には大差は見られなかった。

(3) 高強度 (SD390) の Post-Head-bar を使用した場合の挙動

高強度 (SD390) で D25 の Post-Head-bar を使用したケースを標準配置 1, 標準配置 2 およびせん断補強な

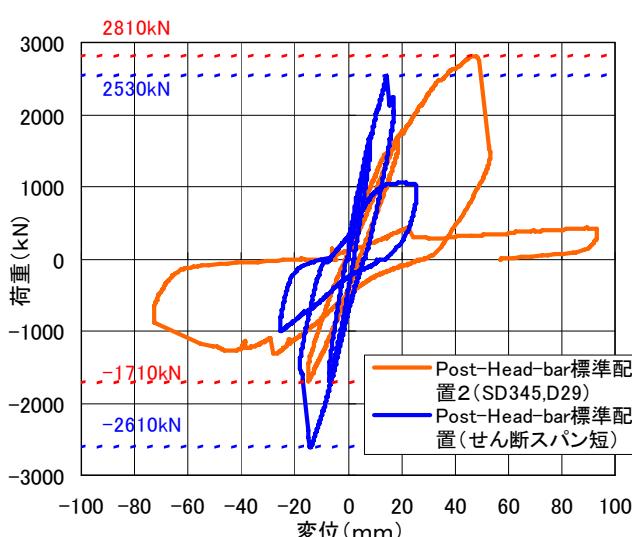


図-16 せん断スパン比の影響

Fig.16 Influence of shear span ratio

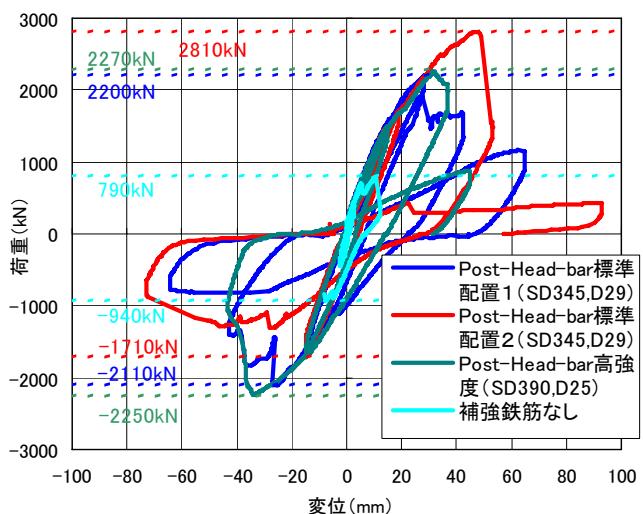


図-17 高強度鉄筋を利用した場合の載荷履歴

Fig.17 Force-displacement relation using high strength Post-Head-bar

表-3 有効係数の比較
Table3 Comparison of effective factor

ケース名	Post-Head-bar の仕様	せん断耐力 (kN)					有効係数 $V_y, \exp - V_c$ V_s	
		示方書式 (安全係数 1.0)			試験結果			
		コンクリート (V_c)	せん断補強鉄筋 (V_s)	合計 (V_c+V_s)	V_y, \exp			
標準配置 1	SD345	D29	404	937	1340	2.32	1100 0.74 0.95	
標準配置 2			389	876	1265	2.25	1405 1.16	
高強度	SD390	D25	407	807	1214	1.98	1135 0.90	
せん断スパン短	SD345	D29	397	876	1274	2.20	1305 1.04	
千鳥配置			395	876	1271	2.22	1415 1.16	

しのケースと比較して図-17に載荷履歴を示す。高強度のPost-Head-barで補強したケースでは、ピーク荷重が2270kNとなり、標準配置1のケースとほぼ同等となった。

3.2.5 各ケースのせん断耐力への有効性を表す有効係数の比較

表-3に補強鉄筋がないケースを除く5ケースのせん断耐力への有効性を表す有効係数を示す。有効係数とはそれぞれ同強度で同一の断面を有する鉄筋を先施工によりせん断補強した場合の耐力に対するPost-Head-barを用いて後施工で補強した場合の耐力の比であり、以下の式で算出した。

$$\text{有効係数} = (V_{y,\text{exp}} - V_c) / V_s$$

ここで、 $V_{y,\text{exp}}$ としては、載荷試験による正負の最大荷重のうち、大きなほうの値を使用した。 V_c と V_s は、コンクリート標準示方書¹³⁾の、それぞれコンクリートのせん断耐力とPost-Head-barが先施工のせん断補強鉄筋として100%有効に働くものと考えた時のせん断耐力の計算値を示す。なお、 V_s の計算に当り、ここでは、載荷試験の結果を評価するために設計で考慮する部材係数 γ_b は1.0として計算した。

有効係数は、SD295・SD345でD16・D19・D22のPost-Head-barに対しては、建設技術審査証明⁸⁾で0.8と定められている。

せん断補強鉄筋としてSD345・D29のPost-Head-barを使用した場合は、配置方法、せん断スパン比にかかわらず、有効係数は0.74～1.16となっており、標準配置1だけは0.8を下回っている。しかし、実際の設計においては、部材耐力の計算上の不確実性、部材寸法のばらつきの影響、部材の重要度などを考えて部材係数を設定することになる。そこで、実設計と同様に建設技術審査証明⁸⁾で規定されている部材係数(1.1)を考慮すると有効係数は $0.74 \times 1.1 = 0.81$ となると考えられる。したがって、このケースでも設計上有効係数は少なくともD22以下のPost-Head-barに対して使用される0.8以上であると考えられる。なお、標準配置1と標準配置2における有効係数の平均値は0.95となった。また、SD390・D25の高強度鉄筋を使用した場合も、有効係数が0.90であり0.8以上となった。

したがって、建設技術審査証明で規定されているSD345以下、D22以下のPost-Head-barで用いる有効係数(0.8)を太径鉄筋・高強度鉄筋にも適用できることが明らかとなった。

4. まとめ

後施工タイプのプレート定着型せん断補強鉄筋(Post-Head-bar)を用いた耐震補強工法は、既設地下コンクリート構造物を後施工でせん断補強することにより、その耐震性を確実に向上させることができる工法である。

本報ではPost-Head-bar工法の概要、適用実績を整理するとともに、適用範囲拡大のために実施した太径鉄筋と高強度鉄筋を用いた場合の性能確認試験結果を報告した。本報のまとめを以下に示す。

- (1) Post-Head-bar工法は浄化センター・ポンプ場、浄水場、水門、道路・鉄道トンネルなどを対象に、既に30件の工事に適用されており、42,000本以上の施工実績がある。施工対象部位・施工方向については、壁の横向き施工と床版の下向き施工が多く、対象部材厚さは最大3,000mmに達する。
- (2) 太径のPost-Head-barとしてSD345のD29を使用した場合と高強度のPost-Head-barとしてSD390のD25を使用した場合について、壁を模したはり状試験体の正負交番載荷試験結果を報告した。これらの試験の結果、太径や高強度のPost-Head-barを使用した場合は、せん断補強鉄筋がないケースに比べせん断耐力が大きく、建設技術審査証明で規定されているせん断耐力への有効性を表す有効係数を0.8として設計できることがわかった。なお、Post-Head-barを千鳥配置にした場合や、せん断スパン比を短くした場合についても同様の結果が得られた。

Post-Head-bar工法は既に建設技術審査証明を取得している範囲(SD295・SD345でD16・D19・D22)では多数の施工実績があり、現在も引き合いが多い。今後、今回試験を実施し、その性能を確認した太径や高強度のPost-Head-barについても公的な認定を得て、地下または半地下構造物のせん断補強工事に適用していきたい。

謝辞

国土交通省北海道開発局から新千歳空港地下道耐震対策工事の施工中の写真使用の許諾をいただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 内閣府中央防災会議専門調査会：地震防災戦略（定量的な減災目標と具体的な実現方策を定める計画）,
http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_toukai/pdf/senryaku/honbun.pdf, 2005.
- 2) 国土交通省都市・地域整備局下水道部, (社)日本下水道協会：下水道地震対策緊急整備計画策定の手引き（案）, 2006.4.
- 3) 土木研究センター：プレート定着型せん断補強鉄筋, 「Head-bar」, 建設技術審査証明報告書, 2004.9.
- 4) 三桶達夫, 堀口賢一, 大友健, 加納宏一, 田中良弘 :既設コンクリート構造物のせん断補強工法の開発, 大成建設技術センター報, 第39号, 2006.
- 5) 田中良弘, 大友健, 三桶達夫, 堀口賢一 :後施工プレート定着型せん断補強鉄筋によるR C地下構造物の耐震補強工法の開発, コンクリート工学, Vol45, No.3, pp.30-37, 2007.
- 6) 三桶達夫, 堀口賢一, 岡本晋 :既設コンクリート構造物のせん断補強工法の開発, 電力土木, pp.62-66, 2007.
- 7) 岡本晋, 三桶達夫, 堀口賢一, 府川徹, 中條基, 加納宏一 :後施工プレート定着型せん断補強鉄筋による耐震補強工法の開発 Post-Head-barによるせん断補強効果, 大成建設技術センター報, 第40号, 2007.
- 8) 土木研究センター :後施工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.
- 9) 岡本晋, 岡本修一, 中條基, 府川徹. :後施工プレート定着型せん断補強鉄筋の既設地下コンクリート構造物への実施適用, 第63回土木学会年次学術講演会, 2008.
- 10) 三桶達夫, 岡本晋, 堀口賢一 :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—太径鉄筋の適用—, 第64回土木学会年次学術講演会, 2009.
- 11) 岡本晋, 三桶達夫, 堀口賢一 :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—, 第64回土木学会年次学術講演会, 2009.
- 12) 加藤幸輝, 青井晃樹 :新千歳空港における土木施設の耐震対策について, 第9回空港技術報告会, 2008.12.
- 13) 土木学会 :コンクリート標準示方書 構造性能照査編, 2002 制定