

「マルチプルナットバー®」を用いた電力地下施設の耐震補強事例

田中 浩一

Report of Retrofit Construction using “Multiple Nuts Bar” for Underground RC Structures at Electric Power Stations

Koichi Tanaka

Abstract

A retrofit method names “Multiple Nuts Bar” is developed for the underground RC structure. This method can retrofit the outer wall of the existing box culverts from their insides without excavation. Application examples of this method at an electric power company are reported here. A thermal power plant’s sluice gate, and a nuclear power station’s duct and sluice gate were retrofitted. In the case of other nuclear power stations, underground RC structures will comprise thick walls of thickness 2.0–2.5 m. Grouting test was conducted using the long “Multiple Nuts Bar” for confirming the mortar filling performance against thick walls. Finally, it is revealed that entrapped air does not exist around the “Multiple Nuts Bar”.

概要

地下構造物の耐震補強工法として大林組は「マルチプルナットバー®」を開発した。この工法は地下カルバートの外壁のように地盤と接触している鉄筋コンクリート構造体を掘削することなく、内空側から補強できる利点がある。本報告では、電力施設において耐震裕度の向上や原子力施設の再稼働に向けてマルチプルナットバーを用いた耐震補強事例を紹介する。某電力の火力発電所ではコンパインド化工事に伴い、既存の取水口と取水路の耐震裕度を高めるためにマルチプルナットバーが採用されている。某電力の原子力発電所では新規規制基準を受けて耐震裕度向上のため配管ダクトや取水路をマルチプルナットバーで補強した。一方、原子力発電所では壁厚が2.0m～2.5mの壁がある。これらを対象に、長さ1.8m～2.7mと長尺なマルチプルナットバーを挿入する実験を実施して、マルチプルナットバーの定着具周辺のモルタルにエアだまりが生じないことを確認した。

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、コンクリートの許容せん断応力が高く設定されていたため、せん断補強筋が配置されていない場合が多い。このような地下カルバートが地震時に繰返し荷重を受けると、壁や頂底板がせん断破壊する可能性がある。

前述のような地下構造物の面外方向のせん断補強を対象にした研究が行われ、様々なあと施工せん断補強工法が開発された。あと施工せん断補強工法とは、既存の壁を削孔して、その中にせん断補強筋を挿入してモルタルで定着させることにより、せん断補強筋をあとから補う方法である(Fig. 1参照)。当社は、あと施工せん断補強工法として「マルチプルナットバー」^{2), 3), 4), 5)}を開発した。従来の工法は、あと施工せん断補強筋として鉄筋を使用しているのに対して当社は鉄筋より高強度なPC鋼棒を用いている。これは、あと施工せん断補強筋1本あたりが負担するせん断力を高め、必要なあと施工せん断補強筋の本数、すなわち削孔本数を減らして工期短縮とコストダウンを図るためである。高強度であっても既存躯体にしっかりと定着させるため、マルチプルナットバー端部には複数の定着具を設けている(Photo 1参照)。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の後、上下水道施設や鉄道施設など様々な地下構造物を対象と

して、あと施工せん断補強工事が行われてきた。

本報告では、本工法を電力地下施設の耐震補強に用いた事例と、厚い壁に向けた取組みについて紹介する。

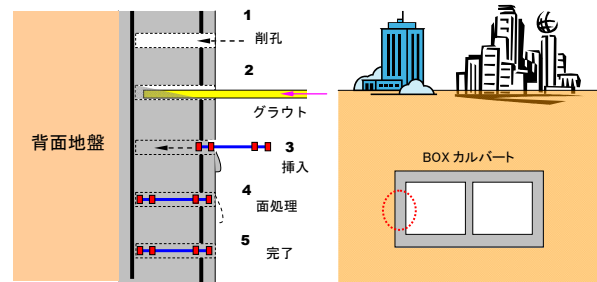


Fig. 1 あと施工せん断補強の概念図
Outline of This Retrofit Method

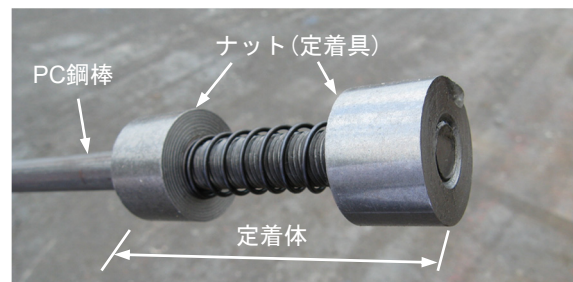


Photo 1 マルチプルナットバーの定着体(φ13)
Shape at the End of Multiple Nuts Bar

2. 某電力火力発電所の耐震補強事例⁶⁾

2.1 耐震補強工事の必要性

某電力の火力発電所では、震災により減少した電源を確保するための緊急電源として建設した5号機シンプルガスタービン設備を、恒久電源として使用するためのコンバインド化工事を行った。本工事は平成24年6月に着工し、火力設備機械基礎および復水器冷却用水路などの構築を行い、平成26年3月1日に発電を開始している。

本工事では工程がタイトであったため、既設の取水口と取水路を再利用して合理化を図っている。しかし、これらは昭和57年に廃止された旧1・2号に用いていた構造物であるため、経年による劣化だけでなく、今後起こりうる大規模地震に対する耐震性が懸念された。

経年劣化を把握するため、コンクリートの圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比、中性化深さ、塩化物イオン含有量などが調査された。加えて、配筋状況や鉄筋のかぶり深さ、鉄筋の腐食状況が電磁波レーダ探査やコンクリートはつりを行って調査された。これらの調査結果では、ごくわずかな鉄筋の点錆びがあったものの、コンクリートのかぶりが剥落するような腐食箇所は見られなかった。よってコンクリート材料、配筋状況とも十分に健全であることが確認できた。

一方、コンバインド化した施設は、恒久電源施設と位置づけられているため、耐用年数を50年としている。したがって、今後起こりうる大規模地震に耐えられるよう、耐震設計を行う必要があった。

2.2 耐震性能照査の概要

地盤と構造物との相互作用を考慮して耐震性能を把握するため、レベル2地震動を対象に2次元の時刻歴応答解析を行っている。使用した解析コードは当社が開発した有効応力解析ソフトのO-EFFECT⁷⁾である。対象構造物は4連ボックスカルバートである(Fig.2参照)。時刻歴応答解析に使用する入力地震動は、建設サイトの地盤調査結果から地盤モデルを作成し、SHAKE⁸⁾で算定した。

解析の結果、応答曲率は許容値以内だったものの、作用せん断力がせん断耐力を上回っていた。Fig.2に示したように耐震補強が必要な範囲は頂版の一部、底版の一部、ならびに壁の下半分であった。Fig.2には補強対象も示してある。厳しい電力需給状況の中、既設3号機の発電を停止してカルバート内部をドライにすることができなかつたため、5号水路を今回の補強対象とした。

2.3 マルチプルナットバーの施工

2.3.1 工法選定 耐震補強工法の選定について、大型の重機を既設構造物に近づけて躯体を損傷させたくない、という方針が文献⁶⁾の中で記されている。工法選定の結果、躯体を直接補強できる「あと施工せん断補強」の内、マルチプルナットバーが採用された。その理由は「1本当たりの負担範囲が広く総施工本数を少なくする

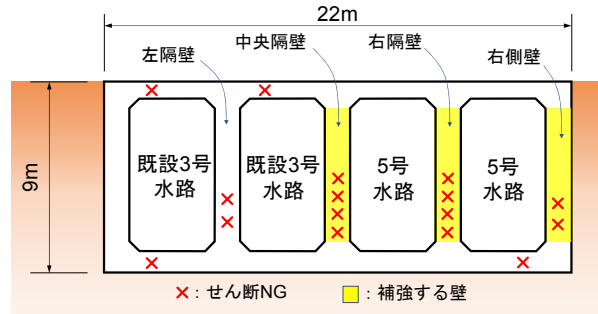


Fig. 2 耐震診断結果による補強範囲
Retrofit Area defined by Evaluation of Seismic Analysis

Table 1 補強前後のせん断耐力照査値
Seismic Analysis Results about Response/Capacity Ratio

補強の実施	左隔壁	中央隔壁	右隔壁	右側壁
前	1.341	1.379	1.181	1.352
後	0.559	0.552	0.467	0.523



Photo 2 削孔状況
Drilled Holes at the Wall

ことができ、躯体の損傷リスクを最小限とし、工期を短縮することが可能となる」と記されている。マルチプルナットバーの開発目的である高強度化による省力化の効果が評価されたことがわかる。

2.3.2 補強後の照査値 Table 1にマルチプルナットバーで補強する前後のせん断耐力照査値の一例を示す。せん断耐力照査値とは作用せん断力をせん断耐力で除した値であり、1.0以上となるとせん断破壊することを表す数値である。いずれの壁も補強前の照査値は1.18~1.38であったが、補強後の照査値は0.5程度となっている。

2.3.3 施工状況 Photo 2に削孔状況を示す。マルチプルナットバーは部材直交方向(写真では水平方向)に最大1.0m離す設計が可能である。この写真から水平方向に大きく離してマルチプルナットバーを配置する設計がなされていることがわかる。マルチプルナットバーの総本数は850本、施工対象面積は230m²であった。

3. 某電力原子力発電所の耐震補強事例⁹⁾

3.1 耐震補強工事の必要性

某電力の原子力発電所では平成25年7月施行の新規制基準を受けて、耐震安全性を向上するため、配管ダクトおよび取水路の耐震補強工事を行うこととなった。

本報告では、主に配管ダクトの施工について述べる。

3.2 配管ダクトにおける施工上の課題

配管ダクトは海水熱交換機建屋とタービン建屋を地下で結ぶ鉄筋コンクリート製の2連カルバートであり、その内部には冷却用水配管や電気ケーブルトレイが複雑に多数配置されている。Fig. 3に示すように土被りは約20mで岩盤上に設置されている。

配管ダクト直上の地上は非常時のアクセス道路となっていること、および配管ダクトの土被りが約20mと非常に大きいことなどから、地盤改良による耐震補強は選択されず、ダクト内部から構造物を直接補強できるマルチプルナットバーが採用された。

しかしながら、配管ダクトを補強するには配管や電気ケーブルトレイを避けてマルチプルナットバーを施工する必要があった。特に難しいのは隔壁の補強であった。その理由は、Fig. 4に示すように配管や電気ケーブルトレイを避けて隔壁を補強するためには内空両側から削孔をする必要があり、狭い側の内空幅は1.35mと狭隘であったためである。

そこで、この狭隘なスペースでも冷却用水配管や電気ケーブルトレイを損傷させないでマルチプルナットバーを施工するため、Photo 3に示すような実大のモックアップを製作し、それをを用いた試験施工から得られた情報を施工の詳細仕様に反映することとした。

3.3 モックアップを用いた試験施工

3.3.1 着目点 この狭隘な施工環境でマルチプルナットバーを施工する上で重要となるのは、削孔に伴う既存鉄筋の損傷と壁貫通の回避、ならびにグラウトの確実な充填である。そこで、以下のa～eに着目した試験施工を行った。

- a：狭隘部の作業成立性
- b：グラウト材の充填性
- c：鉄筋探査の精度
- d：鉄筋損傷防止策の有効性
- e：作業員の教育と訓練

3.3.2 狭隘部の作業成立性 配管ダクト内の配管類は発電所の運転上重要な施設である。削孔などの施工中に配管を損傷させてしまうことを防止するため養生防護を行う。その養生防護の性能を確認するため、養生マットに削孔機械と同等な重さの重量物を落下させる実験を行った。その結果、配管類の養生は、養生マット、不燃シート、プラスチック製防護マットで養生するだけでなく、削孔機の直下および直上はアルミ板で防護すること

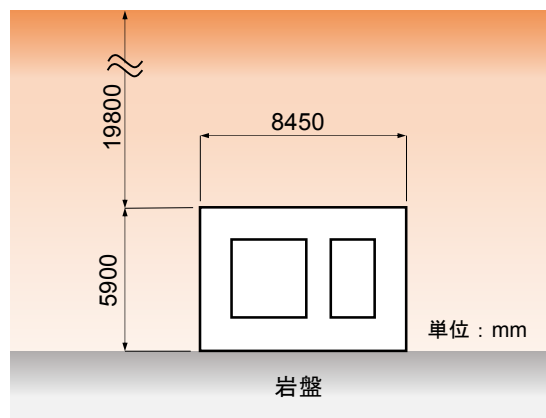


Fig. 3 配管ダクトの形状寸法¹⁰⁾
Shape of the Pipe Duct

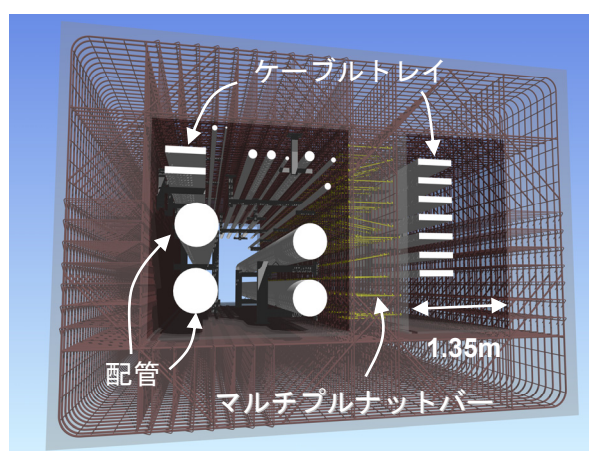


Fig. 4 配管およびケーブルトレイの配置状況
The Layout of Pipes and Cable Trays

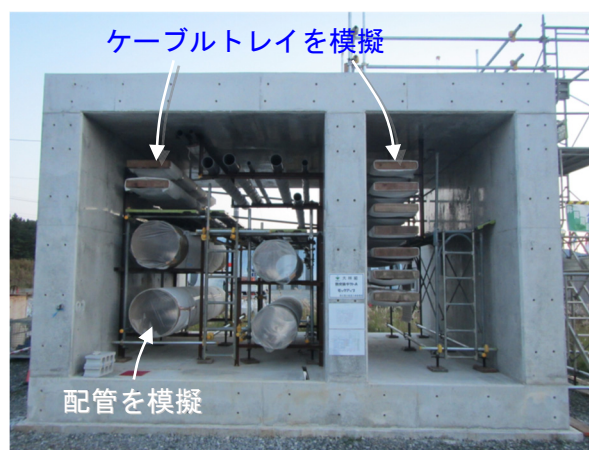


Photo 3 配管ダクトの実大モックアップ
Mockup of the Duct

となった。また、モックアップの中で仮設足場と削孔機をセットして、配管とケーブルトレイ間においてマルチプルナットバーが施工できるかを検証し、作業員の負荷や危険度を事前に把握するだけでなく、負荷を軽減するための作業計画見直しに役立てた。

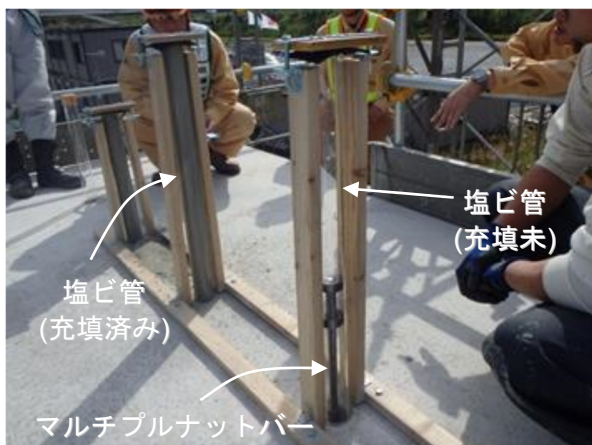


Photo 4 上向き試験施工の様子
Upward Grouting Test using Mockup

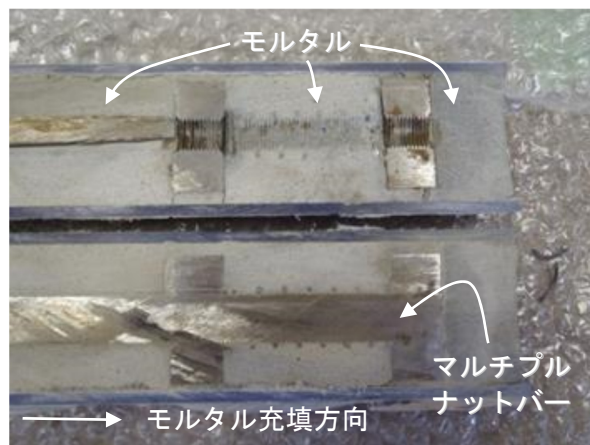


Photo 5 上向き試験施工におけるモルタルの充填状況
Filling Status of Upward Grouting Test



Photo 6 斜め上向きにおける削孔機セット状況
Side View of Core-Drill Set at Upward Slope



Photo 7 斜め上向きにおけるグラウト状況
Mortar Leak in case of Upward Slope Grouting

3.3.3 グラウト材の充填性

(1) 上向き施工 Photo 4に示すようにモックアップの頂版を用いて上向き試験施工を行った。モックアップは実際のカルバートよりも壁厚や頂版厚を薄くしたため、実際の頂版厚さに相当するグラウト高さとなるように透明な塩ビ管で延長した。マルチプルナットバーはモルタルを充填する前に削孔内部へエア抜き管とともにセットし、その後、底型枠を設置した。エア抜き管とは削孔内部の空気を抜くためのもので、エア抜き管からモルタルが流出することを目視で確認して充填完了とする。エア抜き管を削孔内部に残置させないため、このモルタル流出を確認した後、エア抜き管を引き抜く。この時、モルタルが流出し続けないように逆止弁が取り付けられている。モルタルはポンプで圧送しているため、この逆止弁が作動すると削孔内部がモルタルで満たされて圧力が急激に高まり、底型枠が剥がれ落ちる懸念がある。これを防止するため、モルタル用のリリース弁をポンプに取り付けてある。なお、使用したリリース弁は事前に室内実験により作動性を確かめた。グラウト材の充填状況をPhoto 5に示す。上端までモルタルが充填されているだ

けでなく、マルチプルナットバーのナット(定着具)周辺もモルタルが十分に充填されていることがわかる。

(2) 斜め上向き施工 冷却用水配管や電気ケーブルトレイを避けた施工を行うため、斜め上向きや斜め下向きを施工する必要があった。角度はいずれも15°程度であった。マルチプルナットバーは施工する向きによってモルタルの配合を変えることが「建設技術審査証明報告書「マルチプルナットバー」」¹¹⁾に記載されている。横向きは型枠が省略できるように硬練りのモルタルを使用し、上向きはエア抜き管からも流れ出すよう軟らかいモルタルを使用する。硬練りのモルタルの流動性は、簡易フロー試験値(JASS15 M-103)が70±10mmとなるよう水量を調整する。一方、軟らかいモルタルはJ14漏斗値(JCSE-F541)で5±2秒とする。そこで、斜め上向きは前述の上向きの施工方法に基づく試験施工を行った。削孔機のセット状況をPhoto 6に、エア抜き管からモルタルが流出する状況をPhoto 7に示す。マルチプルナットバー先端のモルタル充填状況を観察した結果、斜め上向き施工は上向き施工方法に準拠すれば良いことがわかった。

(3) 斜め下向き施工 斜め下向きの施工は、横向きの施工方法に基づくこととした。削孔機のセット状況、



Photo 8 斜め下向き施工における削孔機セット状況
Side View of Core-Drill Set at Downward Slope



Photo 11 鉄筋探査の状況
Rebar Investigation using a Radar



Photo 9 斜め下向き施工におけるグラウト状況
Multiple-Nuts-bar Insertion in case of Downward Slope

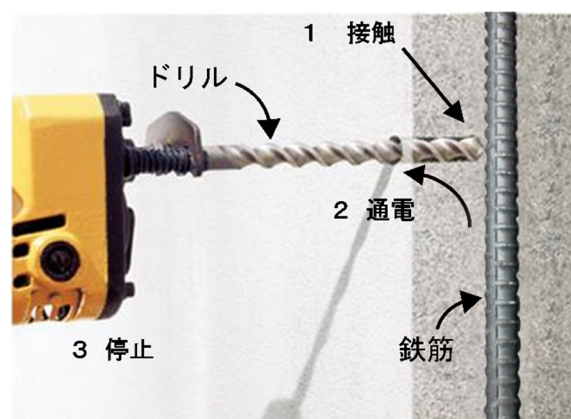


Fig. 5 鉄筋感知センサーのしくみ
The Prevention System of the Rebar Damage



Photo 10 斜め下向き施工におけるモルタル充填状況
Filling Status in case of Downward Slope Grouting

マルチプルナットバー挿入状況およびマルチプルナットバー先端のモルタル充填状況をPhoto 8～Photo 10に示す。この結果から斜め下向きの施工は、横向きの施工方法に準拠すれば良いことがわかった。

3.3.4 鉄筋探査の精度 削孔時手前側の鉄筋に干渉しないように予め鉄筋探査を行う必要がある。そこで

モックアップを利用して電磁波レーダ法を用いた鉄筋探査を行って精度を確認した(Photo 11参照)。その結果、かぶり300mmまでの範囲であれば、誤差がほとんどないことがわかった。

3.3.5 鉄筋損傷防止策 削孔機に金属感知センサーを取り付け、既存鉄筋に削孔ドリルが接触すると、瞬時に削孔ドリルを止める方法を採用した(Fig. 5参照)。その作動状況をモックアップで確認した。その結果、接触とほぼ同時(約0.1秒以内)に停止し、誤って既存鉄筋を切断することを防止する手段として有効であることがわかった。

3.3.6 教育と訓練 モックアップは、前述の様々な対策の成立性や有効性の確認だけでなく、作業者の施工訓練施設としても活用した。具体的には、作業手順の確認、当現場特有の各種対策方法の確認、安全意識の向上などである。

3.4 施工状況

取水路の工期は平成26年8月～平成27年4月、また本報告で詳述した配管ダクトの工期は平成27年3月～平成28年2月である。狭い施工環境であるにも関わらず、大き

なトラブルもなく無事に施工ができたことは、このモックアップを用いた事前の検査やトレーニングが大きく貢献したと言える。本工事におけるマルチプルナットバー施工数量は、取水路で7,586本、配管ダクトで1,923本、合計9,509本であった。

4. 大きな壁厚への取り組み

4.1 大きな壁厚に対する耐震補強ニーズ

原子力施設では厚い壁を有する構造物が多い。通常の土木構造物よりも安全裕度が要求されることが一因として考えられる。一方、建設当時の基準地震動に対して設計が行われているため、配筋された鉄筋に大きな余裕があるとは限らない。そのため、近年の基準地震動の大幅な増大と耐震裕度の向上が求められる中、これらの厚い壁に対しても耐震補強が必要となる可能性がある。

4.2 大きな壁厚を補強する課題

マルチプルナットバーの横向き施工は、Fig. 1に示したように硬練りのモルタルを削孔内部にグラウトし、その後、マルチプルナットバーを挿入する「プレグラウト方式」を採用している。その理由は、モルタルが漏れないように型枠を設置する手間を省略し、合理化を図ったためである。硬練りのモルタル中にマルチプルナットバーを挿入すると、特に先端の定着具(以下、ナット)近傍に空気を巻き込み、定着性能が低下する懸念があった。この空気の巻き込みは、開発当初からマルチプルナットバーの横向き挿入実験により観察されていた。この実験において、マルチプルナットバーの先端2つのナットの内、最先端(最も奥側。1番目)と2番目のナットの背面(挿入方向の逆側の面)にモルタル中の空気が溜まる現象(以下、エアだまり)が観察された。可視化実験を行った結果、マルチプルナットバーの最先端(1番目)のナットはモルタル中の空気すべてと接触し、1番目と2番目のナットの背面でモルタルの渦ができて、エアだまりが生じると考えられた(Fig. 6, Photo 12参照)。したがって、モルタル中の空気をすべて抜くことで、エアだまりは解決できると考えた。脱気したモルタルを用いた挿入実験の結果、エアだまりはごくわずかとなった。そこでマルチプルナットバーに予めモルタルを塗布するプレウェットだけでなく、プレグラウトする前に硬練りモルタルを脱気することを本工法では義務付けている。

しかしながら、壁厚、すなわちマルチプルナットバーの挿入長さが大きくなると、最先端のナットがモルタル中の空気と接触する機会も増える。硬練りモルタルの脱気は限界があり、空気量が0%のモルタルは製造できない。したがって、壁厚が厚くなると脱気したモルタルを使用してもエアだまりが生じる懸念があった。

そこで、壁厚が2.0mを超える部材をマルチプルナットバーで補強することを想定し、横向き施工を行って、エアだまりの有無を確認した。

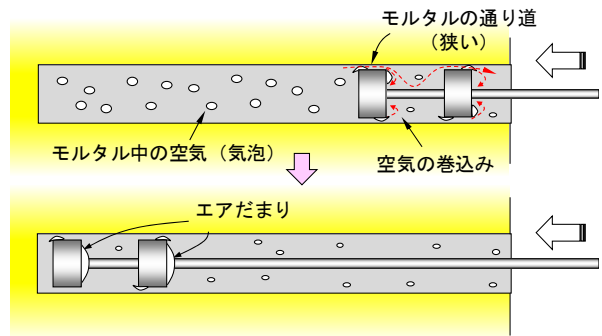
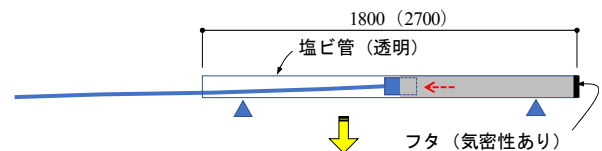


Fig. 6 モルタル中の空気が溜まる現象
The Mechanism of Air Entrapping behind the Nuts



Photo 12 可視化実験の様子
The Mortar Behavior on Visualization Experiment

①モルタルホース挿入→モルタル注入



②モルタル注入完了



③マルチプルナットバー挿入



Fig. 7 実験の概要
Outline of Long Insertion Test of Multiple Nuts Bar

4.3 実験概要

実験方法をFig. 7に示す。削孔は塩ビ管で代用した。

塩ビ管の中へマルチプルナットバーの横向き施工の手順通り硬練りのモルタルを充填し、その中へモルタルを塗布したマルチプルナットバーを挿入した。実験の状況をPhoto 13に示す。

パラメータは、塩ビ管の長さ、簡易フロー試験値、モルタルの空気量、プレウェットの手法である。塩ビ管の



Photo 13 実験の状況
View of Long Insertion Test



Photo 14 プレウェットの状況(全長)
Mortar Pre-Wetting



Photo 15 プレウェットの状況(先端のみ)
Mortar Pre-Wetting (Tip Only)



Photo 16 No. 28の先端におけるモルタル充填状況
(空気量：0.6%，簡易フロー：73mm)
Grout Condition at the Tip of the No. 28
(Entrapped Air: 0.6%, Flow Value: 73mm)

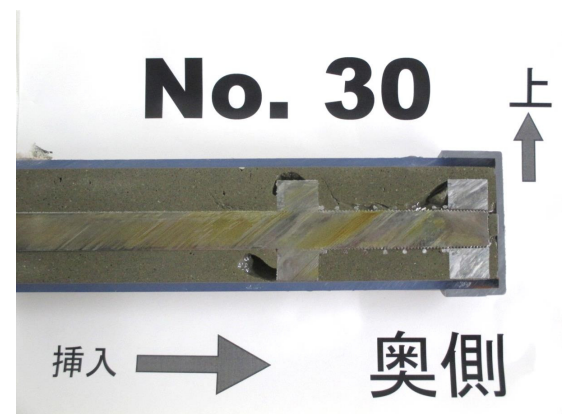


Photo 17 No. 30の先端におけるモルタル充填状況
(空気量：1.3%，簡易フロー：60mm)
Grout Condition at the Tip of the No. 30
(Entrapped Air: 1.3%, Flow Value: 60mm)

長さは壁厚2.0m～2.5mまでを想定し、1.8mと2.7mの2種類とした。簡易フロー試験値は60～80mmとなるように水量を調整した。水とブレミックスモルタル粉体の重量比(以下、水材比)は16.5%±0.5%が基準値であるが、簡易フロー試験値が60mmに近く、硬練り過ぎて空気が抜けにくい不利な場合も想定し、15.8%～17.0%とした。モルタルの脱気作業は1バッチを練り終わった後、パイプレータで行った。パラメータである空気量の調整は、この脱気作業の有無で調整した。プレウェットとは、マルチプルナットバーに予めモルタルを塗布しておくことである。このプレウェットをマルチプルナットバー全長に行うと、モルタルの消費量と挿入時におけるマルチプルナットバーの重量が増える。これらのデメリットを解決するため、ナット近傍だけにモルタルを塗布した場合とマルチプルナットバー全長に塗布した場合を比較する実験を行った。それぞれをPhoto 14, Photo 15に示す。

充填性の確認は、モルタルが硬化した後に、塩ビ管をカッターで縦に半割し、ナットの近傍に大きなエアだまりがないかを目視で確認した。

4.4 実験結果

マルチプルナットバーの先端側(奥側)を半割した一例を、Photo 16, Photo 17に示す。いずれも塩ビ管の長さが2.7mの場合である。No.28, No.30の各パラメータの値を

Table 2 長尺挿入実験のパラメータ
Parameters of Long Insertion Test

No.	*1 水/材 (%)	脱気時間(分)		空気量 (%)	*4 簡易フロー (mm)	マルチプル ナットバー 長さ (m)	プレウエット
		ハイ レータ	*2 ポンプ 循環				
28	17.0	2	2	0.6 *3	73 *3	2.7	端部のみ
30	15.8	0	1	1.3 *3	60 *3	2.7	全長

*1:水とプレミックスモルタル粉体の重量比。基準値は16.5±1%。
*2:ポンプ内で循環させた時間。 *3:計測値。 *4:基準値=70±10mm。

Table 2に示す。

プレウエットが先端のみとしたNo.28では、十分にナット近傍がモルタルで充填されていることがわかる。一方No.30では、プレウエットを全長にしたにもかかわらず、大きな気泡がナットの近傍に生じている。この気泡は、挿入方向の反対側(ナットの背面)に集中している。この観察結果から、プレウエットよりもモルタルを脱気することの方が効果は高いこと、すなわちFig. 6で示した仮説が裏付けられた。

以上の結果から、モルタルの空気が0.6%程度になるように十分に脱気し、かつ、簡易フロー試験値が70mm以上となるようモルタルの品質管理を行えば、部材厚が2.5m程度でも、エアだまりは防止できることがわかった。

5. まとめ

電力施設における耐震裕度工事の内、特に地下構造物の耐震補強にマルチプルナットバーを適用した事例を紹介した。また、壁厚が2.5m程度まで施工が可能となるかを施工実験で確認した。

以上のことから、以下のことがわかった。

- 1) 某電力の火力発電所における取水路耐震補強では、水平方向の削孔本数を減らすことができるマルチプルナットバーの利点を発揮できた。
- 2) 某電力の原子力発電所における配管ダクトの耐震補強は狭隘な中でのマルチプルナットバー施工となったが、モックアップを用いた検証や訓練を行うことにより、安全に工事を行うことができた。
- 3) 壁厚が2.5m程度の部材をマルチプルナットバーで補強する場合、モルタル脱気と簡易フロー試験に

よる品質管理を行えば、定着具であるナット近傍に有害なエアだまりは生じない。

参考文献

- 1) 曾良岡宏, 他: 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) 田中浩一, 江尻譲嗣: PC鋼棒を面外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, 2011.7
- 3) 田中浩一, 江尻譲嗣: 複数個の機械式定着を有するPC鋼棒による靱性補強効果, 土木学会第66回年次学術講演会概要集, V-488, pp. 975-976, 2011.9
- 4) 田中浩一, 江尻譲嗣: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 2, pp. 961-966, 2012.7
- 5) 田中浩一, 江尻譲嗣: 複数個の機械式定着を有するPC鋼棒によるせん断補強効果, 土木学会第67回年次学術講演会概要集, V-242, pp. 483-484, 2012.9
- 6) 小崎力, 中野範彦: 八戸火力5号機コンバインド化工事に伴う土木工事の設計と施工~既設備の有効利用と耐震補強工事~, 電力土木2014年7月号, No. 372, pp. 44-48, 2014.7
- 7) 伊藤浩二: 動的有効応力解析プログラム「EFECT」(その1)-基礎理論と地盤構成モデル-, 大林組技術研究所報, No. 51, pp. 7-14, 1995.12
- 8) Schnable, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley, 1972.
- 9) 竹内祥一, 他: あと施工型高強度せん断補強鉄筋を用いた地中ダクトの耐震性能向上工事における品質確保, 電力土木2015年9月号, No. 379, pp. 39-43, 2015.9
- 10) 小崎力, 他: 狭隘な作業環境における「あと施工せん断補強」の試験施工の効果について, 土木学会東北支部技術研究発表会演会概要集, Vol. 53, VI-37, 2016.3
- 11) 土木研究センター: あと施工型高強度せん断補強鉄筋「マルチプルナットバー」, 2013.7