くさび型接着接合を用いた精密装置用高剛性基礎の開発

Development of High Rigidity Pedestal Flooring Employing Adhesively-Bonded Wedge Chip for Precision Devices

吉岡　宏和*1　　井上　竜太*3　　阿部　隆之*2　　高橋　良典*1

梗　概

高剛性・高強度であり施工性に優れた精密装置用基礎を開発した。SUS製の筐体とコンクリートの付着を改善することにより，基礎ユニット本体の剛性を高めた。基礎ユニットと躯体の接合部については，くさび型片を対向させて接着接合することにより，位置決めの自由度を確保しながら高剛性化および高強度化を図った。結合させる材料には製造環境に対して発塵やケミカル汚染を起こさないもののみを使用し，稼動中のクリーンルーム内でも施工が可能である。さらに，基礎群を根太に結合した実大試験体により，露光装置に必要な動剛性および終局強度が得られていることを確認した。

キーワード：高剛性基礎，精密装置，接着接合構造，ケミカル汚染

Summary

In the most advanced manufacturing facilities, required environmental specifications are become strictly and more complex. We proposed brand-new high rigid pedestal flooring for precision device such as photolithography equipment. The foundations are adhesively-bonded with wedge steel chips, so that a high positioning accuracy can be achieved easily. A high stiffness and a high strength of the binding site are shown. All materials employed in the foundations are free from chemical contamination, which is one of the big problems for producing defectives in the clean rooms.

Keywords: high rigid pedestal flooring, precision devices, adhesively-bonded structure, chemical contamination

1　はじめに

半導体工場や液晶工場などに代表される先端製造施設では，加工精度が微細化の一途をたどり，建物や精密装置を設置する基礎には厳しい振動環境が求められている。周辺から伝播する振動を低減することを目的として，精密装置用のアクティブ除振装置[1~3]が開発され，既に実用に供されている。一般に，これらの装置は，躯体上の振動を装置上では1/10またはそれ以下に低減できるという優れた除振能力を持つが，装置および基礎を空気ばねや磁気により支持するパッシブ系にアクチュエータ機構を加えたものが多い。

一方，近年の露光装置など一部の精密装置は設置基礎の振動量に加えて，高い動剛性や低いアクセレランス（単位加振力あたりの加速度応答），高い耐震強度を求められるケースが多い。前述のアクティブ除振台は剛性が低く，露光装置には適用できない。躯体の振動をアクティブ制御により低減する試み[4]やアクティブ除振台を高剛性化する試み[5]も研究されているが，実用にはいたっていない。現状では，剛性の高い基礎をモルタルなどを介して躯体上に構築して，露光装置を設置することが多いが，クリーンルーム内部でモルタルを打設すると多くのアンモニアが発生し，製造に有害なケミカル物質が発生する問題があった。

以上の背景を鑑み，近年の露光装置に求められる高剛性・高強度を持ち，施工性に優れた精密装置用基礎の開発を行った。まず，基礎ユニット本体の剛性を高めるよう，ステンレス製筐体と内部に打設するコンクリートの付着を改善した。次に，基礎と躯体の接合部にくさび型片を対向させて接着接合することにより，位置決めの自由度を確保しながら高剛性化および高強度化を図った。さらに，基礎群を根太に結合した実大試験体により，露光装置に

＊1　技術研究所　主任研究員　博士（工学）　Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.
＊2　技術研究所　主任研究員　Research & Development Institute, Dr. Eng.
＊3　東京本店　作業所　博士（工学）　Tokyo main office, Dr. Eng.

必要な動剛性および終局強度が得られていることを確認するとともに，新規施工および精密装置のレイアウト変更があった場合に伴う剥離施工が容易に実施できることを確認した。これら，一連の施工は発塵やケミカル汚染のないもののみを使用しているため，稼動中のクリーンルーム内でも施工が可能である。

2　既往の高剛性基礎

Fig.1に従来の高剛性基礎の構成例を示す。露光装置などの精密装置はクリーンルームに設置されるが，効率よく空調を行うため，クリーンルーム床下に空間を設け，クリーンルーム床の多くを穴のあいたグレーチングで構築することにより，気流を床下へ送る方式が一般的である。グレーチングは梁に直交する根太により支持されるが，根太の固有振動による振動増幅や剛性不足が問題となるため，根太同士を緊結して補剛することを目的とした高剛性基礎上に設置されるケースが多い。

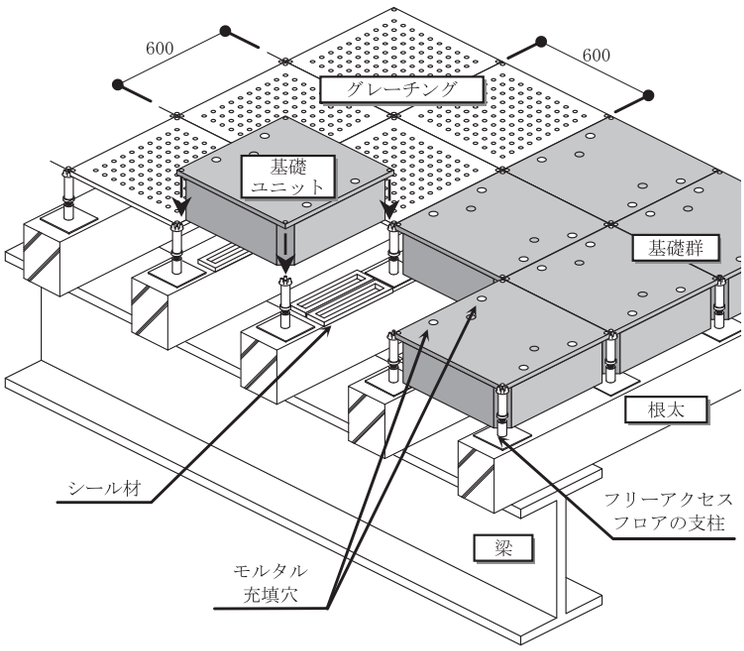


Fig.1　従来の高剛性基礎例
Example of a conventional high rigidity foundation

Fig.1の事例では，標準的なグレーチング（600mm×600mm）とほぼ同一の平面サイズを持つPCa基礎ユニットが使用されている。基礎ユニットはステンレス鋼製の筐体内部にコンクリートを充填して剛性を高めている。基礎ユニットを複数個配置して基礎群を構築する際に，基礎全体の平面度を確保するための位置決めと，根太に強固に緊結する必要があるが，事例では，フリーアクセスフロアの支柱を利用して位置決めを行った後，架台上部から無収縮モルタルを打設して根太と基礎ユニットを緊結している。

また，近年のクリーンルームの要求性能の一つに，製造に有害なケミカル物質を建築材料などから発生させない，いわゆるケミカル汚染を起さない[6] ことが挙げられる。従来の事例では，セメントからアンモニアが発生するため，稼働中のクリーンルーム内でモルタルを打設することができない。

3　高剛性基礎ユニットの開発

高剛性基礎ユニットの開発にあたり，下記の方針を立てた。

① 接合部の動剛性5×10^8N/m以上，終局せん断強度60kN以上
② 発塵，ケミカル汚染を起こさない材料のみで構築
③ 容易に精度の良い位置決めができ，簡易な施工方法

露光装置の基礎として1×10^8N/m程度の動剛性が求められる場合がある。基礎の動剛性は根太本体と基礎ユニットの剛性の直列ばねとなるため，基礎ユニットの剛性のみでは決定できないが，露光装置スペックの5倍程度とした。具体的な要素として，基礎ユニット本体および基礎ユニットと根太の接合部の2点に分け，それぞれについて開発を実施した。

3.1　基礎ユニットの高剛性化

基礎ユニットの動剛性の評価試験を行った。試験体は597mm×597mm，高さ280mmの基礎ユニットであり，従来と同様にステンレス鋼筐体内部にコンクリートが充填されている。筐体とコンクリートの付着による影響を見るため，①筐体にボルトや溝のない基礎，②筐体の天板裏面に長さ100mmのM20ボルトを250mmピッチに9本溶接接合した基礎（Photo 1），③筐体の天板裏面に60mmピッチの格子状の溝（幅8mm，深さ4mm程度）を施工した基礎（Photo 2）の3種類を作製した。200mm幅の根太上に2台の基礎ユニットを並べて設置することを想定し，根太幅のほぼ半分にあたる98mmを鋼製ベッドと接触させた。基礎ユニットと根太の接合部の剛性による影響を排除するた

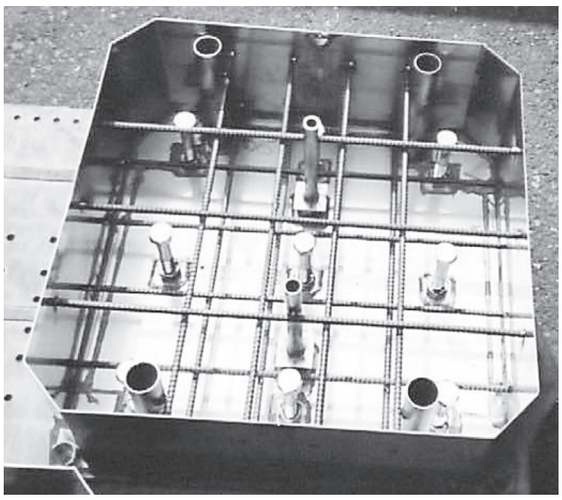


Photo 1　ボルト付き基礎筐体
Housing of pedestal reinforced by bolts

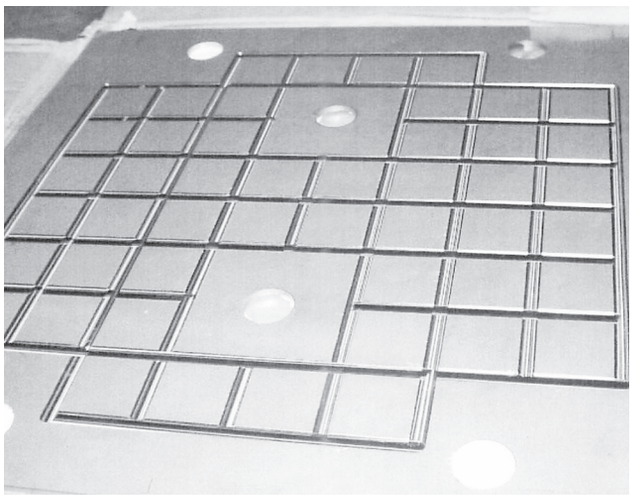


Photo 2　天板の裏側の溝
A ditch of the backside of the top panel

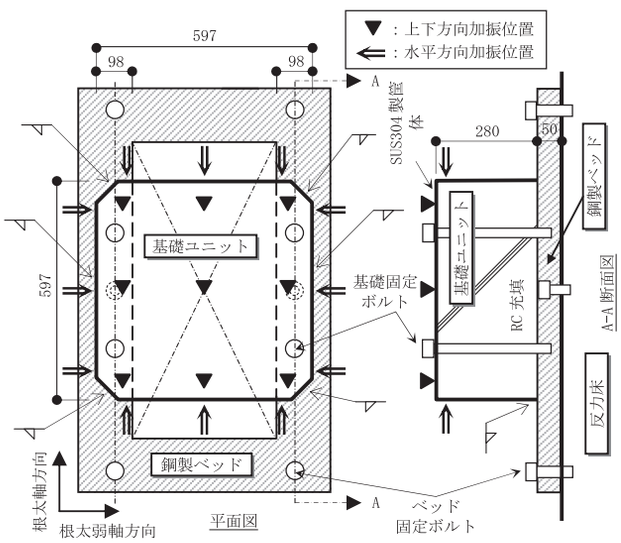


Fig.2　基礎ユニットの剛性評価試験体
Experimental object to evaluate stiffness of foundation unit

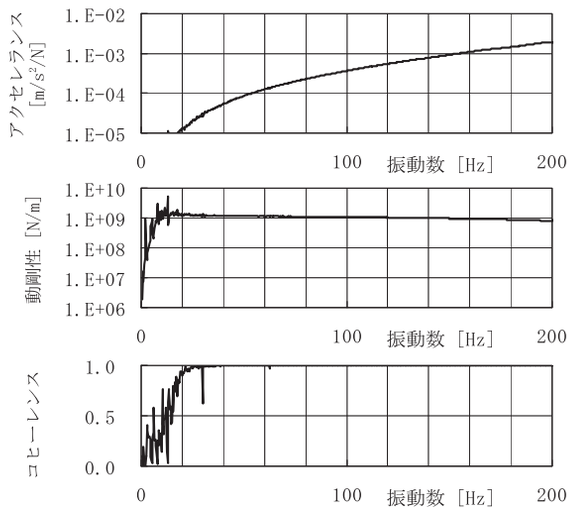


Fig.3　アクセレランス，動剛性，コヒーレンスの算定例
（ボルト付き基礎，水平：根太軸方向，中央部加振時）
Example of estimated accelerance, dynamic stiffness and coherence

め，Fig.2に示すように，反力床とベッドおよび基礎ユニットとベッドをそれぞれボルトにより接合した。さらに，基礎ユニットとベッドとの接触位置周辺を溶接した。

Fig.2に示す位置をインパルスハンマによりそれぞれ打撃加振し，ハンマのロードセルから得られる加振力と，ハンマ打撃位置から5cm程度離れた地点の応答加速度を計測し，FFTアナライザにより伝達関数を算出することによりアクセレランスを得た。アクセレランスを2回積分し，逆数をとることにより，動剛性が得られる。Fig.3にアクセレランスおよび動剛性の算定例を示す。低振動数領域は加振力不足によるデータの乱れが認められるが，40Hz以上の振動数領域では，ほぼなめらかな動剛性が得られている。コヒーレンスを確認しながら，この算定例では40Hz以上の動剛性の平均値（1.02×10^{9}N/m）を求め，平均動剛性とした。以降，平均動剛性のみを示すが，全て同様の手順を行っている。

Table 1　基礎ユニットの平均動剛性の算定結果［$\times10^{8}$N/m］
Estimated dynamic stiffness of foundation unit［$^{*}10^{8}$N/m］

	根太弱軸方向	根太弱軸方向	上下方向
試験体①	8.84	10.12	2.65
試験体②	9.87	7.95	8.27
試験体③	7.02	5.80	8.97

Table 1に3種類の基礎ユニットの平均動剛性を示す。これらは，各打撃位置で求められた平均動剛性を平均したものである。付着を高める対策を行っていない試験体①は，上下方向の平均動剛性が他の試験体に比べて著しく低

下している。試験体②と試験体③を比較すると，水平剛性は試験体②の方が高いが，上下剛性は試験体③の方がやや高い結果となった。試験体②は全ての方向で8×10^{8}N/m程度以上の平均剛性を持ち，施工性も試験体③に比べて優れているため，ボルトによる付着補強を採用することとした。

3.2 基礎ユニットと根太の接合部の開発

接合部のみを取り出した部分試験体を3体作製した。基礎ユニットを模した厚さ32mmの鋼製板を反力床上にボルト接合した鋼製ベッドに接合した。試験体Aは，エポキシ樹脂を用いて接合したものである。接合のディテールはFig.4に示すとおり従来の基礎と同じであり，上部鉄板の穴の1方からエポキシ樹脂を注入し，他方の穴からエポキシ樹脂が上がってくることで，充填を確認した。

Fig.5に試験体B，Cの試験体の概要を示す。鉄製くさび型片を2方向から対向させ，一方は上部鉄板に溶接し，他方（図中灰色の部材）は接着剤によりベッドと上側のくさびを接合した。くさびは，奥行き90mm，高さが10～20mmで，相対するくさびの接合面積を調整することにより，位置決めした基礎ユニットと根太の隙間に応じて25～35mmの範囲で密着させることができる。接着剤はブチルなどケミカル汚染の影響がある成分を含まない材料を選択している。試験体Bは，接着可能な長さのほぼ全面（40cm幅）を接着した（以下，全面くさびと称する）。試験体Cは接着接合するくさび型片を6cm程度の幅で4個とした。接着可能な長さのほぼ6割程度を接着した（以下，部分くさびと称する）。部分くさび試験体は，基礎と根太が平行ではない場合などに，間隔が不均一になる場合があることを想定して，意図的に2方向に1/200程度傾斜させた状態で接着した。鋼製ベッドと上部鉄板の平均間隔は，全ての試験体で30mmとした。

Table 2に基礎接合部の平均動剛性の評価結果を示す。評価方法は前節で述べた基礎ユニットの試験時と同様である。すべての方向で部分くさび接合が最も高い剛性を示した。部分くさび方式のみ鋼製板を傾斜させたため，くさびごとの接着接合長さおよび接合剛性が不均一になっている。今回の実験結果では，それらの剛性の総和が全面くさびの剛性より高まったものと思われる。くさび接合方式は全ての方向で動剛性の目標値（5×10^{8}N/m）を満足したが，エポキシ接合による試験体は，上下方向の動剛性が小さかった。

次に，剛性評価試験体の終局せん断強度を試

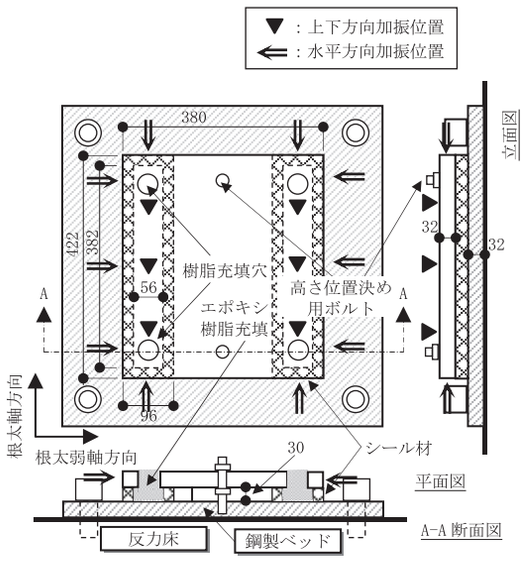


Fig.4 エポキシ接合部の剛性評価試験体（試験体A）
Experimental object to evaluate stiffness of junction bonded with epoxy adhesive

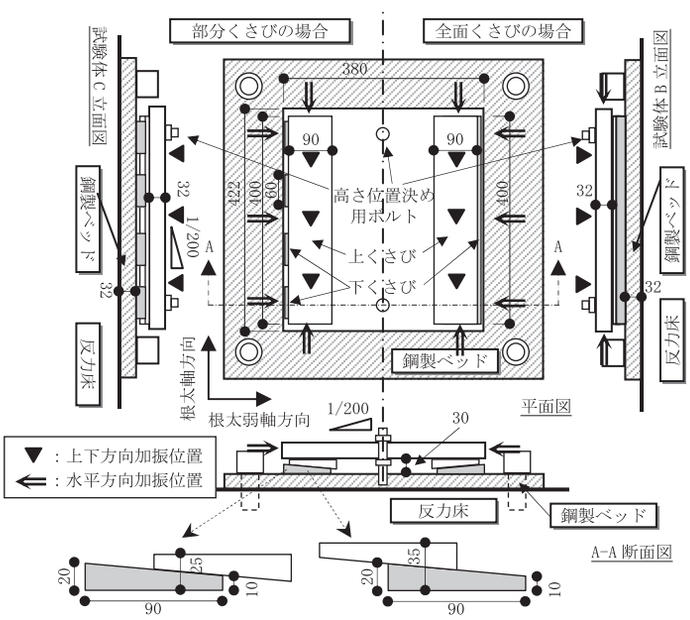
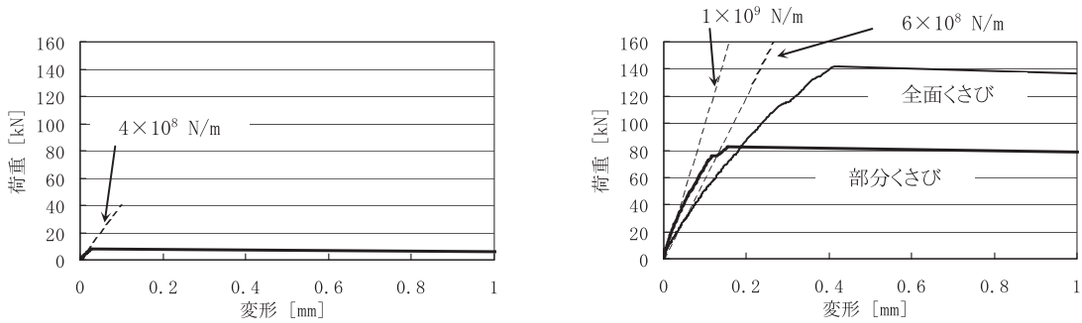


Fig.5 くさび接着接合部の剛性評価試験体（試験体B，C）
Experimental object to evaluate stiffness of junction using adhesively-bonded wedge chips

Table 2 基礎ユニットの平均動剛性の評価結果［×10^{8}N/m］
Evaluated dynamic stiffness of foundation unit［*10^{8}N/m］

	根太弱軸方向	根太弱軸方向	上下方向
エポキシ接合	7.05	6.77	2.71
全面くさび接合	10.74	10.20	5.41
部分くさび接合	20.45	14.05	6.78



(a)　エポキシ接合部　　(b)　くさび接着接合部

Fig.6　基礎接合部の水平せん断加力時の荷重変形曲線
Experimental load-deformation curve of junction subjected to horizontal shear force

Photo 3　剥離施工試験風景
Construction experiment of detaching foundation unit

Photo 4　剥離後のくさびの状況
Detached wedge chip

験した。基礎ユニットを模した上部の鉄板を水平方向に加力し，単純せん断を与えた。荷重変形曲線をFig.6に示す。加力初期の荷重変形曲線から推定される剛性は，インパルスハンマによる打撃により推定された剛性に比べ，やや低く算定される傾向にあった。これは，インパルスハンマ打撃による変形が極微小であることに起因しているものと思われる。くさび接合による試験体の終局せん断強度は，全面くさびが140kN程度，部分くさびが80kN程度であり，目標値（60kN）を達成した。エポキシ接合試験体の終局せん断強度は10kN程度であった。

くさびの接着接合方式による基礎は，強固に根太と結合されるため，搭載する精密機器のレイアウト変更があった場合に合わせて，容易に剥離させて移動可能であることが求められる。実大の部分くさび基礎を作成し，鉄骨製の根太にみたてた鉄製板に接合した。十分硬化した後に，剥離試験施工を実施した。Photo 3に施工状況を示す。チェーンブロックなどで上向きに荷重を掛けながら接着部をタガネで打撃すると，比較的容易に剥離した。Photo 4に剥離状況を示す。剥離は接着接合部ではなく，基礎ユニットに充填したコンクリート面で起こった。

4　実大試験体による剛性の確認

実大試験体を製作し，根太と高剛性基礎全体の剛性を実験により確認した。Fig.7に試験体の概要を，Fig.8に根太と基礎ユニットとの接合方法を示す。ボルトによるSUS製筐体の内部付着強化と，部分くさび接合方式を採用した。根太のウエブ部にはコンクリートが充填されている。2.4mスパンの3本の根太上1.2m×2.4mの範囲に600mm×600mm×280mm（H）サイズの基礎4台および，600mm×1200mm×280mm（H）サイズの基礎2台により基礎群を構築した。従来600mm×600mmでは精密装置の支持脚が2基の基礎ユニットにまたがってしまう箇所であっても，600mm×1200mmの基礎を組み合わせることにより，1基の基礎ユニット上に安定に設置することができる。施工

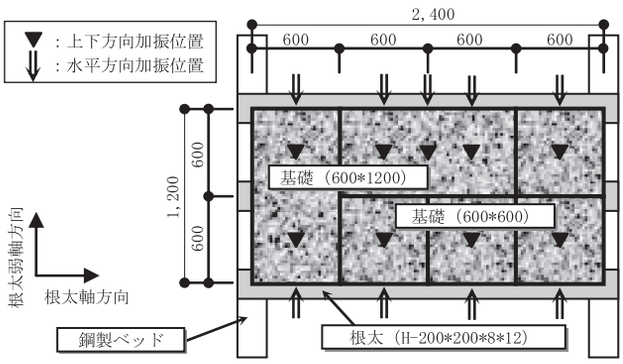


Fig.7　基礎ユニットの複合試験体
Experimental object of complex of foundation unit

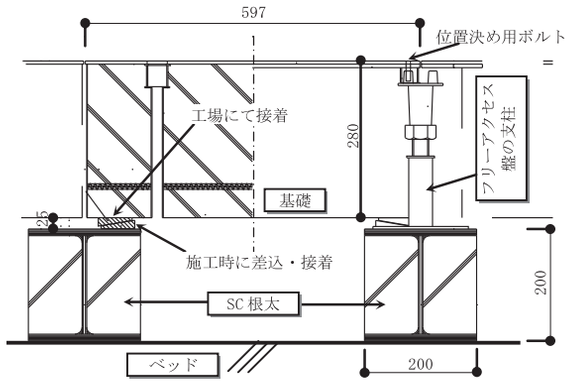


Fig.8　基礎ユニットと根太の接合方法
Joining method of foundation unit and joist

時には，従来通りフリーアクセスフロアの支柱を利用して位置決めをした後，下側の部分くさびを根太の下部から接着接合した。

根太と高剛性基礎全体の剛性は，根太の剛性により大きく影響を受けるため，基礎ユニットの剛性のみでは予測できない。そこで，FEM解析を行い，試験体全体の動剛性を予測した。Table 3に実大試験体の平均動剛性をFEM解析結果と比較して示す。FEM解析における基礎接合部の剛性は，Table 2で求められた実験値を使用した。根太単体では動剛性が低いが，高剛性基礎を接着接合することにより大きく改善され，露光装置の基礎として求められる1×10^8N/mを満足した。特に，根太の弱軸方向の補剛効果が顕著である。また，実験結果と解析値はよい対応を示している。

Table 3　複合試験体の平均動剛性［$\times10^8$ N/m］
Evaluated dynamic stiffness of foundation complex［$^*10^8$ N/m］

	根太弱軸方向	上下方向
根太単体	0.50 （0.41）	0.85 （0.79）
根太および基礎の接着接合後	1.40 （1.57）	1.16 （1.20）

上段：実験結果，下段（　）内：FEM解析値

5　まとめ

くさび型片を接着接合することにより，ケミカル汚染を起こさない部材のみを用いて，根太の剛性不足を補う高剛性基礎を開発した。部分試験体および実大試験体により露光装置に必要な動剛性および終局強度が得られていることを確認した。また，新規施工およびレイアウト変更に伴う剥離施工が容易に実施できることを確認した。

謝辞

開発に際し多大な御協力を頂いた(株)竹中工務店九州支店設計部および河内板金工業(株)の関係各位に，心から謝意を表します。

参考文献

1）Yoshioka, H., Takahashi, Y., et al.: An Active Microvibration Isolation System for Hi-tech Manufacturing Facilities, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 123, No. 2, pp.269-275, 2001.
2）安田正志，大坂隆英，池田雅夫：フィードフォワード制御を併用したアクティブ除振装置の研究，日本機械学会論文集（C編），No.58，Vol.552，pp.2381-2387，1992
3）増田圭司，中村佳也，ほか4名：超磁歪アクチュエータを使用したアクティブ微振動制御装置の開発，日本建築学会大会学術講演梗概集B2，pp.797-800，1998
4）嶋崎守, 藤田隆史，ほか4名:免震された精密生産施設のためのピエゾアクチュエータを用いた総合的アクティブ微振動制御システム，日本機械学会論文集（C編），No.72，Vol.722，pp.3123-3130，2006
5）水野毅, 吉冨亮一：ゼロパワー磁気浮上を利用した除振装置の開発（第1報，基本原理と基礎実験），日本機械学会論文集（C編），No.68，Vol.673，pp.2599-2604，2002
6）石黒武：空気質の計測・分析技術（2）電子デバイス製造環境における化学物質微量分析技術，空気調和・衛生工学，No.81，Vol.8，pp.687-694，2007