

# 加振試験による 機器基礎定着部の健全性評価検討

長澤 和幸<sup>1</sup>・折田 修一<sup>2</sup>・大島 宣昭<sup>3</sup>・遠山 典秀<sup>4</sup>・中西 啓二<sup>5</sup>・下戸 芳寛<sup>6</sup>

<sup>1</sup>東京電力株式会社 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町一丁目1番3号)  
E-mail:k.nagasawa@tepcoco.jp

<sup>2</sup>東京電力株式会社 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町一丁目1番3号)  
E-mail:orita.shuichi@tepcoco.jp

<sup>3</sup>日立GEニュークリア・エナジー株式会社 (〒317-0073茨城県日立市幸町三丁目1番1号)  
E-mail:nobuaki.oshima.sj@hitachi.com

<sup>4</sup>日立GEニュークリア・エナジー株式会社 (〒317-0073茨城県日立市幸町三丁目1番1号)  
E-mail:norihide.tohyama.tp@hitachi.com

<sup>5</sup>清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4番17号)  
E-mail:nakanisi@shimz.co.jp

<sup>6</sup>清水建設株式会社 (〒105-8007東京都港区芝浦一丁目2番3号)  
E-mail:orito@shimz.co.jp

本報は、原子力発電所の機器・配管支持構造物の基礎ボルトに、地震力のような動的荷重が作用した場合の定着部の性能を確認するために行った加振試験について示すものである。加振試験としては、①基礎部に動的引抜力を作用させる引抜力加振試験、②動的せん断力を作用させるせん断力加振試験、③実機機器の模擬試験体に観測波等を入力した実機模擬加振試験の3種類の試験を行うと共に、加振試験後に内部損傷調査と残留耐力を確認するための引抜試験も実施した。その結果、現行の設計式に基づいて設計された基礎ボルトは、動的荷重に対して十分な安全余裕を有すると共に、動的荷重載荷後においても、設計許容値以上の引抜耐力を有していることを確認した。

**Key Words :** E-defenses, Vibration Test, Anchor Bolt, Pull-out Strength, Shear Strength

## 1. はじめに

原子力発電所に設置される機器・配管支持構造物の、基礎ボルトやスタッドによるコンクリートへの定着部は、載荷試験による研究成果<sup>1)</sup>を基に設計手法<sup>2)</sup>を確立し、設計を行っている。ただし、これまでに実施された試験は、静的載荷によるもののみであり、地震力のような動的荷重が作用した場合の定着部の性能を実験的に確認した例はない。

本研究では、コンクリート床版に埋め込まれた定着部に動的荷重が作用した時の定着部の挙動、耐力を確認するための加振試験と、加振試験後の内部損傷調査と動的荷重作用後の定着部耐力を調査することを目的として実施した静的引抜試験の結果を示すものである。

なお、加振試験は、(独)防災科学技術研究所三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)を用いて行った。

## 2. 引抜力加振試験

### (1) 試験方法

試験体の仕様及び概要を表-1及び図-1, 2に示す。試験体は、基礎ボルトを取り付けたベースプレートに鋼管を介して重錘を設置し、加振により基礎ボルトに引抜力が作用するようにしたものである。試験体パラメータは、基礎ボルト径と埋込深さであり、ボルトの外側に鋼管スリーブを設置し、ボルト周辺をモルタルグラウトした試験体と、基礎ボルトを鉄筋補強(D13@200)された基礎台に設置した試験体も併せて試験を行った。基礎台付試験体以外は、基礎ボルトは鉄筋補強されていないコンクリート部分に埋め込まれた。基礎ボルトの材質はSS400とし、据付時に締付力(M16: 100N-m, M36: 1200N-m)を導入した。試験体の固有振動数は15Hz程度であった。なお、加振試験後に、内部損傷を調査するためのコア抜きと、残留耐力を確認するための引抜試験を実施するために、全ての試験体について同一形状

の試験体を2体用意した。

入力地震波は、試験体の固有振動数と一致する卓越振動数を持つ模擬地震波とし、一方向入力とした。時刻歴波形及び応答スペクトルの実測値を図-3、4に示す。

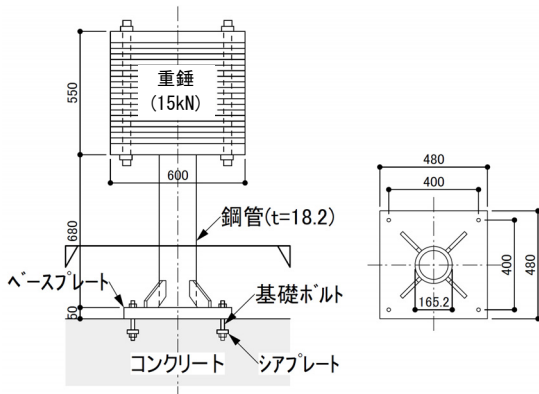
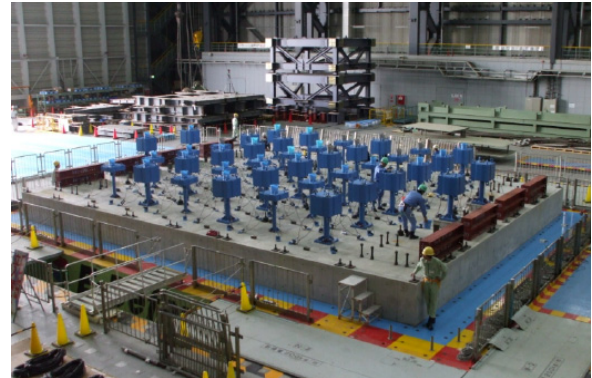


図-1 引抜き力加振試験体形状

図-2 引抜き力加振試験体設置状況

表-1 引抜き力加振試験体及び試験結果一覧

No	ボルト種類	試験体種類	パラメータ						加振試験結果		内部損傷調査	静的引抜き試験		
			ボルト径	埋込深さ(mm)	シアプレート寸法(mm)	スリーブ	初期締付力	基礎台	配筋	試験体(注1)		最大加速度による引抜き荷重設計許容値IIIAs	内部ひび割れ	最大耐力設計許容値IIIAs
I-1-1	標準ボルト	埋込深さパラメータ	M16	150	80	無	有	無	無	P	0.67	無	-	ボルト降伏
I-1-2				C	0.67									
I-1-3				P	1.02									
				C	1.18									
I-1-4				P	1.78									
				C	1.64									
I-1-5	スリーブ有	150	80	有	有	基礎台配筋	P	0.69	無	-	ボルト降伏			
I-1-6	基礎台有	150	80	無			C	0.76						
I-2-1	ボルト強化	埋込深さパラメータ	M36	139	110	無	有	無	無	P	1.47	無	2.25	シアコーン
I-2-2				C	1.09									
I-2-3				P	2.02									
				C	2.11									
I-2-4				P	3.04									
				C	2.93									
I-2-5	P	6.62												
	C	5.93												
I-2-6	P	1.20												
	C	0.96												
III-1-2	標準ボルト	限界加振試験体	M16	49	80	無	有	有	基礎台配筋	P	3.58(700gal入力)	無	-	ボルト降伏
										C	4.87(900gal入力)			
										P	3.42(700gal入力)			
										C	4.27(900gal入力)			

(注1) P: 加振後引抜き試験, C: 加振後コア抜き観察

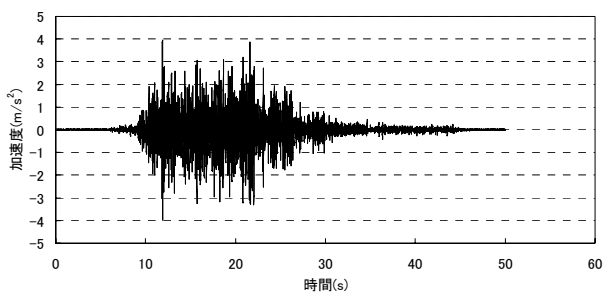


図-3 時刻歴波形

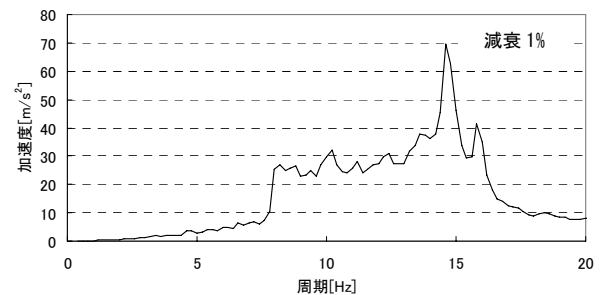


図-4 応答スペクトル

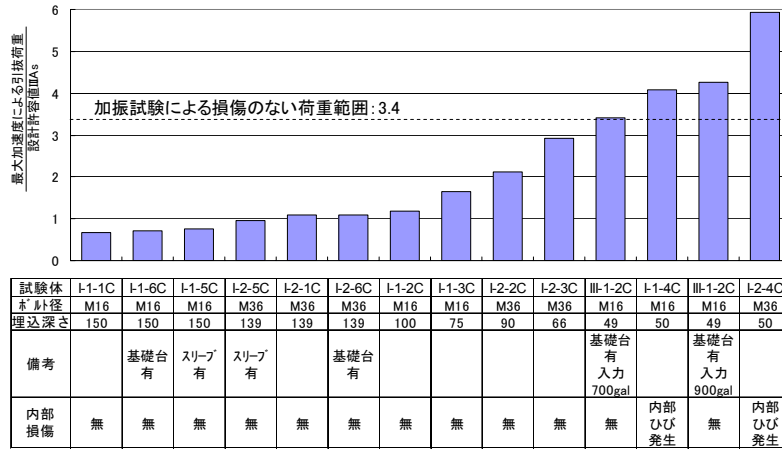


図-5 加振時最大引抜力の設計許容値 IIIAs との比較

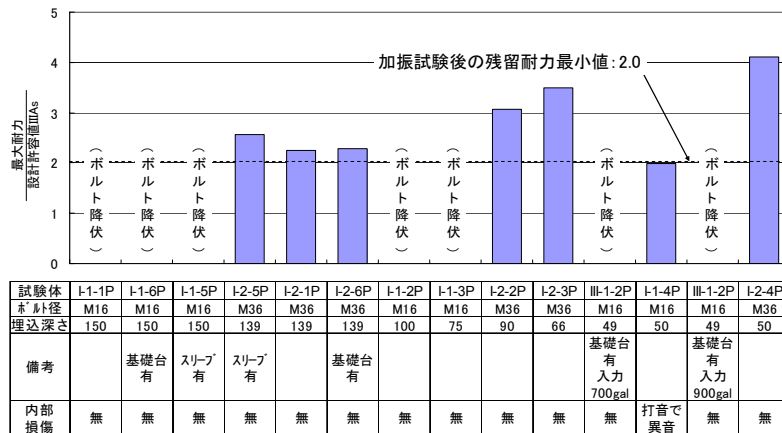


図-7 引抜試験最大耐力の設計許容値 IIIAs との比較

## (2) 試験結果

加振試験後のコンクリートの損傷状況は、後述するように、一部の試験体で内部ひび割れの発生が確認されたものの、表面にひび割れが生じている試験体はなかった。図-5には、試験体重錘の応答加速度から算定したボルトの最大引抜力の、設計許容値 IIIAs ( $0.45Ac\sqrt{F_c}$ ,  $Ac$ : コンクリートのコーン状破壊面の有効投影面積,  $F_c$ : コンクリートの設計基準強度)に対する比を示す。一部埋込深さが大きく設計許容値が比較的大きい試験体を除けば、入力値は設計許容値を超えており、設計許容値の最大約6倍の入力に対しても、ひび割れが表面に達するようなコーン破壊は起きていない。

## (3) 内部損傷調査

内部損傷の確認は、試験体コンクリートをコア抜き・切断し、表面を目視観察する方法により行った。調査結果を表-1に併せて示す。埋込深さが少なく、コンクリートコーン破壊耐力が比較的小さい試験体において内部ひび割れが観察された。内部ひび割れが観察された試験体の一例を図-6に示す。設計許容値 IIIAs の約4.1倍の引抜力が作用した試験体には内部ひび割れが生じたが、引抜力が設計許容値の約3.4倍の試験体では内部ひび割れが生じなかったことから、設計許容値の約3.4倍程度の引抜力に対しては、定着部はコンクリートの内部損傷もなく健全であるといえる。



図-6 内部ひび割れ状況 (試験体 I-1-4)

## (4) 静的引抜試験

加振後の残留耐力を確認するための静的引抜試験は、試験体コンクリート床版上に自己釣合系の加力フレームを設置し、油圧ジャッキにより基礎ボルトを4本同時に引抜くという方法で行った。

試験結果を表-1に併せて示す。埋込深さが比較的大きいM16ボルトを用いた試験体を除いて、破壊モードはコンクリートのシアコーン破壊であった。最大耐力の設計許容値 IIIAs に対する比を図-7に示す。内部ひび割れが発生していることが確認された試験体においても、設計許容値の約2倍の最大耐力を有しており、設計許容値は確保されていることが確認できた。

### 3. せん断力加振試験

#### (1) 試験方法

試験体の仕様及び概要を表-2及び図-8, 9に示す。基礎ボルトは4-M8(SS400)とし、初期締付け・スリーブ・基礎台の有無をパラメータとし、ボルトに作用するせん断力を、設計許容荷重IIIAsの0.5倍, 1.0倍, 2.0倍になるように重錘の重量を設定した。試験体形状は1600mm×1600mm×25mmのベースプレート上に鋼板を重ねて所定の重量になるように製作した。RC床版とベースプレート間にはグリースを塗布したステンレスプレートを挟み摩擦を低減させ、重錘からのせん断力が直接ボルトに作用するようにした。ボルトの初期締付け力は12N-mとした。

加振波は中越沖地震観測波のうち柏崎刈羽原子力発電所1号機原子炉建屋(以下KK-1 R/Bと呼ぶ)基礎版上で観測されたEW方向波を最大加速度が9.8m/s<sup>2</sup>となるように割増して水平1方向に加振した。

#### (2) 試験結果

試験結果を表-2に示す。設計許容荷重IIIAsの2.0倍のせん断力が作用するよう設定した試験体II-1-4はボルトがせん断破壊した。図-10にII-1-4の加振後の損傷状況を示す。それ以外の試験体は、定着部の機能に関係しない僅かなボルトの抜出しとボルト周辺コンクリート表面にごく軽微な剥離が発生したのみであり、定着性能に影響するような損傷は認められなかった。

#### (3) 内部損傷調査

試験体II-1-4の内部損傷状況を図-10に示す。表面側で、ボルトの湾曲及びボルト周辺コンクリートの損傷が認められた。それ以外の試験体については、内部にひび割れ等の損傷は認められなかった。

#### (4) 静的引抜試験

加振後の引抜試験は、加振試験でボルトが破断したII-1-4以外の試験体に対して実施し、全ての試験体で、破壊モードはボルト降伏であった。



図-8 せん断力加振試験体



図-9 せん断力加振試験体設置状況



図-10 試験体II-1-4の損傷状況

表-2 せん断力加振試験体及び試験結果一覧

試験体 No	試験体の種類	ボルト径	埋込深さ (mm)	シアプレート (mm)	パラメータ			試験結果			
					重錘重量 (kN)	初期締付け力	スリーブ	基礎台	試験体 <sup>1)</sup>	最大加速度による発生荷重 IIIAs設計許容値	破壊様式 <sup>2)</sup>
II-1-1	IIIAs設計許容荷重×1.0 初期締付け無し	M8	76	40	48	無	有	有	P	1.01	A
									C	0.92	A
II-1-2	IIIAs設計許容荷重×0.5		76	40	28	有			P	0.59	A
									C	0.57	A
II-1-3	IIIAs設計許容荷重×1.0		76	40	48				P	1.05	A
									C	0.94	A
II-1-4	IIIAs設計許容荷重×2.0	76	40	79	P		1.91	B			
					C		1.86	B			
II-1-5	IIIAs設計許容荷重×1.0 スリーブ有		76	80	48	無	P	0.96	A		
						C	1.07	A			
II-1-6	IIIAs設計許容荷重×1.0 基礎台有		150	40	48	有	無	P	0.94	A	
							C	0.96	A		

注1) P: 加振後引抜き試験, C: 加振後コア抜き観察, 注2) A: 健全, B: ボルト破断

## 4. 実機模擬加振試験

### (1) 試験方法

試験体は柏崎刈羽原子力発電所7号機原子炉建屋(以下、KK-7 R/Bと呼ぶ)基礎版上に設置されるRHR熱交換器と同様な重量(約330kN)及び寸法を模擬し、実機と同じ基礎定着部構造とした。図-11、12に振動台上に設置された試験体の概観写真を示す。重錘はRC造とし2台の鉄骨架台及び基礎台で支持され、スリーブ付きのM48(SS400,L=500mm)の基礎ボルト4本で支持される。基礎台の内1台は固定で、他の1台は熱膨張に対応するため長手方向に摺動方式である。ボルトの初期締付力は3 kN-mとした。

加振波は、①中越沖地震におけるKK-7 R/B基礎版上観測波、②KK-7基準地震動Ss波(平成20年5月22日に東京電力より公表された基準地震動)のKK-7 R/B基礎版上応答波、③中越沖地震におけるKK-1 R/B基礎版上観測波の1.7倍とし水平上下3方向同時加振とした。

### (2) 試験結果

図-13に入力地震波の目標最大加速度と試験体RC床版における計測最大値を比較して示す。3波とも概ね予定された地震波が入力された。またKK-1観測波の1.7倍入力では、最大 $18.0\text{m/s}^2$ (観測波の2.6倍)の加速度が入力されたが、加振後の基礎台コンクリート部の表面には有意なひび割れが発生していないことを確認した。基礎ボルトについても損傷は認められなかった。

### (3) 内部損傷調査

図-14に加振後のボルト廻りのコンクリートをコア抜きカットした状況を示す。コンクリート内部にはひび割れは観察されず健全であることを確認した。

### (4) 静的引抜き試験

加振による定着部への影響を確認する目的で3回の加振履歴を受けた定着部の静的引抜き試験を実施した。図-15に荷重-ボルト拔出量関係を示す。ボルトの設計許容荷重を超える荷重が載荷されることでボルトが軸降伏し、塑性変形による伸びが伸張したが、コンクリートは損傷することはなかった。

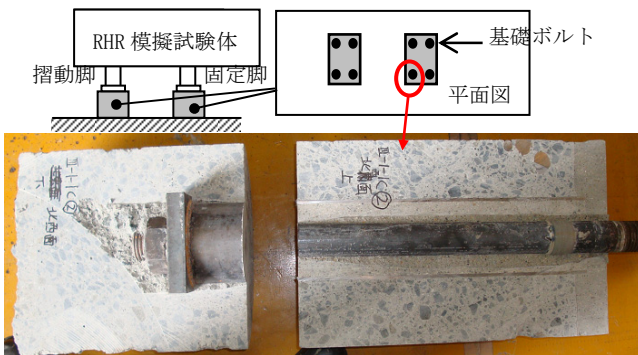


図-14 ボルト周辺コンクリートの状況



図-11 実機模擬試験体



図-12 実機模擬試験体の設置状況

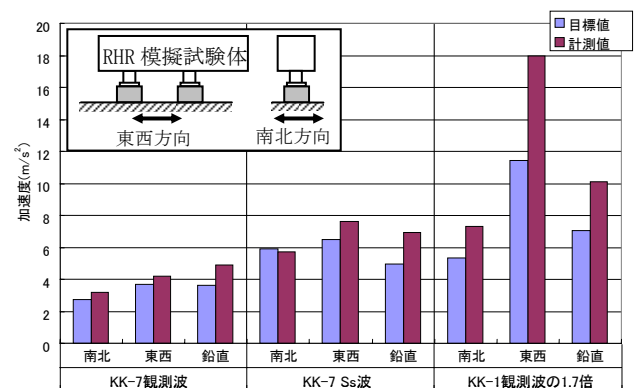


図-13 入力地震波最大加速度

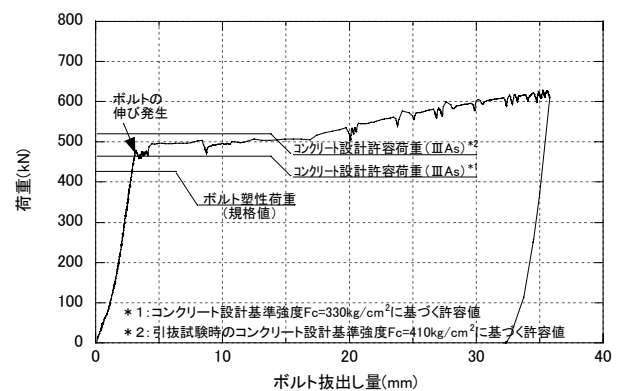


図-15 静的引抜き試験による載荷履歴曲線

## 5. まとめ

原子力発電所の機器・配管支持構造物の基礎ボルトを模擬した試験体に対し、①引抜き加振試験、②せん断力加振試験、③実機模擬加振試験の3種類の加振試験を実施した。その結果を以下にまとめる。

### (1) 引抜き加振試験

基礎定着部に動的引抜き力を作用させて引抜き耐力及び挙動を評価し、設計許容値IIIAsの最大約6倍の入力に対して定着部はその機能を喪失せず、十分な余裕を有していることを確認した。また、加振試験後に実施した内部損傷調査により一部の試験体で内部ひび割れの発生が観察されたが、設計許容値の約3.4倍までの引抜き荷重であれば内部も健全であることが確認された。また、残留耐力を確認するための引抜き試験では、加振後の全ての試験体が設計許容値以上の残留耐力を有しており、今回行った加振が定着部の機能に影響しないことを確認した。

### (2) せん断力加振試験

基礎定着部に動的せん断力を作用させてせん断耐力及び挙動を評価し、作用せん断力が設計許容値をわずかに超える範囲までの定着部健全性を確認した。

### (3) 実機模擬加振試験

原子力発電所の実際の機器・コンクリート定着部を模擬した試験体に、中越沖地震観測波及びそれを上回る地震波を3回加振入力したが、試験体の定着部には有意な損傷は認められず、また静的引抜き試験により残留耐力が設計許容値以上であることを確認した。

### 参考文献

- 1) 市橋 他「原子力発電所の機器定着部（基礎ボルト）に関する実験試験（その1）～（その5）」、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.157～166, 1987
- 2) 日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991追補版」

## VIBRATION TEST FOR INTEGRITY OF EQUIPMENT FOUNDATIONS AFFECTED BY DYNAMIC LOAD

Kazuyuki NAGASAWA, Shuichi ORITA, Nobuaki OSHIMA, Norihide TOHYAMA,  
Keiji NAKANISHI and Yoshihiro ORITO

This report describes the plan and results of vibration tests performed to confirm capacities of equipment base anchorage for dynamic loads like seismic loads. The following three kinds of vibration tests were carried out.

- (i) Vibration test in which pull-out force is applied to anchor bolts
- (ii) Vibration test in which shear force is applied to anchor bolts
- (iii) Vibration test for models of actual equipment bases

After the vibration tests, surveillance of damages in internal concrete and static pull-out tests to confirm residual strength were also performed.

As the results, it was confirmed that

- anchor bolts designed using the existing design method have sufficient strength for dynamic loads, and
- residual pull-out strength of anchor bolts exceed design allowable values even after severe dynamic loads are applied.