

塑性率を考慮した静的震度設計法による 柏崎刈羽原子力発電所特定重大事故等対処施設の設計例

The seismic design example for the Specialized Safety Facility with Static Seismic Coefficient Procedure considering Ductility Factor

東京電力 HD(株) 長澤 和幸
東京電力 HD(株) 川口 善之
東京電力 HD(株) 古谷 賢

Kazuyuki NAGASAWA Member
Yoshiyuki KAWAGUCHI
Masaru FURUYA

This paper proposes new static seismic design methodology with newly defined DSC derived from elastic-plastic time historical seismic response analysis of components and allowable ductility factor to prevent damage to components. The process of the seismic response analysis to obtain the ductility factor considering load-deflection characteristic of components and definition of the allowable ductility factor based on the actual experiences are also described. Furthermore, trial analysis of the DSC for actual nuclear facility of Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station is conducted.

It is expected that the new method will help diversify the existing seismic design system, which is based on equivalent elastic design, as well as increase the reliability of seismic design to deal with the uncertainty of the seismic motion.

Keywords: Seismic Design, Static Coefficient, Ductility Factor, Design Basis Earthquake

1. 緒 言

現行の機器の耐震設計体系は相当の保守性を有しており、弾塑性領域の地震応答を塑性率として整理することで、地震動の特性と機器の損傷の関係を表現できる可能性があるとの知見を得た。

本論では、地震動のもとでの塑性率を一定程度以下に抑えることにより地震による機器の損傷ないしは機能喪失を防止する、新たな静的震度設計の手法に基づき、柏崎刈羽原子力発電所特定重大事故等対処施設の耐震設計を例にとり、許容塑性率を満足するために採用すべき静的震度のレベルを検討した。

2. 塑性率を用いた静的震度設計法

2.1 手法の考え方

配管系や建物との連成が必要な大型構造物などを除き、機器は1自由度系のモデルを用いて地震応答解析されることが多い。1自由度系でモデル化される機器の弾塑性地震応答解析では、重心位置での荷重と変形（相対変位量）の関係によって地震応答が決定される。

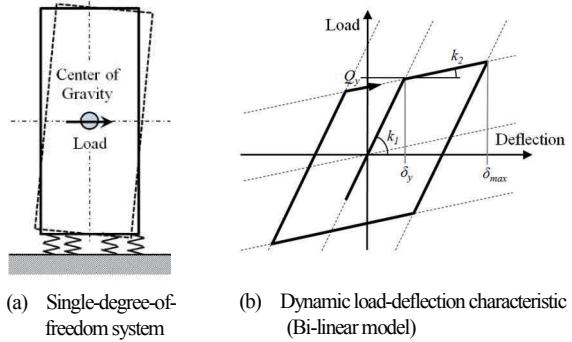


Fig.1 Elastoplastic response analysis

本論文においては、原子力発電所設備を Fig.1(a)のように、機器の重心位置に地震荷重が作用したときの地震応答変位特性（荷重一変位特性）を1自由度系バイリニアモデル（Fig.1(b)）に単純化したモデルを用いて、塑性域まで（自身に対する材料の粘り）を考慮し、耐震設計を高度化する手法を提案する。

$$k_1 = \frac{4\pi^2}{T^2} \frac{W}{g} \quad (1)$$

$$Q_y = Sc W \quad (2)$$

$$\mu = \frac{\delta_{max}}{\delta_y} \quad (3)$$

Fig.1(b)で Q_y は降伏荷重、 δ_y は降伏変形、 δ_{max} は最大変形を表し、一次剛性 k_1 は弾性剛性、二次剛性 k_2 は塑性剛性を示している。系の固有周期 T と k_1 の間には式(1)が成立する。ここで、 W は質点の質量、 g は重力加速度である。

連絡先: 古谷 賢, 〒945-8601 新潟県柏崎市青山町 16 番地 46, 東京電力ホールディングス(株), 原子力設備管理部安全施設建設センター,
E-mail: k.nagasawa@tepc.co.jp

る。また、 Q_y と W の関係式(2)において降伏荷重を与える震度を静的震度 Sc と呼ぶ。また、塑性率 μ は式(3)のごとく δ_y と δ_{max} の比と定義する。

このバイリニアモデルに任意の地震動を入力し時刻歴弾塑性応答解析を実施することで地震力の特性に応じた荷重一変位ヒステリシス応答が出力されるとともに、地震継続時間中の最大塑性率が得られる。

さらに、静的震度 Sc を一定として固有振動数を変化させたバイリニアモデルを用いて上記の計算を行って最大塑性率をプロットすることによって、塑性率スペクトルを評価する(Fig.2参照)。

ここで、実際に大きな地震動を受けた原子力発電所機器について、機器の設計上の静的震度 Sc と観測記録により塑性率スペクトルを導出して、機器の損傷ないしは機能喪失の有無と比較することにより、機器の機能維持に影響すると考えられる塑性率レベルを把握できる。原子力発電所における機器は多種多様であるため、広範囲の機器について分析を行うことで、機器固有の機能維持を担保する塑性率レベルの導出が可能である。

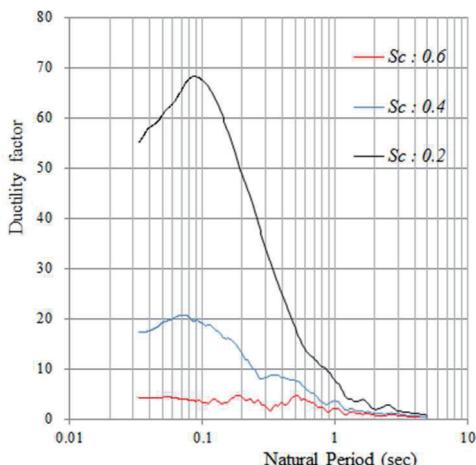


Fig.2 Example of ductility factor response spectrum

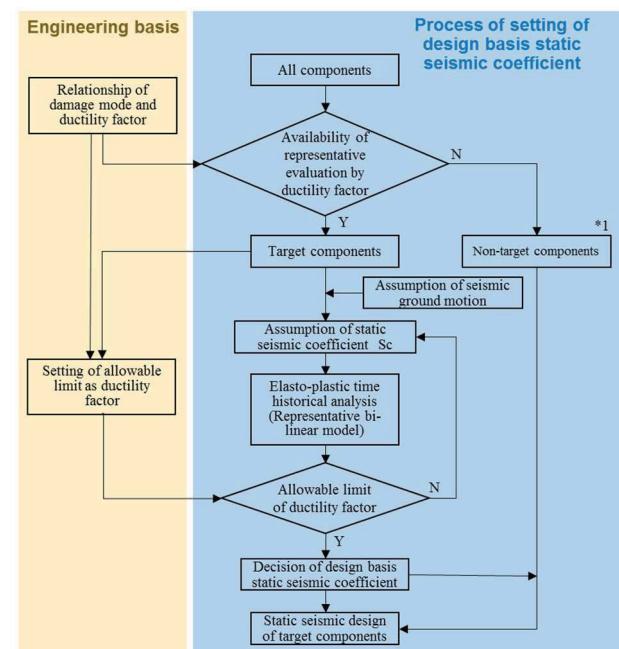
2.2 手法の手順

許容塑性率を用いた静的震度設計の手順を示すFig.3は、静的震度設計に用いる設計用静的震度の導出プロセスを示している。

設計者は、まず、本手法を適用できる機器を選定する必要がある。ここでは、機器の機種ならびに損傷モードによっては本手法が適用できない可能性があるため、対象とする機器を選定する。リレーのチャタリング、地震時の相対変位や内部部品の接触等のように、塑性率で機器系の損傷ないし機能喪失を代表できない機器については、個

別の設計を行うことが必要である。

次に入力となる地震動を選定する。想定される地震動としては当該発電所における基準地震動に基づいて設定することが合理的であると考えられる。入力となる地震動を用いて塑性率スペクトルを導出するにあたり、静的震度 Sc を定め、バイリニアモデルを用いた時刻歴弾塑性解析を実施する。これにより求められた塑性率スペクトルが全固有周期帯において許容塑性率を下回るまで、静的震度 Sc を大きくしながら解析を繰り返し、許容塑性率を満足する静的震度 Sc を見出す。さらに、これに保守性を考慮して設計用静的震度を定め、各機器の静的震度設計に用いる。



*1: A component, whose damage modes are not associated with the ductility factor, should be non-target component. Examples of these damage modes are wearing of bearings, ratcheting fatigue, contact of internal parts, short circuit of electrical equipment, relay chattering, etc.

Fig.3 Procedure of setting of design basis static seismic coefficient

3. 柏崎刈羽原子力発電所での設計例

平成25年7月に発効した原子力発電所に係る新規制基準においては、原子力発電所における大型航空機の衝突やテロリストによる襲撃に対する対策として特定重大事故等対処施設の設置が義務付けられ、さらに当該施設については、基準地震動を超える地震動に対する頑健性が求められている。

特定重大事故等対処施設の地震動に対する頑健性を高める手段として、本論で提案する耐震設計の多様化を採用することを考慮し、当該施設を例に許容塑性率を満足

するための静的震度の導出過程を以下に記す。

なお、ここでは、第3.2.1項で示す簡易的な1自由度系モデルで表現される機器を設計対象として試算した。

3.1 入力地震動の設定

Fig.3に示す通り、許容塑性率に基づき静的震度を決定する際に、入力地震動の設定が必要である。

基準地震動を用いた地震応答解析による動的な耐震設計においては、許容基準はおおむね弾性範囲に収まる程度の保守的なものである。本静的震度設計においては、機器の損傷ないし機能喪失を防止することを性能目標とし、機器の相当の変位を許容するので、入力となる地震動についても相当に大きいものを想定することが必要である。これにより、自然現象である地震の不確実性に対する耐震設計の多様性を向上させることができるものと考える。

ここで、現行の基準[1]では、基準地震動は「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」および「震源を特定せずに策定する地震動」の二つの観点から策定することとされている。本提案における入力地震動についても、これらを基本として入力レベルを検討する。

3.1.1 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

敷地ごとに震源を特定して策定する地震動は、敷地に大きな影響を与えると予想される地震に不確かさを考慮して基準地震動を策定することとされる。したがって、塑性率の算定に用いる入力地震動についても敷地ごとに固有のものである。

Table 1 Design Basis Earthquake for KK NPS (Ominato Side Area)

DBE	Earthquakes for review	Maximum acceleration (Gal)		
		NS	EW	UD
Ss-1	F-B	1050 *1	650	
Ss-2		848	1209	466
Ss-3	Katakai (in the Nagaoka Heiya Seien Fault System)	envelope	600 *1	400
Ss-4	The Nagaoka Heiya Seien Fault System	1.5 × stress drop	428	826
Ss-5		35° inclination	426	664
Ss-6		1.5 × stress drop	434	864
Ss-7		35° inclination	389	780
Ss-8	2004 Hokkaido Rumoi Sicho Nanbu		650	330

*1 Ss-1 and Ss-3 are derived with attenuation model.

柏崎刈羽原子力発電所の基準地震動のうち「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」は、主に2007年新潟県中越沖地震の震源となったF-B断層、長岡平野西縁断層帶およびこれらの連動などを考慮し、それぞれの断層に対して応力降下量、断層傾斜角等の震源特性パラメータを科学的知見に基づき保守的に設定して、策定している（Table 1 のSs-1～Ss-7 参照）。

本論で考慮する入力地震動については、基準地震動を相当に上回る規模として、簡便さの観点から基準地震動の加速度を2倍する手法を採用した。ここでは、Table 1 に示した基準地震動のうち、加速度の大きいSs-1 およびSs-2 の2倍波を検討対象とし、これらをSs-1* およびSs-2*とした（Fig.4,5 参照）。

なお、Ss-1* およびSs-2* は解放基盤表面で定義される波であり、本来であれば、これらを用いた特定重大事故等対処施設の建屋動解析の結果を用いて検討を行うべきであるが、ここでは、便宜的にSs-1* およびSs-2* をそのまま用いて検討を行った。従って、本論での解析結果は、建屋動解析結果を用いて検討するものに比して、極めて保守的な結果を与えるものと考える。

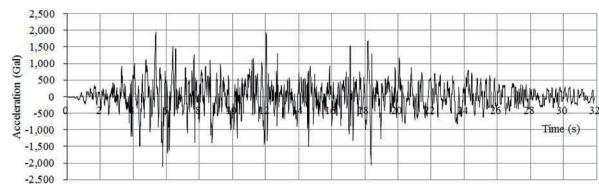


Fig.4 Seismic ground motion of Ss-1*

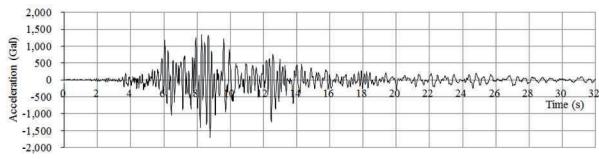


Fig.5 Seismic ground motion of Ss-2*

3.1.2 震源を特定せず策定する地震動

柏崎刈羽原子力発電所における「震源を特定せず策定する地震動」の策定にあたっては、震源と活断層を関連付けることが困難な過去の内陸地殻内地震（近地地震）を検討対象地震動として選定し、これらの観測記録と敷地周辺の地盤特性を踏まえ、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」を一部の周期帯においてわずかに上回る、2004年北海道留萌支庁南部地震に基づく地震動をSs-8として基準地震動に追加している（Table 1 のSs-8 参照）。

これに対して、特定重大事故等対処施設の耐震設計にあたっては、全国で観測された地表面での地震観測記録に基づき入力地震動を定めることとする。

選択した地震動は、国立研究開発法人防災科学技術研究所が公開している強震観測網（K-NET, KiK-net）のデータについて下記の条件で検索した地上観測波形で、3方向合成加速度が大きな上位 60 波形とした（Appendix Table1, Fig.6 参照）。

1) 記録開始時刻: 1996 年以降 2016 年 4 月まで

2) 最大加速度（3 方向合成最大加速度）：

500 から 5000 Gal

3) 震央距離：0 km から 30 km

これらの地震動は、地表面で観測された地震動であり、特定重大事故等対処施設の建屋内における基準地震動による地震応答に比べて非常に大きな加速度である。

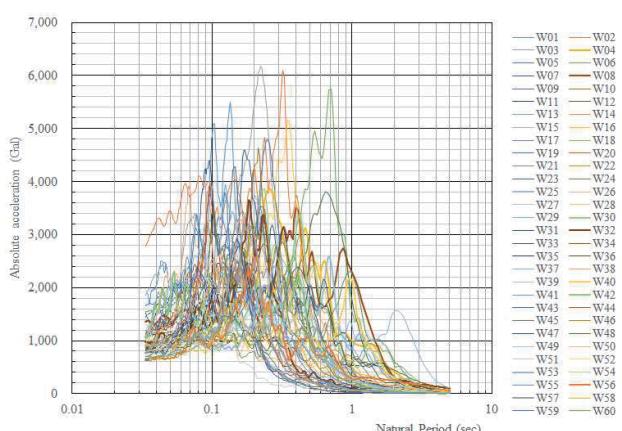


Fig.6 Seismic response spectrum based on observed near field earthquake ground motion

3.2 塑性率スペクトルの導出と静的震度の設定

3.2.1 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

Ss-1*および Ss-2*について 1 自由度系バイリニアモデルを用いた弾塑性応答解析を実施し（弹性域の減衰定数：0.05, 二次剛性：一次剛性の 0.05 倍），応答塑性率スペクトルを算出した（Fig.7,8 参照）。

応答塑性率スペクトルより、現行の耐震クラス S の機器に考慮される静的震度（ $3C_i=0.6$ ）程度では、固有周期によっては応答塑性率が 50 を超えることが確認できる。前章で提案した許容塑性率（10）を満足するため、特定重大事故等対処施設の機器の設計では耐震 S クラスに用いる静的震度は

1.5 以上が望まれる。ただし、前述の通り Ss-1*および

Ss-2*は解放基盤表面の地震動であるので、建屋応答を考慮した実際の設計においては、これより小さな静的震度が想定される。

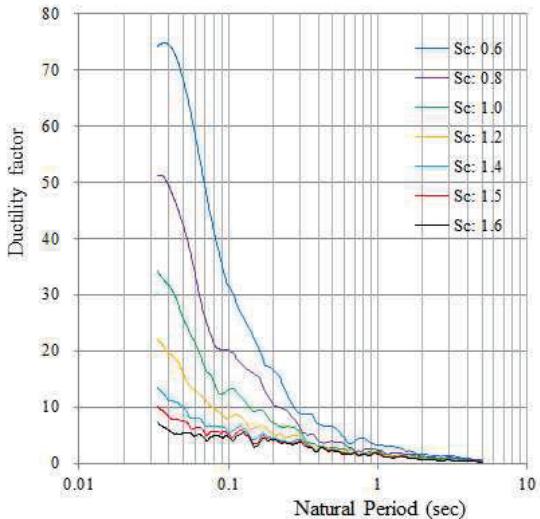


Fig.7 Ductility factor response spectrum (Ss-1*)

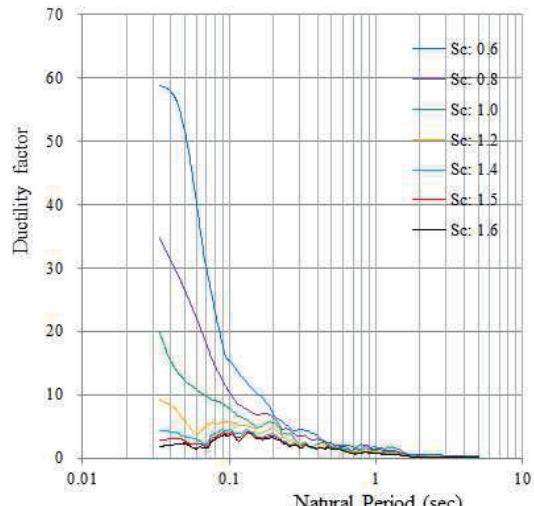


Fig.8 Ductility factor response spectrum (Ss-2*)

3.2.2 震源を特定せず策定する地震動

3.1.2 項において抽出した近地地震の地上波 60 波形について、1 自由度系バイリニアモデルを用いた弾塑性応答解析を実施し（弹性域の減衰定数：0.05, 二次剛性：一次剛性の 0.05 倍），応答塑性率スペクトルを算出した（Fig.9～11 参照）。

応答塑性率スペクトルより、現行の耐震クラス S の機器に考慮される静的震度（ $3C_i=0.6$ ）程度では、応答塑性率が最大で 100 程度となるが、静的震度を 1.2 程度することで、60 波の標準偏差の 3 倍（ 3σ ）が応答塑性率 10

を下回り、また、静的震度を 1.5 程度とすることで、60 波すべての応答塑性率が 10 を下回る結果となった。ここで、各応答塑性率スペクトルで最大値を示しているのは、観測記録（W 02）（2008 年岩手・宮城内陸地震時の東成瀬の記録）であり、EW 方向の最大加速度は 2449 Gal, 3 方向の合成加速度は 2600 Gal であった（Appendix Table1 参照）。

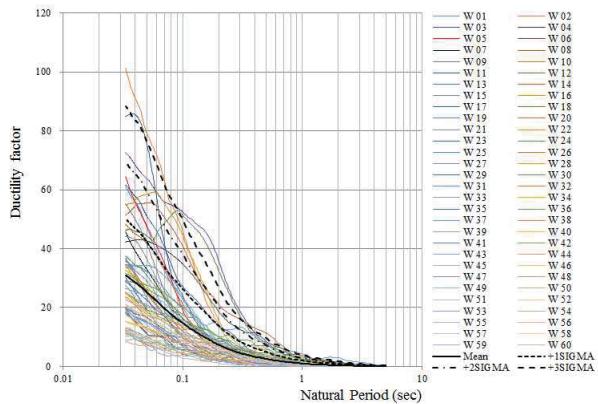


Fig.9 Ductility factor response spectrum (Sc 0.6)

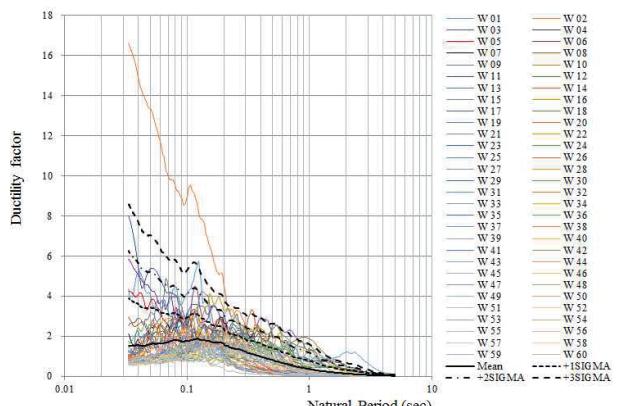


Fig.10 Ductility factor response spectrum (Sc 1.2)

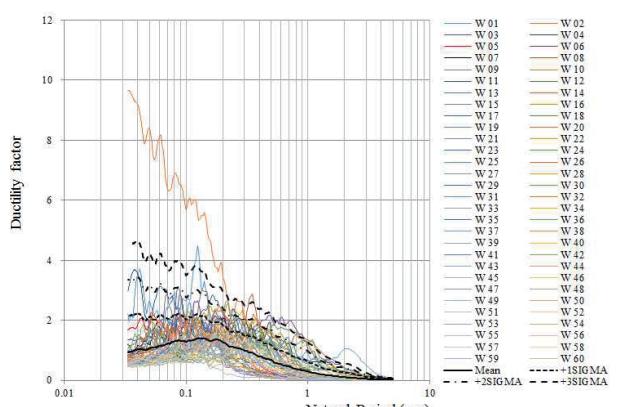


Fig.11 Ductility factor response spectrum (Sc 1.5)

以上より、前章で提案した許容塑性率(10)を満足する、特定重大事故等対処施設の耐震 S クラスの機器に用いる静的震度としては、1.2~1.5 程度が求められる。

3.2.3 許容塑性率を満足するための静的震度の設定

許容塑性率を 10 とした場合、これを満足するための静的震度を、柏崎刈羽原子力発電所特定重大事故等対処施設を例に検討した。入力とする地震動は、基準地震動の 2 倍に相当する地震動、ならびに全国で観測された大震度の地表面の観測記録であり、前者で静的震度を 1.5 以上、後者で 1.2~1.5 とすることで、許容塑性率(10)を満足する結果となった。従って、特定重大事故等対処施設の S クラス機器の設計では、静的震度を 1.5 とすることで、本論が目標とする耐震設計の多様性と頑健性が得られるものと考えられる。

なお、前項に示した通り、入力地震動については解放基盤表面ないしは地表面での地震動であり、岩着された S クラス建屋内の機器への入力としては、過度に保守的となっている可能性があり、実際の設計においては建屋の応答解析等を通じて、より合理的な設計用静的震度の設定が期待される。

4. 結 言

本論では原子力発電所設備で用いられている構造材料の粘りを考慮し、設備の機能喪失を許容限界とした静的震度設計法の考え方を示した上で、柏崎刈羽原子力発電所特定重大事故等対処施設の耐震設計を例により、許容塑性率を満足するために採用すべき静的震度のレベルを検討した。

本手法は、現行の原子力発電所における基準地震動を用いた動的設計が、概ね弾性範囲内に収まる構造強度を求めていているのに対して、機器の弾塑性挙動と地震動の交番特性を考慮した上で、機器の荷重・変位特性に着目して機能維持を図るという新しい概念を取り込んだものである。

地震は自然現象であるので不確定性を考慮する必要があり、これまでの経験からも、基準地震動を一部の周期帯で超過するような地震が発生する可能性を否定することはできない。本論で提案する手法は、そのような地震を想定した場合の後備の位置づけとなり、現行の耐震設計体系に新たな多様性と保守性を与えるものと期待されるとともに、実地震を経験した際の設備状況の把握や、地震後の再稼働の判断にも貢献するものと考えられる。

今後は、他の原子力発電所や一般産業設備における被害状況の分析、塑性率に着目した各種試験の実施や過去の試験の分析を行うことで、設備の損傷モードを適切に考慮できる本手法の高度化と、許容塑性率に対するさらなる知見の拡充が期待される。

参考文献

- [1] 原子力規制委員会：“実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（別記2），原規技発第1407092号”，pp.122-132(2014).
- [2] K. Nagasawa, T. Narabayashi: “Seismic response and its analysis for components of Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plants in 2007 Niigata-ken Chuetsu-Oki Earthquake”，Mechanical Engineering Journal, Vol.4, No.1, pp.1-16(2017).
- [3] 長澤和幸, 奈良林直：“東北地方太平洋沖地震における福島第一原子力発電所の地震応答に関する分析について”，日本機械学会論文集, Vol.82, No.837, pp.1-18(2016).

Appendix Table1 The 60 waveforms selected from K-NET and KiK-net database

Wave number	K-NET/KiK-net Registered ID	Observation point	Estimated JMA Intensity	Epicentral distance (km)	Maximum acceleration (Gal)				
					NS	EW	UD	NS-EW-UD composition	NS-EW composition
W 01	IWTH250806140843	Ichinoseki-nishi	6.3	3	1143	1433	3866	4022	1434
W 02	AKTH040806140843	Higashi Naruse	6.4	22	1319	2449	1094	2600	2482
W 03	NIG0210410231756	Tokamachi	6.2	21	1716	850	564	1750	1747
W 04	KMMH161604142126	Mashiki	6.4	11	760	925	1399	1580	925
W 05	GIF0071102270219	Takane	5.8	13	381	1530	247	1539	1538
W 06	NIG0190410231756	Ojiya	6.7	7	1147	1308	820	1501	1500
W 07	IWTH260806140843	Ichinoseki-higashi	6.0	12	888	1056	927	1372	1171
W 08	KMMH161604160125	Mashiki	6.4	2	653	1157	873	1362	1314
W 09	TCGH071302251623	Kuriyama-nishi	6.0	4	1224	835	737	1300	1297
W 10	IWTH020807240026	Tamayama	5.8	24	1019	684	594	1186	1027
W 11	HKD0200412141456	Minatouchou	5.9	9	536	1127	368	1177	1176
W 12	TTRH020010061330	Hino	6.6	7	927	753	776	1142	1109
W 13	IWTH270305261824	Rikuzentakata	5.4	28	888	556	637	1098	910
W 14	IBRH131103191856	Takahagi	6.0	1	1026	526	733	1084	1037
W 15	WKYH011107051918	Hirokawa	4.9	2	754	1064	386	1084	1083
W 16	SZO011103152231	Fujinomiya	6.3	15	501	982	501	1076	1013
W 17	IWTH250806142342	Ichinoseki-nishi	4.8	3	345	939	378	1004	944
W 18	NIG0210410231834	Tokamachi	6.1	26	816	811	220	990	969
W 19	KGS0059705131438	Miyanojo	5.9	16	902	901	288	977	977
W 20	MYG0020305261824	Utatsu	5.4	17	593	858	339	949	926
W 21	ISK0060703250942	Togi	5.9	7	717	849	462	945	934
W 22	NIG0280410231756	Nagaokashisho	61	15	870	706	436	921	912
W 23	KGS0029703261731	Izumi	5.2	12	727	542	246	903	902
W 24	ISK0050703250942	Anamizu	6.3	19	473	782	556	903	896
W 25	KMM0081604160125	Uto	6.2	18	882	652	771	882	882
W 26	MYGH030305261824	Karakuwa	5.0	13	809	651	460	872	819
W 27	MIEH100704151219	Geino	4.9	4	850	374	227	863	862
W 28	SMNH010010061330	Hakata	5.7	8	720	607	631	849	844
W 29	IBR0191104121407	Kita Ibaraki	5.5	19	696	502	329	847	791
W 30	KMM0061604160125	Kumamoto	6.0	2	827	616	534	843	843
W 31	NIGH010410231756	Nagaoka	6.1	15	818	655	375	841	840
W 32	KMM0091604160125	Yabe	5.7	22	777	640	187	831	830
W 33	NIGH010410231803	Nagaoka	5.8	12	742	502	384	827	797
W 34	IBRH131203100225	Takahagi	5.0	9	691	304	409	826	718
W 35	IWTH250806162314	Ichinoseki-nishi	5.2	2	688	547	670	824	727
W 36	NIG0190410231834	Ojiya	6.0	12	795	637	355	821	818
W 37	NIG0180707161013	Kashiwazaki	6.3	21	667	514	369	813	812
W 38	NIG0231103120359	Tsunan	5.4	6	536	704	316	804	771
W 39	TTR0070010061330	Kofu	5.8	13	725	573	404	803	803
W 40	KMMH031604160125	Kikuchi	6.1	22	787	228	403	801	789
W 41	IWTH250806140920	Ichinoseki-nishi	4.8	22	782	210	461	785	784
W 42	KMM0111604160125	Tomochi	5.6	21	598	602	255	778	778
W 43	MIE0040704151219	Kameyama	5.3	8	716	356	323	771	764
W 44	KGS0029705131438	Izumi	5.3	16	728	443	189	756	753
W 45	NIGH110410231834	Kawanishi	5.6	22	741	534	300	754	754
W 46	IBR0191104111716	Kita Ibaraki	5.8	7	659	624	419	746	706
W 47	TKY0081407281705	Okada	4.8	5	704	269	449	744	724
W 48	IWTH030807240026	Iwaizumi	4.9	8	475	549	575	736	640
W 49	TTR0090010061330	Nichinan	5.4	13	629	595	289	729	721
W 50	TCGH071212171848	Kuriyama-nishi	4.9	2	631	338	520	727	635
W 51	MYG0059608131113	Naruko	4.8	5	324	708	292	722	720
W 52	NIG0200410231834	Koide	5.6	9	527	524	329	719	718
W 53	KMMH161604142207	Mashiki	5.6	2	465	560	518	710	668
W 54	SZO0020912180845	Itou	5.6	2	313	639	229	703	693
W 55	IBRH131104140735	Takahagi	5.2	2	536	658	353	684	683
W 56	KMM0051604160125	Otsu	5.7	11	526	482	397	669	575
W 57	KMM0091604142126	Yabe	5.3	17	569	547	94	669	669
W 58	NIG0200410231756	Koide	5.5	11	521	407	312	640	639
W 59	WKYH011107051934	Hirokawa	4.1	3	429	595	262	634	617
W 60	AZO0029703032309	Itou	5.6	6	306	587	231	631	618