東北地方太平洋沖地震による 地震動が構造物の非線形応答特性に及ぼす影響

坂柳 皓文¹·星隈 順一²·堺 淳一³

 ¹独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:h-saka44@pwri.go.jp
²独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員(同上)
E-mail:hosikuma@pwri.go.jp
³独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 主任研究員(同上)
E-mail:sakai55@pwri.go.jp

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では防災科学研究所の強震ネットワークにおいて約 27m/s²の非常に大きな地震動を観測したほか,各地で継続時間が非常に長い地震動が観測された.本検 討では東北地方太平洋沖地震の地震動が構造物の地震応答特性に及ぼす影響を明らかにするため,1自由 度振動系に対して,観測された加速度波形を入力地震動とした非線形時刻歴応答解析を実施し,非線形 スペクトルを用いた検討を実施した.その結果,今回の地震動では0.5秒以下の短周期において大きな応 答加速度を示すものの,一般的な橋梁に影響を及ぼす周期帯では,履歴吸収エネルギー,最大応答塑性 率の観点で評価すると兵庫県南部地震の記録や道路の耐震設計で一般に用いられている地震波と同程度 もしくはそれ以下の応答となることが分かった.また,地震応答後の残留変位の特性についても検討し た結果,降伏後剛性または最大応答塑性率が大きくなると残留変位は小さくなる傾向にあること,東北 地方太平洋沖地震の地震動により生じる残留変位は道示標準波および兵庫県南部地震の地震動により生 じる残留変位より小さい傾向があることが分かった.

Key Words: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquak e, Nonlinear response analysis, Spectralanalysis, Hystereticenergy, Residualdisp lacement

1. はじめに

平成23年3月11日14時46分頃に、三陸沖を震源と するマグニチュード9.0の巨大地震が発生した.こ の地震により宮城県栗原市で震度7を観測するなど 広い範囲で強い揺れを観測した.今回の地震では、 太平洋沿岸を中心に非常に高い津波を観測し、東北 地方から関東地方の太平洋沿岸では激甚な被害が生 じた.また、地震動による被害としては東北地方か ら関東地方にかけて、地震動により昭和55年の耐震 設計基準より古い基準で設計され、耐震補強されて いなかった道路橋の鉄筋コンクリート橋脚の軸方向 鉄筋段落し部の損傷や支承部周辺の損傷が生じたこ とが報告されている¹⁾.さらに、関東地方では広域 にわたって地盤の液状化による被害が生じたことも報 告されている¹⁾. 今回の地震により観測された地震動については, 水平方向の地盤面の加速度が最大で27m/s²を記録し たものをはじめ,道路橋示方書²⁾で規定される設計 地震動のスペクトルを上回る記録がいくつかの観測 点で記録されている.これらの記録は継続時間が長 く,震源域に近い東北地方で観測された地震動の中 には2つの主要動が連続して発生した波形となって いるものがある.

そこで、本検討ではこうした地震動の特性が構造 物の非線形応答特性に及ぼす影響に着目し、主とし て非線形スペクトル解析による検討を行った.本文 はその結果を報告するものである.

2. 線形スペクトルによる地震動特性の検討

本検討では、防災科学技術研究所の強震ネットワ



ーク³⁾(以下, K-NETとよぶ), 基盤強震観測網⁴⁾(以 下, KiK-netとよぶ),国土交通省地震計ネットワー ク⁵⁾(以下,国交省記録と呼ぶ)で観測された記録 のうち、地盤面の加速度が大きかったり、加速度応 答スペクトルが相対的に大きな値を示す記録のEW成 分およびNS成分を用いることとした.図-1に解析対 象としたK-NET築館記録, K-NET石巻記録, K-NET仙 台記録, KiK-net 芳賀記録, 国交省大崎記録のNS成 分およびKiK-net芳賀記録,国交省気仙沼記録,国 交省鳴瀬記録のEW成分の時刻歴加速度波形を例とし て示す.また,各観測点の地盤種別および最大加速 度を表-1に示す.なお、石巻観測点の地盤種別は地 盤のせん断弾性波速度に基づく評価では I 種地盤と なるが、N値に基づく評価ではⅡ種地盤と推定され るため、ここではⅡ種地盤として取り扱うこととし た.

加速度波形より,KiK-net芳賀記録以外の記録で は複数の主要動が含まれていることが分かる.複数 の主要動が含まれる地震記録は2008年の四川大地震 や2010年のチリ地震でも観測されているが,日本国 内のこれまでの地震記録では見られなかった特性を 有している.一方,KiK-net芳賀記録に含まれてい る主要動は1つであり,他の観測記録とは傾向が異 表-1 観測地点の地盤種別および PGA

細 涧 占	抑粉裡印	最大加速度(m/s ²)		
再九 (只) 示	地位加加	EW	NS	
K−NET築館	I 種地盤	12.7	27.0	
K-NET石巻	Ⅱ種地盤	3.8	4.6	
K-NET仙台	Ⅱ種地盤	9.8	15.2	
KiK-net芳賀	I 種地盤	12.0	8.0	
国交省 大崎	Ⅲ種地盤	3.7	4.8	
国交省 気仙沼	Ⅱ種地盤	5.7	3.5	
国交省 鳴瀬	Ⅱ種地盤	6.4	4.2	

なっている.

これらの加速度波形について,減衰定数5%とした 線形加速度応答スペクトルを示した結果が図-2であ る.図中には道路橋示方書のレベル2地震動タイプ IおよびタイプIIの標準加速度応答スペクトルも比 較のために示している.また,KiK-net芳賀記録以 外の記録に対しては2つの主要動を分割した場合の スペクトルを示しているが,これについては後述す る.KiK-net芳賀記録についてはNS成分,EW成分の 線形加速度応答スペクトルを示している.さらにK-NET築館記録およびKiK-net芳賀記録については応答 加速度の最大値が大きいため,縦軸を対数としたグ ラフも示している.

ここではまず波形全体を用いた結果について検討



する.東北地方太平洋沖地震はプレート境界で発生 した海洋型の地震であり,道路橋示方書の分類では レベル2地震動タイプ Iとなるが,図-2より1秒程度 までの領域では大きな応答加速度を示すこと,長周 期側にはそれほど大きな成分が含まれていないこと から,レベル2地震動タイプ IIの傾向に近いスペク トル特性を示していることが分かる.図-2(a)より K-NET築館記録の加速度応答スペクトルでは固有周 期0.2秒から0.3秒の間にピークがあり,その応答値 は100m/s²を上回る非常に大きな加速度を示してい ることが分かる.また,固有周期0.5秒以上では応 答が小さくなり,レベル2地震動タイプ IIの標準加 速度応答スペクトル以下の応答となる.

図-2(b)に示すK-NET石巻記録については固有周期 1.5秒付近の応答加速度スペクトルのピークがレベ ル2地震動タイプⅡの標準加速度応答スペクトルと 同程度となっている点が特徴である.

図-2(c)に示すK-NET仙台記録については加速度応 答波形のピークが固有周期0.7秒から0.8秒の間にあ り,その固有周期付近ではレベル2地震動タイプⅡ の標準加速度応答スペクトルを超える応答を示して おり,最大値はおよそ27m/s²である.

図-2(d)に示すKiK-net芳賀記録では、NS成分、EW

成分ともに固有周期が0.3秒から0.7秒の間でレベル 2地震動タイプⅡの標準加速度応答スペクトルを超 える応答を示している.加速度応答スペクトルの最 大値はEW成分の方が大きく,55m/s²を超えている.

図-2(e)に示す国交省大崎記録では,固有周期2秒 以下の範囲ではレベル2地震動タイプⅡの応答以下 であるが,レベル2地震動タイプⅠよりは大きな応 答を示している.

図-2(f)に示す国交省気仙沼記録では固有周期0.5 秒から1秒の間に加速度応答スペクトルのピークが あり,最大値はおよそ25m/s²である.また,その固 有周期付近ではレベル2地震動タイプⅡを大きく上 回る応答を示している.

図-2(g)に示す国交省鳴瀬記録では固有周期0.8秒 付近に加速度応答スペクトルのピークがあり,最大 値はおよそ20m/s²である.また,その固有周期付近 ではレベル2地震動タイプIIを上回る応答を示して いる.

また、東北地方太平洋沖地震では、2つの主要動 が短い時間の間に連続して発生したと考えられてい る.このような地震動の特性が構造物の応答特性に 及ぼす影響を検討するため、観測された加速度波形 で主要動が2つ認められるものについては、波形を2



つの主要動に分割し、2つの主要動それぞれを単独 で解析した場合と、連続したままの波形全体で解析 した場合と結果を比較した.図-3に分割した場合の 加速度波形の概要図を示す.波形分割は1回目の主 要動の加速度が収束する位置で行った.

図-2に示した線形加速度応答スペクトルには波形 全体で解析した線形加速度応答スペクトルと第1波, 第2波をそれぞれ単独で解析した場合の線形加速度 応答スペクトルを比較している.

図-2より、国交省気仙沼を除く解析結果では、第 2波を単独で解析した場合の線形加速度応答スペク トルが、波形全体で解析した場合の線形加速度応答 スペクトルとほぼ一致する.これより、線形加速度 応答スペクトル解析を行った場合、東北地方太平洋 沖地震の2つの主要動のうち、第2波による応答が支 配的となることが分かる.すなわち、第1波で構造 物に損傷を生じさせ、第2波によりさらなる損傷の 進展を生じさせる可能性のある地震動であると言え るため、これについては、3において検討している. また、国交省気仙沼記録については他の記録と傾向 が異なり、第1波を単独で解析した場合の線形加速 度応答スペクトルが波形全体で解析した場合の線形 加速度応答スペクトルとほぼ一致する.そのため、 第1波による応答が支配的となることが分かる.

3. 非線形スペクトルによる地震動特性の検討

(1) 解析条件と比較に用いた地震動

本検討では塑性応答の影響を含めた地震動特性の 検討を行うため、非線形スペクトル解析を行った. 非線形スペクトル解析の条件として以下のように設 定した.

- ・復元力モデルとしてバイリニアモデルおよびクラ フモデルを用い、1次剛性(降伏剛性)に対する2 次剛性(降伏後剛性)の比を0.001とした.
- ・振動系の降伏震度として0.4および0.6を仮定した.
- ・固有周期は0.1秒から3.0秒の範囲で、0.1秒ごと に計算を行った.

非線形スペクトル解析の比較対象とした地震動は 東北地方太平洋沖地震の地震動の他,道路橋示方書 に示される「動的解析に用いる地震動」(以下,道 示標準波と呼称する)および過去の大規模な地震の 代表として,1995年の兵庫県南部地震の地震動とし た.

道示標準波の解析対象はレベル2地震動のタイプ I,タイプⅡである.道路橋示方書には各条件に対 して3つの波形が示されており、本論文ではこれら を道路橋示方書に示されている順に上からA波,B波, C波と呼称する.本検討では3波とも解析対象とした



図-4 K-NET石巻記録NS成分を入力した場合の応答 (降伏震度0.4 固有周期0.5秒 バイリニアモデル)



が,ここではA,B,C波のうち,一般的な橋梁の固 有周期帯である0.5秒から1.5秒の間で応答が大きく なるものを代表として東北地方太平洋沖地震との比 較を示す.

兵庫県南部地震については神戸海洋気象台(I種 地盤),JR鷹取駅(Ⅱ種地盤),東神戸大橋(Ⅲ種地 盤)の3地点で観測された地震動を比較対象とした.

(2) 非線形地震応答の特性

本検討では東北地方太平洋沖地震の地震動に対し て降伏震度,復元カモデル,固有周期,入力地震動 をパラメーターとし,1920ケースの応答解析を行っ た.このうち特徴的な応答を示した結果の例を図-4 から図-7に示す.ここで図-4,図-5はK-NET石巻記 録NS成分を入力した固有周期0.5秒,降伏震度0.4の



図-6 K-NET仙台記録EW成分を入力した場合の時刻歴応答 変位(降伏震度0.4 固有周期0.8秒 バイリニアモデル)



図-7 K-NET築館記録NS成分を入力した場合の時刻歴応答 変位(降伏震度0.4 固有周期0.5秒 バイリニアモデル)

系に対して,バイリニアモデルおよびクラフモデル で解析した場合,図-6はK-NET仙台記録EW成分を入 力した固有周期0.8秒,降伏震度0.4の系の応答,図 -7はK-NET築館記録NS成分を入力した固有周期0.5秒, 降伏震度0.4の系の応答である.

図-4より降伏震度に達すると塑性化し、最終的に 残留変位が発生していることが応答変位のグラフか ら分かる.また、東北地方太平洋沖地震には2つの 主要動が含まれている地震波もあるが、1回目の応 答の後、2回目の主要動で応答変位がさらに増加し ている.また、1回目の主要動で発生した応答変位 と2回目の主要動で発生した応答変位を比較すると、 2回目の主要動で発生した応答変位の方が大きくな っている.図-5に示す結果は図-4の条件で復元力モ デルをクラフモデルとした場合であるが、変位の増 加傾向は図-5と同様であるものの、変位の増加幅は 図-4に対して小さい.

一方,図-6に示す例でもそれぞれの主要動に対し て大きな応答は2回発生しているが,図-4,図-5の 例とは異なり,1回目の変位と2回目の変位が逆方向 であり,2回目の応答で残留変位が揺り戻される応 答となっている.また,応答変位は2回目の方が大 きく,揺り戻された後,最終的に1回目の応答とは 逆方向に残留変位が発生している.

図-7に示す例では1回目の主要動では塑性領域ま で応答していないため,残留変位が発生せず,2回 目の応答でのみ塑性化し,残留変位が発生している.

(3) 波形分割した場合の非線形スペクトル

ここでは上述した1920ケースの応答結果を最大応 答塑性率スペクトルとして示し、本地震の地震動特 性を分析することとした.ここでは、バイリニアモ デルで降伏震度0.4とした場合を例として、2つの主 要動の影響に着目し、2つの主要動が含まれる記録 については線形スペクトルによる検討と同様に波形 を分割し、それぞれを単独で解析した場合と波形全 体で解析を行った場合の比較を行った.図-8にバイ リニアモデルで降伏震度0.4とした場合の最大応答 塑性率スペクトルの例を示す.

図-8(a)に示すK-NET館記録では,波形全体で非線 形解析を行った場合には,固有周期0.5秒以下では 非常に大きな応答塑性率を示すが,固有周期1秒以 上になると応答塑性率が1以下となり,線形応答と なる.また,第2波のみで解析を行った場合と固有 周期0.5秒以上のスペクトルがほぼ一致した.これ は図-7に示したように固有周期0.5秒以上では第1波 目単独での最大応答塑性率が概ね1以下であり,第 2波目においてのみ塑性応答が発生するためである. すなわち,固有周期0.5秒以上では第1波目では塑性 応答しないため,2つの主要動が連続して発生した 影響は見られない結果となった.

図-8(b)に示すK-NET石巻記録では,波形全体で非 線形解析を行った場合には固有周期0.5秒付近に応 答塑性率のピークがあり,応答塑性率は6程度とな る.また,固有周期1.3秒付近にも応答塑性率のピ ークがあり,応答塑性率は3程度となる.この2つの ピーク付近では波形全体で非線形解析を行った場合 と,第1波,第2波のみで解析を行った場合とで差異 が現れた.これは図-4の時刻歴応答変位から分かる ように,第1波で一定の残留変位が生じ,第2波でさ らに残留変位が増大したため,それぞれ単独で解析 を行った場合よりも応答塑性率が大きくなったもの と考えられる.その他の周期帯では波形全体と第2 波単独での最大応答塑性率スペクトルが一致するた め,第2波が支配的であると考えられる.

図-8(c)に示すK-NET仙台記録では,波形全体で非 線形解析を行った場合に固有周期0.8秒付近に応答 塑性率のピークがあり,応答塑性率は5程度となる. このピーク付近では波形全体で非線形解析を行った 場合と,第1波,第2波のみで解析を行った場合とで 差異が現れた.これはK-NET石巻記録と同様に第1波 で一定の残留変位が生じ,第2波でさらに残留変位 が増大したため,それぞれ単独で解析を行った場合 よりも応答塑性率が大きくなったものと考えられる. その他の周期帯では波形全体と第2波単独での最大 応答塑性率スペクトルが一致するため,第2波が支 配的であると考えられる.

図-8(d)に示すKiK-net芳賀記録では、NS成分およびEW成分の最大応答塑性率スペクトルを示している. 線形スペクトルでは固有周期0.3秒から0.7秒にかけてはEW成分の方が大きな値を示すが、非線形応答では固有周期0.3秒から0.5秒でNS成分の方が大きな応答塑性率を示している点が特徴的である.また、固有周期0.7秒付近ではEW成分の方が大きな応答塑性率を示す結果となった.線形スペクトルでは固有周期0.3秒から0.7秒にかけて30~50m/s²と大きな応答を示すが、一般的な橋梁の固有周期の範囲とされる固有周期0.5秒以上では最大応答塑性率µ=4程度であり、構造物に非線形応答生じさせるという観点ではそれほど強い地震動ではなかったと考えられる.

図-8(e)に示す国交省大崎記録では,波形全体で 非線形解析を行った場合には固有周期0.5秒付近に



応答塑性率のピークがあり、応答塑性率は5程度で ある.また、固有周期0.5秒以下と固有周期0.9秒付 近では第2波単独での応答塑性率が、波形全体での 応答塑性率よりも大きくなった.これは図-6で分か るように第1波目で残留変位が発生するが、第2波目 で逆方向に揺り戻されるために最大変位が小さくな り、結果として最大応答塑性率が小さくなったため である.その他の周期帯では波形全体と第2波単独 でのスペクトルが一致するため、第2波が支配的で あると考えられる.

図-8(f)に示す国交省気仙沼記録では,波形全体 で非線形解析を行った場合には固有周期0,3秒付近 に応答塑性率のピークがあり,応答塑性率は7.5程 度となる.そのほかの部分では固有周期が大きくな るにつれ,応答塑性率もなだらかに小さくなってい く.また,波形全体と第1波単独での解析が一致す るため,他の記録とは異なり,第1波が支配的であ ると考えられる.

図-8(g)に示す国交省鳴瀬記録では,波形全体で 非線形解析を行った場合には固有周期0.3秒から1秒 の間にいくつか応答塑性率のピークが見られ,ピー クの応答塑性率は4程度である.このピーク付近で は波形全体で非線形解析を行った場合と,第1波, 第2波のみで解析を行った場合とで差異が現れた. これはK-NET石巻記録やK-NET仙台記録と同様に第1 波で一定の残留変位が生じ,第2波でさらに残留変 位が増大したため,それぞれ単独で解析を行った場 合よりも応答塑性率が大きくなったものと考えられ る.その他の周期帯では波形全体と第2波単独での スペクトルが一致するため,第2波が支配的である と考えられる.

図-8の結果から,特にK-NET石巻記録,K-NET仙台 記録,国交省鳴瀬記録のように波形全体での応答塑 性率が,波形分割した場合の応答塑性率を上回るよ うな場合では,構造物において,2つの主要動が連 続したことにより,第1波目に生じた損傷が第2波目 の主要動により,より大きな損傷へ進展する可能性 が考えられる.また,国交省気仙沼記録を除く記録 では第2波の応答が支配的であり,国交省気仙沼の み第1波の応答が支配的となった.



(4)解析パラメータの影響と設計地震動及び過去の 大規模な地震による地震動との比較

a) 解析パラメータの影響

ここでは、まず、この分析における降伏震度の影響と復元カモデルの影響について検討した.検討対象としたのはKiK-net芳賀記録、国交省大崎記録、 国交省鳴瀬記録の3地点の記録で、図-9に各地点の EW成分およびNS成分でバイリニアモデル降伏震度 0.4とした場合、バイリニアモデル降伏震度0.6とした場合、クラフモデル降伏震度0.4とした場合の最 大応答塑性率スペクトルを比較して示す.

図-9において,バイリニアモデルにおいて降伏震 度を0.4としたケースと0.6としたケースでは,当然 ではあるが,降伏震度を大きくすると最大応答塑性 率は小さくなり,ピークの数も減って,全体として 滑らかなスペクトルになる.固有周期が0.5~1秒の 範囲では,降伏震度が0.2大きくなることで,応答 塑性率が半分程度以下まで低下するケースもある.

非線形履歴モデルの違いに着目すると,KiK-net 芳賀記録と国交省鳴瀬記録では,固有周期が0.5秒 以上であればクラフモデルよりもバイリニアモデル の方が大きな応答塑性率となる.これは,バイリニ アモデルでは最大変位が発生する前までに応答変位 が一方向に偏る場合が多く,最大変位発生時にさら に応答変位が増大するのに対し,クラフモデルでは 再載荷剛性が小さいため,応答変位の偏りが小さく, 最大変位が小さくなるためである.一方,国交省大 崎記録では,EW成分においてクラフモデルの結果 に固有周期0.6秒付近に応答塑性率が5程度のピー クがあり,バイリニアモデルの2倍近い応答になっ ている.また,NS成分においても固有周期が1.3 秒付近までクラフモデルの方が大きな応答塑性率を 示す.これは最大変位が発生する前までの応答変位 の偏りの程度がクラフモデルとバイリニアモデルで 差が無い場合で,クラフモデルの方が再載荷剛性が 小さいために最大変位が大きくなるためである.

結果として降伏震度が大きくなることで応答塑性 率が小さくなり、最大応答塑性率のピークも見られ なくなる.また、バイリニアモデルとクラフモデル を比較すると、最大変位発生前までの応答変位の偏 りが大きい場合ではバイリニアモデルの方が最大応 答塑性率が大きくなり、最大変位発生前までの応答 変位の蓄積に差が無い場合ではクラフモデルの方が 最大応答塑性率が大きくなる.さらにバイリニアモ デルの方が応答変位の偏りが生じやすいことから、 変位の増大や揺り戻しの影響をクラフモデルより大 きく受け、最大応答塑性率のピークが多く見られる 結果となった.

b)設計地震動及び過去の大規模な地震による地震動 との比較

前述した解析パラメータの比較では降伏震度0.4, 復元カモデルをバイリニアモデルとした場合で最大 応答塑性率が大きくなり,固有周期に対する最大応 答塑性率の変化も大きいため,ここでは降伏震度 0.4としたバイリニアモデルを基本に道示標準波お よび兵庫県南部地震との比較を示す.比較した記録 はK-NET築館記録,KiK-net芳賀記録,国交省大崎記 録,国交省鳴瀬記録である.

図-10(a)はK-NET築館記録の地震動と道示標準波 (I種地盤)および兵庫県南部地震(I種地盤であ る神戸海洋気象台の記録)の最大応答塑性率スペク トルを比較したものである.なお,0.2秒程度の短 周期では非常に大きな応答塑性率となるため,縦軸 を対数としたグラフも示している.これによれば,



線形応答で100m/s²を超える応答加速度のピークを 示した0.2秒から0.3秒において、応答塑性率は約28 にも達し、これは道示標準波の応答塑性率19の約 5倍に相当する.0.3秒を超える固有周期帯ではタ イプⅡ標準波よりも小さな応答となっており,固有 周期0.8秒を超えるとタイプ I 標準波よりも小さな 応答となる.また,兵庫県南部地震との比較ではほ とんどの固有周期帯で兵庫県南部地震の方が大きな 応答となった. K-NET築館記録は短周期領域で非常 に大きな応答示すが,これは短周期では降伏変位が 非常に小さく、応答塑性率の値が大きくなるためで ある. 図-11には最大応答変位スペクトルを示すが, 最大応答変位でみればK-NET築館記録は固有周期0.2 秒で約0.11m(降伏変位約0.004m), 固有周期0.3秒で 約0.14m(降伏変位約0.009m)となっているのに対し, タイプⅡ標準波では固有周期0.2秒で0.07m(降伏変 位約0.004m), 固有周期0.3秒で0.17m(降伏変位約 0.009m)となっており、短周期では0.2秒まではK-NET築館記録の方が大きくなるが、0.3秒以上ではタ イプⅡ標準波の方が大きい.

図-10(b)はKiK-net芳賀記録の地震動と道示標準 波(I種地盤)および兵庫県南部地震(I種地盤で ある神戸海洋気象台の記録)の最大応答塑性率スペ クトルを比較したものである.比較の結果,KiKnet芳賀記録は概ねタイプII標準波と同等の値を示 し,兵庫県南部地震の記録よりも小さな応答となっ た.ただし,KiK-net芳賀記録はEW成分で固有周期 0.8秒付近に最大応答塑性率のピークを持ち,ピー ク付近では道示標準波,兵庫県南部地震以上の応答 を示す.

図-10(c)は国交省大崎記録の地震動と道示標準波 (Ⅲ種地盤)および兵庫県南部地震(Ⅲ種地盤であ る東神戸大橋の記録)の最大応答塑性率スペクトル



図-11 K-NET築館記録の最大応答変位スペクトル

を比較したものである.比較の結果,解析を実施した0.1秒から3.0秒の固有周期で,国交省大崎記録の応答はタイプⅡ標準波よりも小さな応答となった. またタイプⅠ標準波と比較しても一部の固有周期を除き,概ね小さな応答となった.兵庫県南部地震との比較では1秒以下の固有周期帯で相対的に大きな応答を示すが,これは東神戸大橋の記録による応答 塑性率が他記録と比べ小さいためである.

図-10(d)は国交省鳴瀬記録の地震動と道示標準波 (II種地盤)および兵庫県南部地震(II種地盤であるJR鷹取駅の記録)の最大応答塑性率スペクトルを 比較したものである.比較の結果,解析を実施した 0.1秒から3.0秒の固有周期で,国交省鳴瀬記録の応 答はタイプI標準波よりも小さな応答となった.ま たタイプI標準波と比較すると1秒以下の固有周期 帯では国交省鳴瀬記録の応答が大きくなり,1秒を 超える固有周期帯ではタイプI標準波の応答が大き くなる.兵庫県南部地震との比較では解析を実施し た0.1秒から3.0秒の固有周期で,国交省鳴瀬記録の 応答は兵庫県南部地震よりも小さな応答となった.

代表4地点の比較の結果,東北地方太平洋沖地震

の最大応答塑性率スペクトルはタイプⅡ標準波と同 程度かそれ以下の結果となった.また,タイプⅠ標 準波との比較では,1秒以下の固有周期帯で東北地 方太平洋沖地震による地震動の方が大きな応答を示 す場合があった.兵庫県南部地震との比較では概ね, 東北地方太平洋沖地震の方が小さな応答となること が分かった.

4. 履歴吸収エネルギーの観点から見た継続時間の 長い地震動の評価

構造物への影響という観点では、東北地方太平洋 沖地震の地震動は、地震動の継続時間が長く、構造 物に生じる応答の繰り返し回数が多くなることが特 徴である.既往の研究では、こうした繰り返し回数 の影響について降伏を超える応答の回数により評価 している例⁶⁾もあるが、東北地方太平洋沖地震の地 震動のように2つの主要動がある場合には、図-4(b) に示すように、応答の中心線が1つ目の主要動の後 にシフトする場合もあり、この場合には降伏を超え る応答の回数による評価では塑性応答の繰り返し回 数の影響を評価するのは容易ではない.

既往の研究では構造物が塑性応答を繰り返すこと により累積の履歴吸収エネルギーが増加し,その値 が構造物の損傷とも関係していることが検討されて おり⁷⁾,本検討においても累積吸収エネルギーによ りこの特性を評価することとした.評価においては, 既往の大規模地震の地震動や道示標準波を用いた場 合の累積吸収エネルギーと比較することとした.ま た,鉄筋コンクリート橋脚等の地震時保有水平耐力 や変形性能を評価する際には,正負交番繰り返し載 荷実験が行われるが,その実験の各載荷振幅におけ る繰り返し回数は3回とすることが一つの目安とな っているため,図-12に示すように一定振幅の繰り 返し回数を3回とする場合のエネルギー吸収量とも 比較することとした.

解析は降伏震度を0.4または0.6一定で、復元力モ デルはバイリニアモデルおよびクラフモデルとし、 1次剛性(降伏剛性)に対する2次剛性(降伏後剛 性)の比を0.001とした.また、解析対象とした固 有周期は一般的な橋梁の固有周期帯0.5秒、0.75秒、 1.0秒、1.25秒、1.5秒で解析を実施した.

図-13にK-NET仙台記録NS成分で解析した場合の履 歴吸収エネルギーの時刻歴グラフを示す.図中には, 兵庫県南部地震におけるJR鷹取駅の結果も比較のた めに示している.また,図中の点線は,正負交番繰 り返し載荷実験における各載荷段階の累積吸収エネ ルギーを示している.

これによれば、K-NET仙台記録では1回目の主要動 において、正負交番載荷実験でのµ=3までの載荷に 相当する以上の吸収エネルギー量になり、さらに2 回目の主要動の際にµ=5までの載荷に相当するエネ ルギー吸収量に達している.JR鷹取駅記録では、µ =4~5までの載荷に相当するエネルギー吸収量であ



り, K-NET仙台記録NS成分の方が累積吸収エネルギ ーとしては約15%大きくなる.それぞれの主要動ご とのエネルギー吸収量ではJR鷹取駅の方が大きいが, 東北地方太平洋沖地震の地震動は継続時間が長いた めに,累積エネルギー吸収量としては大きくなる. この特徴は橋の耐震性能の観点からも重要であると 考えられる.

こうした解析を上述の固有周期と地震動に対して 行った結果を図-14に示す.図-14には正負交番繰り 返し載荷実験での各応答塑性率に応じた履歴吸収エ ネルギーも点線で示す.本検討の条件では降伏震度 を一定の値で仮定しており, さらに東北地方太平洋 沖地震の特性として短周期の応答加速度が大きいこ とと、短周期の系では降伏変位が小さいことから、 短周期帯では塑性化し易く、その結果、エネルギー 吸収量は大きくなると考えられる.このため、図-14(a)から図-14(f)の降伏震度を0.4,固有周期を 0.5秒, 復元力モデルをクラフモデルとしたケース では, 例えば国交省鳴瀬記録に対する応答では正負 交番繰り返し載荷実験でのμ=5相当の累積エネルギ ー吸収量となっているが、一方で図-14(g)のように 降伏震度を0.6とすると、塑性化の影響が小さくな るため、固有周期が0.5秒においても最大でも正負 交番繰り返し載荷実験でのµ=4相当の累積エネルギ 一吸収量になることが分かる.他の固有周期帯では 降伏震度を大きくしたことにより,正負交番繰り返 し載荷実験の履歴吸収エネルギーが増加していくた め, 東北地方太平洋沖地震における地震動による履 歴吸収エネルギーは概ね正負交番載荷実験における μ=2からμ=3までの吸収エネルギーに相当している.

また、最も大きな履歴吸収エネルギーを示すのは 国交省大崎記録NS成分である.履歴吸収エネルギー が大きいのは、塑性応答が大きいということである が、図-8から図-10に示した最大応答塑性率スペク トルでは0.5秒から1.5秒において他記録と比べ、や や大きな応答塑性率を示すものの、履歴吸収エネル





ギーのような大きな差は見られない.これは塑性応 答が他記録では概ね正負どちらかに偏って発生して いるのに対し,国交省大崎記録NS成分では正負両側 で大きな塑性応答が発生するためであり,正負どち らかの最大変位を基に算出される最大応答塑性率は 他記録と比べ顕著に大きくならないためである.

次に各地震動の履歴吸収エネルギーを比較すると, 東北地方太平洋沖地震の地震動による累積吸収エネ ルギーは、道示標準波や兵庫県南部地震による地震 動に比べてやや大きいか同程度であり、継続時間が 長い特性があるが、構造物の耐震性能への影響の観 点では道路橋示方書の設計で考慮しているレベル2 地震動タイプⅡと同程度であることが分かった.

なお,図-14(a)から(g)にはRC橋脚の履歴特性に 近い特性を示すクラフモデルの結果を示したが,図 -14(h)に示すバイリニアモデルの場合には固有周期



図-15 可能最大残留変位の概要図

表-2 残留変位比の標準偏差および最大値 (固有周期0.1, 0.3秒の結果を除く)

剛性比	標準偏差			最大値				
	μ=2	μ=4	μ=6	μ=2	μ=4	μ=6		
0.001	0.32	0.31	0.33	1.00	1.00	1.00		
0.05	0.32	0.16	0.07	1.00	0.98	0.29		
0.2	0.22	0.05	0.02	1.00	0.21	0.10		
クラフモデル	0.15	0.16	0.18	0.53	0.58	0.58		

によって履歴吸収エネルギーの増減に違いがあるが, クラフモデルと比較すればやや小さい傾向である. 一方,正負交番繰り返し載荷実験の吸収エネルギー はバイリニアモデルとした場合,クラフモデルより も大きくなるため,結果的に固有周期0.5秒,降伏 震度0.4の系に国交省成瀬記録を入力する場合でも μ=4相当の履歴吸収エネルギーとなる.

5. 残留変位比スペクトル

構造物への影響という観点では履歴吸収エネルギ ーの他,地震動により発生する残留変位という観点 も重要である.既往の研究では,1自由度振動系に 対し,地震動を入力した際に最終的に発生した残留 変位を,図-15に示す発生し得る可能最大残留変位 で除した残留変位比による評価を行っている⁸.

本検討においても残留変位比により,東北地方太 平洋沖地震の特性を評価することとした.評価にお いては,兵庫県南部地震や道示標準波を用いた場合 の残留変位比とも比較することとした.

また、入力する地震動の強度によっては振動系が 塑性域に入らず、残留変位が発生しない場合や、発 生する場合でも応答塑性率がそれぞれ異なる結果と なる.一般的に応答塑性率が小さい方が残留変位比 としては大きくなるため、それぞれの応答塑性率が 異なれば構造物に影響を及ぼす残留変位について正 しい評価ができないと考えられる.そのため、残留 変位比の評価にあたっては最大応答塑性率μを 2,4,6と一定にし、これに達するように各入力地震 動に対する降伏耐力を定めることとした.さらに、

残留変位に対しては降伏後剛性による影響が大きい ことが既往の研究により明らかになっているため⁸⁾, 1次剛性(降伏剛性)に対する2次剛性(降伏後剛 性)の比を0.001,0.05,0.2の3通りに設定し,比 較を行うこととした.復元力モデルはバイリニアモ デルを基本とし,クラフモデルについては剛性比が 0.001のみ解析を行った.

(1) 残留変位比に及ぼす解析パラメータの影響

図-16にKiK-net芳賀記録,国交省大崎記録,国交 省鳴瀬記録の3地点6成分での残留変位比のプロット を示す.プロットしている固有周期は0.1秒,0.3秒, 0.5秒,0.8秒,1.0秒,1.3秒,1.5秒,1.8秒,2.0 秒,2.3秒,2.5秒,2.8秒,3.0秒である.また,表 -2に各条件での標準偏差および最大値を示す.表-2 及び図-16から分かるように条件解析パラメータに よって残留変位比は大きくばらつく結果となる.

まず、剛性比0.001の場合には、最大応答塑性率 μ を変化させても全体的なばらつきに変化はなく、 残留変位比は0~1の間で残留変位比が分布する. 標準偏差としては約0.3である.ここで、剛性比を 0.05に大きくすると、 μ が大きくなると残留変位比 が分布する範囲が小さくなる.残留変位比の最大値 は μ =2および μ =4では剛性比が0.001のケースと大 差ないが、 μ =6の場合には0.3程度になる.これに つれて、標準偏差も小さくなる.さらに剛性比を大 きくして0.2とすれば、 μ =4の場合でも、残留変位 比は最大でも0.2程度となる.

一方,クラフモデルを用いると,バイリニアモデ ルよりも全体として残留変位比は小さくなる.最大 応答塑性率μが変化しても,残留変位比の分布の範 囲は大きくは変化せず,いずれの場合にも最大でも 0.5程度となる.クラフモデルの場合は,残留変位 がその復元カモデルの特性上,正負それぞれの応答 最大変位をとった後は塑性化しない振動であっても, 再載荷剛性が小さいため,正負の最大変位の中間位 置に残留変位が収束していくため,残留変位比の最 大値は0.5に近くなる傾向がある.

(2)残留変位比スペクトル

図-17に残留変位比スペクトルを示す.残留変位 比スペクトルは解析対象とした各地震動を国交省記 録,K-NET・KiK-net記録,兵庫県南部地震,道示標 準波タイプIおよび道示標準波タイプⅡに分け,そ れぞれの平均値として示したものである.

各解析パラメータによる影響は前述したプロット グラフでの傾向と同様の傾向となる.東北地方太平 洋沖地震(国交省記録,K-NET・KiK-net記録)と兵庫 県南部地震および道示標準波の比較の観点では,剛 性比0.05および剛性比0.2の場合では東北地方太平 洋沖地震の残留変位比スペクトルは固有周期0.5秒 においてやや大きくなる場合があるものの,概ね他 の地震動と比べ,残留変位比スペクトルの値は小さ くなる傾向が見られる.

また、剛性比0.001の場合ではどの記録も概ね0.5 から0.8の間に分布し、剛性比0.05の場合では μ =2 で0.3から0.6、 μ =4で0.1から0.4、 μ =6で0から0.3 に分布する.さらに剛性比0.2の場合では μ =2で0.1 から0.4、 μ =4で0から0.2、 μ =6で0から0.1に分布 する.クラフモデルについてはどの記録も概ね0.3 から0.4の間に分布する.



図-16 国交省記録 残留変位比プロット





6. 結論

本検討では1質点・1自由度の振動系を対象とした 線形加速度応答スペクトルおよび非線形スペクトル により,東北地方太平洋沖地震の地震動が構造物の 地震応答特性に及ぼす影響に関する検討を行った. 本検討から得られた知見をまとめると以下の通りで ある.

1) 東北地方太平洋沖地震の地震動には2つの主要動 が含まれているものがあるが、構造物に与える影響 が支配的であるのは主に2つ目の主要動である.また、2つの主要動が連続して起きたことによる影響 としては、変位の増加もしくは揺り戻しの応答が一 部の地震動、降伏震度の組み合わせで見られた.

2) 非線形スペクトルで評価すると、最大応答塑性 率は一般的な橋梁の固有周期帯において道示標準波 レベル2地震と同程度もしくは道示標準波レベル2地 震以下であった.また兵庫県南部地震との比較では 東北地方太平洋沖地震における3地点の応答は兵庫 県南部地震の応答より小さくなった.

3) RC橋脚の耐震性を検証するための試験方法とし て一般的となっている3回繰り返しの正負交番載荷 実験での履歴吸収エネルギーと比較してみてみると, 東北地方太平洋沖地震の地震動では最大で塑性率 μ =5程度,多くの固有周期帯で塑性率 μ=3以下の履歴 吸収エネルギー程度に相当するもので分かった.また,2つの主要動を分け,個々の主要動で履歴吸収 エネルギーを評価すると,兵庫県南部地震の主要動 での履歴吸収エネルギーよりも小さい.また,2つ の主要動を合わせた場合で見ると,道示標準波や兵 庫県南部地震での履歴吸収エネルギーと比較して, 固有周期0.5秒でやや大きくなるものの,それ以外 の周期帯では同程度の履歴吸収エネルギーであった. 4)残留変位比による評価では最大応答塑性率,剛性 比の組み合わせによっては残留変位比は大きくばら つく結果となった.また,剛性比および応答塑性率 を大きくすることで,ばらつきは小さくなる傾向が ある.東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震およ び道示標準波との比較では剛性比0.05および0.2と した場合では,東北地方太平洋沖地震の残留変位比 はやや小さい値を示すことが分かった.

謝辞:本検討に際し,防災科学研究所の強震ネット ワークおよび基盤強震観測網の観測データおよび国 土交通省国土技術政策総合研究所 地震防災研究室 の国土交通省地震計ネットワークの観測データを利 用させていただきました.ここに記して謝意を表し ます.

参考文献

 1)国土交通省国土技術政策総合研究所,独立行政法人 土木研究所:平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震土 木施設災害調査速報,国土技術政策総合研究所資料,土 木研究所資料,2011.

2) 社団法人 日本道路協会:道路橋示方書・同解説V, 日本道路協会,2002.

3) 防災科学研究所:http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/

4) 防災科学研究所:http://www.kik.bosai.go.jp/kik/

5) 国土技術政策総合研究所 地震防災研究室:http://w ww.nilim.go.jp/lab/rdg/

6) 星隈順一,運上茂樹:入力地震動の特性とRC橋脚に
生じる塑性応答回数、コンクリート工学年次論文集、23巻
3号、pp. 1243-1248、2001.

7) 滝本和志,川島一彦:基部で曲げ破壊するRC橋脚の エネルギー吸収容量の定式化,土木学会論文集,532/V-30号, pp.5-13,1996

8) 川島一彦, Gregory A MACRAE, 星隈順一, 長屋和 宏:残留変位応答スペクトルの提案とその適用, 土木学 会論文集 501/I-29号, pp. 183-192, 1994

EffectsofGroundMotioninThe2011offthePacifi ccoastofTohokuEarthquake onNonlinearResponseofStructures

HirofumiSAKAYANAGI,Jun-ichiHOSHIKUMAandJunichi SAKAI

TsukidateobservingstationofK-NETrecordedac the Pacific coast of Tohoku Earthquake. It is noted observed in this earthquake.

This study examines some of the characteristics of Earthquake using nonlinear response analysis and no freedomsystem.Basedontheresultsofthestudies ,iti have caused large response in the natural period of current design codes in natural period range that a ffect

celeration of more than 27 m/s ² during The 2011 off that the ground motions with long duration were

es of The 2011 off the Pacific coast of Tohoku no nlinear spectral analysis on the single-degree-of-,itisfound that the ground motions in this earth quake less than 0.5 seconds and smaller response than th e ffect the general bridges.