

非線形スペクトル解析による 東北地方太平洋沖地震の地震動の特性に関する一検討

坂柳 皓文¹ 星隈 順一² 堺 淳一³

¹正会員 工修 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)
²正会員 工博 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
³正会員 工博 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

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、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い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⁾。また、関東地方では広域にわたって地盤の液状化が生じ、河川堤防、下水道施設、建物等に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2700gal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、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応答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（以下、K-NETとよぶ）において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を用いることとした。図-1に解析対象としたK-NET築館の記録、K-NET石巻の記録、K-NET仙台の記録のNS成分の時刻歴加速度波形を示す。また、各観測点の地盤種別はそれぞれ築館がⅠ種地盤、石巻と仙台がⅡ種地盤である。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。

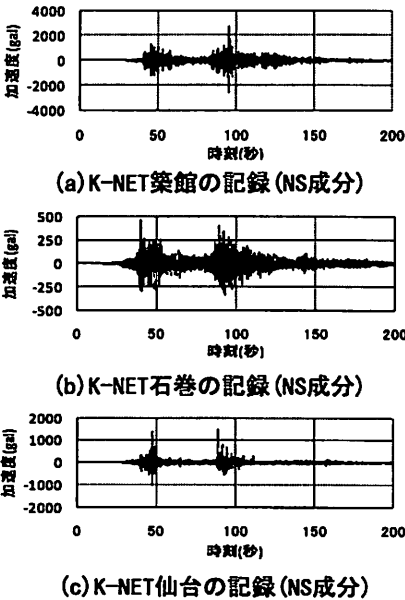
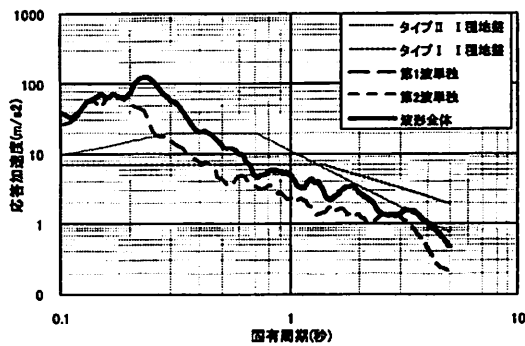
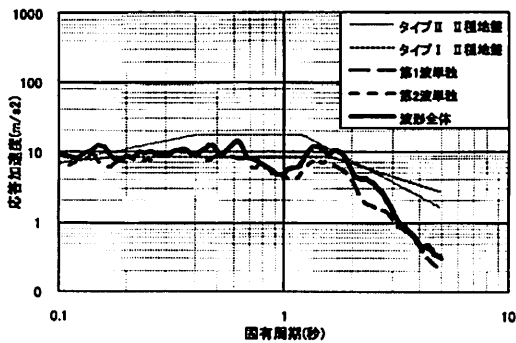


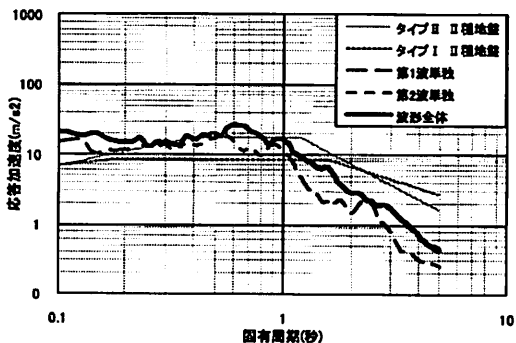
図-1 観測された代表的な地震動



(a) K-NET 築館記録NS成分



(b) K-NET 石巻記録NS成分



(c) K-NET 仙台記録NS成分

図-2 線形加速度応答スペクトル

加速度波形より、いずれの記録でも地震動はおおむね40秒から大きくなり、45秒付近で一つ目の主要動が観測されている。その後、75秒付近で一旦、地震動が収束しかけるが、95秒付近で再度、大きな地震動が観測されている。このように2つ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。

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-2は各地点のNS成分を例に線形加速度応答スペクトルを示したものである。図中には道路橋示方書のレベル2地震動の設計地震動のスペクトルも比較のために示している。また、2つの主要動を分割



図-3 波形分割の概要図

した場合のスペクトルも示しているが、これについては後述する。

波形全体のスペクトルより、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、レベル2地震動(タイプI)に分類されるが、概ねレベル2地震動(タイプII)と同程度の応答を示すことが分かる。

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/s^2 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。

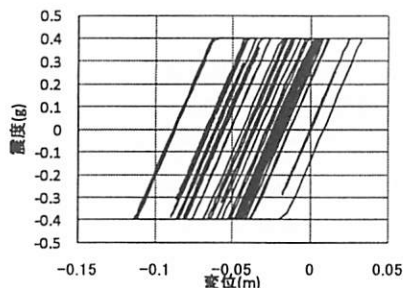
図-2(b)に示すK-NET石巻記録についても短周期の応答が大きく、固有周期が0.1秒から0.2秒の間ではレベル2地震動(タイプII)の標準スペクトルを超える応答を示しており、さらに固有周期1.1秒から1.2秒間のピークの応答はレベル2地震動(タイプII)の標準スペクトルと同程度となっている。

図-2(c)に示すK-NET仙台記録についても短周期の応答が大きく、固有周期が0.1秒から0.2秒の間ではレベル2地震動(タイプII)の標準スペクトルを超える応答を示している。さらに、ピークは固有周期0.7秒から0.8秒の間にあり、レベル2地震動(タイプII)の標準スペクトルを超える応答を示している。

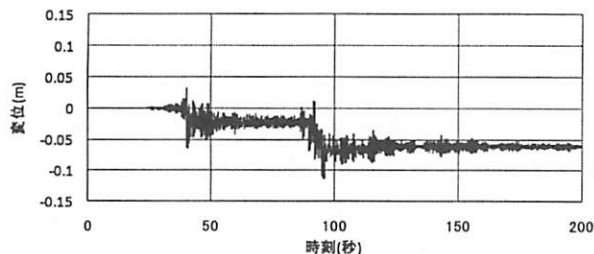
また、東北地方太平洋沖地震では、2つの主要動が短い時間で連続して発生したと考えられる。その特性が構造物の地震応答に及ぼす影響を検討するため、波形を分割し、2つの主要動それぞれを単独で解析した場合と、連続したままの波形全体で解析を行った場合とで比較を行った。図-3に分割した場合の加速度波形の概要図を示す。波形分割は1回目の応答が収束する75秒の位置で行った。

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、第2波を単独で解析した場合のスペクトルが波形全体で解析した場合のスペクトルとほぼ一致する。そのため、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波が支配的であることが分かる。

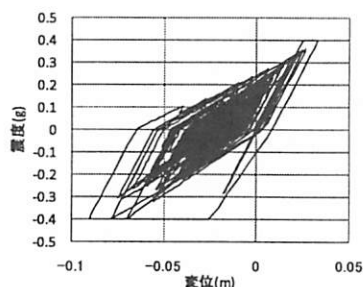


(a) 応答履歴

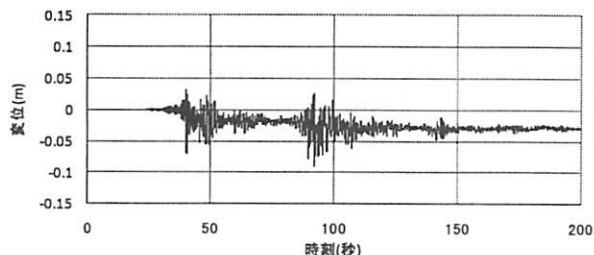


(b) 時刻歴応答変位

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)



(a) 応答履歴



(b) 時刻歴応答変位

図-5 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 クラフモデル)

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。

- ・降伏震度として0.4および0.6を仮定した。
- ・復元力モデルとしてバイリニアモデルおよびクラ

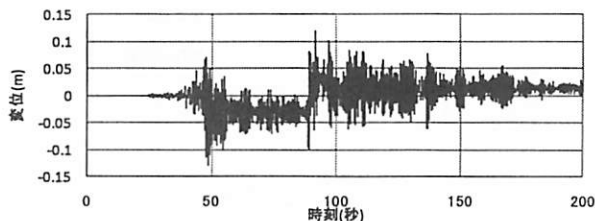


図-6 K-NET仙台記録EW成分を入力した場合の時刻歴応答
変位(降伏震度0.4 固有周期0.8秒 バイリニアモデル)

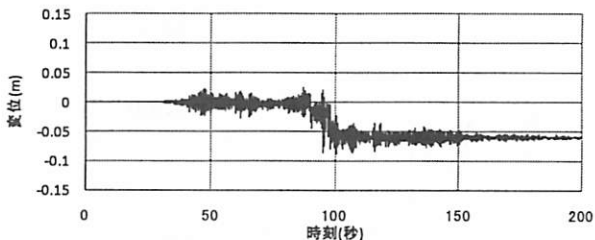


図-7 K-NET築館記録NS成分を入力した場合の時刻歴応答
変位(降伏震度0.4 固有周期0.5秒 バイリニアモデル)

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。

- ・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いるが、本検討中では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、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比較した。

兵庫県南部地震についてはJR鷹取駅、東神戸大橋、神戸海洋気象台の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、復元力モデル、固有周期、入力地震動をパラメーターとし、720ケースの応答解析を行ったが、このうち特徴的な応答を示した結果を、応答の例として図-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の系に対して、バイリニアモデル

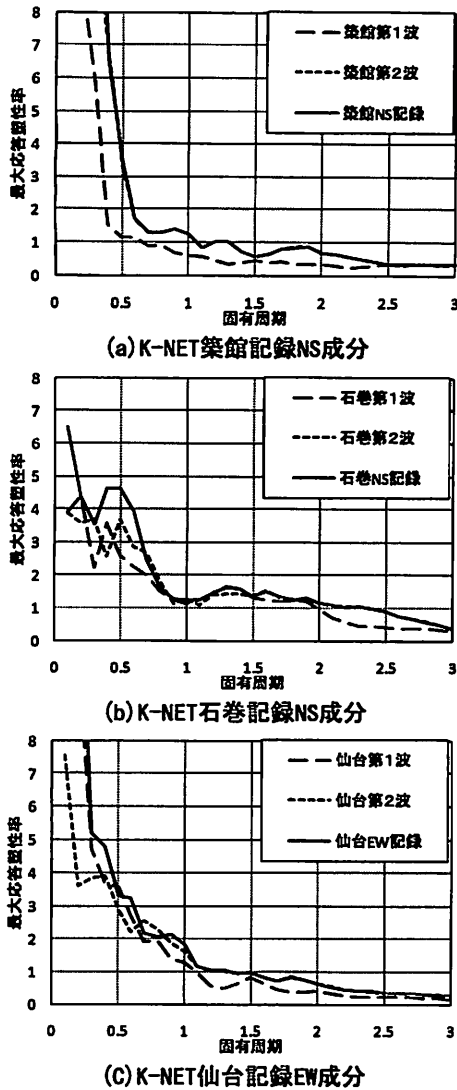


図-8 最大応答塑性率スペクトル
(降伏震度0.4 バイリニアモデル)

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が、1回目の応答の後、2回目の応答でさらに変位が増加している。また、応答変位は2回目の応答の方が大きくなっている。図-5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でも応答は2回発生しているが、図-4、図-5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720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。また、線形スペクトルによる比較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)に示されるK-NET築館記録の場合では波形全体で非線形解析を行った場合と、第2波のみで解析を行った場合とで、スペクトルがほぼ一致した。これは図-7に示したように第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、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。

図-8(b)に示すK-NET石巻記録の場合では固有周期0.5秒付近において、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仙台記録の場合では固有周期0.8秒付近において、波形全体で非線形解析を行った場合が第2波のみで解析を行った場合とで差異が現れた。固有周期0.8秒では波形全体で解析した場合の応答塑性率が、単独で解析を行った場合と比べ小さくなっているが、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波単独での解析が一致するため、第2波が支配的であると考えられる。

解析の結果、K-NET石巻記録およびK-NET仙台記録では一部の固有周期で2つの主要動が連続して発生したことによる影響が見られた。それ以外の固有周期では3記録とも第2波目の影響が支配的であった。

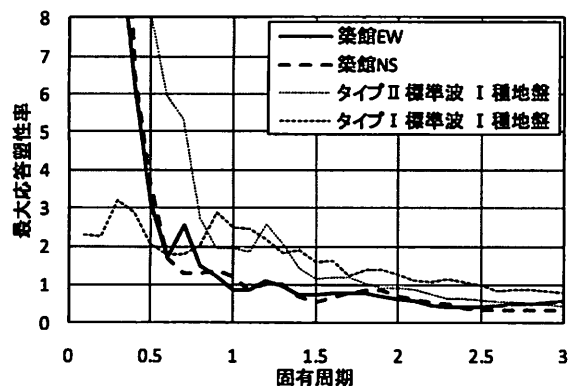


図-9 K-NET築館記録と標準波の最大応答塑性率スペクトルの比較(降伏震度0.4 バイリニアモデル)

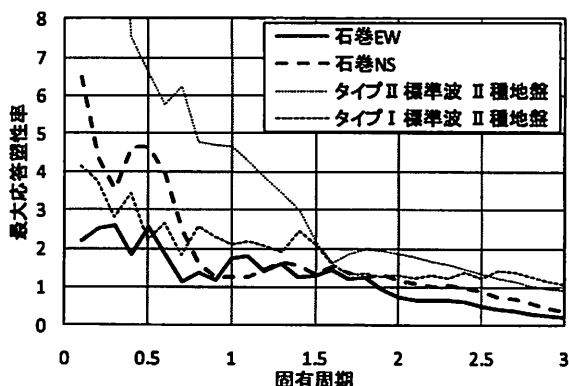


図-11 K-NET石巻記録と標準波の最大応答塑性率スペクトルの比較(降伏震度0.4 バイリニアモデル)

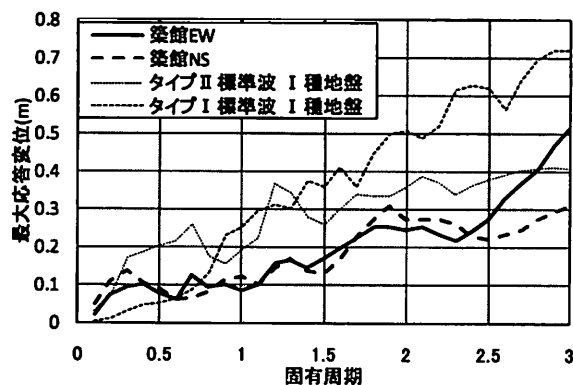


図-10 K-NET築館記録と標準波の最大応答変位スペクトルの比較(降伏震度0.4 バイリニアモデル)

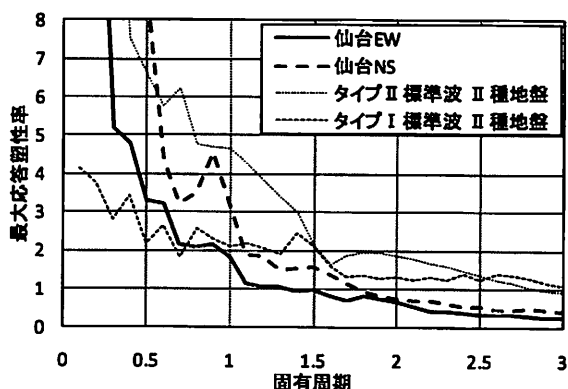


図-12 K-NET仙台記録と標準波の最大応答塑性率スペクトルの比較(降伏震度0.4 バイリニアモデル)

(4) 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) 道路橋示方書の設計地震動との比較

ここでは降伏震度0.4としたバイリニアモデルを例に道示標準波との比較を示す。図-9はK-NET築館記録の地震動と道示標準波（I種地盤）の最大応答塑性率スペクトル比較したものである。K-NET築館記録の波形では0.5秒以下の短周期では道示標準波より大きな応答を示す場合があるが、一般的な橋梁の固有周期帯0.5秒～1.5秒の間ではタイプI、タイプII標準波よりも小さな応答となった。

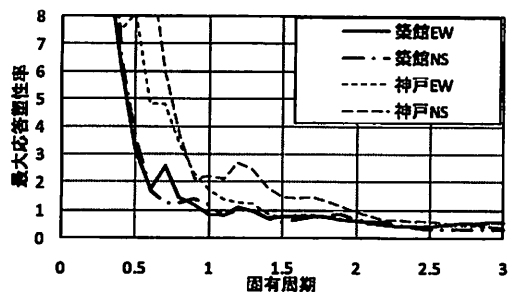
また、0.5秒以下の短周期で非常に大きな応答塑性率となるが、これはそのような構造系を想定した場合には降伏変位が小さく、応答塑性率で評価すると値が大きくなるためである。図-10に最大応答変位スペクトルを示す。最大応答変位ではK-NET築館記録は固有周期0.2秒で約0.11m、固有周期0.3秒で約0.14mとなっているのに対し、タイプII標準波では固有周期0.2秒で0.07m、固有周期0.3秒で0.17mとなっており、短周期では0.2秒まではK-NET築館の

方が大きくなるが、0.3秒以上ではタイプII標準波の方が大きくなった。

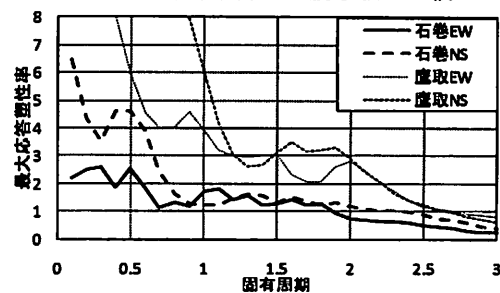
K-NET石巻記録の地震動と道示標準波（II種地盤）の最大応答塑性率スペクトルを図-11に示す。K-NET石巻記録では全固有周期帯において、タイプII標準波より小さな応答となった。また、タイプI標準波と比較しても固有周期0.8秒以上では同程度かタイプI標準波以下となった。

K-NET仙台記録と道示標準波（II種地盤）の最大応答塑性率スペクトルを図-12に示す。K-NET仙台記録の波形では降伏震度0.4とした場合において一般的な橋梁の固有周期帯ではタイプI標準波よりも大きな応答を示すが、タイプII標準波と同程度かタイプII標準波以下となった。

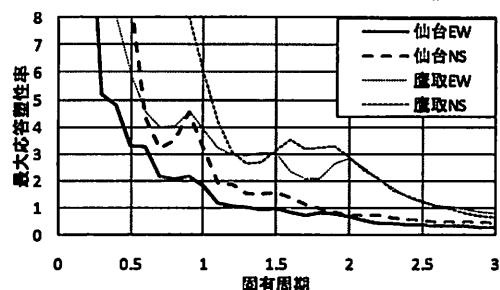
比較の結果、東北地方太平洋沖地震の3地点の観測波と道示標準波の比較では東北地方太平洋沖地震の応答はタイプII標準波と比べ同等もしくはタイプII標準波より小さな応答を示す結果となった。タイプI標準波との比較ではやや応答が大きくなる周期帯があるが、多くの固有周期帯で同程度かタイプI標準波より小さな応答となった。



(a) K-NET築館記録とJR鷹取駅の比較



(b) K-NET石巻記録とJR鷹取駅の比較



(c) K-NET仙台記録とJR鷹取駅の比較

図-13 過去地震との最大応答塑性率スペクトルの比較
(降伏震度0.4 パイリニアモデル)

(b) 兵庫県南部地震で観測された地震動との比較

ここでは降伏震度0.4としたパイリニアモデルを例に兵庫県南部地震の地震動との比較を示す。K-NET築館記録と兵庫県南部地震(I種地盤である神戸海洋気象台の記録)との最大応答塑性率スペクトルを図-13(a)に示す。0.5秒以下の短周期では兵庫県南部地震よりも大きな応答を示すが、一般的な橋梁の固有周期帯である0.5秒から1.5秒の固有周期では兵庫県南部地震より応答が小さくなる結果となった。

K-NET石巻記録と兵庫県南部地震(II種地盤であるJR鷹取駅の記録)との最大応答塑性率スペクトルを図-13(b)に示す。固有周期0.5秒付近でNS成分がやや大きな応答を示すが、全固有周期帯で兵庫県南部地震より小さい応答となった。

K-NET仙台記録と兵庫県南部地震(II種地盤であるJR鷹取駅の記録)との最大応答塑性率スペクトルを図-13(c)に示す。固有周期0.8秒付近でNS成分がやや大きな応答を示すが、全固有周期帯で兵庫県南部

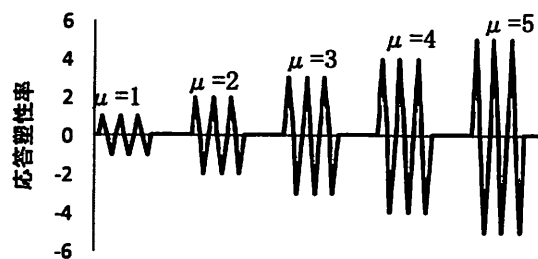


図-14 正負交番载荷実験の载荷履歴

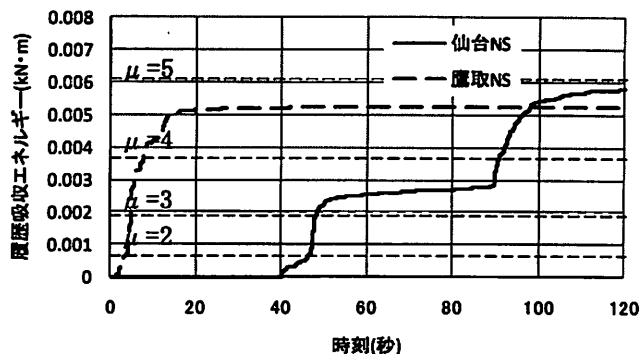


図-15 履歴吸収エネルギーの時刻歴
(固有周期0.5秒 降伏震度0.4 クラフモデル)

地震より小さい応答となった。

以上より、東北地方太平洋沖地震の3地点はいずれも兵庫県南部地震より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増え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を降伏を超える応答の回数により評価している例³⁾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できない。

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⁴⁾、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

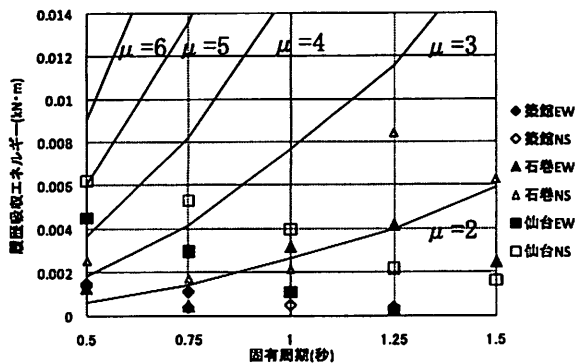


図-16 東北地方太平洋沖地震の地震動を入力した場合の履歴吸収エネルギー（クラフモデル，降伏震度0.4）

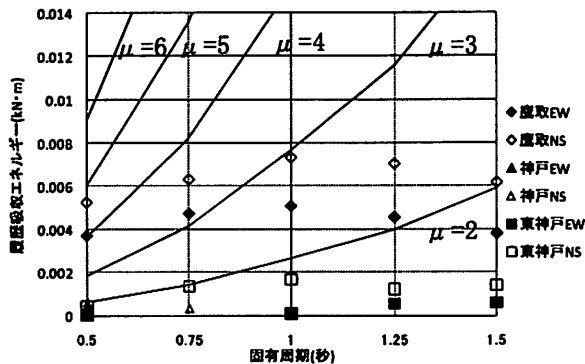


図-17 兵庫県南部地震の地震動を入力した場合の履歴吸収エネルギー（クラフモデル，降伏震度0.4）

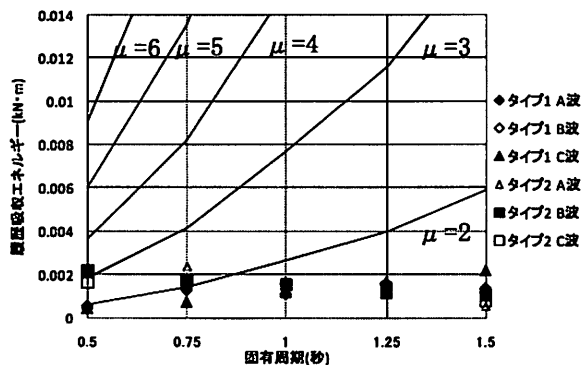


図-18 道示標準波（Ⅰ種地盤）を入力した場合の履歴吸収エネルギー（クラフモデル，降伏震度0.4）

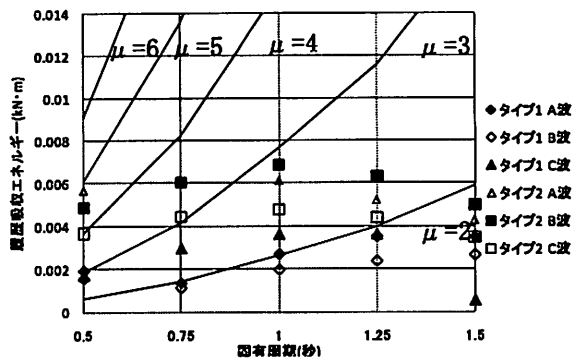


図-19 道示標準波（Ⅱ種地盤）を入力した場合の履歴吸収エネルギー（クラフモデル，降伏震度0.4）

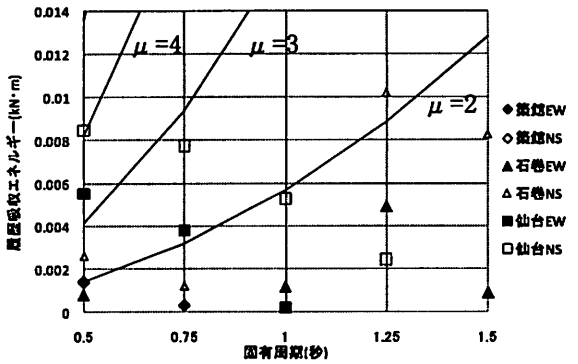


図-20 東北地方太平洋沖地震の地震動を入力した場合の履歴吸収エネルギー（クラフモデル，降伏震度0.6）

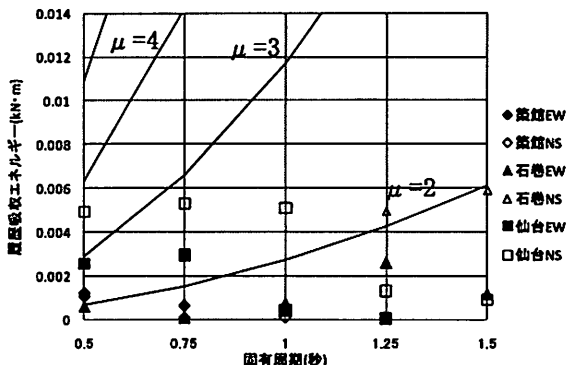


図-21 東北地方太平洋沖地震の地震動を入力した場合の履歴吸収エネルギー（パイリニアモデル，降伏震度0.4）

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-14に示すように一定振幅の繰返し回数を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、復元力モデルはパ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～1.5秒とし、0.5秒、0.75秒、1.0秒、1.25秒、1.5秒で解析

を実施した。

図-15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、1回目の主要動の際に $\mu=3$ を超えるレベル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 $\mu=5$ 相当のエネルギー吸収量になる。JR鷹取駅記録では、 $\mu=4\sim5$ 相当の累積エネルギー吸収量であるため、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、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-16から図-21に示す。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、塑性化し易く、その結果、エネルギー吸収量は大きくなる。このため、図-16の降伏震度を0.4としたケースで固有周期が0.5秒では例えばK-NET仙台記録NS成分において $\mu=5$ 相当の累積エネルギー吸収量となっている。一方、図-20のように降伏震度を0.6とすると、固有周期が0.5秒においても最大でも $\mu=4$ 相当の累積エネルギー吸収量になることが分かる。図-16と図-17、図-18および図-19の比較によれば、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、ここには、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-21に示すバイリニアモデルの場合には固有周期によって履歴吸収エネルギーの増減に違いがあるが、クラフモデルとの差は小さく、傾向は同じである。一方、正負交番繰り返し載荷実験の吸収エネルギーは増加するため、結果的に固有周期0.5秒、固有周期0.4の仙台NS成分でも $\mu=4$ 相当となる。

5. 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の特性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返しの応答が一部の固有周期帯で見られた。

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ると、東北地方太平洋沖地震の地震動では最大で塑性率 $\mu=5$ 程度、多くの固有周期帯で塑性率 $\mu=3$ 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以下の履歴吸収エネルギーであった。

6. 謝辞：本検討に際し、防災科学研究所の強震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) 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。
- 4) 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Ⅴ巻、532/V-30号、pp. 5-13、1996