東北地方太平洋沖地震時の広域における表層地盤の非線形挙動評価

（独）港湾空港技術研究所　　正会員　○若井　淳
（独）港湾空港技術研究所　　正会員　　野津　厚

１．はじめに

地震動が構造物に与える影響を正確に理解する上で，表層地盤の非線形挙動が地震動に与える影響を評価することは重要である．2011 年東北地方太平洋沖地震（以下，本震という）では，全国をカバーする強震観測網により，非常に広範な地域で強震記録が得られている．本研究では，これらの記録を用いて，当該地震の際に各地で実際に生じた非線形挙動強さとその空間的な分布を把握し，さらに，非線形挙動強さと地震動強さや地盤条件との関係について検討を行う．

既往の研究の中には，強震時および弱震時の水平動と上下動のスペクトル比を用いる方法 [1)]や，互いに近接した 2 地点間のスペクトル比を用いる方法 [2)]などにより，表層地盤の非線形挙動強さを評価した事例がある．それに対し，本研究では，既往の研究 [3)]で提案されている線形時のサイト増幅特性からの偏差を明らかにすることに主眼を置いている点が特徴である．

２．非線形挙動強さの評価方法

本研究では，本震時の記録が得られている K-NET，KiK-net 観測地点の中で，本震時に表層地盤が非線形挙動を示した可能性のある観測地点を漏れなく対象とするため，地表最大加速度(3 成分合成)が 50cm/s^2 以上の観測地点をすべて対象とする．この時，対象候補地点は 398 地点となる．次に，各観測地点において，線形時のサイト増幅特性(地震基盤～地表）のピーク周波数と，本震時の地表におけるフーリエスペクトルのピーク周波数をそれぞれ読みとり（図 1 の左および中央)，前者に対する後者の比（以下，ピーク周波数比という）を，表層地盤に生じた非線形挙動の強さの指標として用いる．ただし，双方のピーク周波数を読み取る際に，どちらか一方でもピークが不明瞭でピーク周波数を特定するのが困難な場合，その観測地点を対象から除外する．その結果，最終的に検討対象となるのは 98 地点に絞られる．そして，ピーク周波数比と，地震動強さの指標である地表最大加速度(PGA)，地表最大速度(PGV)，PSI 値との関係などについて検討を行う．

３．検討結果

非線形挙動強さの空間的な分布を図 1 右に示す．図中の観測地点を表す△の色が，暖色系ほど非線形挙動が強く，寒色系ほど非線形挙動が弱いことを示している．概ね，各 SPGA[4)]に比較的近い地点ほど非線形挙動が強い傾向がみられる．非線形挙動強さの指標であるピーク周波数比と地震動強さの指標である PGA，PGV 及び PSI 値の関係について検討したところ，いずれに対しても，その値が大きくなると非線形挙動が強くなる傾向があるが，非線形挙動強さと最も相関の高い指標は PGV であることがわかった．また，非線形挙動強さと PGV の関係は，指数関数モデルよりも双曲線モデルにより，より適切に表現できることがわかった．この結果に基づき，PGV から非線形挙動強さを推定するための経験式を提案した（図 2 左）．次に，非線形挙動強さと地震動強さおよび地盤条件の三者の関係について調べるために，表層地盤の非線形挙動強さの経験式からの偏差を，「ピーク周波数比の観測値」の「経験式」に対する比として評価し，これと線形時のサイト増幅特性(地震基盤～地表)のピーク周波数との関係を検討したところ，両者は負の相関を示すことがわかった（図 2 右）．このことは，堆積層の厚い地盤ほど，表層地盤の非線形挙動によるピーク周波数の低減率が小さいことを意味する．なお，ピーク周波数比の観測値の経験式に対する比とサイト増幅特性のピーク周波数との関係式を図 2 右に示す．図 2 右の式は，図 2 左の式を補正する役割を持っている．実際，AIC（赤池情報量基準）や BIC（ベイズ情報量基準）は補正後の方が小さくなることを確認しており，より適切なモデルとなることを示している．

キーワード　非線形挙動，強震動，東北地方太平洋沖地震，経験式
連絡先　〒239-0826　神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1　（独）港湾空港技術研究所 地震防災研究領域　地震動研究チーム
TEL　046-844-5085

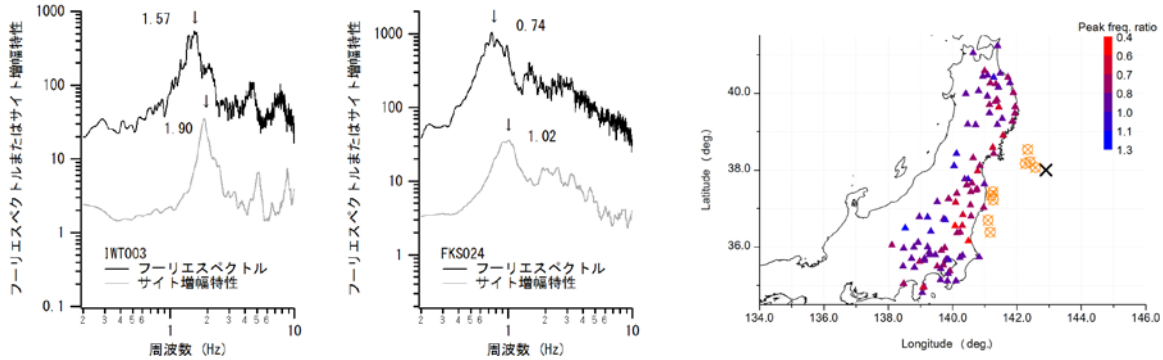

図 1　左，中央：本震時のフーリエスペクトルとサイト増幅特性の比較；右：本研究の対象地点（98 地点）とそこでのピーク周波数比の評価結果(暖色系：非線形挙動が強い，寒色系：非線形挙動が弱い)．×印は気象庁発表の本震震央位置，○と×を組み合わせた記号は既往の研究[4]で推定されている本震の SPGA の位置．

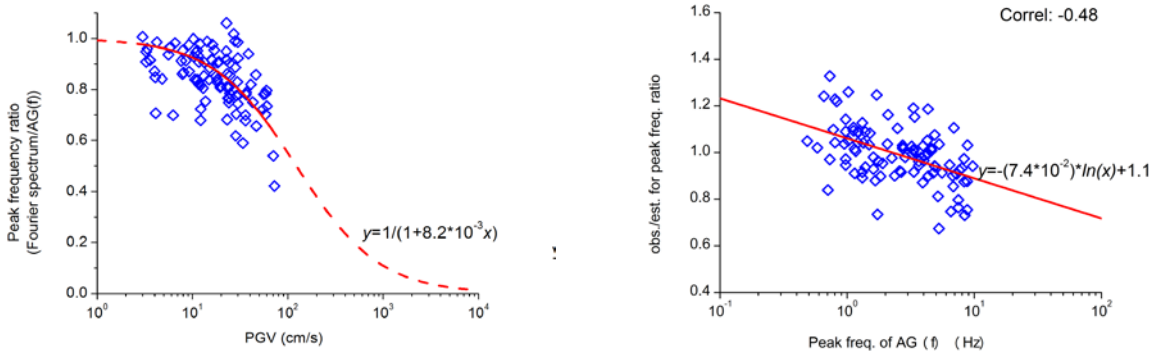

図 2　左：PGV とピーク周波数比（地表フーリエスペクトル/線形時サイト増幅特性）の関係，右：ピーク周波数比の観測値の経験式に対する比とサイト増幅特性のピーク周波数の関係

4．まとめ

本研究では，2011 年東北地方太平洋沖地震の際に広域で得られた観測記録を用いて，各観測地点で生じた非線形挙動強さを評価し，その空間的な分布や地震動強さの指標との関係などを検討した．その結果，非線形挙動強さと最も相関の高い地震動強さの指標は PGV であることを明らかにし，その関係を表現するため双曲線モデルに基づいた経験式を提案した．さらに，非線形挙動強さと地震動強さおよび地盤条件の三者の関係を表す式を導き，これが非線形挙動強さと PGV の関係を示す経験式を補正するために有効であることを示した．本研究では地盤の非線形挙動のうち剛性の低下のみに着目しているが，今後はもう一方の減衰の増大に関する経験式について検討することが課題のひとつである．

謝辞

本研究では，(独) 防災科学技術研究所の K-NET 及び KiK-net の強震記録を使用させて頂きました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1) 野口科子・佐藤浩章：2011 年東北地方太平洋沖地震の強震データに基づく表層地盤の非線形応答特性，日本地震学会秋季大会講演予稿集，pp. 58，2011

2) 池浦友則：2011 年東北地方太平洋沖地震・本震時における KiK-net 地点のサイトファクターの変化，日本地震学会秋季大会講演予稿集，pp. 57，2011

3) 野津厚・長尾毅・山田雅行：スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例，日本地震工学会論文集，第 7 巻，第 2 号，pp. 215-234，2007

4) 野津厚・山田雅行・長尾毅・入倉孝次郎：海溝型巨大地震における強震動パルスの生成とその生成域のスケーリング，日本地震工学会論文集，第 12 巻，第 4 号，pp. 209-228，2012