

# 巨大地震による長周期地震動予測の重要性について

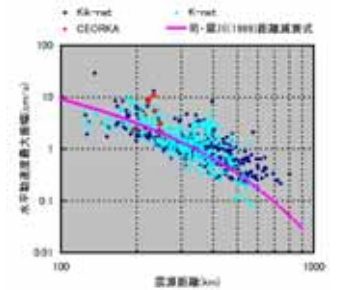
入倉孝次郎・釜江克宏・川辺秀憲 (京都大学)

## はじめに

東南海・南海地震の発生が危惧される中、その震源域から離れてはいるものの、今年9月5日に紀伊半島沖や東海道沖を震源とするM6.9とM7.4の地震が発生し、震源域から非常に離れた大都市(大阪、名古屋、東京など)において長周期地震動が観測された。この長周期地震動は、昨年発生した2003年十勝沖地震(M8.0)で、200km以上も離れた苫小牧において石油タンクのスロッシング現象を引き起こし、タンクの全面火災を引き起こす原因になった。筆者らはこれまで想定東南海・南海地震時の予測結果に基づき、巨大地震時の長周期地震動の重要性を指摘してきた。ここでは、9月5日に発生した地震時における地震動の特徴や長周期構造物によって観測されたデータなどを紹介し、将来の巨大地震による長周期地震動による被害を軽減するためには、精度の高い地震動予測と、超高層ビル、免震構造物、長大橋、石油タンクなどの長周期構造物の安全性再確認が重要かつ緊急の課題であることを指摘する。

## 2004年9月5日の紀伊半島南東沖地震(M7.4)による長周期地震動の検討

ここではK-NET、KiK-net、CEORKAによる観測記録を用い、まず既存の距離減衰式(司・翠川,1999)との比較を行った。大阪平野や関東平野で振幅が距離減衰式より大きくなっており、堆積盆地構造の影響が示唆される結果となっている。次に、各地点における長周期地震動の周期ごとの揺れやすさを近似的に(1)式によって評価し、周期ごとに図示した。図から大阪平野では3秒~6秒、濃尾平野では3秒~4秒、関東平野では7秒~10秒の周期で揺れやすいことがわかる。



水平動最大速度と距離減衰式(司・翠川,1999)の比較

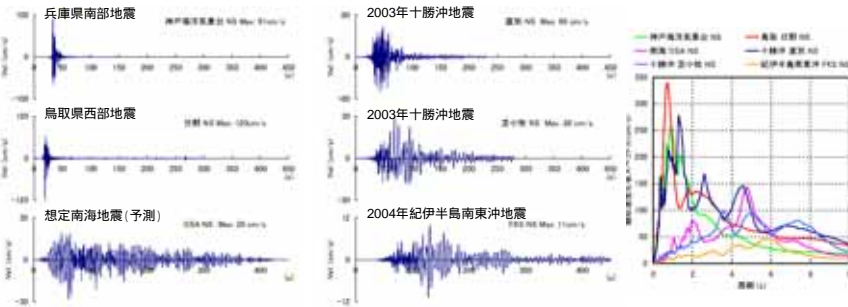
$$C = \frac{pSv/V_{MAX}/\sqrt{R}}{pSv^B/V_{MAX}^B/\sqrt{R^B}} \quad (1)式$$

C: 揺れやすさ係数, pSv: 擬似速度応答スペクトル, V<sub>MAX</sub>: 距離減衰式(司・翠川,1999)による速度最大値, R: 震源距離

各係数の右上の添え字Bは基準点(MIEH09)の値であることを示す。

観測点が震源から遠いため観測記録の速度最大値は表面部分になるとして、ここでは距離減衰式による速度最大振幅を Rで割った値で距離減衰(幾何学的減衰)の効果を取り除いた。

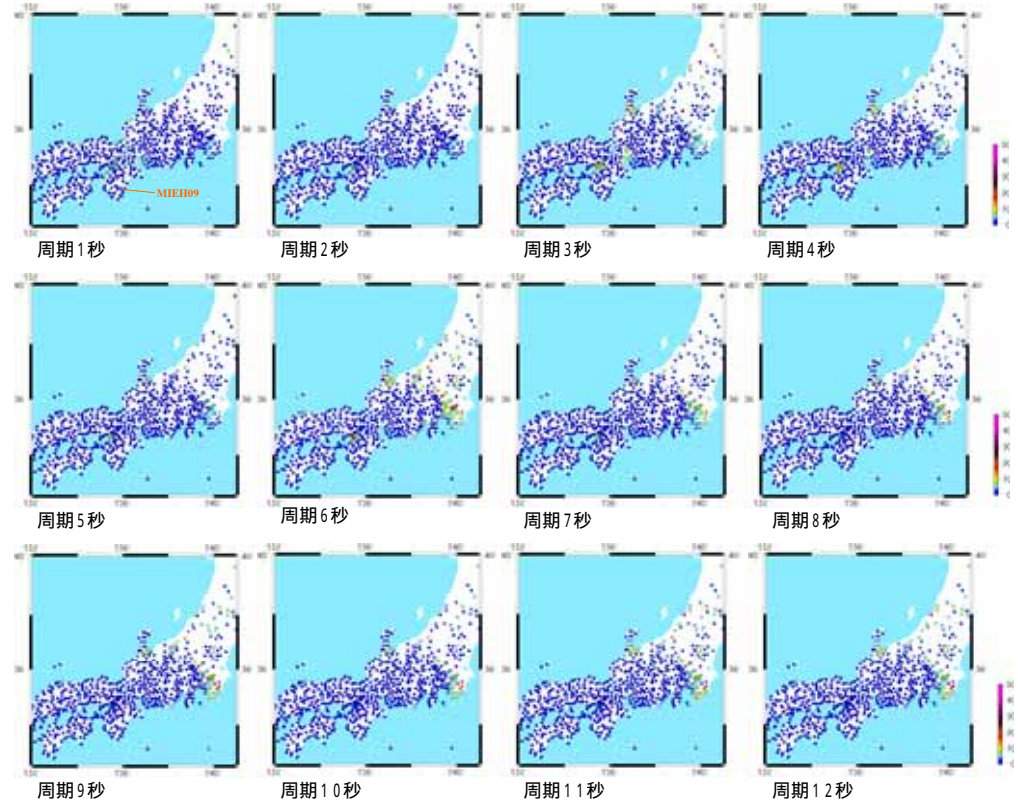
## 海溝型巨大地震と内陸地殻内地震との強震動特性の違い



内陸地殻内地震と海溝型地震による地震動の違い

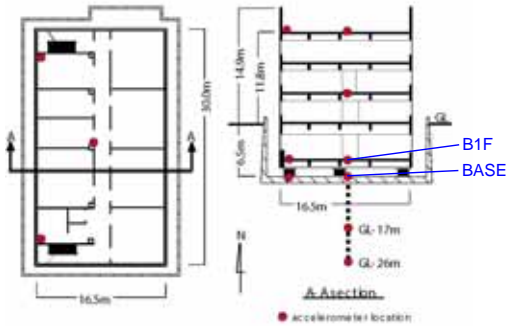
1995年兵庫県南部地震(M7.3)、2000年鳥取県西部地震(M7.3)、2003年十勝沖地震(M8.0)、想定南海(M8.4)・東南海地震(M8.1)、2004年紀伊半島南東沖地震(M7.4)

まずここでは海溝型巨大地震と内陸直下地震による観測及び予測地震動を紹介し、それぞれの地震動の違いを示す。地震動の特徴としては、海溝型巨大地震は震源域が陸域から離れていることが多く、その強さは震源域が陸域にある内陸地殻内地震に比べ小さいが、地震の規模が非常に大きい(震源域が広い)ことから、強い地震動が非常に広範囲に及び(中央防災会議による予測震度参照)。また震源域に近い沿岸部などで非常に強い地震動となるだけでなく、震源域から遠く離れた都市部では震源で生成された周期の長い地震動が堆積盆地内で増幅され、長周期地震動が強くなる。一方、内陸地殻内地震では1995年兵庫県南部地震や2000年鳥取県西部地震もそうであったように、震源域までの距離が非常に小さく、非常に強い地震動となる。これらの2つのタイプの地震による地震動の違いを上図に示す。振幅、継続時間の違いや周期特性の違いが特徴的である。ちなみに、想定東南海・南海地震についての予測結果については後に再掲する。

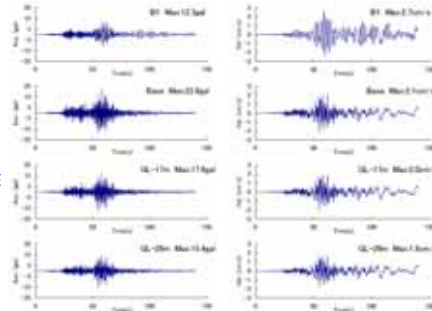


# 長周期地震動の構造物への影響

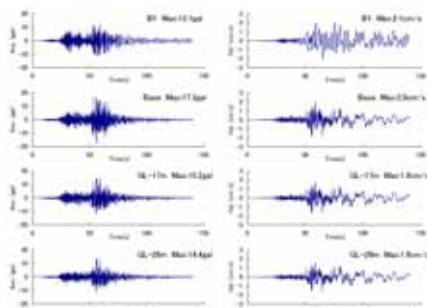
京都大学構内に立地する免震構造物の地震時応答



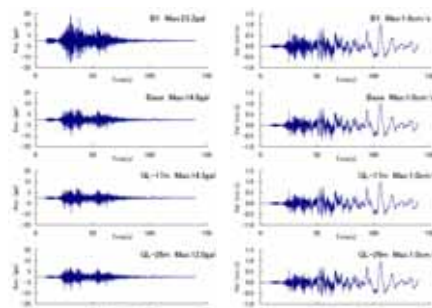
京都大学構内の免震建築物及び地震計設置位置



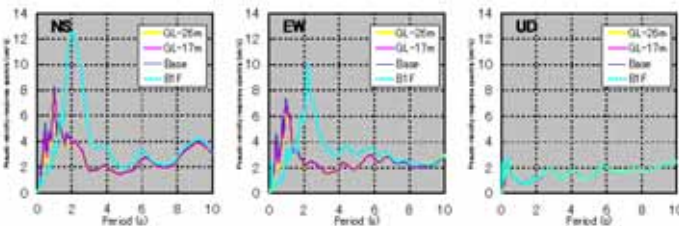
京都大学構内の免震建築物観測記録：NS成分  
紀伊半島南東沖地震 (2004年9月5日23時57分：M7.4)



京都大学構内の免震建築物観測記録：EW成分  
紀伊半島南東沖地震 (2004年9月5日23時57分：M7.4)



京都大学構内の免震建築物観測記録：UD成分  
紀伊半島南東沖地震 (2004年9月5日23時57分：M7.4)

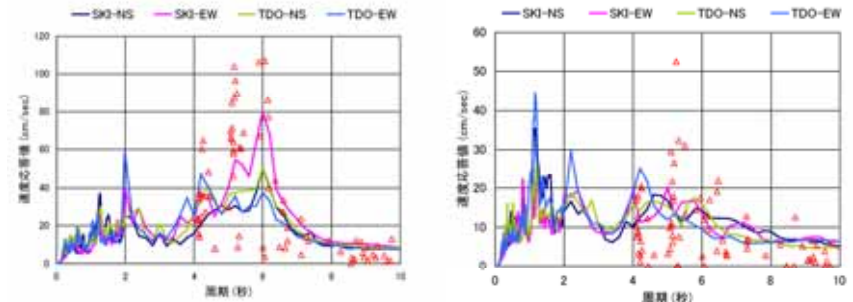


京都大学構内の免震建築物観測記録：擬似速度応答スペクトル (減衰5%)  
紀伊半島南東沖地震 (2004年9月5日23時57分：M7.4)

京都大学構内には上図のような免震構造物があり、地震観測が実施されている。ここでは2004年9月5日23時57分に発生した紀伊半島南東沖地震 (M7.4) 時の観測記録を紹介する。地震観測は地中2ヶ所、基礎部 (BASE)、免震層上部 (B1F) などで行われており、3箇所における3成分観測波形 (加速度、速度) を示した。また、それらの擬似速度応答スペクトルも示した。図から免震効果によって短周期成分が低減されていることがわかる。ただし、2秒から6秒あたりでは逆に大きく増幅していることがわかる。特に2秒付近では3倍程度の増幅を示している。本免震建屋の固有周期は約2秒ということである。最近免震構造物の長周期化が進められているが、より規模の大きい地震では、より周期の長い、強い長周期地震動が生成される可能性が高く、長周期地震動に対する免震構造物の安全性の再検討が望まれる。

謝辞) 観測結果はシステムを管理されている京都大学・竹脇出教授と観測に協力されている大林組・中村充氏によって提供されたものであり、ここに感謝の意を表します。

大阪湾岸に立地する石油タンクのスロッシング



2004年9月5日23:57 (M7.4)

2004年9月5日19:07 (M6.9)

石油タンクのスロッシングから評価した速度応答値 ( ) と近傍地震観測点での速度応答スペクトルとの比較 (1%減衰)

2004年9月5日に発生した紀伊半島南東沖地震の前震 (M6.9) 及び本震 (M7.4) では広い範囲で長周期地震動が観測された。図は大阪湾岸 (堺 - 忠岡間) に立地する石油精製所にある多数の石油タンクにおいて観測されたスロッシング現象を示す。タンクの固有周期はタンクの形状、液面高さなどから評価し (1) 式)、速度応答値は地震時の最大波高から (2) 式) によって評価した。地震動の観測スペクトルは当該地点での観測記録がないため、近傍観測点 (関震協・堺、忠岡) における値を参考値として示した。スロッシング量はバラツキが大きいものの、観測スペクトルとのピーク周期や応答値はほぼ整合している。

$$T = 2\pi\sqrt{D/(3.682g \cdot \coth(3.682H/D))} \quad (1)$$

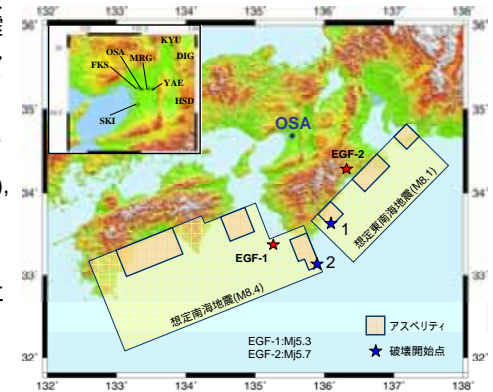
T: 固有周期, D: タンク直径, H: 液深, g: 重力加速度

$$W = D/2g \cdot 0.837(2\pi/T) \cdot Sv \quad (2)$$

W: 最大波高, Sv: 速度応答スペクトル

## 想定東南海・南海地震時の地震動予測

ここでは経験的グリーン関数法を用いた想定東南海・南海地震時の大都市・大阪における地震動予測結果を紹介する。震源モデルが推本によって提案されたそれぞれ3つのアスペリティを有するモデルである。OSA (大阪管区気象台地点) では南海・東南海はそれぞれ個別に発生した場合と両者が連動した場合についての結果を、関震協観測点である福島 (FKS)、弥栄 (YAE)、森河内 (MRG) などについては東南海地震に対しての予測結果である。4~6秒の長周期地震動が卓越し、その応答値は2000年建築基準法改正に伴う安全限界レベルを越えている。今年9月5日に発生した紀伊半島南東沖地震 (M7.4) における観測スペクトルも比較のために示した。この地震に対しては数多くの観測記録が得られており、今後分析結果を基にここで示した予測結果の妥当性を検証する必要がある。

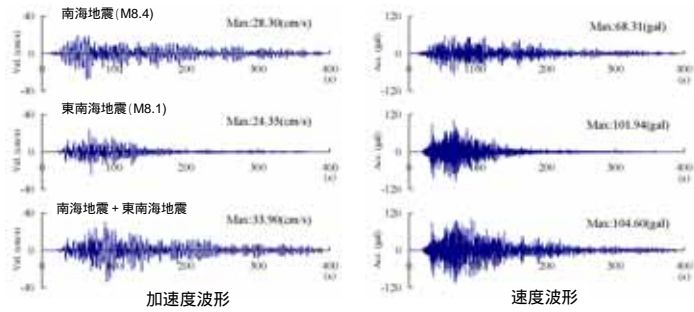


想定震源位置と波形合成地点

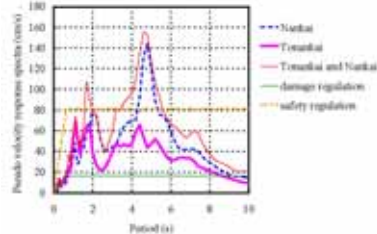


# 巨大地震による長周期地震動の観測結果及び予測結果

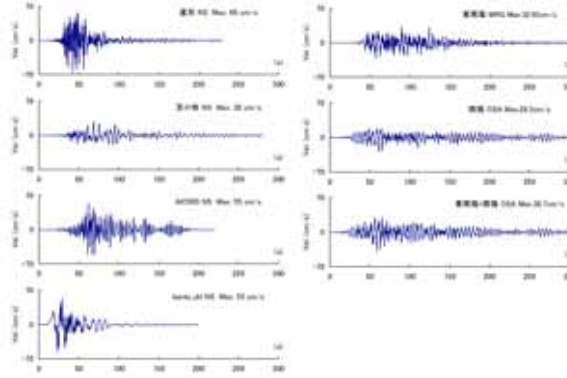
ここでは2003年9月26日に発生した2003年十勝沖地震 (M8.0)における観測結果、1923年関東地震の再現結果、発生が危惧されている東海・東南海・南海地震の予測地震動による長周期地震動を示す。地震の規模や当該地点の地下構造の影響によって周期特性に変化が見られる。また、いずれの地震でも長周期側において2000年建築基準法の改正に伴う、安全限界のスペクトルレベルを大きく越えている。このような地震動に対して長周期構造物がどのような被害を受けるのかの緊急な検討が必要である。



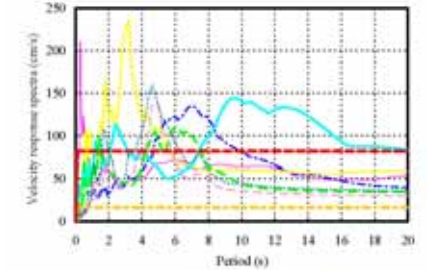
想定南海地震と想定東南海地震の同時発生を想定した強震動予測結果  
上: 想定南海地震単独 中: 想定東南海地震単独 下: 両地震の同時発生



想定南海地震と想定東南海地震の同時発生を想定した予測地震動の擬似速度応答スペクトル(減衰5%)



巨大地震による観測及び予測強震動(速度波形)



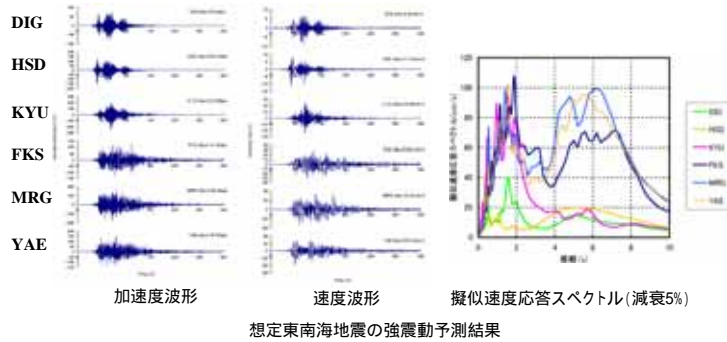
巨大地震による強震動の速度応答スペクトル(減衰5%)と2000年改正建築基準法の損傷限界・安全限界との比較。

2003年十勝沖は苫小牧と広尾での観測記録。想定東南海地震については、AIC003Iはハイブリッドグリーン関数法による合成結果(渡辺・他, 2004)、MRGは経験的グリーン関数法による合成結果(釜江・川辺, 2003)、1923年関東地震については3次元差分法と経験的グリーン関数法あるいは統計的グリーン関数法のハイブリッド法による合成結果(佐藤・壇, 2001)。想定南海地震および想定東南海・南海地震のOSAは経験的グリーン関数法による合成結果(釜江・川辺, 2003)。

## おわりに

近い将来の発生が危惧されている東南海・南海地震時の地震動予測結果に基づき、海溝型巨大地震時における災害軽減にとって長周期地震動の高精度な予測の重要性を指摘してきた。その指摘は2003年十勝沖地震や今年9月5日に発生したM6.9とM7.4の地震によって観測された長周期地震動によって確認できた。ここでは今回の地震による長周期地震動の分析結果や長周期構造物における観測結果などを紹介した。その結果は、来るべき海溝型巨大地震時に対して長周期構造物の被害を軽減するためには、高精度な長周期地震動予測が緊急の課題であるとともに、その地震動によって長周期構造物がどのような被害を受けるのかの研究が極めて重要であることを示している。

**謝辞:** 独立行政法人防災科学技術研究所のK-NET及びKiK-net、関西地震観測研究協議会及び独立行政法人港湾空港技術研究所の強震記録を使用しました。関係者の皆様に感謝いたします。



想定東南海地震の強震動予測結果