

## 3-5 弾性加速度応答スペクトル

地震動が構造物に与える影響を直接確認する方法に震動実験がある。これは、加振台の上に対象となる橋梁もしくはその模型を置き、その加振台を鳥取県西部地震で観測された地震動で震動させるというものである。現実には、震動実験は非常に高価であり、対象とする橋梁毎にこのような実験を行うことは不可能である。このため、多数の橋梁の性質を固有周期と減衰定数で代表させ、コンピュータの中で震動実験を行ったのが、図 3-12 に示す応答スペクトルである。図に示すように、いろいろな固有周期  $T$  と減衰定数  $h$  を有する柱を加振台の上に置き、加振台を地震動で震動させ、各柱の頭部に設置された加速度計で加振台が震動することによって生じる柱頭部の加速度応答波形を計測する。そして、各柱の加速度応答の最大値を縦軸に、柱の固有周期を横軸にとりその交点を一つの線で結んだものが加速度応答スペクトルである。これを、橋梁の減衰定数毎に作成すれば、ある地震動がいろいろな橋梁に与える影響を加速度応答の大小で比較することができる。さらに、ある橋梁に対して、いろいろな地震動から得られた加速度応答スペクトルを比較すれば着目している橋梁がどの地震動の影響を最も強く受けるかを知ることができる。なお、加速度応答に着目するのは、得られた最大加速度を重力加速度で除した震度は、橋梁の耐震設計に用いる設計水平震度に相当するからである。震度は、橋梁の自重の何割に相当する水平力が地震時に作用するかを表した無次元量であり、対象とする地震動によって橋梁に生じる震度と橋梁の耐震設計で考慮した設計水平震度の大小関係や、対象とする地震動が性質が異なる橋梁に与える影響の大小を容易に比較できるという利点を有している。

鳥取県西部地震がどのような固有周期の構造物に被害を与えるか、また、既往の

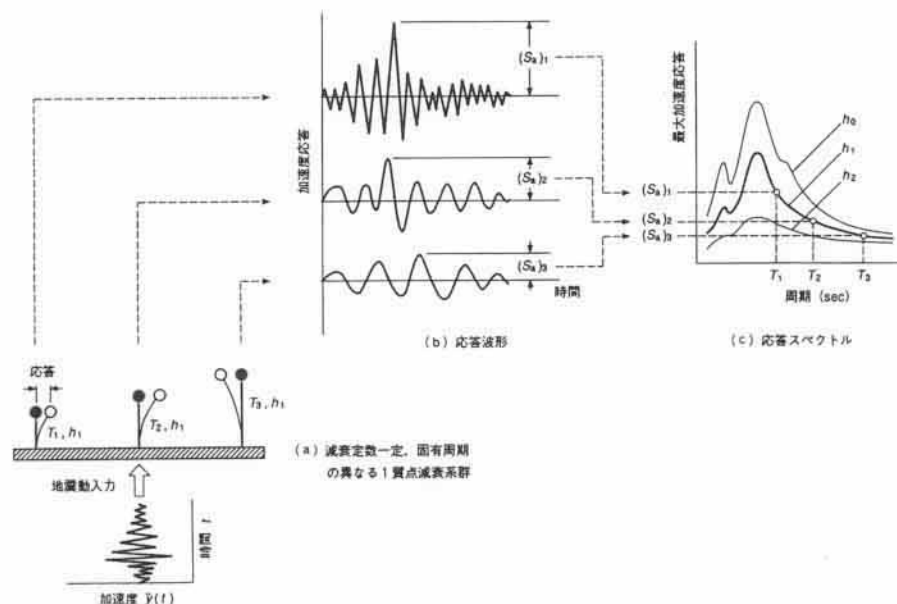


図 3-12 弾性加速度応答スペクトルの概念図<sup>4)</sup>

地震動と比較して橋梁構造物に与える影響が大きいかを検討するために、鳥取県西部地震で観測された強震記録と過去の強震記録に対して加速度応答スペクトルを作成する。

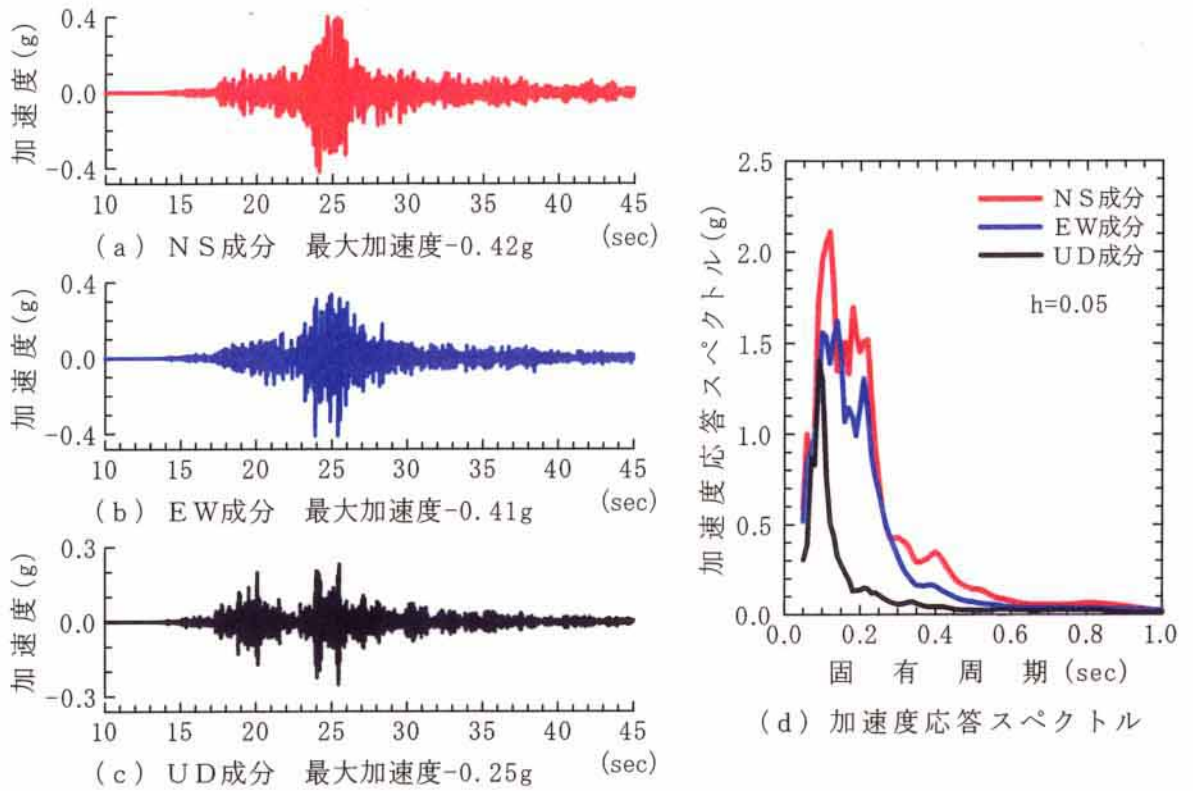
質量  $m$ ，減衰定数  $c$ ，剛性  $k$  から成る 1 自由度系に地震動の加速度  $\ddot{z}_g(t)$  が作用するときの加速度応答スペクトルは、次式によって与えられる。

$$\begin{aligned}
 m(\ddot{z}_g(t) + \ddot{x}(t)) + c\dot{x}(t) + kx(t) &= 0 \\
 \left| \ddot{z}_g(t) + \ddot{x}(t) \right|_{\max} &= SA(T, h) \\
 &= \omega_d \left| \int_0^t \ddot{x}(\tau) e^{-h(\omega-\tau)} \left[ \left( 1 - \frac{h^2}{1-h^2} \right) \sin \omega_d(t-\tau) + \frac{2h}{\sqrt{1-h^2}} \cos \omega_d(t-\tau) \right] d\tau \right|_{\max} \quad (3-10) \\
 \omega &= \sqrt{\frac{k}{m}} \quad , \quad c = 2h\omega \quad , \quad \omega_d = \omega \sqrt{1-h^2}
 \end{aligned}$$

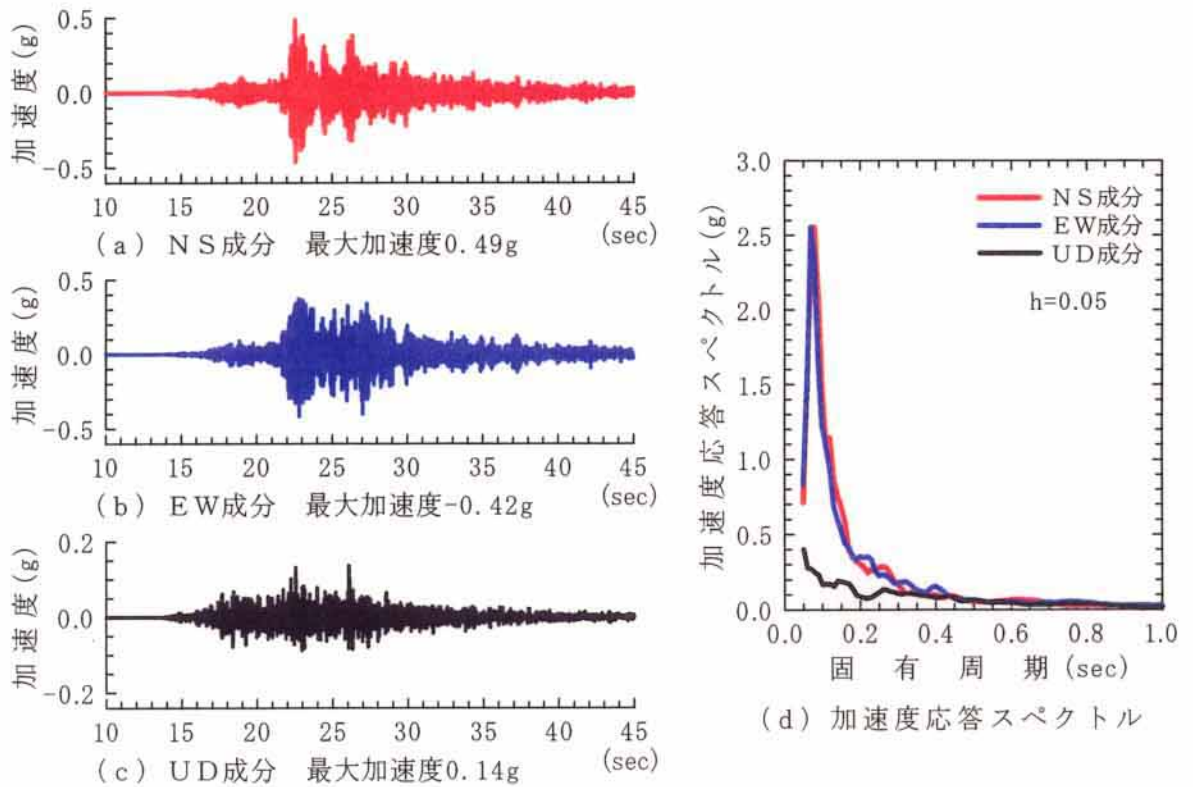
ここでは、道路橋示方書 V 耐震設計編に規定される標準加速度応答スペクトルと同様に、全て減衰定数 5% の加速度応答スペクトルを求めた。

図 3-13 は、鳥取県西部地震で観測された地震動の加速度波形と加速度応答スペクトルを示したものである。同図(1)の高野記録の加速度応答スペクトルは、固有周期 0.1 ～ 0.3 秒の場合には NS 成分では 2.0g 以上、EW 成分では 1.5g 以上と大きいですが、固有周期 0.3 秒以上になると、その値は急激に低下している。同図の東城記録の加速度応答スペクトルではこの傾向がさらに顕著であり、固有周期 0.1 秒では加速度応答スペクトルが 2.5g と大きいですが、0.2 秒以上の固有周期では、加速度応答スペクトルは 0.4g 以下となる。一般的な橋梁の固有周期は、おおよそ 0.5 秒付近に分布していることから、固有周期 0.3 秒以下で大きな加速度応答スペクトルが生じてても、橋梁構造物に与える影響は小さいといえる。高野記録、東城記録の他に、西城記録、横田記録、邑智記録、赤崎記録(K-NET)、御調記録、哲多記録、湯原記録、上斎原記録、北房記録、吉田記録、赤崎記録(KiK-net)でも、加速度応答スペクトルに同じような傾向が見られ、これらの地点の地震動は橋梁構造物に与える影響が小さかったと考えられる。次に、図 3-13(2)の新見記録の加速度応答スペクトルに着目する。固有周期 0.3 秒付近で最大の加速度応答スペクトルとなり、それより長周期になると加速度応答スペクトルは減少するが、その傾向は緩やかである。しかし、固有周期が 0.8 秒以上となると 0.2g 程度に低下していることがわかる。一般的な橋梁では健全な状態の固有周期が 0.5 秒付近にあるため、0.5 秒付近の加速度応答スペクトルが大きい地震動を受けると、橋脚にはひびわれ等の何らかの損傷が生じると考えられる。橋脚に一度何らかの損傷が生じた場合には、橋脚の剛性が軟らかくなり、その固有周期は 0.5 秒よりも長くなるため、固有周期が 0.5 秒より長い領域で加速度応答スペクトルが小さい地震動は、橋脚にさらに大きな被害を与えることはない。新見記録はこのような特性の地震動といえる。新見記録の他に、落合記録、美保関記録、広瀬記録、江府記録、日南記録、口和記録、伯太記録、仁多記録、美保関記録で観測された地震動もこのような傾向にあるといえる。これに対して、図 3-13(6)に示す米子記録、図 3-13(13)の日野記録は、固有周期が 1 秒より長い場合にも 1g 以上の加速度応答が生じていることがわかる。したが

って、鳥取県西部地震において最も橋梁構造物に被害を与える可能性が高い地震動は、日野や米子で観測された記録であるといえる。ただし、日野記録の観測地点は鶉ノ池ほとりの堆積層に設置されている<sup>9)</sup>ことや、周辺の被災状況から日野町全体に生じた地震動の特性を代表していない可能性がある。特に、日野記録 NS 成分は、固有周期 0.7 秒付近の 3g を越える加速度応答を中心に、大きなピークを有する加速度応答スペクトルとなっている。これは、日野の観測地点の堆積層の固有周期が表れたものではないかと推定できる。

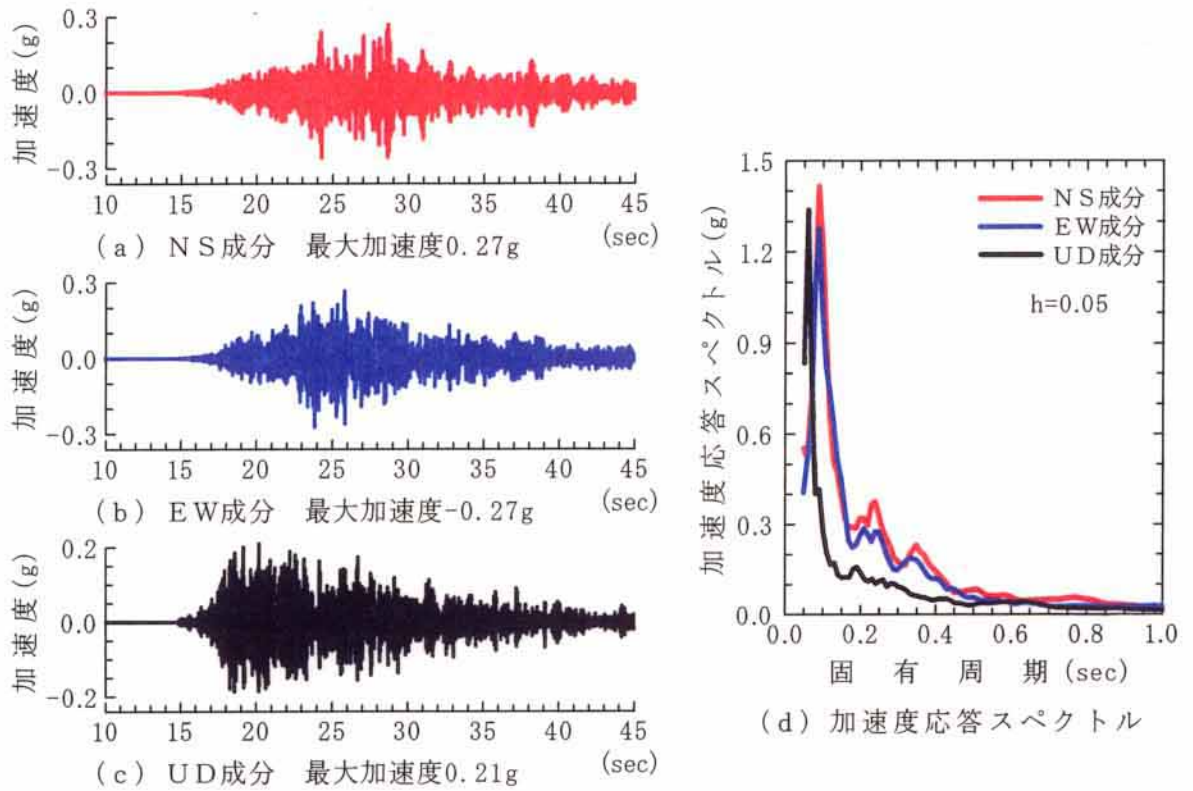


(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 高野(HRS001)

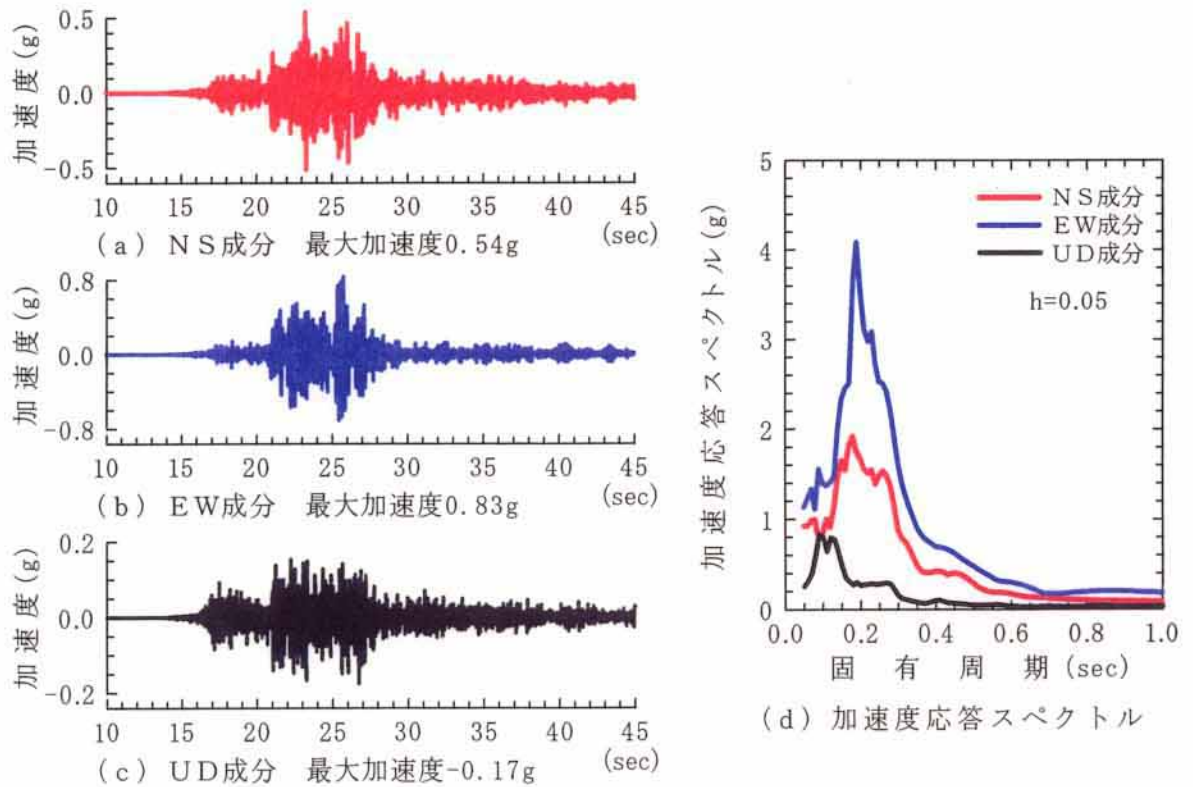


(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 東城(HRS002)

図3-13 (1) 加速度波形と加速度応答スペクトル



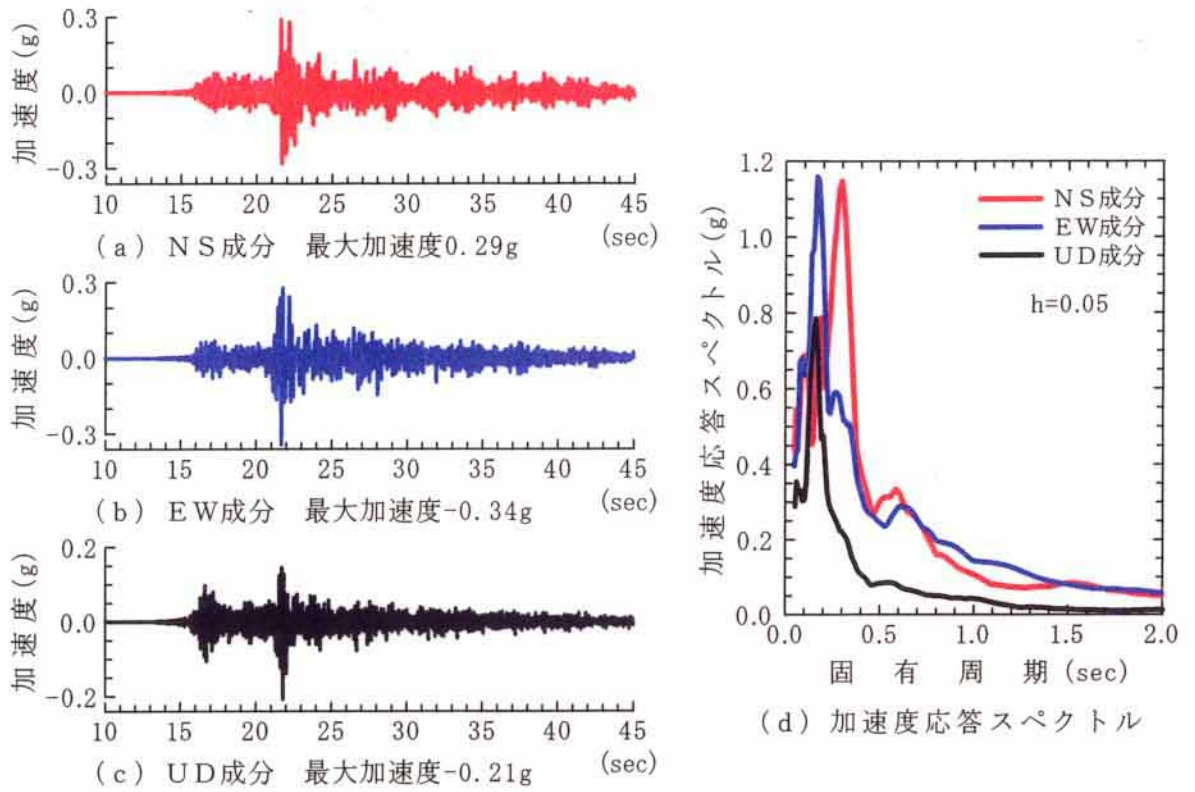
(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 西城(HRS021)



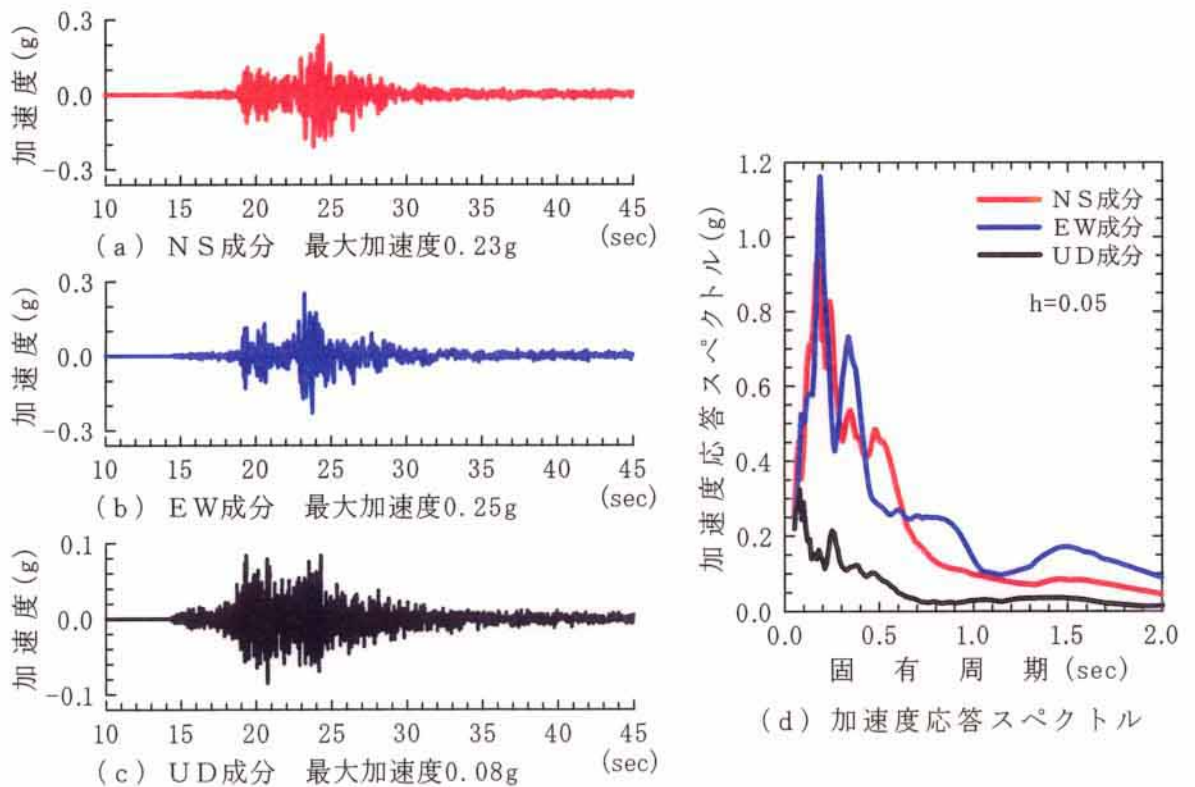
(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 新見(OKY004)

図3-13 (2) 加速度波形と加速度応答スペクトル



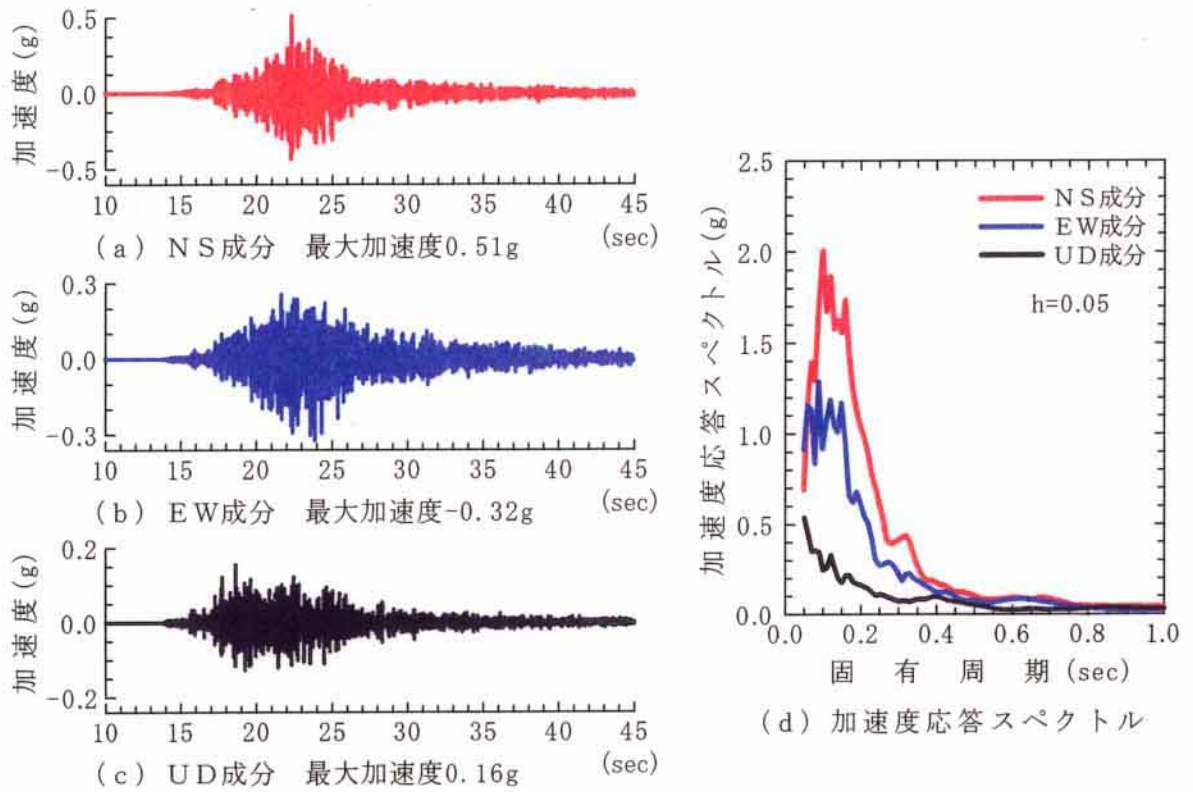


(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 落合(OKY005)

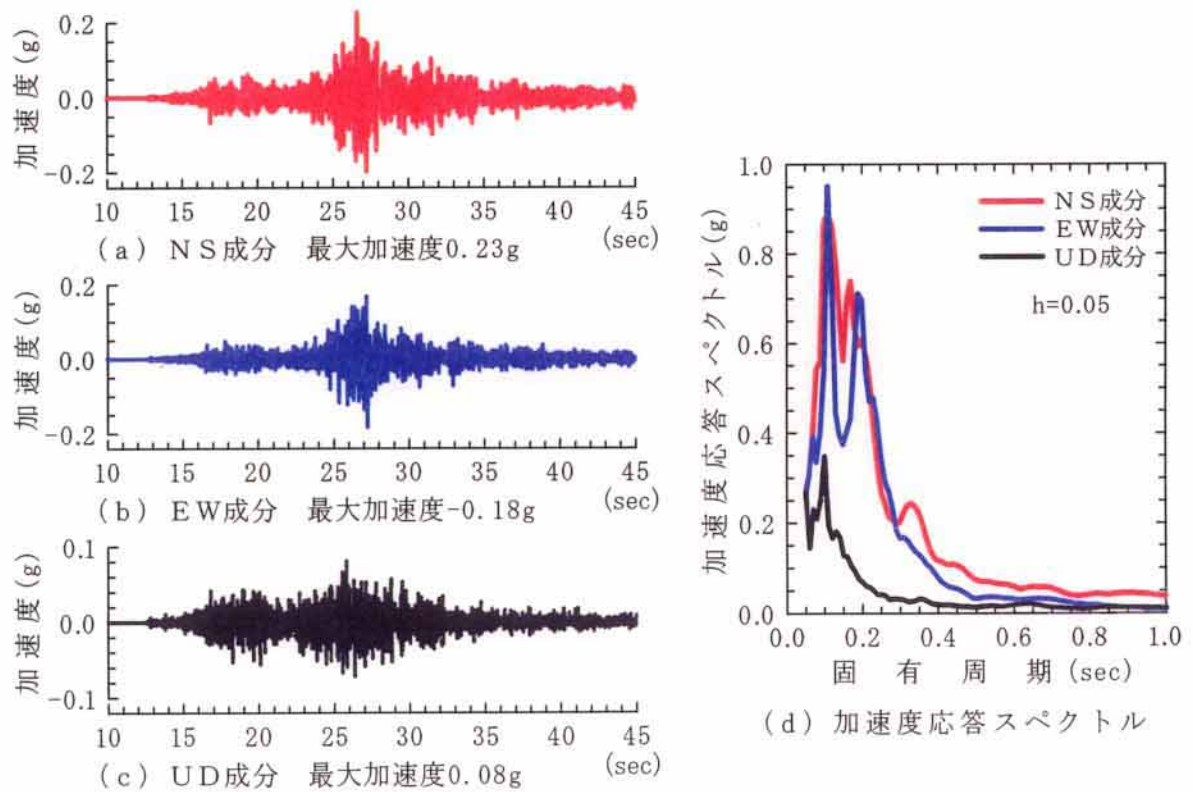


(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 美保関(SMN001)

図3-13 (3) 加速度波形と加速度応答スペクトル

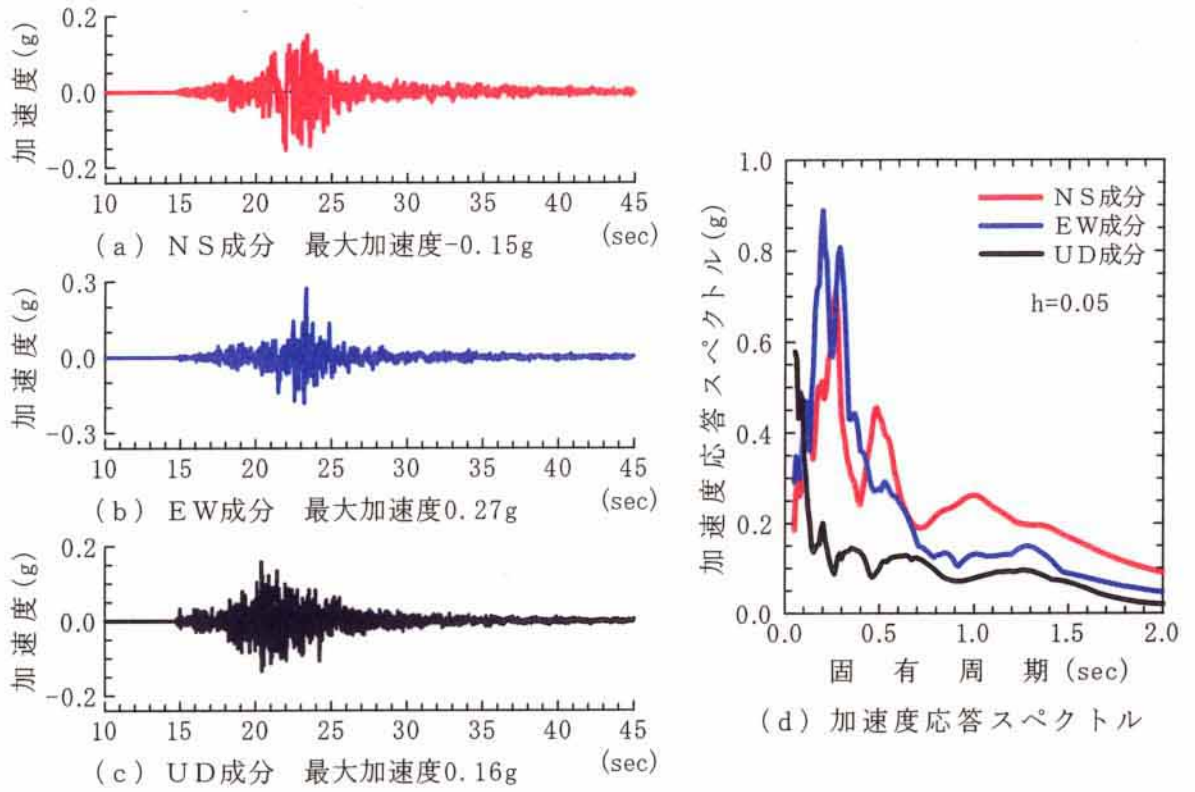


(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 横田(SMN003)

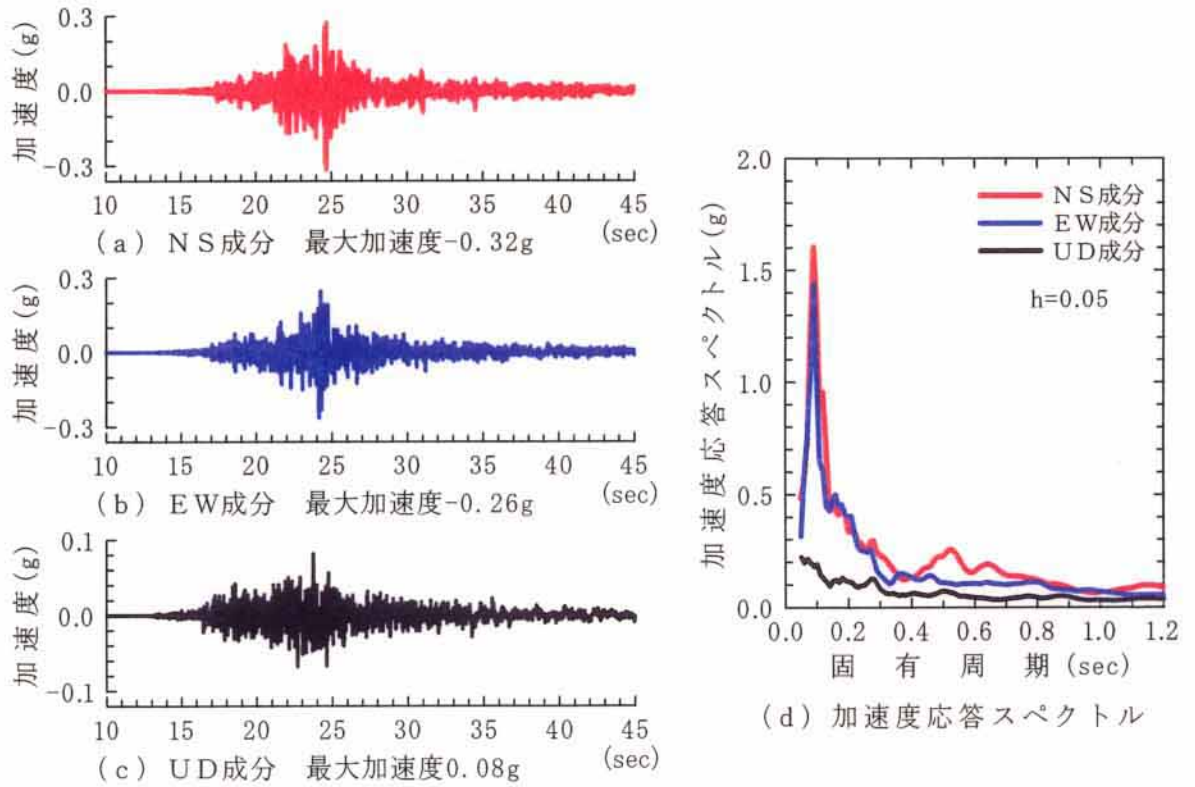


(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 邑智(SMN007)

図3-13(4) 加速度波形と加速度応答スペクトル



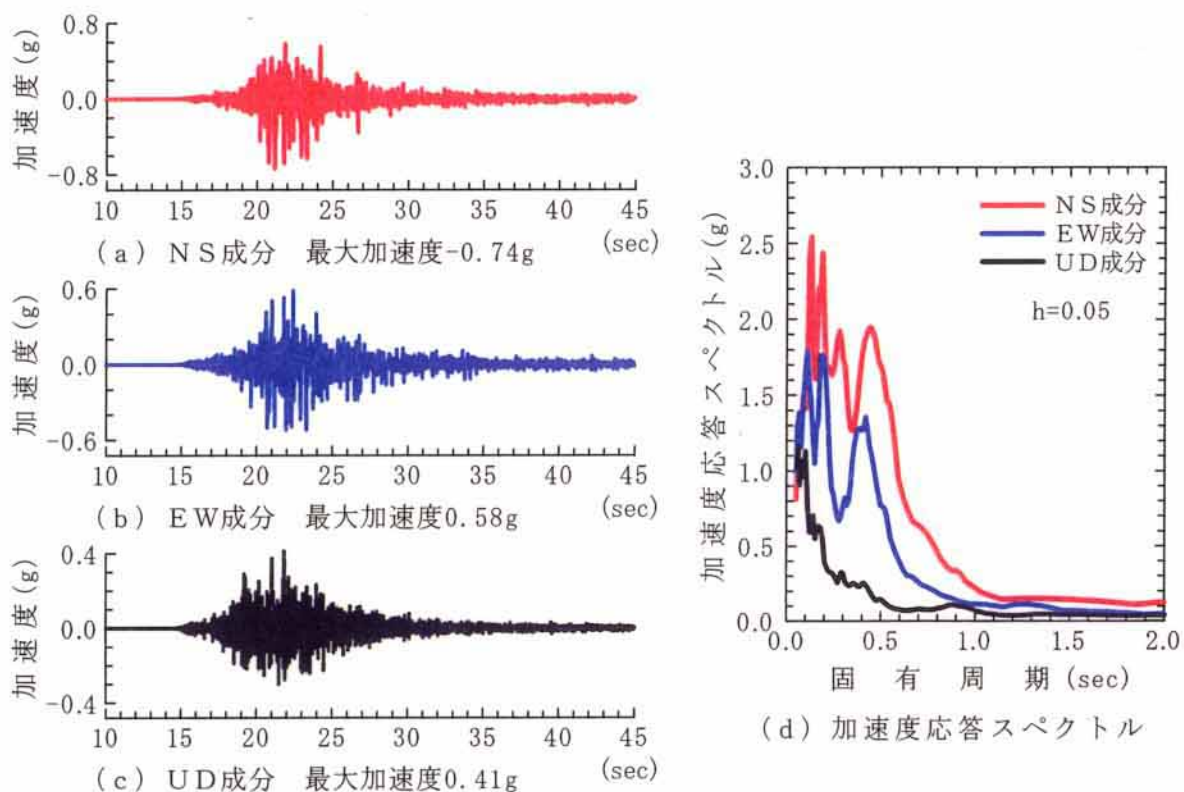
(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 広瀬(SMN015)



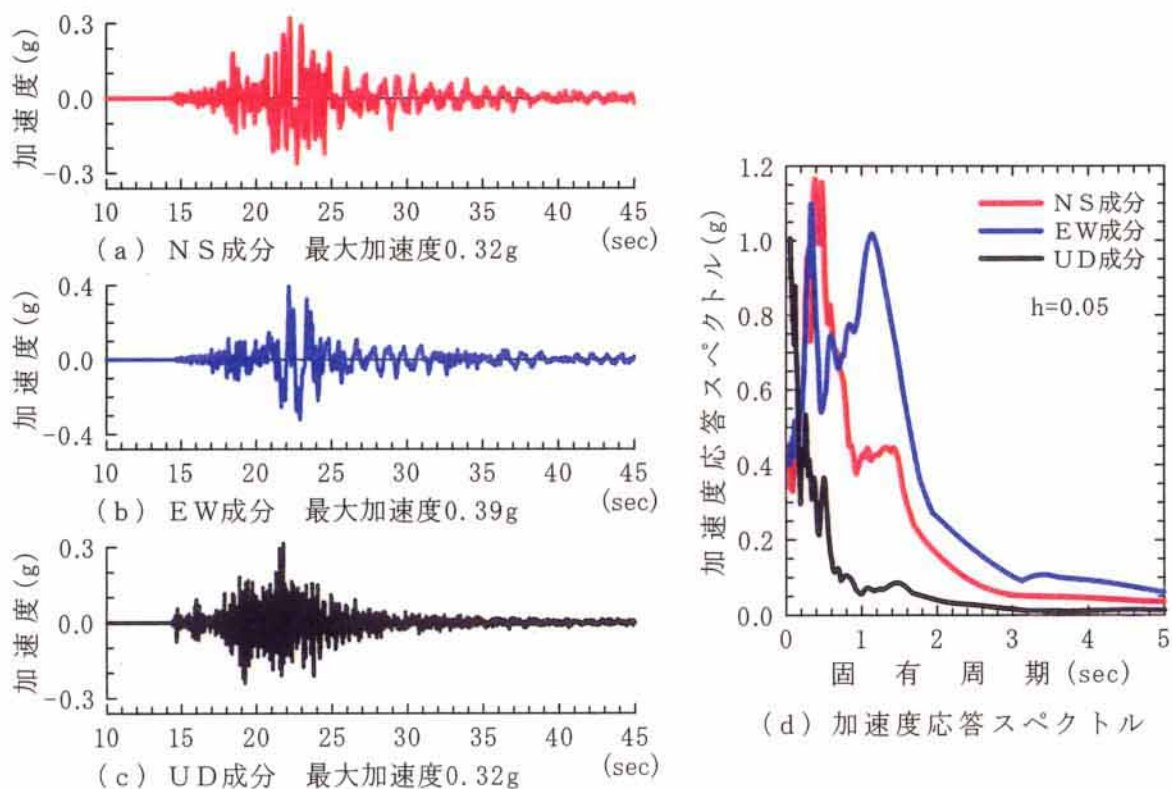
(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 赤碕(TTR006)

図3-13 (5) 加速度波形と加速度応答スペクトル



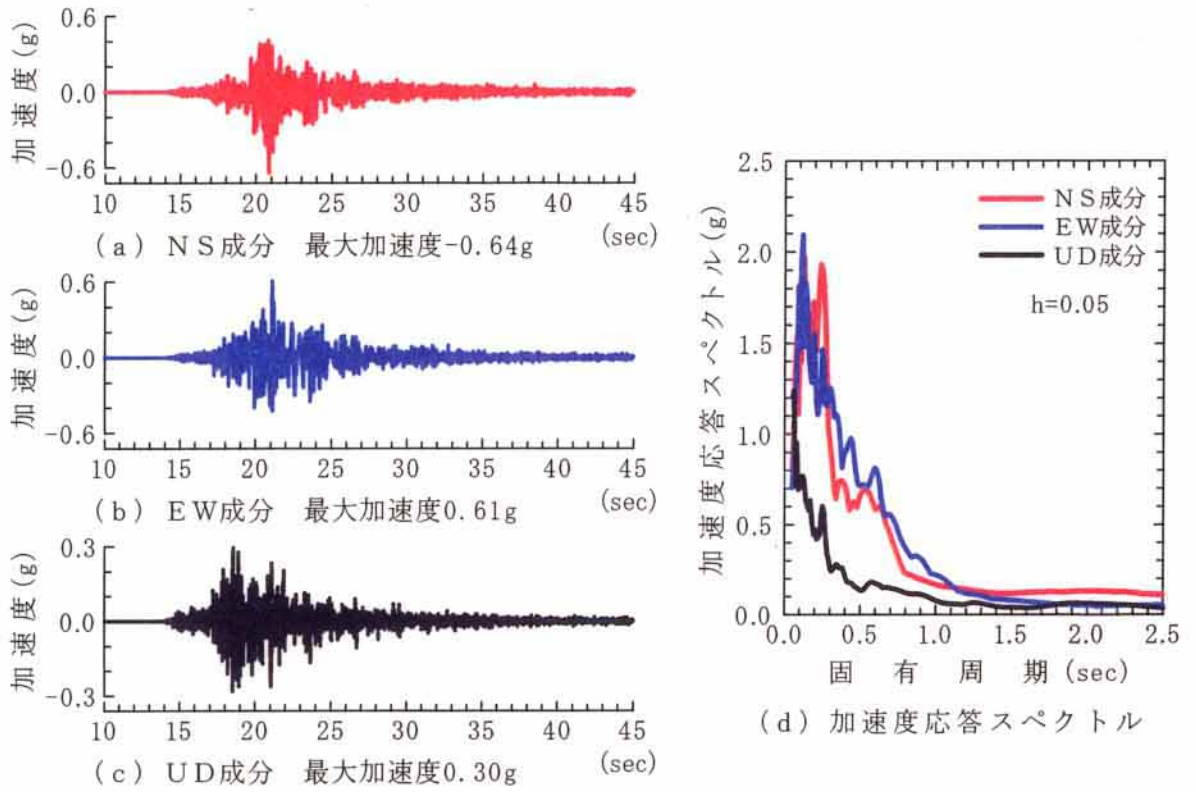


(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 江府(TTR007)



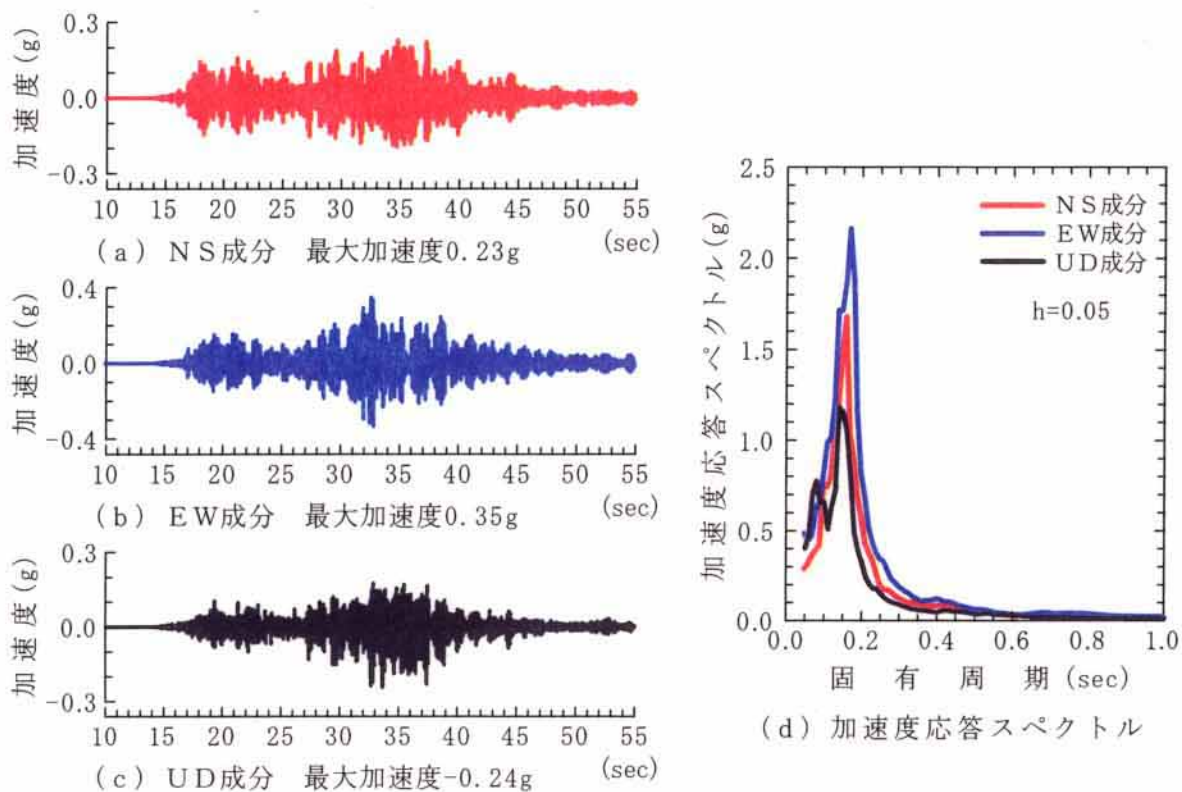
(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 米子(TTR008)

図3-13(6) 加速度波形と加速度応答スペクトル

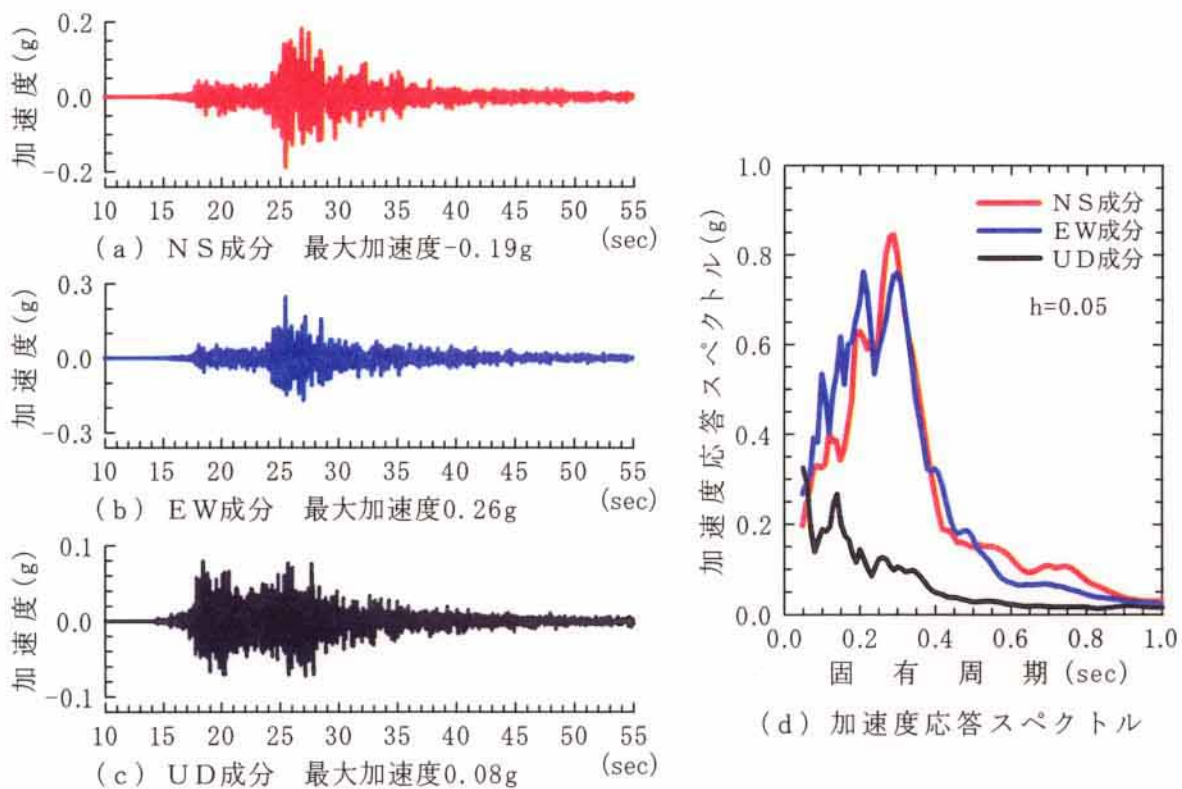


(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 日南(TTR009)

図3-13(7) 加速度波形と加速度応答スペクトル



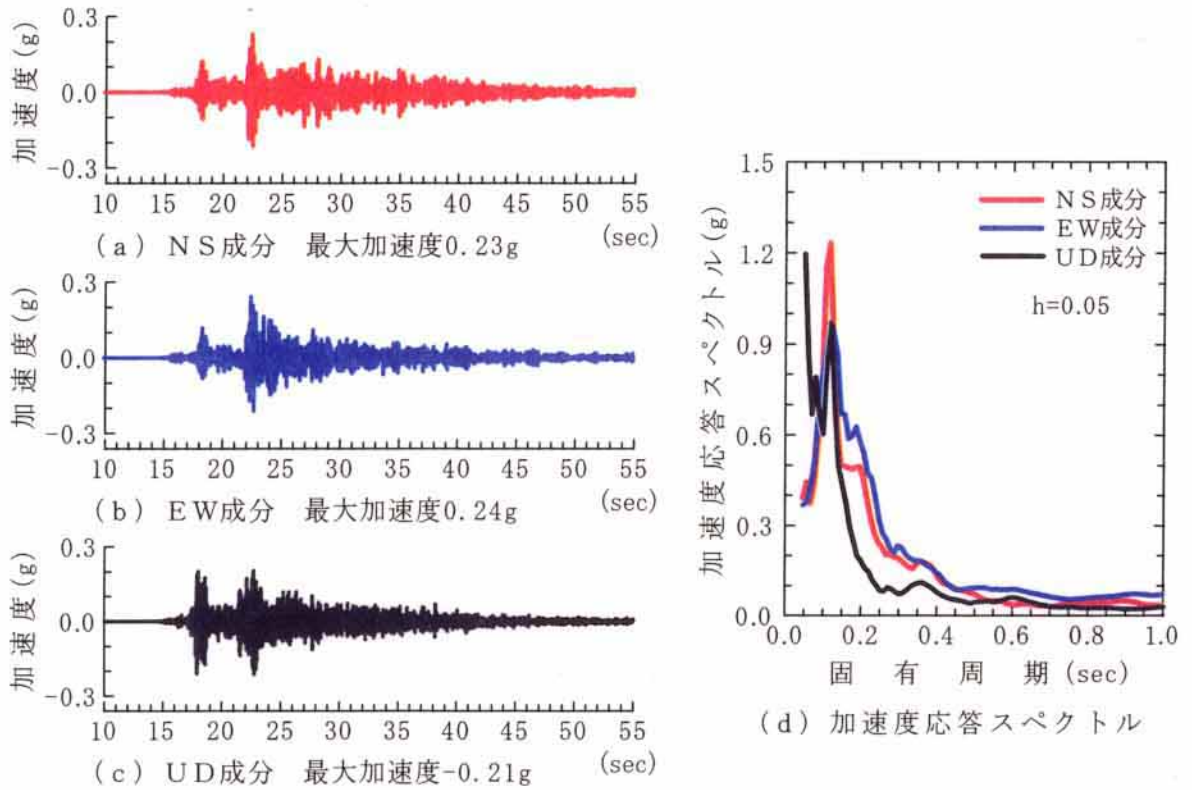
(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 御調(HRS03)



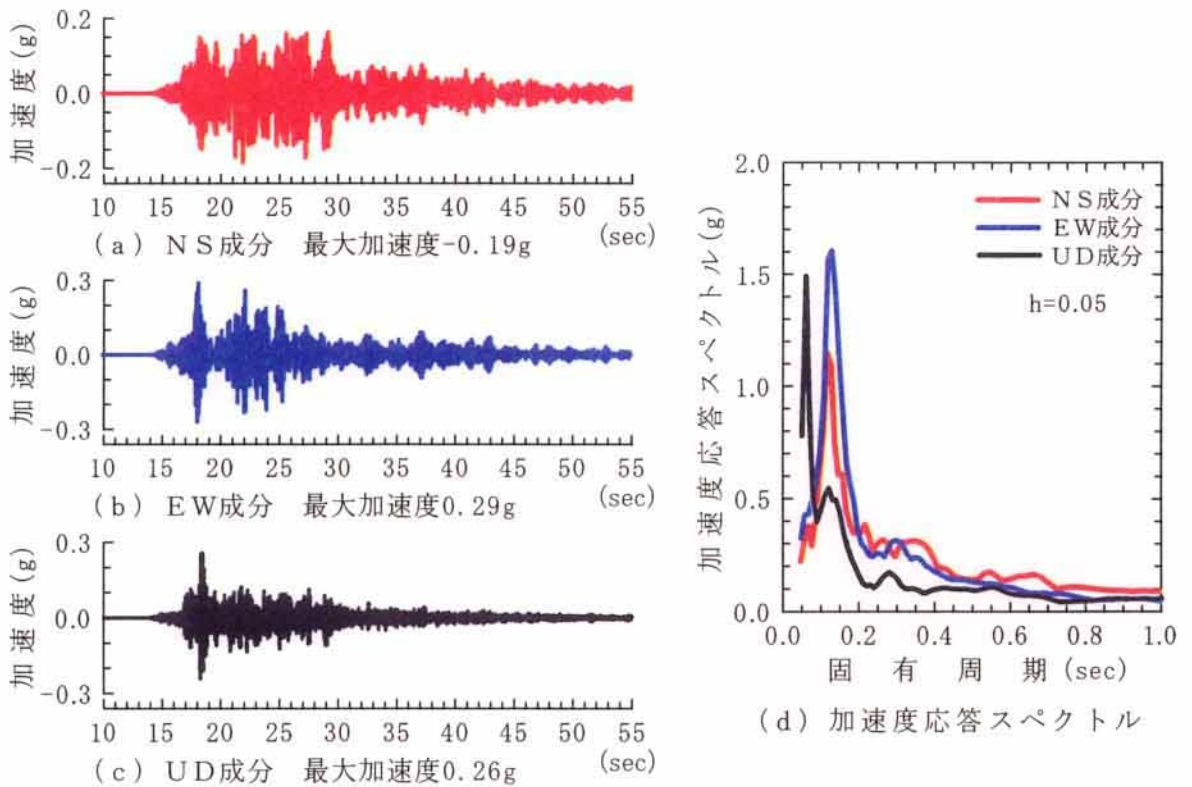
(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 口和(HRS06)

図3-13 (8) 加速度波形と加速度応答スペクトル





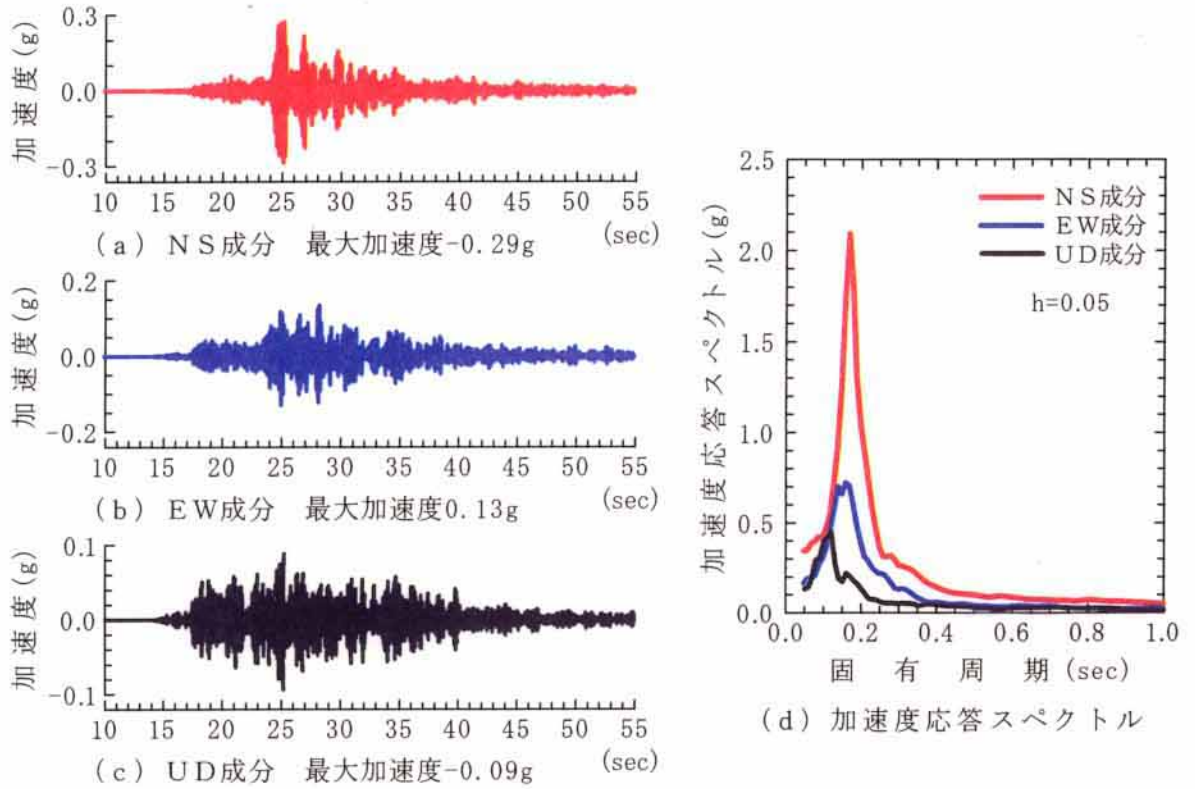
(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 哲多(OKYH08)



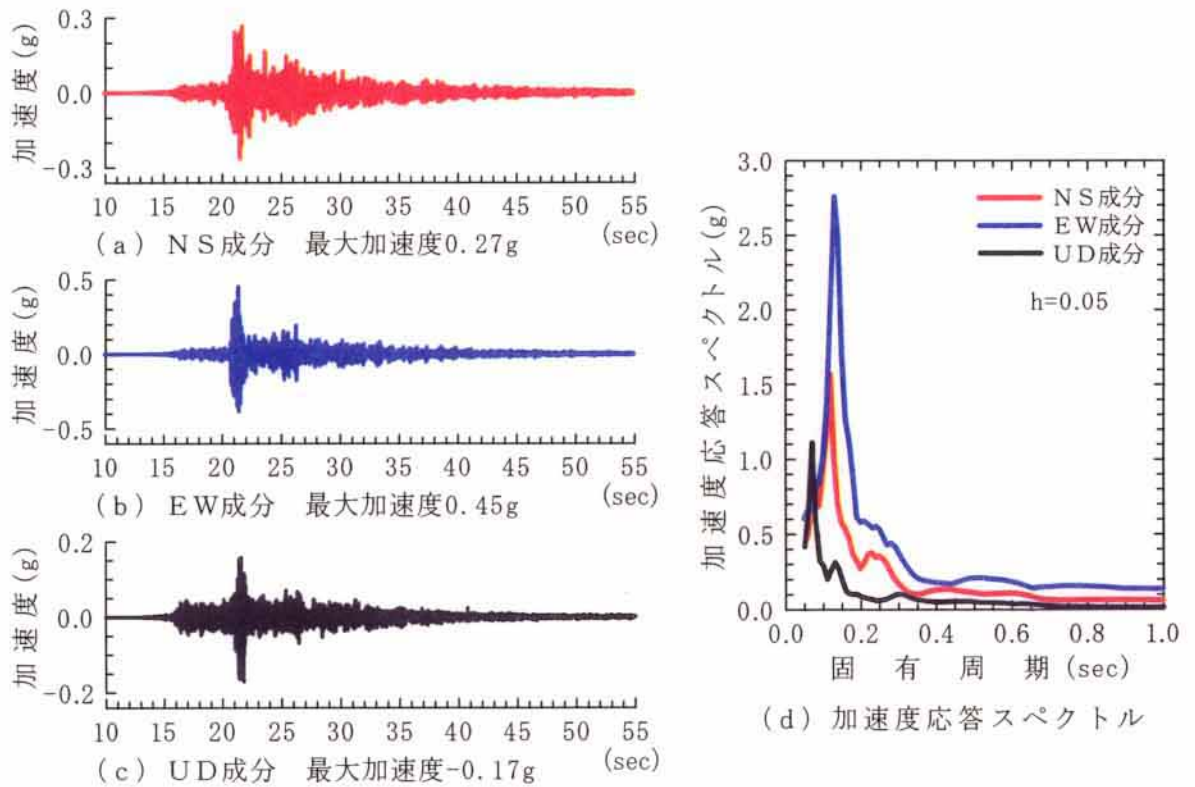
(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 湯原(OKYH09)

図3-13(9) 加速度波形と加速度応答スペクトル



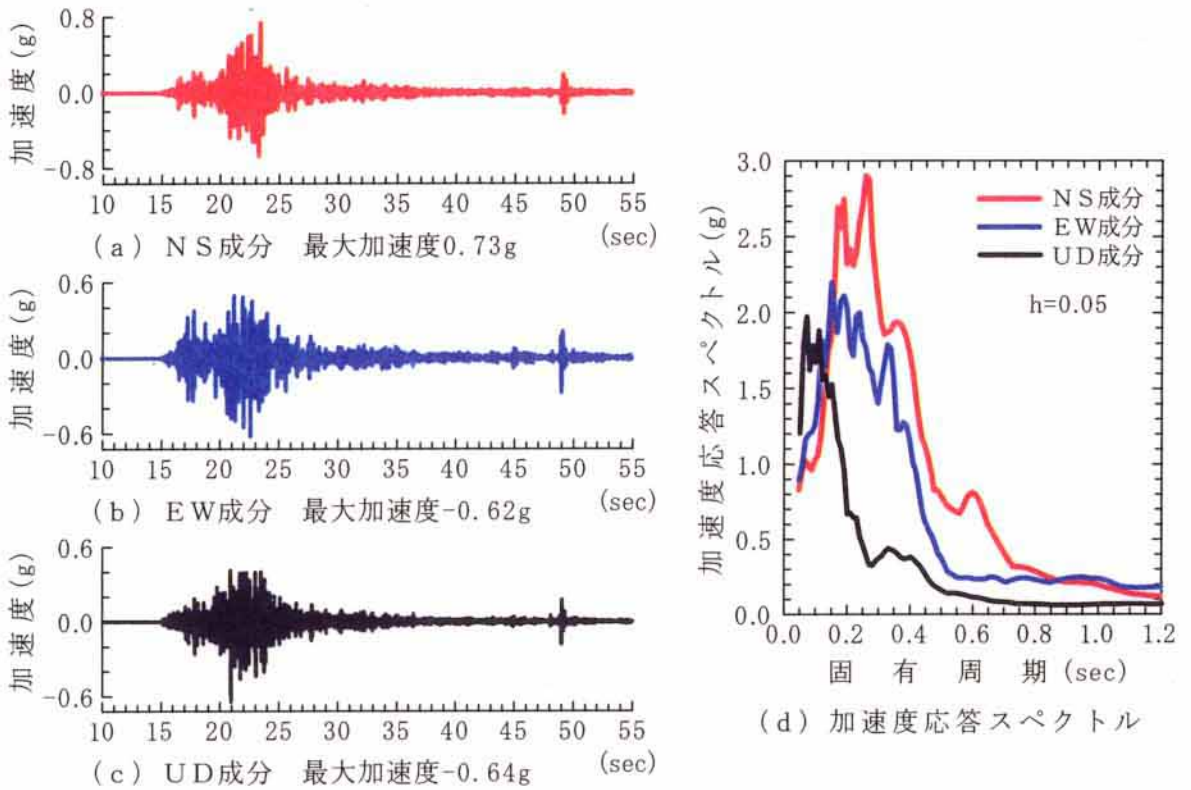


(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 上斎原(OKYH10)

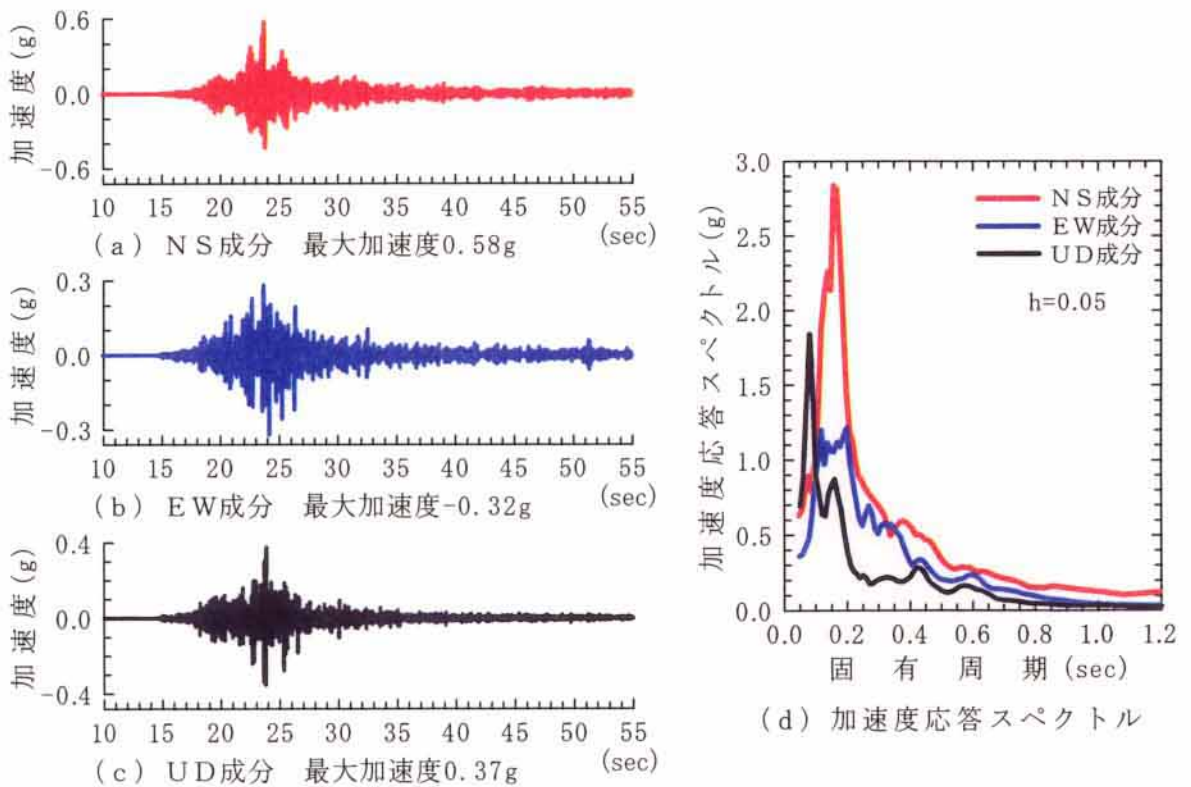


(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 北房(OKYH14)

図3-13 (10) 加速度波形と加速度応答スペクトル

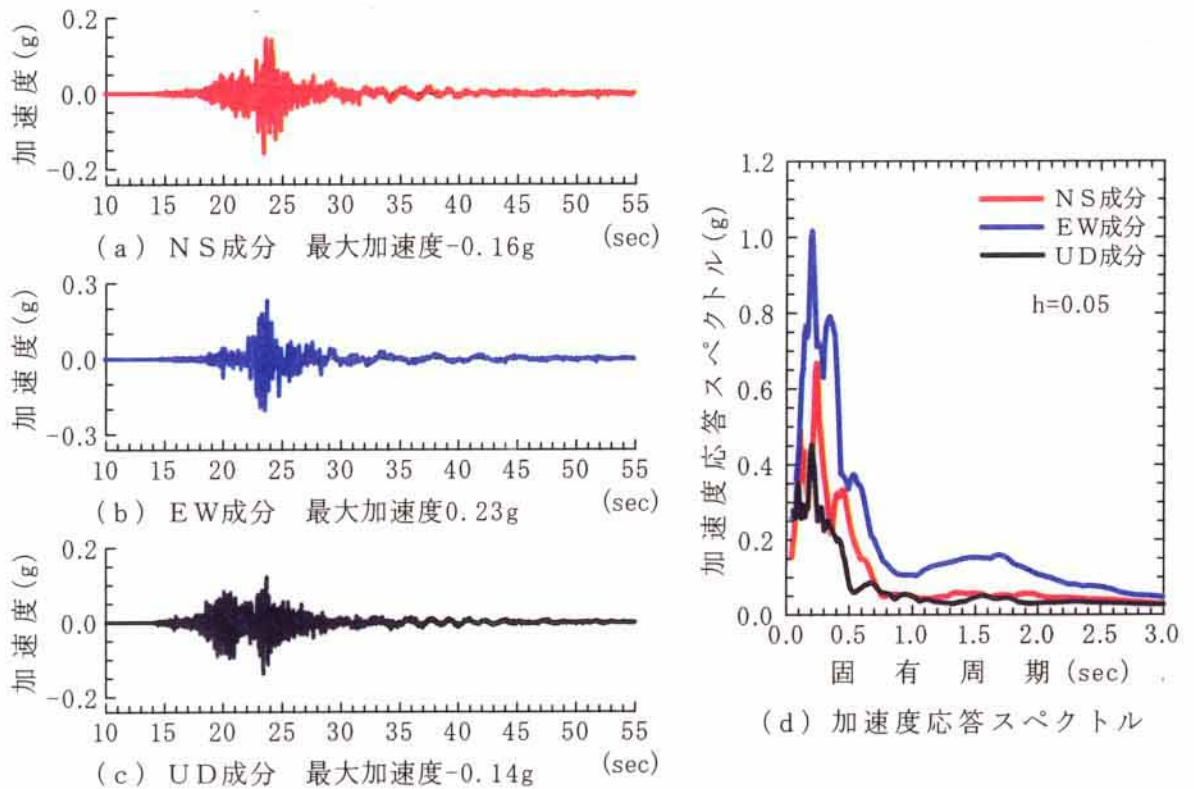


(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 伯太(SMNH01)

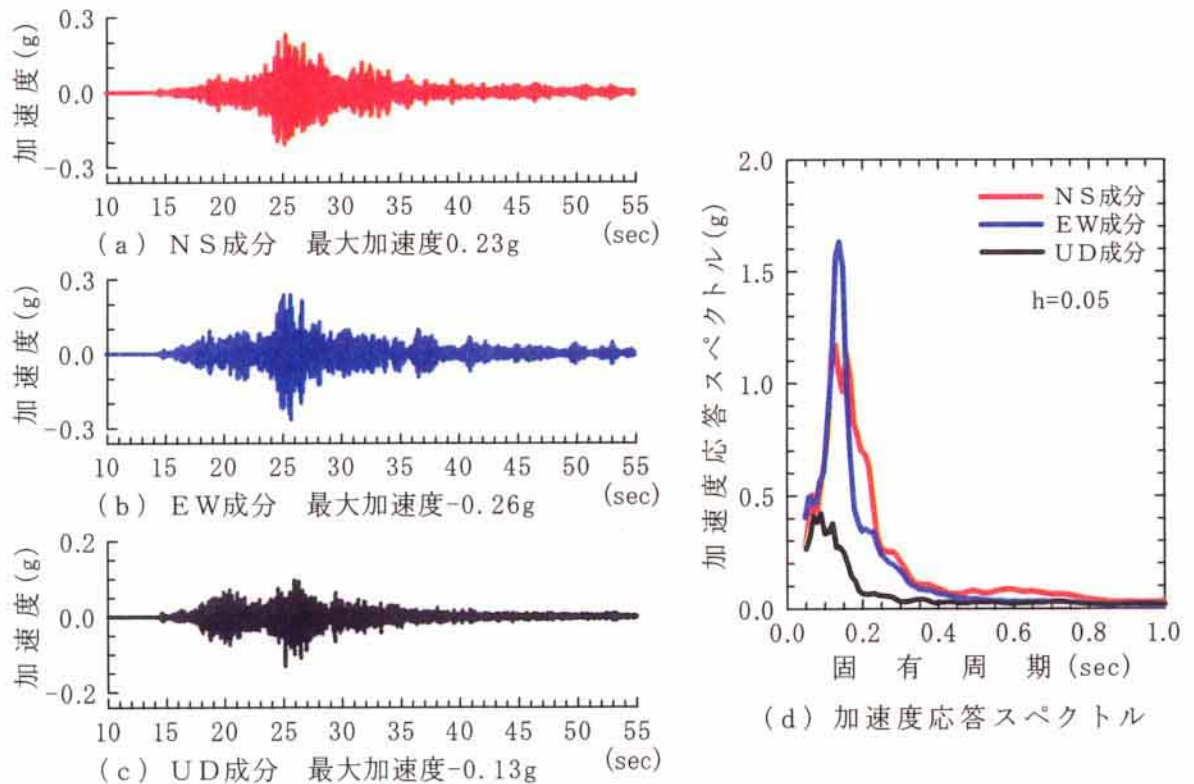


(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 仁多(SMNH02)

図3-13 (11) 加速度波形と加速度応答スペクトル



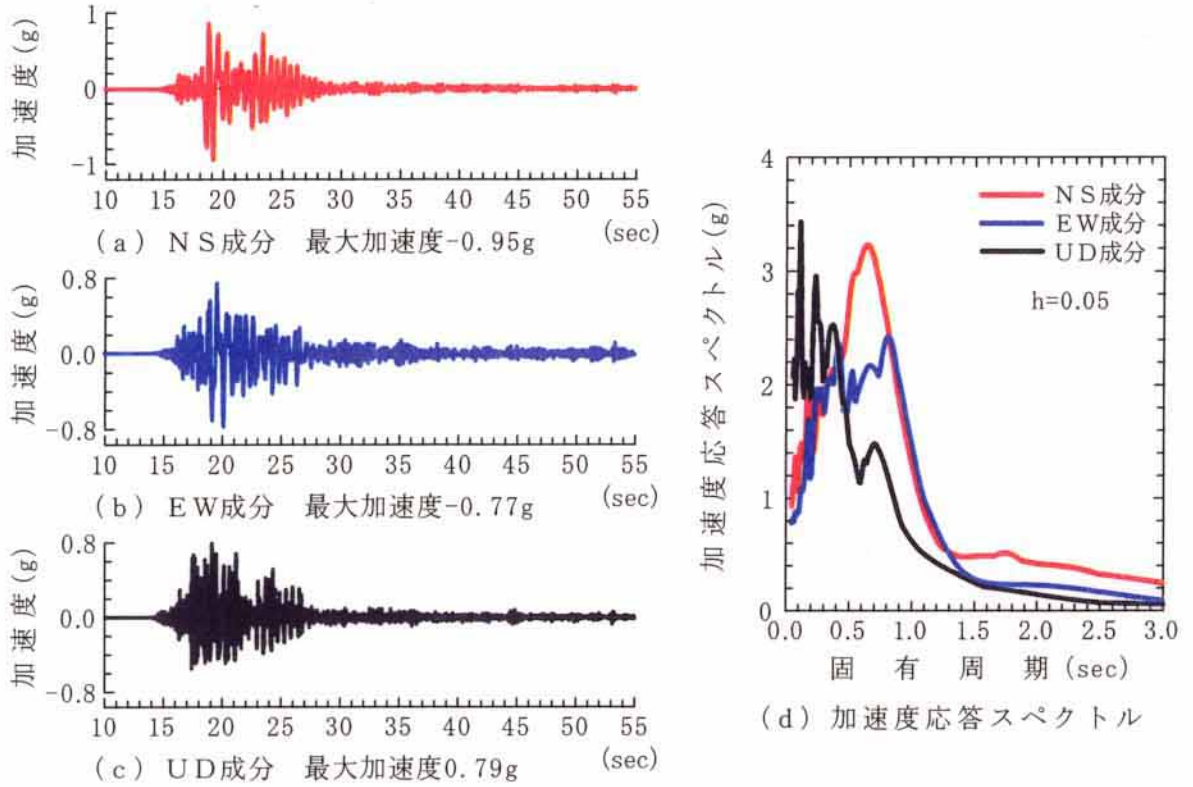
(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 美保関(SMNH10)



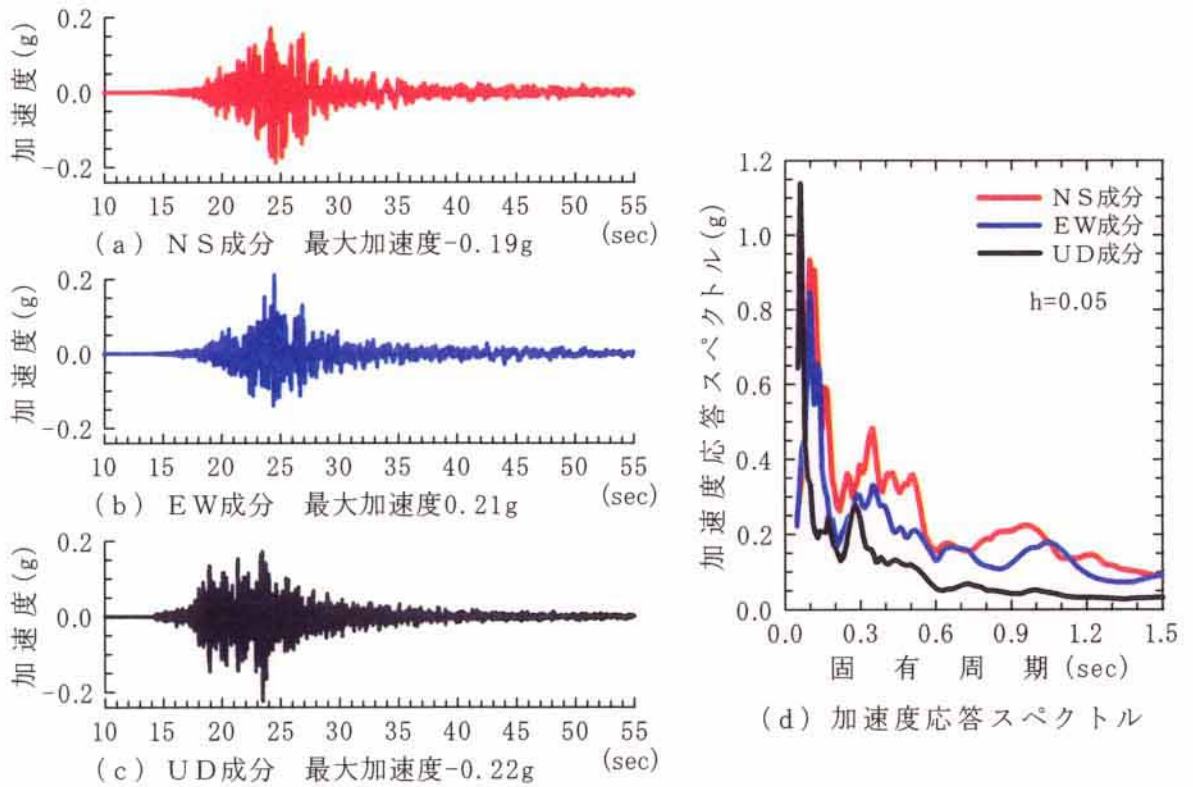
(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 吉田(SMNH12)

図3-13 (12) 加速度波形と加速度応答スペクトル





(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 日野(TTRH02)

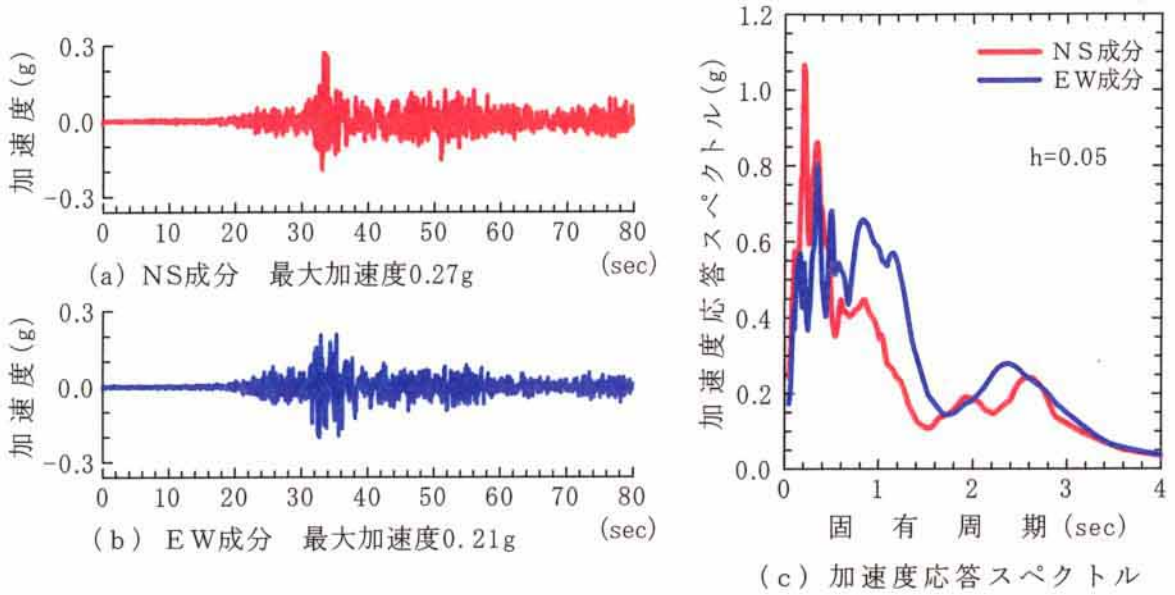


(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 赤碕(TTRH04)

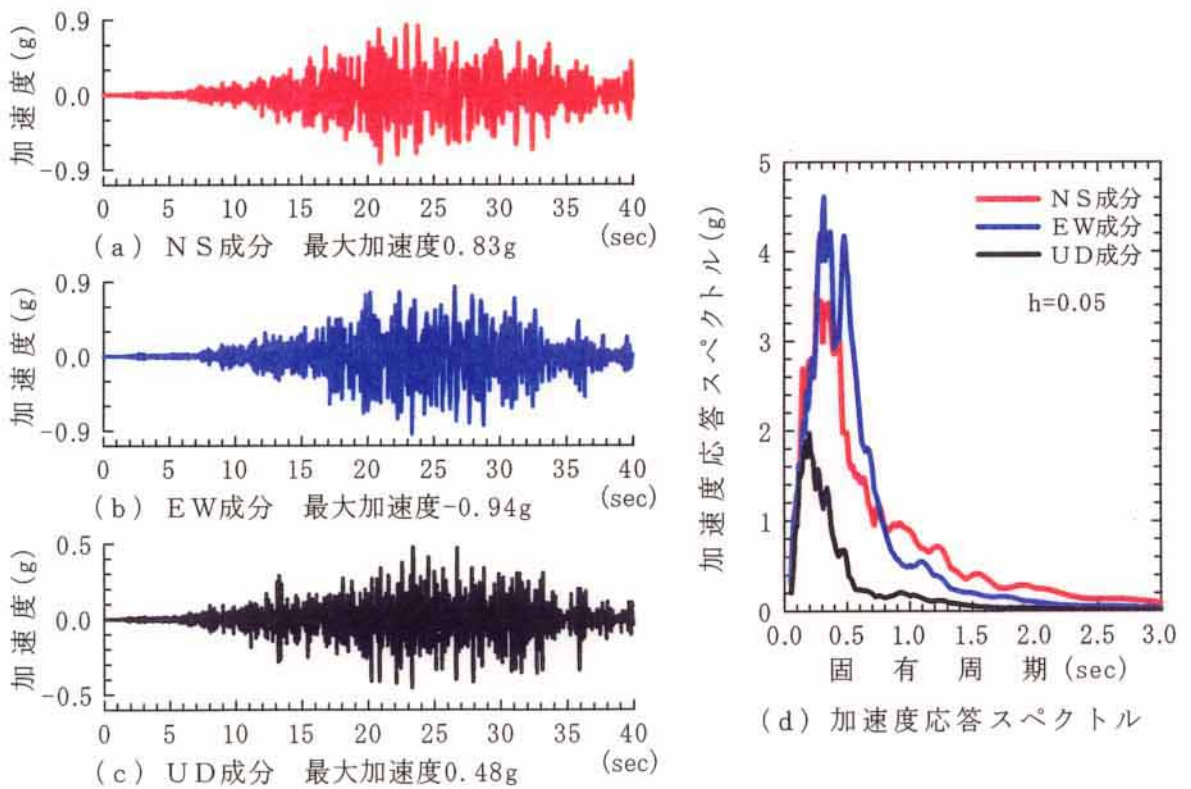
図3-13 (13) 加速度波形と加速度応答スペクトル



図 3-14 は、同様に、既往の強震記録の加速度波形と加速度応答スペクトルを示したものである。同図(1)の釧路沖地震の釧路気象台記録では、加速度応答スペクトルが最大で 4g 以上となっているが、固有周期が 0.8 秒のところ急激に低下していることがわかる。これに対して、同図(2)のノースリッジ地震の Sylmar 駐車場記録では、固有周期が 2 秒以上と長くなった場合でも、0.5g の加速度応答スペクトルとなっている。同様に、図 3-14(2),(3),(4)に示される兵庫県南部地震の加速度応答スペクトルも固有周期が長い場合でも大きな加速度応答が生じることがわかる。特に JR 鷹取駅の記録では、固有周期が 2 秒の場合にも、1g 以上の加速度応答が生じている。このように、固有周期が 1~2 秒と長い領域でも、大きな加速度応答が生じているということは、橋梁が損傷を受けて長周期化した場合でも作用する地震力の低減効果が十分見込めないことを表している。したがって、ノースリッジ地震や兵庫県南部地震で被災した橋梁は、地震動によって橋脚が損傷し固有周期が伸びても、強い地震動の影響を受けつづけたため甚大な被害が生じたと考えられている。

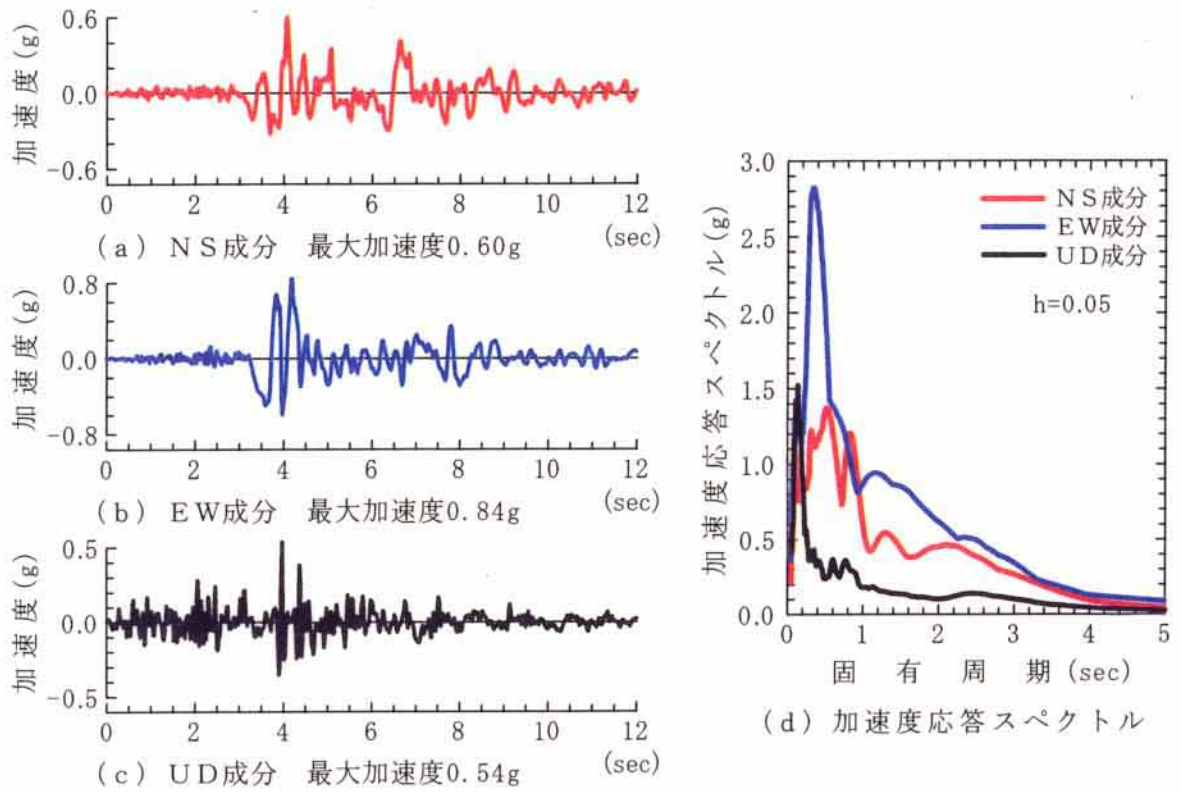


(1) 1968. 5. 16 十勝沖地震 八戸港

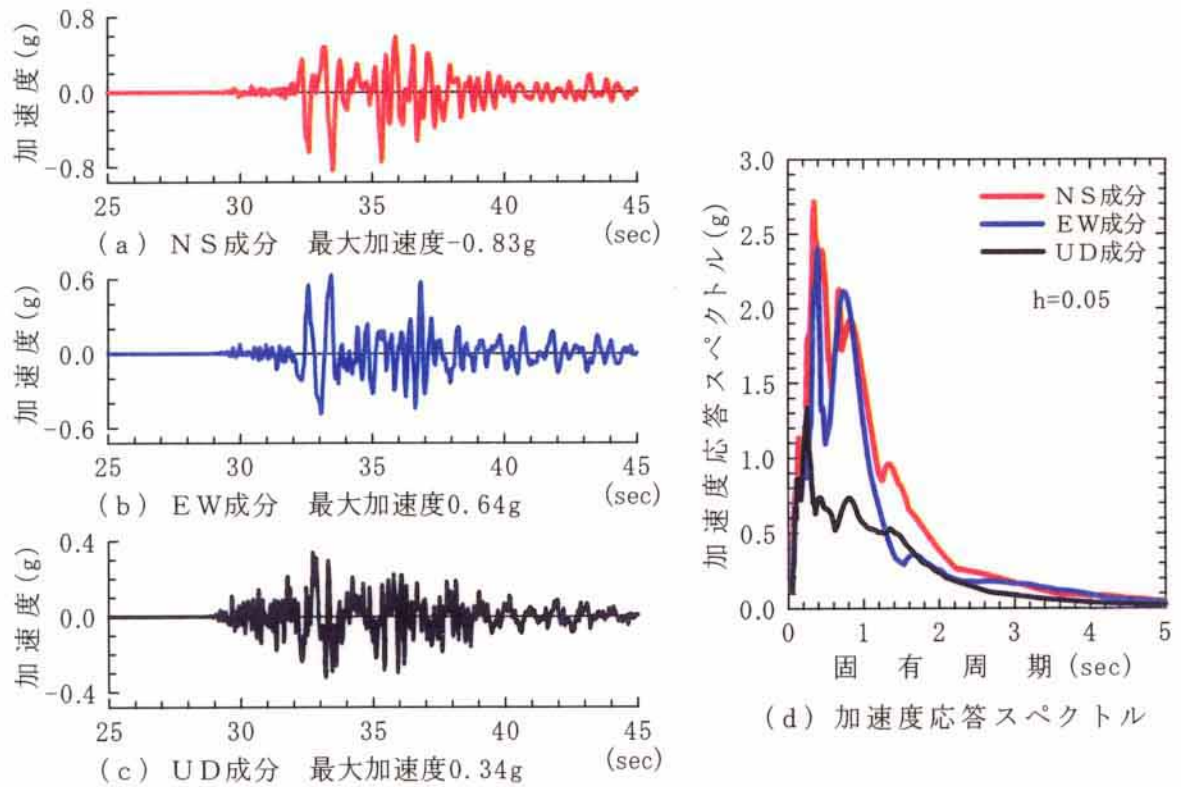


(2) 1993. 1. 15 釧路沖地震 釧路気象台

図3-14 (1) 既往の強震記録の加速度波形と加速度応答スペクトル

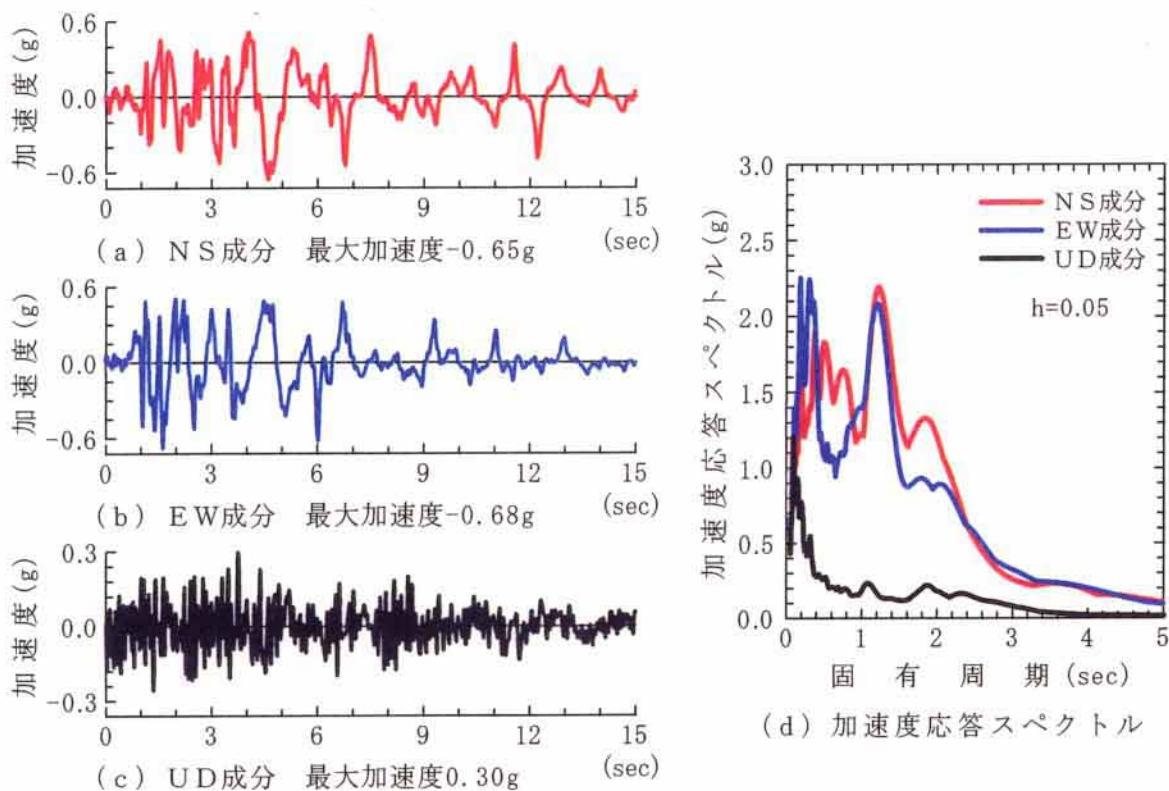


(1) 1994. 1. 17 ノースリッジ地震 Sylmar駐車場

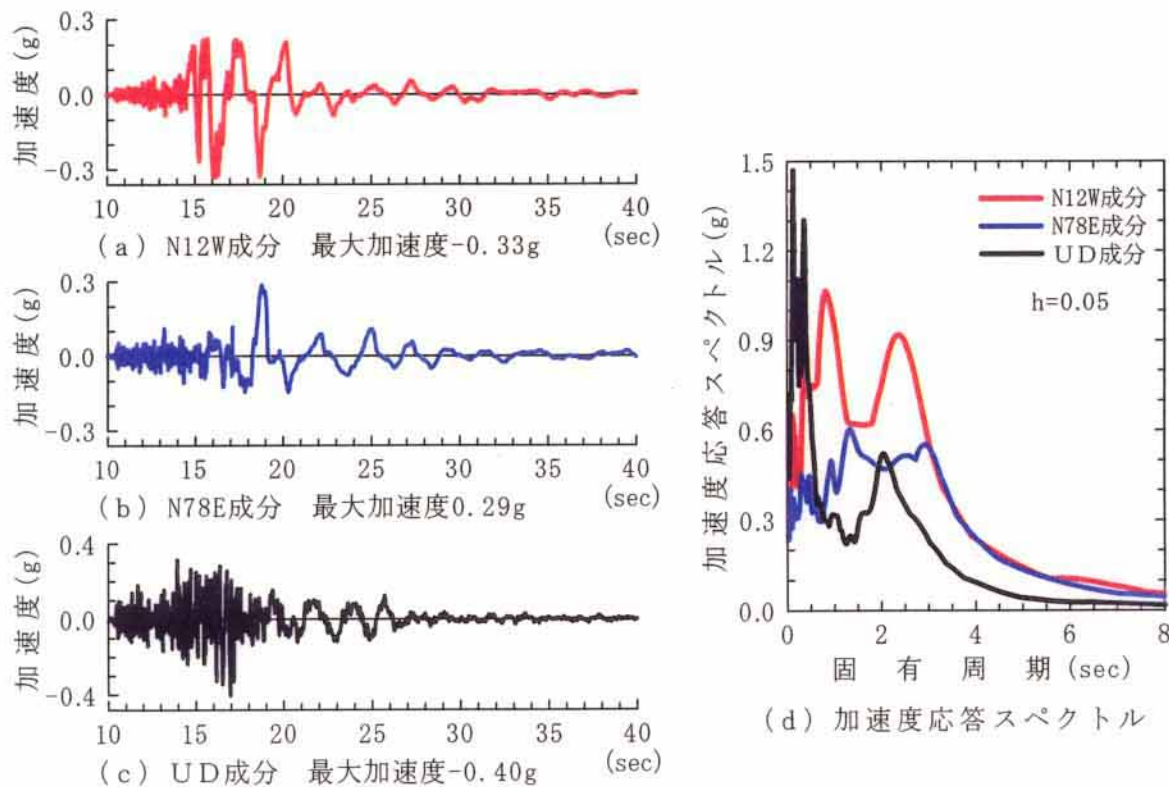


(2) 1995. 1. 17 兵庫県南部地震 神戸海洋気象台

図3-14 (2) 既往の強震記録の加速度波形と加速度応答スペクトル



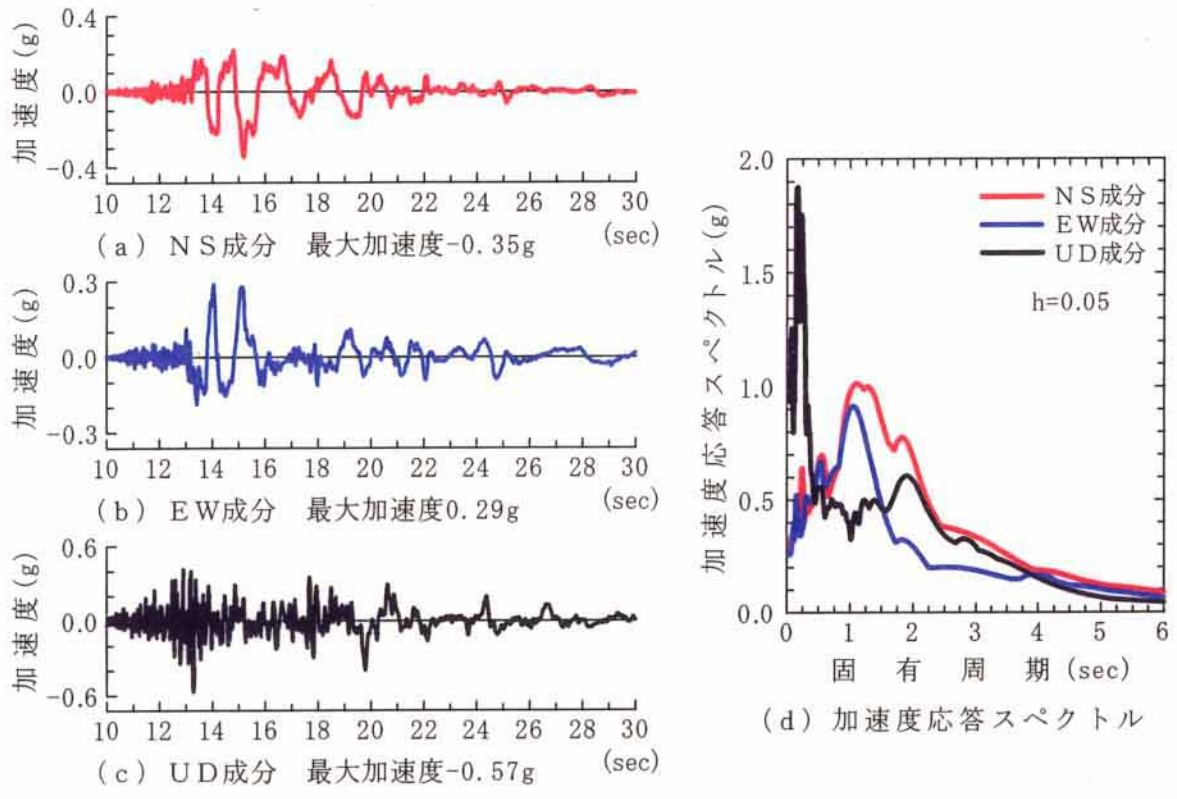
(1) 1995. 1. 17 兵庫県南部地震 JR鷹取駅



(2) 1995. 1. 17 兵庫県南部地震 東神戸大橋周辺地盤上

図3-14 (3) 既往の強震記録の加速度波形と加速度応答スペクトル





(1) 1995. 1. 17 兵庫県南部地震 神戸ポートアイランド地盤上

図3-14(4) 既往の強震記録の加速度波形と加速度応答スペクトル

図3-15は、鳥取県西部地震のⅠ種地盤上で観測された地震動の加速度応答スペクトルを示したものである。図には地盤種別が不明なものも併せて示した。同図(1)の水平成分に着目すると、多くの地震動は、固有周期が0.3秒よりも長くなると加速度応答スペクトルが減少する傾向がある。しかし、新見記録EW成分、伯太記録NS成分、江府記録NS成分、日南記録NS,EW両成分は、固有周期が0.5秒程度までは、加速度応答スペクトルが0.5g以上も生じている。同図(2)のⅠ種地盤の鉛直成分においては、どの地震動も固有周期が0.3秒までに加速度応答が急激に減少している。同図(3)は、Ⅱ種地盤上と地盤種別が不明な地点で観測された加速度応答スペクトルを示したものである。ほとんどの地震動は、固有周期が0.4秒よりも長くなると加速度応答スペクトルが小さくなっているが、日野記録NS,EW両成分は固有周期1.0秒までは、2g以上の大きな加速度応答を、米子記録NS,EW両成分は固有周期1.5秒まで1g近くの加速度応答を示しており、鳥取県西部地震で観測された他の地震動の特性とは異なっていることがわかる。同図(4)は、Ⅱ種地盤の鉛直方向の加速度応答スペクトルを示したものである。この場合にも、日野記録の加速度応答スペクトルは大きく、鳥取県西部地震で観測された他の地震動と傾向が異なっていることがわかる。

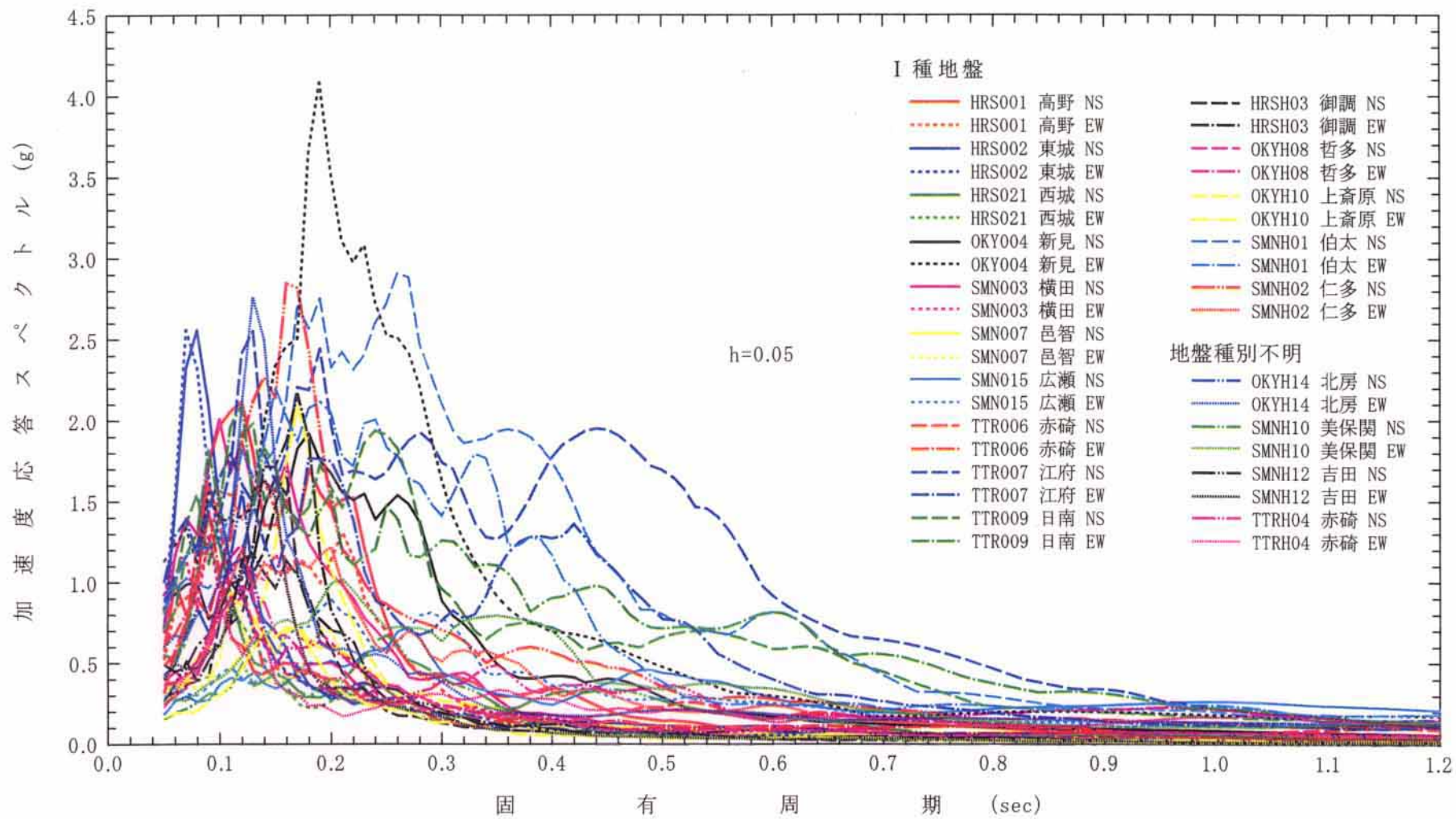


図3-15 (1) 弾性加速度応答スペクトルの比較 (I種地盤, 水平成分)

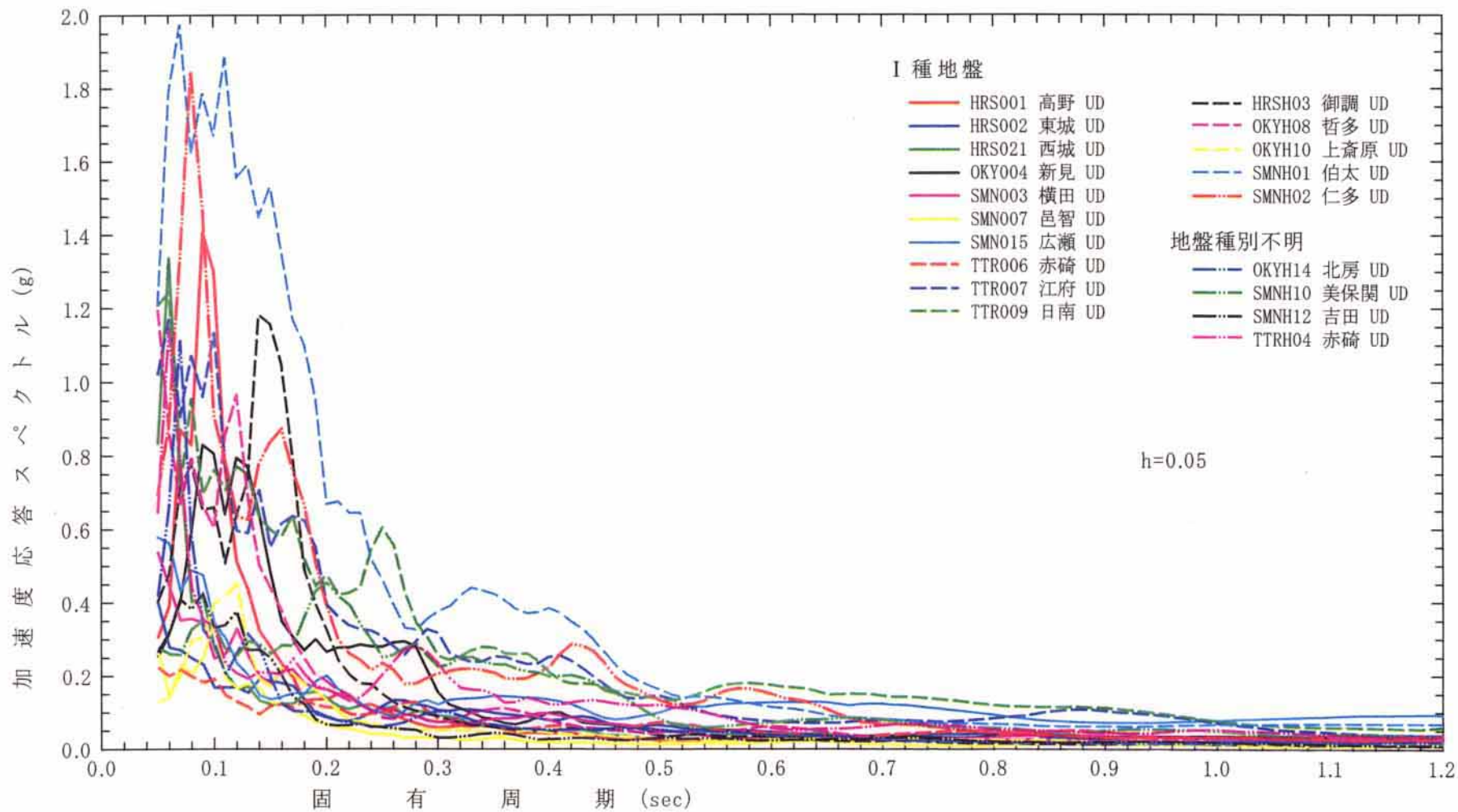


図3-15 (2) 弾性加速度応答スペクトルの比較 (I種地盤, 鉛直成分)



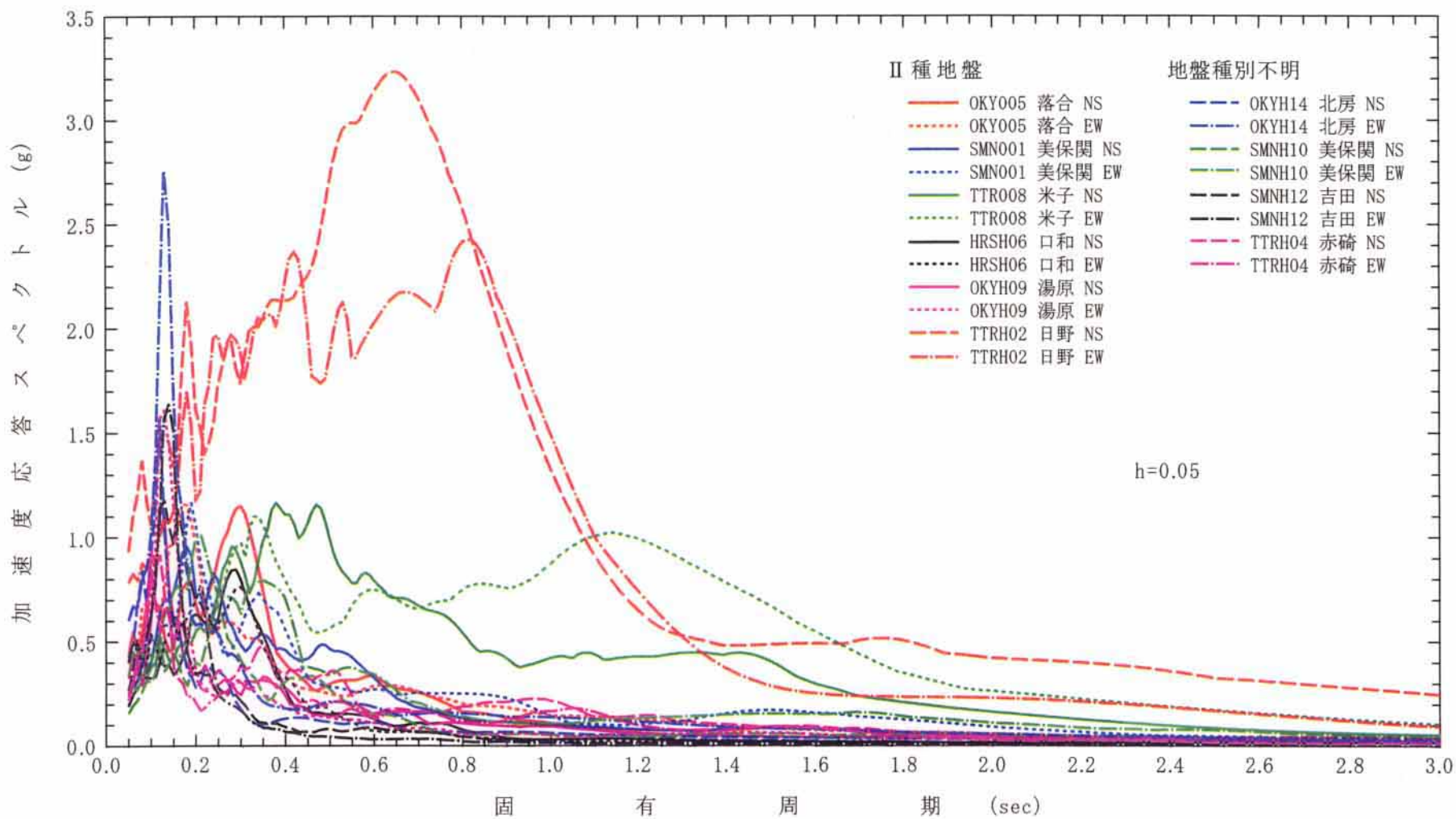


図3-15 (3) 弾性加速度応答スペクトルの比較 (II種地盤, 水平成分)

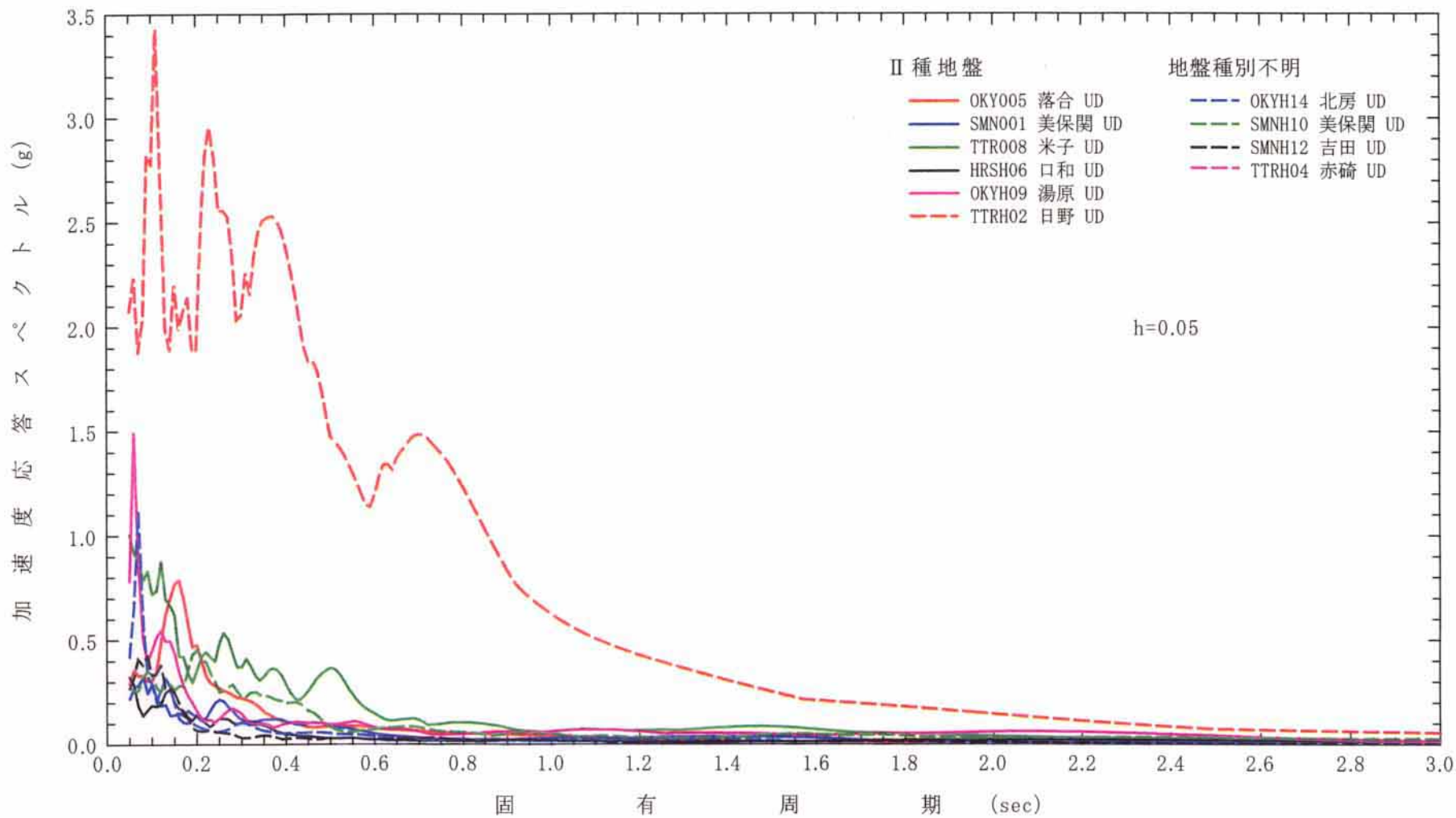
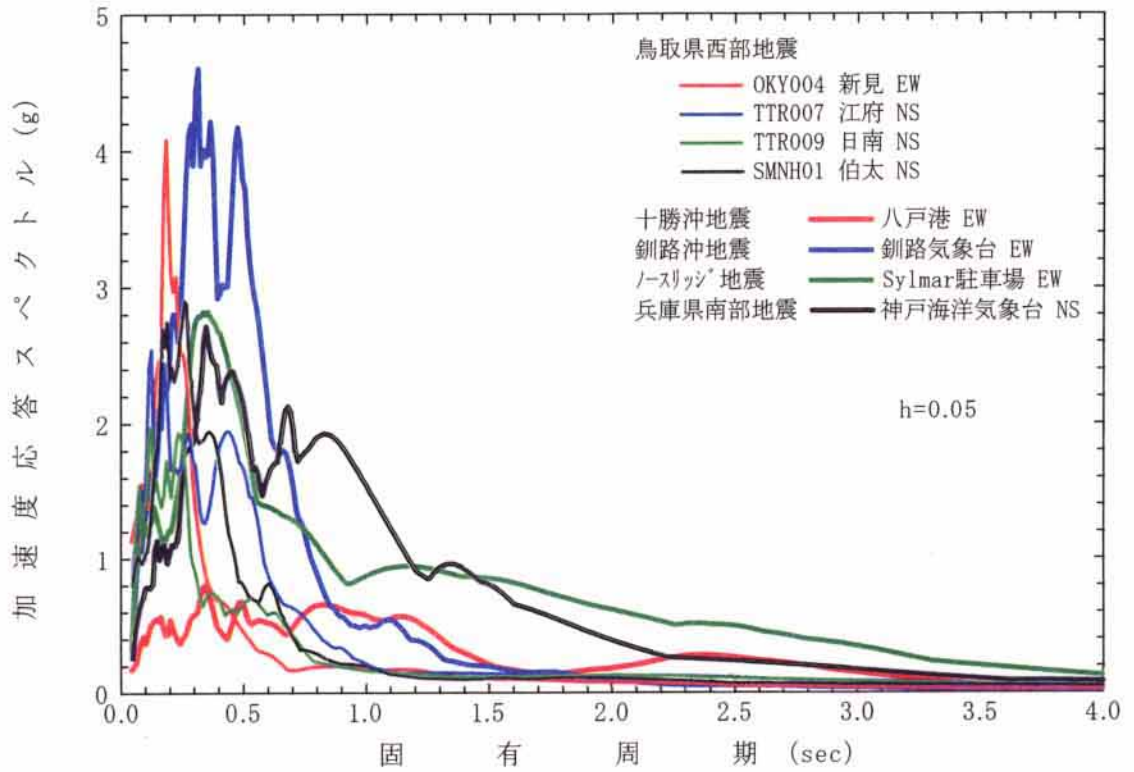
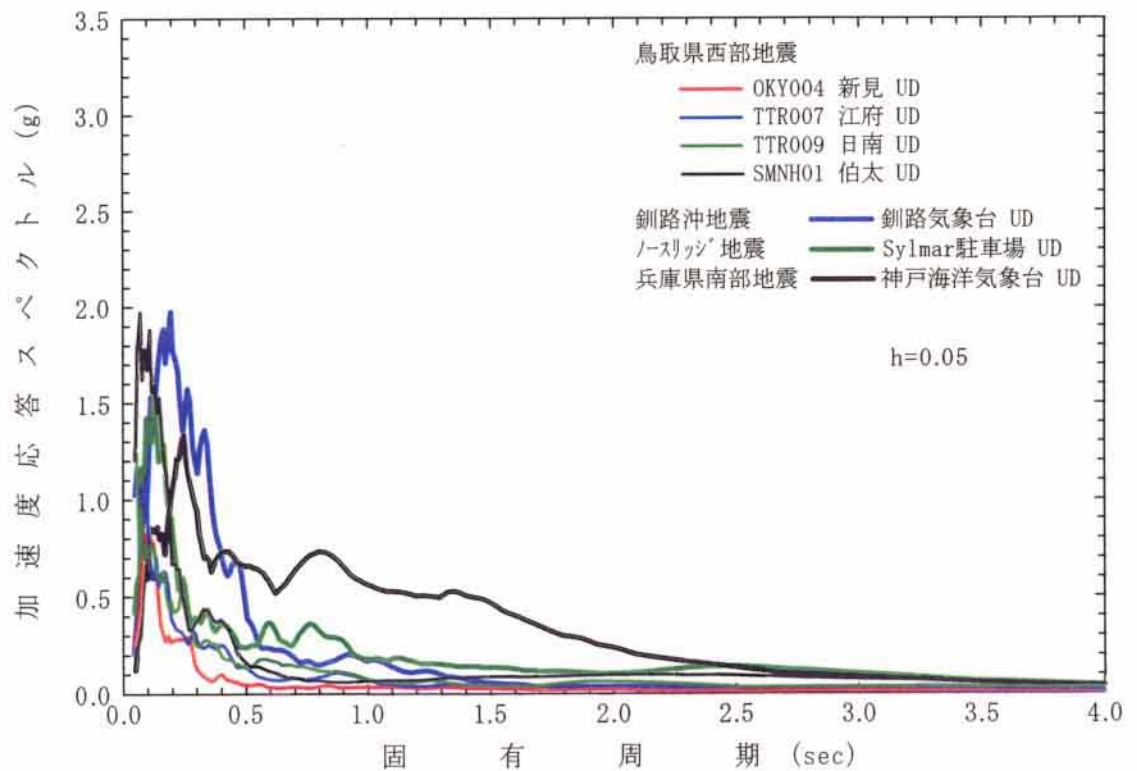


図3-15(4) 弾性加速度応答スペクトルの比較 (II種地盤, 鉛直成分)

次に、鳥取県西部地震で観測された地震動のうち、各地盤種別ごとに加速度応答スペクトルの大きいものを過去の地震動の加速度応答スペクトルと比較した。図 3-16 は、I 種地盤上で観測された、鳥取県西部地震の新見記録 EW 成分、江府記録 NS 成分、日南記録 NS 成分、伯太記録 NS 成分と、十勝沖地震の八戸港記録 EW 成分、釧路沖地震の釧路気象台記録 EW 成分、ノースリッジ地震の Sylmar 駐車場記録 EW 成分、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録 NS 成分を比較したものである。図(1)の水平成分に着目すると、固有周期 0.3 秒よりも短い領域では、新見記録 NS 成分が最も大きい。鳥取県西部地震における記録はどの記録も固有周期が 0.3 秒よりも長くなると、橋梁構造物の被害が軽微であった釧路沖地震の釧路気象台記録 EW 成分よりも小さい加速度応答になっていることがわかる。さらに固有周期が 0.8 秒よりも長くなると、十勝沖地震の八戸港記録 EW 成分よりも加速度応答は小さくなっている。同図の鉛直成分の比較においても、固有周期 0.3 秒よりも短い領域では伯太記録 NS 成分の加速度応答が最も大きくなっているものの、固有周期が 0.3 秒よりも長い場合には、過去のどの地震動よりも加速度応答が小さくなっている。同図(2)は、II 種地盤で観測された、鳥取県西部地震の米子記録 EW 成分、日野記録 NS 成分と、十勝沖地震の八戸港記録 EW 成分、ノースリッジ地震 Sylmar 駐車場記録 EW 成分、兵庫県南部地震の JR 鷹取駅記録 NS 成分を比較したものである。米子記録 EW 成分の加速度応答スペクトルは、全ての固有周期において、ノースリッジ地震 Sylmar 駐車場記録 EW 成分と兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録 NS 成分よりも小さくなっているが、日野記録 NS 成分は、固有周期が 0.5 秒～1.0 秒の間は、どの記録よりも大きな加速度応答を示していることがわかる。しかし、固有周期の増加にともなう加速度応答の減少の傾向は著しく、固有周期が 1.0 秒よりも長くなると、ノースリッジ地震 Sylmar 駐車場記録 EW 成分と兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録 NS 成分よりもその加速度応答は小さくなっている。上述したように、日野記録 NS 成分は、一般的な固有周期の橋脚に一度は大きな加速度応答を生じさせるが、それによって何らかの損傷が生じ、橋脚の固有周期が長周期化すると、その後は橋脚に生じる加速度応答が小さくなるため、ノースリッジ地震や兵庫県南部地震ほどの著しい損傷や破壊に至らないと考えられる。同図(2)の鉛直成分は、固有周期が 2.0 秒までの領域では、日野の加速度応答スペクトルが他の記録よりもはるかに大きくなっている。図 3-16(3)は、鳥取県西部地震において I 種地盤と II 種地盤で加速度応答スペクトルが大きかった記録と、兵庫県南部地震において III 種地盤上で観測された東神戸大橋周辺地盤上記録 NW 成分と神戸ポートアイランド記録 NS 成分の加速度応答スペクトルを比較したものである。観測地点の耐震設計上の地盤種別が異なるので、図 3-16(3)は参考として作成したものである。地盤が緩いために長周期領域でも大きな加速度応答が生じやすい III 種地盤の加速度応答と比較しているため、1.2 秒よりも長周期領域では、鳥取県西部地震の I 種地盤や II 種地盤で観測された記録のほうが小さいことがわかる。



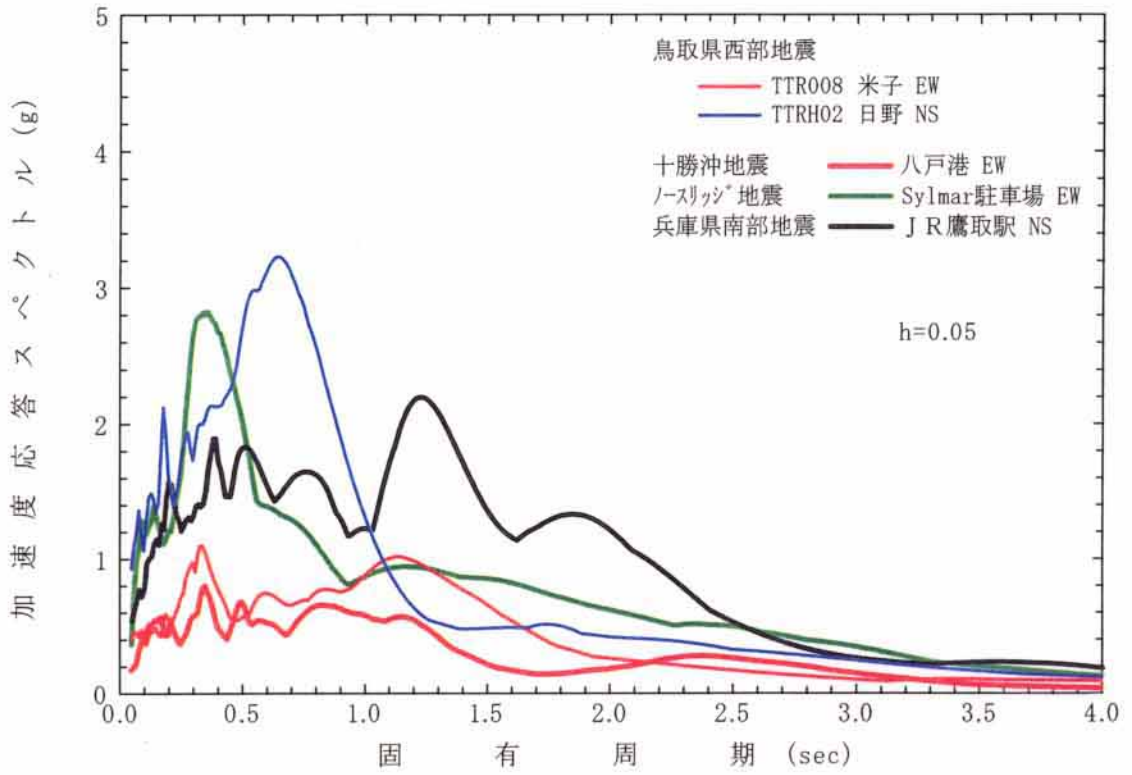
(1) 水 平 成 分



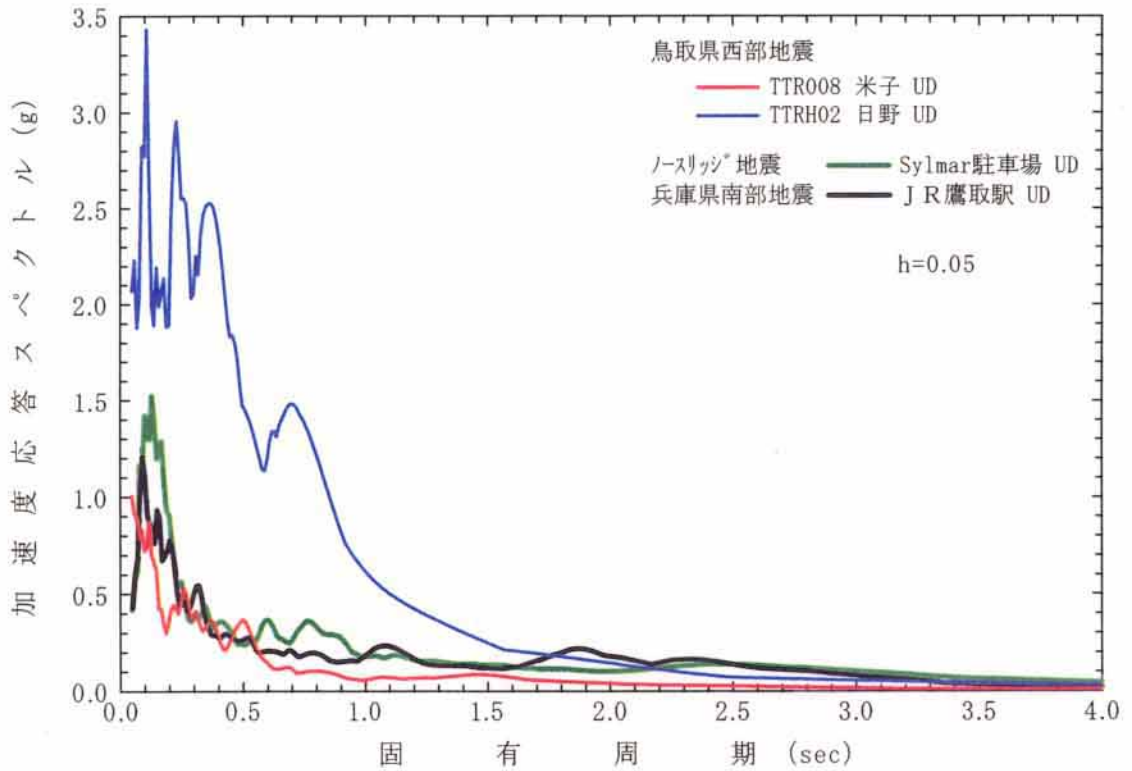
(2) 鉛 直 成 分

図3-16 (1) 弾性加速度応答スペクトルの比較 (I種地盤)



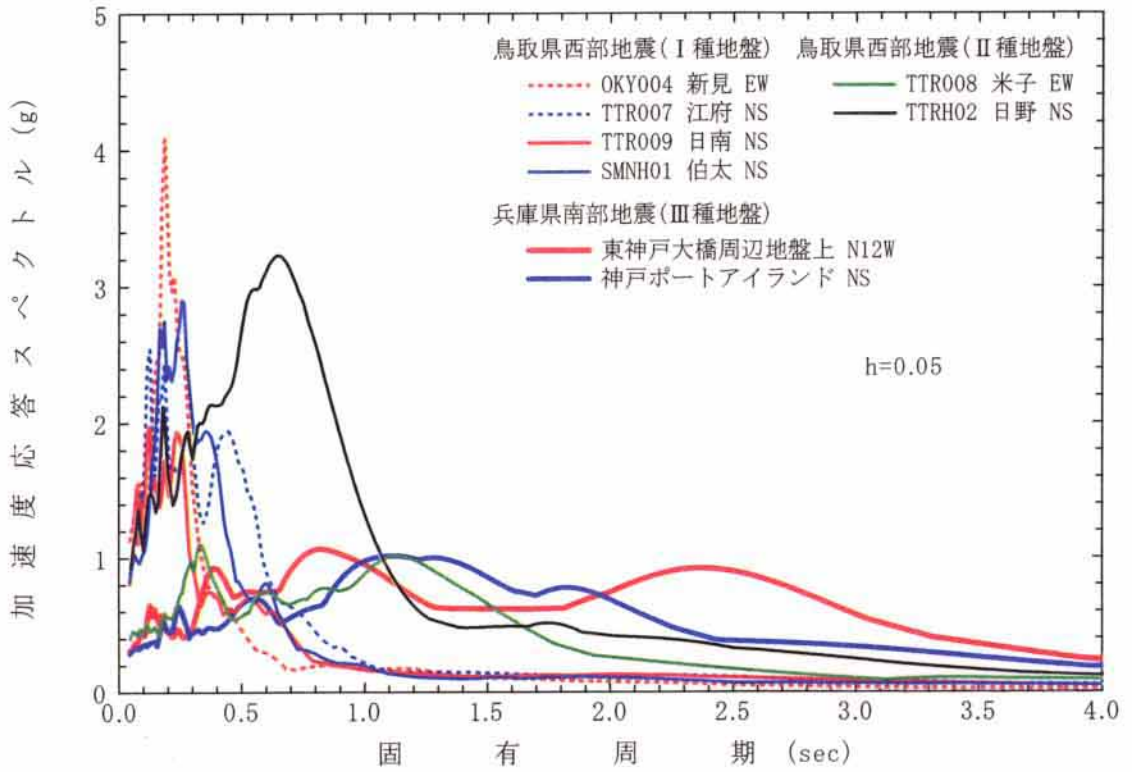


(1) 水 平 成 分

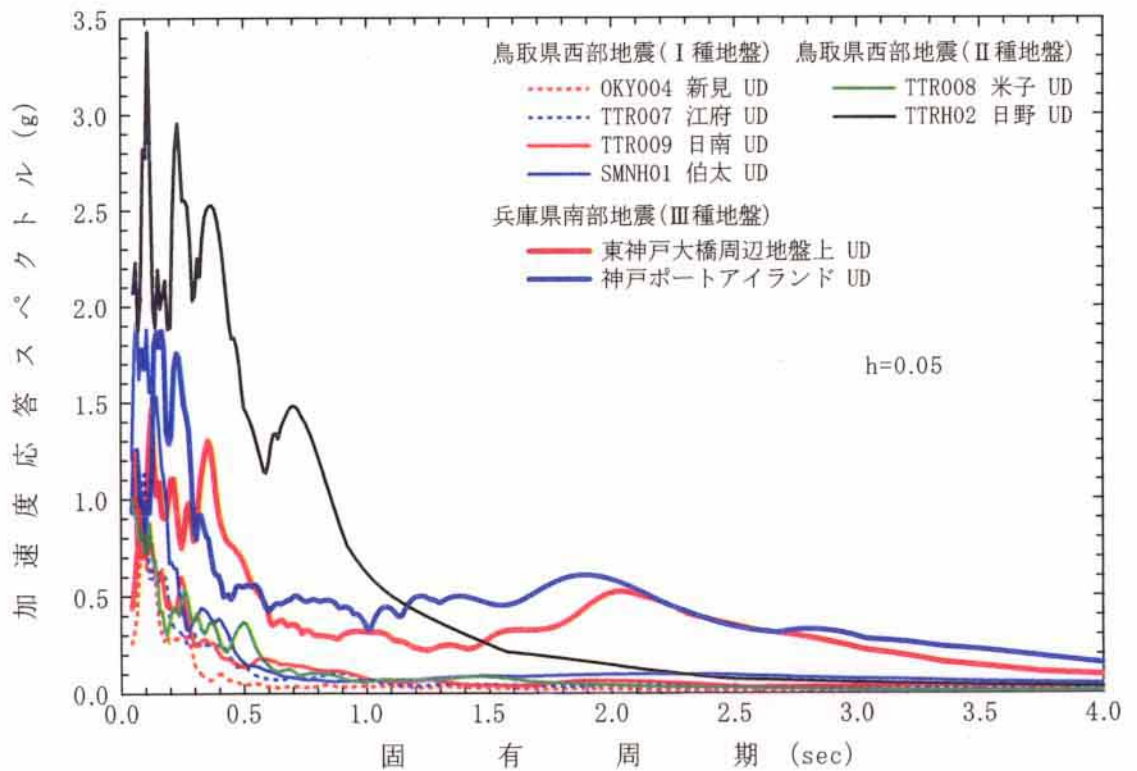


(2) 鉛 直 成 分

図3-16 (2) 弾性加速度応答スペクトルの比較 (Ⅱ種地盤)



(1) 水 平 成 分



(2) 鉛 直 成 分

図3-16 (3) 弾性加速度応答スペクトルの比較  
(鳥取県西部地震I・II種地盤, 兵庫県南部地震III種地盤)