

(134) 鋼製橋脚の弾塑性地震応答解析

名古屋大学工学部土木工学科 正員 鈴木森晶
名古屋大学工学部土木工学科 正員 宇佐美勉
名古屋大学工学部土木工学科 学正員 才塚邦宏

1. まえがき

1995年1月の兵庫県南部地震において観測された予想外に大きな水平加速度を持った地震波の特徴を調べ、従来応答解析で使用してきた土木研究所の地震時保有水平耐力照査用の地震波と比較しその特徴を述べる。そして名古屋大学にて行われた繰り返し載荷実験を基に開発された鋼製橋脚の復元力モデルを用いて今回観測された地震波を入力し弾塑性地震応答解析を行った。鋼製橋脚の固有周期の影響を細長比パラメータを変動させることにより、また鉛直地震動の影響を軸圧縮力比を変動させるというように、種々のパラメータの影響を考慮した応答解析により鋼製橋脚のこのような大地震時における挙動を把握しようとするものである。

2. 兵庫県南部地震における観測地震波

神戸海洋気象台で観測された地震波の加速度記録を Fig.1 に示す。ここでの最大水平加速度の NS 成分は 818gal, EW 成分は 617gal で、観測された地震波の中では最も大きい部類に入る (Fig.1(a),(b))。また、鉛直成分は 332gal で水平成分の約 0.4 倍である (Fig.1(c))。この付近の地盤状態は良質な地盤であるためⅠ種地盤上の値と考えられる。Fig.2, 3 には水平加速度応答スペクトルと水平加速度フーリエ振幅スペクトルを示す。水平加速度応答スペクトルは土木研究所のレベル2地震波のそれと比較されている。これらの特徴として以下のことが挙げられる。1) 400gal を超えるような大きな加速度の継続時間は 10 秒程度であるが、大きな上下動加速度は水平加速度の最大値あたりまで続く。2) 水平動の卓越周期は NS 成分が 0.35 秒, 0.68 秒, 0.83 秒付近, EW 成分が 0.38 秒, 0.70 秒, 0.92 秒, 1.0 秒付近といずれも 1.0 秒以下に集中している。また、上下動の卓越周期は 1 秒前後にあるが、0.2 秒から 1.0 秒あたりまで、同じような強さの比較的大きな加速度が続く。3) 神戸海洋気象台と土木研究所の地震時保有水平耐力照査用レベル2地震波、Ⅰ種およびⅢ種地盤用地震波の応答スペクトルを比較すると、今回の地震波の応答加速度は固有周期 1.0 秒以下の短周期の構造物に対しては土木研究所の約 3 倍もの大きさとなる。

3. 解析モデル

解析モデルとしては、橋脚を上部工を集中質量とした 1 自由度系のモデルとして解析を行った。フランジの幅厚比パラメータ $R_f = 0.7$ 、柱の細長比パラメータ $\bar{\lambda} = 0.4$ の無補剛断面を有する橋脚モデルを考え、減衰定数 ξ は 0.05 とした。橋脚は現行道路橋示方書に従い耐震設計 (1 次設計) を行い、これらのパラメータに適合するような橋脚寸法を定めた。その過程で上部工重量に相当する鉛直荷重 P は自動的に決定される。応答解析に用いる復元力モデルは、文献 [1] の剛性低下と強度劣化を考慮できる修正 3 パラメータモデルを使用した。これは、名古屋大学で行われた準静的実験 [2-5] の水平荷重-変位履歴曲線を基に定められたもので、高い信頼性

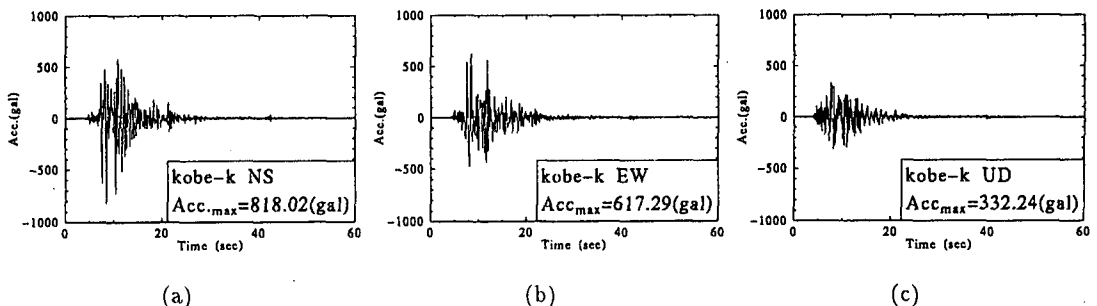


Fig.1 神戸海洋気象台観測地震波

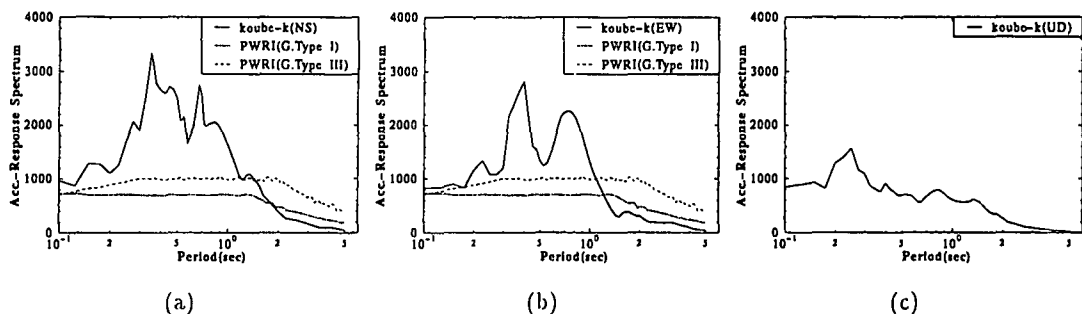


Fig.2 加速度応答スペクトル

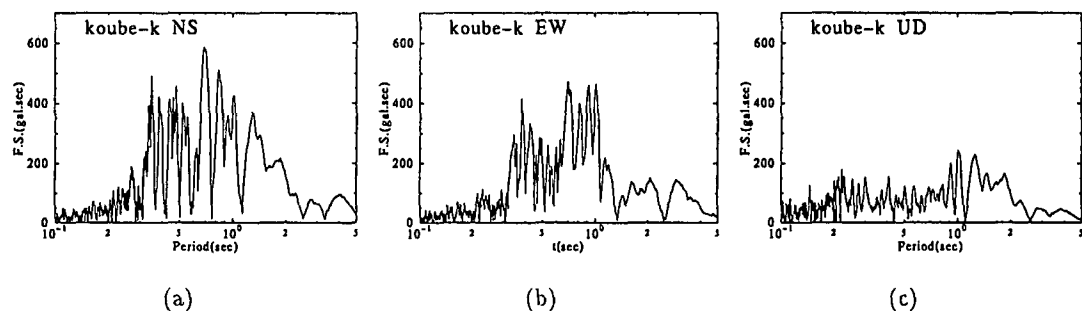


Fig.3 加速度フーリエスペクトル

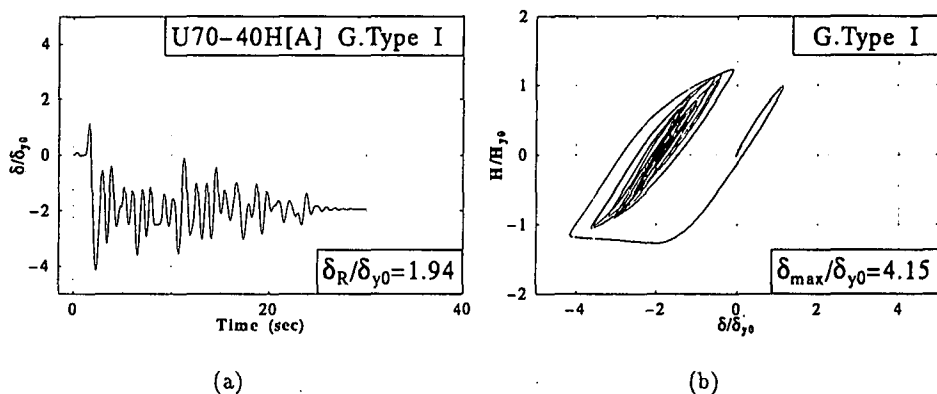


Fig.4 ハイブリッド実験結果 (地震波：土木研究所レベル 2，地盤種 I)

を有する。

4. ハイブリッド地震応答解析との比較

土木研究所の I 種地盤用レベル 2 地震波を用いて行った鋼製橋脚のハイブリッド実験結果 [6] と前述の復元力モデルを用いて解応答析した結果を比較したものを Fig.4,5 に示す。1 次設計によって得られた鉛直力 P/P_y は 0.167 である。両結果を比較してみると、ハイブリッド実験における最大応答変位は $\delta_{max}/\delta_{y0} = 4.15$ 、実験終了時の残留変位は $\delta_R/\delta_{y0} = 1.94$ であったのに対して、応答解析における結果はそれぞれ $\delta_{max}/\delta_{y0} = 4.28$ 、 $\delta_R/\delta_{y0} = 2.07$ となり、最大応答変位、残留変位とも非常に良く一致している。また、荷重-変位曲線も非常に良く一致していると言える。なお、この土木研究所の I 種地盤用地震波はこのパラメータのモデルに関しては片側に寄って振動するような応答を示し、残留変位が残りやすい地震波であると言える。

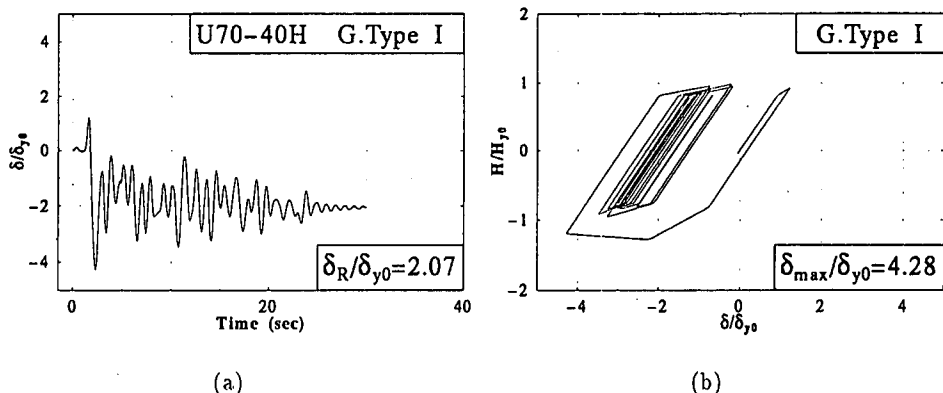


Fig.5 応答解析結果 (地震波：土木研究所レベル2，地盤種Ⅰ)

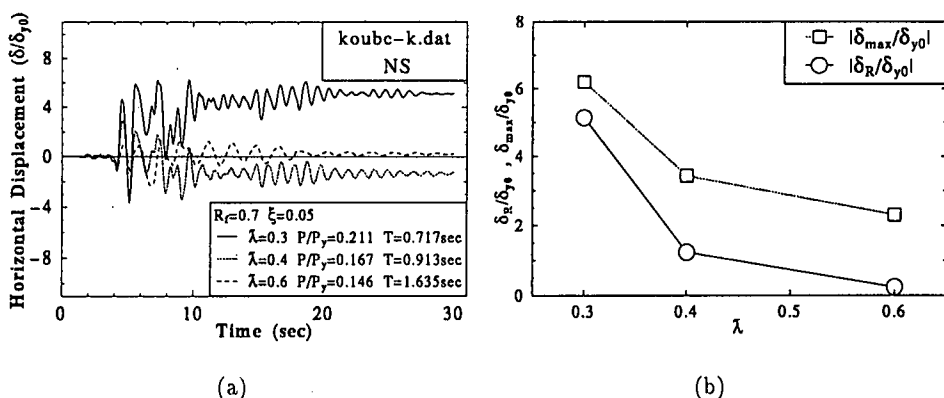


Fig.6 固有周期の違いを考慮した応答解析 (地震波：神戸海洋気象台，NS 成分)

5. 神戸海洋気象台の地震波による応答解析

神戸海洋気象台の水平加速度地震波 (NS 成分) を用いて前述の解析モデルを用いて応答解析を行った。今回の地震波は構造物の固有周期により応答にかなりの影響があると推測されるので、まず固有周期の違いの影響を調べるため細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ を 0.3, 0.4, 0.6 の異なるモデルでの応答解析により検討した。1 次設計によって得られた橋脚の軸力比 P/P_y はそれぞれ 0.211, 0.167, 0.146 で、固有周期はそれぞれ 0.717, 0.913, 1.635 である。応答解析の結果を Fig.6,7 に示す。この図より、最大応答変位 δ_{max} 、残留変位 δ_R とともに $\bar{\lambda}$ が小さくなるほど大きくなり、最大変位および残留変位とも $\bar{\lambda}$ が 0.3 と 0.6 では 3 倍以上の差がある。これは 1 秒以下の短周期での応答スペクトルが極端に大きくなっていることと一致する (Fig.2 参照)。また、 $\bar{\lambda}=0.4$ で比較すると、土木研究所の地震波 (Ⅰ種地盤用) では残留変位が残りやすい地震波であったが、今回の地震波では、最大水平加速度が大きいにもかかわらず最大応答変位、残留変位ともに Ⅰ種地盤での応答解析値よりやや小さい値にとどまっている。なお、残留変位が正負の両方向にずれているのは、固有周期の変化による振動中心の移動方向によるものである。

6. 鉛直地震動の影響

今回の地震では神戸海洋気象台の鉛直加速度 332gal という観測記録をはじめとして、鉛直加速度が非常に大きいことが注目された。そこで、鉛直地震動を上部工重量の割り増しという形で考慮し、前述の 1 次設計により得られた軸力の値を割りまして、軸力比を設計値の 1.0, 1.5, 1.8 倍 (α 倍) として応答解析を試みた。他のパラメータについては、 $R_f=0.7$, $\bar{\lambda}=0.4$, $\xi=0.05$ で前述の応答解析と同様である。なお、軸力比を増すことにより、固有周期にも若干の変化が生じ、それぞれ 0.913, 1.117, 1.240 秒となった。応答解析結果を Fig.8 に示す。

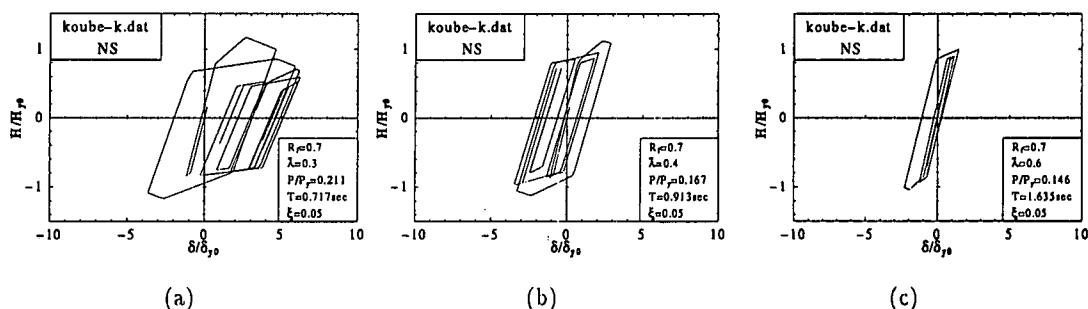


Fig.7 応答解析結果-復元カールプ (地震波：神戸海洋気象台，NS 成分)

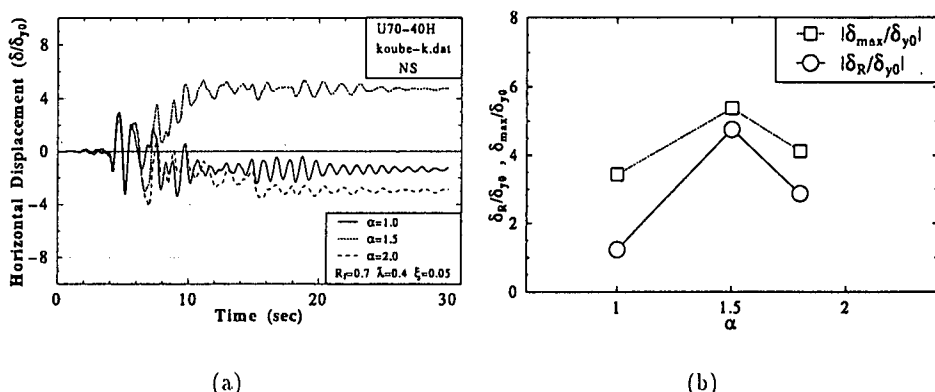


Fig.8 鉛直地震動を考慮した応答解析 (地震波：神戸海洋気象台，NS 成分)

これらの図より，軸力比を増すことにより最大応答変位および残留変位ともに増加する傾向にあり，1.0 倍と 1.5 倍を比較すると最大応答変位で 2 倍弱，残留変位では 4 倍程度となる。

7. 結論

今回の阪神大震災により得られた地震波の特徴とそれを用いた鋼製橋脚の応答解析を行った。その結果，以下のような結論が得られた。

- 1) 今回の地震波は土木研究所の地震波と比較すると 1 秒を境に大きく特徴が分かれ，構造物の固有周期によっては応答が大きく異なる。
- 2) 固有周期の違いによる応答への影響を幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}$ を変化させることにより考慮した結果， $\bar{\lambda}$ が小さくなるほど最大応答変位，残留変位ともに大きく，短周期の鋼製橋脚にとっては非常に厳しい地震波である。
- 3) 鉛直地震動の影響を軸力比 P/P_y を割り増すことによって検討した。その結果 P/P_y の 1.0 倍と 1.5 倍を比較すると最大応答変位で 2 倍弱，残留変位では 4 倍程度となる。

参考文献

- 1) 寺田昌弘，宇佐美勉，鈴木森晶：強震時の鋼製橋脚の損傷度評価法に関する研究，第 48 回年次学術講演会概要集，1993.9.
- 2) 宇佐美勉，今井康幸，青木徹彦，伊藤義人：繰り返し荷重を受ける鋼圧縮部材の強度と変形能に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol.37A，pp.121-134，1991.
- 3) 宇佐美勉，水谷慎吾，青木徹彦，伊藤義人，安波博道：補剛箱形断面鋼圧縮部材の繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol.38A，pp.105-117，1992.
- 4) 宇佐美勉，坂野茂，是津文章，青木徹彦：鋼製橋脚モデルの繰り返し弾塑性挙動におよぼす荷重履歴の影響，構造工学論文集 Vol.39A，pp.235-247，1993.
- 5) 鈴木森晶，宇佐美勉，竹本潔史：鋼製橋脚モデルの静的および準静的挙動に関する実験的研究，土木学会論文集 No.507/I-30，pp.99-108，1995 年 1 月.
- 6) 才塚邦宏，伊藤義人，木曾英敏，宇佐美勉：相似則を考慮したハイブリッド地震応答実験手法に関する考察，土木学会論文集 No.507/I-30，pp.179-190，1995 年 1 月.