

1. はじめに

現在、発生が予想されている東海地震は地震動継続時間が非常に長いとされる海溝型巨大地震であり、揺れによる被害は比較的広範囲に及ぶと考えられている。日本のように極めて地震活動の多い地域において地震動による土木構造物の損傷、崩壊は必然的な問題であり、それに対する対策が不可欠であることは言うまでもない。

計測震度を基に行われている被害予測は、波形の最大振幅に大きく依存する実効加速度により算出されており、実効加速度より低いレベルで繰り返し続く地震動継続時間の影響があまり考慮されていない指標となっている。したがって、計測震度が同じであっても、地震動継続時間が非常に長い場合には、構造物の損傷が大きくなり、予測を上回る被害が出る危険性がある。

そこで、本研究では R C 構造物を解析対象とし、地震動継続時間の異なる地震動加速度波形を入力外力として地震応答解析を行う。その被害状況を比較することで、海溝型巨大地震の特徴のひとつである長い地震動継続時間が R C 構造物の損傷に及ぼす影響について検証した。

2. 解析対象構造物

本研究で解析対象とした構造物は道路橋および鉄道橋である。道路橋は、橋（2 径間連続非合成鋼板桁橋）の鋼製支承と免震支承を対象とした。

鉄道橋は、一層ラーメン構造である第 3 愛宕高架橋 R4 端部および第 5 猪鼻高架橋 R12 中間部、R15 端部を対象とした。

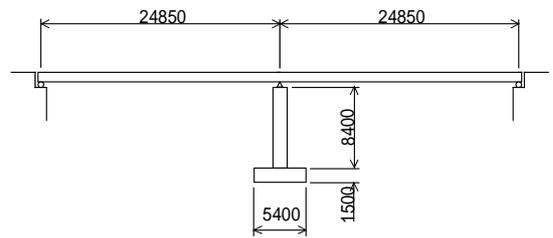


図-1 橋の構造概要

3. 入力地震動

解析に用いた地震動加速度波形は、気象庁、旧運輸省港湾技術研究所、旧建築省土木研究所および防災科学研究所 K-NET 等の観測記録 86 成分およびシミュレーション波形 33 成分の合計 119 成分の加速度記録を振幅調整して計測震度 6.0 となる地震動加速度波形である。継続時間を表す指標は T_{90} (累乗加速度パワーが全体の 5 ~ 95% となる時間) とした。

4. 解析方法

鉄筋コンクリート橋脚を有する高架橋を節点と梁要素からなる平面骨組みモデルとし、道路橋は橋軸方向、鉄道橋には橋軸直角方向へ地震加速度を入力した場合の解析を行う。道路橋は、桁および橋脚の横ばり部は剛体要素、柱部は非線形要素とした。鉄道橋は梁と橋脚の接合部周辺は剛体要素とし、それ以外の部分は非線形要素とした。減衰はレイリー減衰とし、減衰定数は 0.02 とした。橋脚断面の復元力特性は、鉄道構造物設計基準・同解説を参考にした曲げモーメント - 曲率関係のトリリニアモデルを採用し、この構造モデルに離散型運動方程式を解くことにより地震応答解析を行った。数値解法には Newmark- 法を用いた。

5. 終局曲率の算定方法

橋鋼製支承の地震動継続時間 T_{90} - 損傷率関係を図-2 に示す。ここで損傷率とは終局曲率 N に対する最大応答曲率 N_{MAX} である。損傷率が 1 を超えたものについては破壊に至ったものと判断する。終局曲率 N を用いた図-2 からは地震動継続時間の影響があまり反映されていない。構造物の耐力比に応じて載荷繰り返し回数の影響を考慮した終局曲率 N' を求めることで継続時間の影響を考慮した損傷評価を行うこととした。

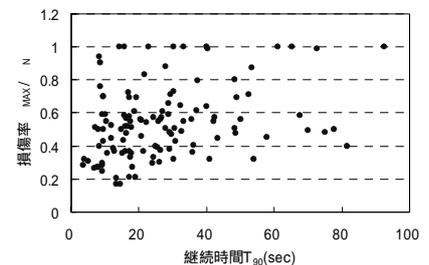


図-2 橋鋼製支承の T_{90} -損傷率関係 (1)

そこでまず靱性率比を次式により計算する。

$$y = (0.2x + 1.28)n^{-0.27}$$

ここで、 y : 靱性率比 (元々の靱性率に対する載荷繰り返し回数の影響を考慮した靱性率の比)

x : 耐力比

n : 降伏変位以降の総載荷繰り返し回数

式 (1) に解析対象となる構造物の耐力比および地震応答解析結果における降伏変位以降への総到達回数を入力することでそれぞれの場合での靱性率比が求まる。その靱性率比を元々の終局曲率 N に掛けることで、載荷繰り返し回数の影響を反映した終局曲率 N' を求めることができる。この載荷繰り返し回数の影響を反映した終局曲率 N' を用いて解析対象構造物の地震応答解析結果を分析し、地震動継続時間の影響を考慮した損傷評価を行う。

6. 解析結果

橋鋼製支承の地震動継続時間 T_{90} -平均損傷率関係を図-3 に示す。図-3 より載荷繰り返し回数の影響を考慮した終局曲率 N' を用いて損傷を評価した場合は、継続時間が長くなるほど損傷率が大きくなるのが分かる。

次に、橋鋼製支承の地震動継続時間 T_{90} が 10 秒毎の平均損傷率および破壊割合を表-1 に示す。

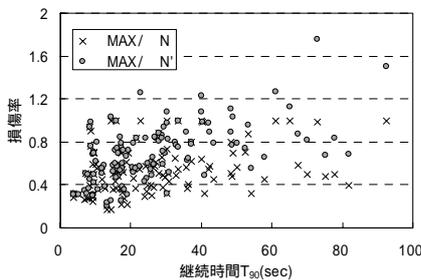


図-3 橋鋼製支承の T_{90} -損傷率関係

T_{90} (sec)	個数	破壊数	平均損傷率 MAX/ N'	破壊割合 (%)
~10	20	0	0.5020	0.00
10~20	34	2	0.5713	5.88
20~30	26	1	0.7045	3.85
30~40	14	2	0.7704	14.29
40~50	11	4	0.9331	36.36
50~	14	4	0.9454	28.57

表-1 橋鋼製支承の破壊割合

表-1 より、平均損傷率、破壊割合とも地震動継続時間 T_{90} が長くなるほど大きくなるのが分かった。平均損傷率については地震動継続時間が長い 10 秒未満のときに 0.50 だったものが、地震動継続時間が短い 50 秒以上のときには 0.94 となり約 1.88 倍の値となった。破壊割合についても地震動継続時間が 50 秒以上になると 36.36% と大きな値を示した。

次に履歴エネルギーを地震動継続時間の影響を考慮した損傷指標として算出した。ここで、履歴エネルギーとは各要素の曲率の増分 $\Delta\phi$ と曲げモーメント M さらに部材長 L を掛け合わせ、部材の合計をとったものとし次式により算出する。

$$E = \sum M \cdot \Delta\phi \cdot L \quad (2)$$

式(2)より 橋鋼製支承の履歴エネルギーと地震動継続時間 T_{90} の関係を図-4 に示す。図-4 より地震動継続時間が長くなるほど履歴エネルギーの値が大きくなるのが分かった。履歴エネルギーだけでは構造物の損傷状況までは示せないが、履歴エネルギーが大きくなっているということは損傷が大きくなっていると判断できると考えられる。

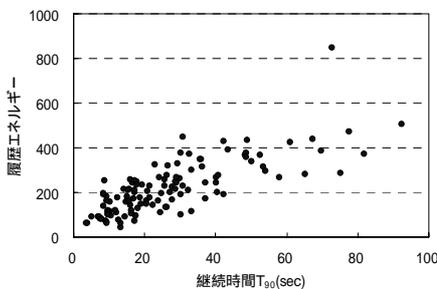


図-4 T_{90} -履歴エネルギー関係

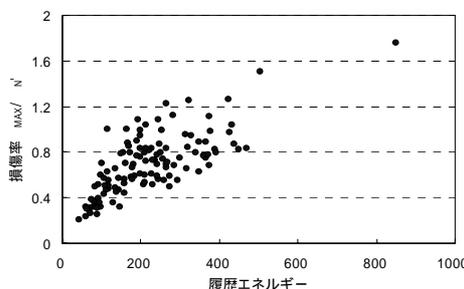


図-5 履歴エネルギー-損傷率関係

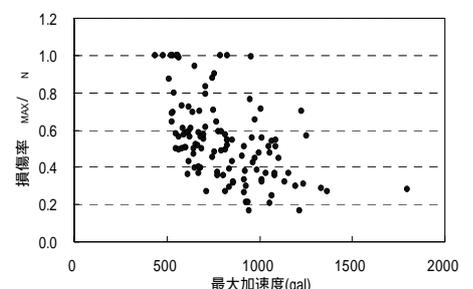


図-6 最大加速度-損傷率関係

橋鋼製支承の載荷繰り返し回数の影響を考慮した終局曲率 N' を用いた損傷率と履歴エネルギーの関係を図-5 に示す。元々の終局曲率 N を用いた損傷率と履歴エネルギーの間に相関関係は見られなかったが、図-5 より載荷繰り返し回数の影響を考慮した終局曲率 N' を用いた損傷率と履歴エネルギーでは、履歴エネルギーが大きくなるほど損傷率が大きくなるのが分かった。

次に、構造物の損傷に対する最大加速度の影響について検討する。橋鋼製支承の最大加速度と損傷率の関係を図-6 に示す。最大加速度と損傷率の間には相関関係が見られなかったことから、本解析において損傷が大きくなった原因は最大加速度ではないと判断できる。

7. まとめ

本解析では、対象とした 5 つの構造物全てにおいて地震動継続時間が長くなると損傷率と破壊割合が高くなるのが分かった。地震動継続時間が長い 50 秒以上になると、地震動継続時間が短い 10 秒未満の場合に比べて損傷率は 橋鋼製支承は 1.88 倍、橋免震支承は 1.28 倍、第 3 愛宕高架橋 R4 端部は 1.61 倍、第 5 猪鼻高架橋 R12 中間部は 1.23 倍、第 5 猪鼻高架橋 R15 端部は 1.55 倍と高くなった。

履歴エネルギーが大きくなると損傷率が高くなるという相関関係が見られた。今後、履歴エネルギーから構造物の損傷率を算出することが可能となれば、被害予測の精度が高まるのではないと思う。