

耐震設計の基礎知識と橋梁の耐震性を高める取り組み

Basic Principle of Seismic Design and a Case of Upgrade Seismic Performance for Bridges

交通事業本部 交通第2部 青地 知也¹⁾



1)

概要(Abstract)

東日本大震災をはじめとする、近年の地震被害を受け、平成 24 年度の道路橋示方書の改定等、耐震設計を取り巻く環境は、目まぐるしく変化している状況である。本報告においては、改めて耐震設計の基本的な知識として、避けるべき被害と耐震設計における考え方を述べるとともに、耐震設計における新しい取り組みについて、紹介する。

1. はじめに

私たちの住む日本は、世界の中でも大規模地震が多発する地帯のひとつであり、さまざまな地震による被害を経験してきている。特に 1995 年 1 月 17 日の兵庫県南部地震では、それまでの設計基準で十分な耐震安全性が確保されていると考えられていた鉄筋コンクリート製橋脚や鋼製橋脚が大きく破壊し、橋梁上部構造の落下、鋼上部構造の損傷などの地震被害が発生した。これは、従来の耐震設計では考慮されていなかった規模の大きい内陸直下型地震による地震力が、これまで基準類で設定されていた震度などの地震力を大きく上回ったために生じた地震被害である。この後も、大型地震が多発しており、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災による被害は、記憶に新しいところである。

これに対し耐震設計においても、地震被害に対応すべく、各種構造物に対する耐震設計基準類の改訂が行われてきている。

2. 避けるべき地震被害と耐震設計の目的

2.1 避けるべき地震被害

構造物における地震被害とは、「地震により構造部材が損傷を受けることで、構造物としての安全性が損なわれること」を意味しているが、さらに違う視点から地震被害を考えると「地震前と同様に供用できない状態になること」と考えることがで

きる。多くの土木構造物は公共物であり社会資本としての側面を持っていることから、地震時の安全性を確保し、人命の損失を生じさせるような壊滅的な損傷の発生はもちろん、震災後の復旧活動や地域住民の生活や生産活動に支障を与えるような機能低下を含め、土木構造物の地震被害である。

つまり避けるべき構造物の地震被害とは、その構造物が地震時または地震後に要求されている安全性・機能性が確保できなくなるような、著しく性能(機能)を低下させる構造部材の損傷である。一般にこのような損傷は構造部材の脆性的な破壊であり、特徴として一旦破壊が生じると破壊の進行が止まらず、一気に構造全体の崩壊につながる破壊形態を示す。言い換えれば「粘りのない破壊形態」である。

2.2 耐震設計の目的

近年の大規模地震に対して「地震による損傷が全く発生しないほど強固な構造物」を構築することは、原子力発電所などの一部の重要施設を除いて一般的な土木構造物では、経済性の観点から極めて困難である。このため、各地震動に対して構造物の損傷に伴う限界状態(耐震性能)を設定し、設計する必要がある。これは、構造物設計に「破壊」という概念を取り入れることであり、「破壊が生じている箇所のある構造物の挙動」をコントロ

ールし、脆性的な破壊を防止することである。つまり、耐震設計の第一歩は、「地震による構造物の破壊」を知ることであり、過去の被災事例という事実から多くを学ぶことから始まる。

耐震設計の目的は単に、「複雑な解析や検討をすること」や、「耐震基準にある許容値や構造細目を満足すること」ではなく、「地震時に構造物の安全性を確保するためには」について常に考え、そのために必要な設計を行う事である。

各耐震基準は構造物の安全性を確保するための一つの有効な手段(方法)であるものの、単に満足すれば良いわけではなく、設計対象の特殊性や周辺環境などから耐震基準への適合性について検討し、「耐震基準が適用可能か?」、「これに従い設計することで安全か?」を確認する必要がある。

3. 耐震設計時における検討のアプローチ

3.1 複雑化する解析手法

コンピューターの飛躍的な進化や、電算の発達に従い、「動的応答解析」や「3次元FEM」のような複雑な解析の設計への適応が可能となったことにより、地震時における構造物の挙動をより現実に近く、精度よく再現できることは事実である。しかしながら、前章でも説明した耐震基準と同様に、適正に解析を使用できず、誤った入力や条件下で使用した場合、全く異なる結果を得ることになる。

耐震設計における解析において最も重要なことは、解析結果への妥当性の判断であり、妥当性を適切に判断するためには、実際の構造物の地震被害や破壊実験など、実構造の破壊に対する知見を深め、数値解析ではない「現実を知る」ことが、なにより重要である。また、耐震設計において動的応答解析は非常に有効な手法であると同時に、設計における一手法に過ぎないことを認識する必要がある。実際の設計において動的解析を活用する場合は、さまざまな他のアプローチを実施し、動的解析の結果と比較検討しながら、解析の精度・妥当性を確認するなど、動的解析を過信することなく、総合的な設計解析の中の一部として、有効に活用することが重要である。

3.2 解析結果を照査するポイント

このような複雑な解析は、膨大な量の計算書である場合が多く、その中身はブラックボックス化されていることも多い。このような内容を照査するた

めの、簡単なポイントをいくつか紹介する。

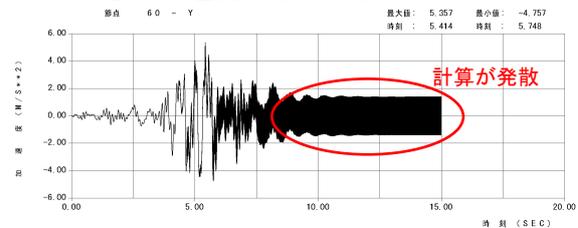
(1) 入力条件の確認

- ①使用する解析ソフトは妥当か。ソフトの仕様に合わせて、解析モデルを現実よりも無理に簡易化していないか? (例: 曲線橋⇒直線橋)
- ②構造全体から、無理に限定した部分を取り出して解析していないか? (例: 異脚高の橋梁)

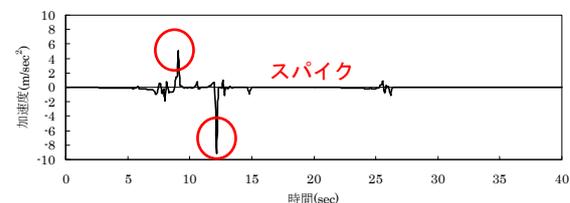
(2) 出力結果の確認

- ①極端に一次固有周期が長・短周期になっていないか? (例: 一般的な橋は0.5~1秒程度)
- ②変形すべき部位が変形しているか? 固定されるべき箇所が動いていないか? (変形は一般的に、重くて柔らかい箇所が一番大きい)
- ③計算が発散していないか?

例: 応答加速度波形の発散



例: 加速度波形の異常値



(3) 解析結果の分析

- ①計算やりっぱなしになってないか?
- ②構造物の振動特性を把握できているか?
- ③結果を力学的根拠に基づき説明できるか?
⇒簡単な質問を試みる。

例:P1 橋脚よりP2 橋脚の変形が大きいのは?
P3 橋脚だけ、許容値を満足しないのは?

これらの解析に対する考え方は、各対象構造物や、耐震基準に共通して適応でき、耐震設計において複雑化する解析の結果に対して、比較的簡易に内容を照査するためのポイントである。これらを活用し、解析結果への妥当性の判断材料とすることで、解析に対する根本的な理解を深めることの手助けとなりえる。

4. 橋梁の耐震性能を高める取り組み

4.1 取り組みの概要

既設橋梁の上部構造が大地震時に変形した場合、桁と橋台パラペットの衝突が避けられない状況にある。このような背景から、桁-橋台パラペット間に緩衝材を設置することで、上部構造の応答変位を抑制するとともに橋台パラペットの損傷を防ぐ、または衝突荷重を緩和することが期待できる。本報告では橋梁解析モデルの遊間に緩衝材を設置し、橋台パラペットに対する桁の衝突に着目した動的応答解析の結果から緩衝材の効果を検証した。

4.2 対象構造

対象橋梁は、図-1に示す様に H8 道路橋示方書を適用して設計された橋長 54.500m、支間長 26.000m の 2 径間連結 PC 合成桁橋である。

主な橋梁諸元は、橋台構造は逆 T 式、橋脚構造は壁式、基礎構造は橋脚、橋台ともに場所打ち杭である。支承構造は全箇所、ゴム支承 (E) を採用している。総上部構造重量は 31100kN、各支点反力は A1 橋台が 8000kN、P1 橋台が 15100kN、A2 橋台が 8000kN となっている。また地盤種別は III 種地盤である。遊間については、桁と橋台パラペットが衝突しない十分な間隔とするため、250mm を確保している。

上記、実橋梁における橋梁諸条件をもとに、解析の基本モデルを作成し、この橋梁に対して桁と橋台パラペットの衝突の影響や緩衝材設置の効果などをパラメトリックに解析する。

4.3 解析モデル

解析モデルは図-2に示す 2 次元骨組モデルとした。上部構造と橋台は線形はり要素、橋脚は非線形はり要素にてモデル化した。パラペットへ伝達される上部構造衝突力に着目し、桁端部と橋台パラペットとの間に緩衝材バネを設置し、この緩衝材バネの性状を変化させ緩衝材バネに生じる応力から、パラペットへの衝突力を算出した。

Case1 の緩衝材を設置しない場合の衝突は、遊間は自由に変形し、橋台パラペットに接触した時点で高剛性を示すバネモデルにて再現した。

Case3 は緩衝材としてハニカム型ダンパーを設置し、その基数は履歴を描き緩衝効果が発揮できる緩衝バネの 2 次剛性の最大値が橋台パラペットの曲げ耐力以下となるように 26 基とした。

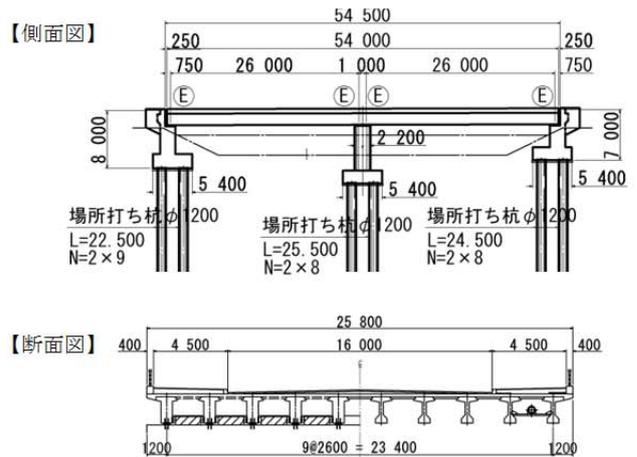


図-1 橋梁概要図

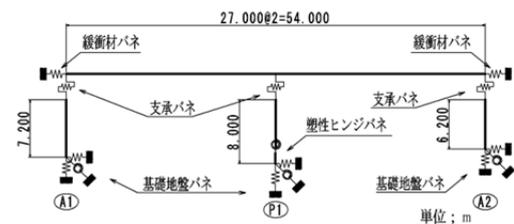


図-2 解析モデル図

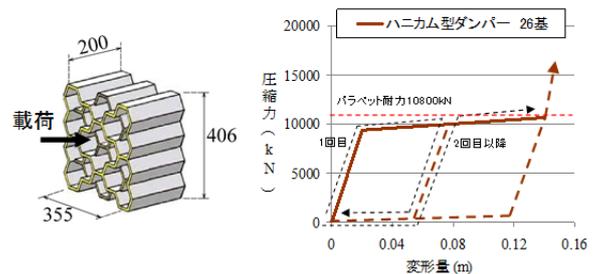


図-3 緩衝材とバネ履歴モデル図

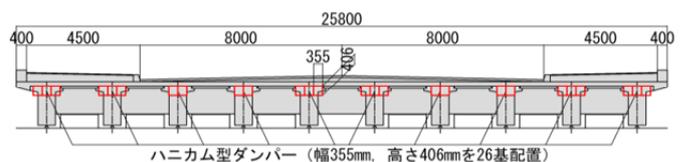


図-4 実橋への緩衝材配置概要図

4.4 解析手法および入力地震波

解析には汎用 3 次元動的解析プログラム TDAP III を使用し、動的解析手法は非線形時刻歴応答解析とした。解析方向は緩衝材の圧縮方向を検討対象としているため橋軸方向のみとしている。

道路橋示方書に示されている III 種地盤のレベル 2 地震動タイプ I およびタイプ II の各 3 波で予備解析を実施し、主桁の応答変位が最大となる地震波について各タイプから抽出して使用した。

4. 5 緩衝材を設置しない場合の解析

実橋設計での桁最大変位は、タイプⅡのA1橋台方向へ248mmであるため、遊間を250mm確保しているが、緩衝材を設置していない場合のパラペットへの桁衝突の影響を検討するため、遊間を50mm、100mm、150mm、200mm、250mmと変化させた。

表-1は各橋台におけるパラペットへの桁衝突荷重の最大値を遊間量毎に示したものである。

タイプⅠの結果では遊間を大きく確保するに従い、桁衝突荷重が小さくなる傾向にある。遊間が大きくなるに従い橋脚の塑性化による履歴減衰や分散支承の影響により衝突荷重が小さくなったものと考えられる。また、遊間100mm以下の場合には橋台パラペットの限界衝突荷重10800kNを上回り、橋台パラペットが破壊に至る結果となった。

タイプⅡでの衝突荷重の最大値は桁と橋台パラペットが衝突しない遊間200mmのA2橋台と遊間250mm以外、橋台パラペットの限界衝突荷重を上回り、橋台パラペットが破壊に至る結果となった。

4. 6 ハニカム型ダンパーを設置した場合の解析

図-5示す様に橋台パラペット前面に緩衝材を配置し、これと桁端の間のクリアランスをパラメータに0mm、50mm、100mm、150mm、200mmと変化させ解析を実施した。(緩衝材の厚さは20mmとして一定)

クリアランスを設けることで、クリアランス以下の変形量に対しては、支承や橋脚による減衰効果を発揮し、これ以上の変形量に対して緩衝材の効果が発揮されることから、緩衝材の効果的な配置を検討するものである。

表-2は各橋台におけるパラペットへの桁衝突荷重の最大値を遊間毎に示したものである。

タイプⅠ、タイプⅡに共通して、桁が緩衝材に確実に接触するクリアランスの場合、桁衝突荷重は10400kN程度から、クリアランスが大きくなるに従い、9800kN程度に低下している。

いずれの場合も橋台パラペット耐力10800kN以下であり、緩衝材を設置しない場合と比較し、桁衝突荷重を1/2から1/4程度に大幅に低減していることが分かった。また、クリアランスの大きさにかかわらず、桁衝突荷重を一定に低減していることが分かった。これは、ハニカム型ダンパーの緩衝材としての特性によるものと考えられる。

表-1 桁衝突荷重結果一覧(緩衝材無)

地震波	遊間 (mm)	桁変位 (m)	A1橋台反力 (kN)	A2橋台反力 (kN)
タイプⅠ	50	0.084	26525	31950
	100	0.128	27656	12009
	150	0.155	5448	—
	200	0.157	—	—
	250	0.157	—	—
タイプⅡ	50	0.111	56302	57851
	100	0.146	28628	43373
	150	0.179	29298	23424
	200	0.230	29653	—
	250	0.248	—	—

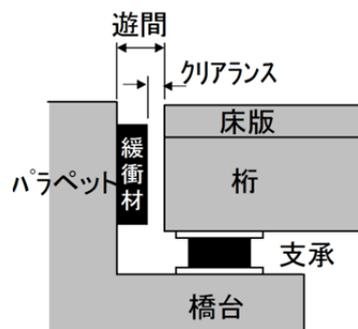


図-5 遊間の緩衝材設置概要図

表-2 桁衝突荷重結果一覧(ハニカム型ダンパー)

地震波	クリアランス (mm)	遊間 (mm)	桁変位 (m)	A1橋台反力 (kN)	A2橋台反力 (kN)
タイプⅠ	0	200	0.113	10361	10176
	50	250	0.122	9925	9639
	100	300	0.146	9641	6552
	150	350	0.156	2794	—
	200	400	0.157	—	—
タイプⅡ	0	200	0.114	10375	10272
	50	250	0.153	10263	10194
	100	300	0.168	9880	9838
	150	350	0.207	9765	9455
	200	400	0.238	9555	—

4. 7 まとめ

ハニカム型ダンパーは、1次剛性から2次剛性へ移行する耐力が高く、ダンパーが完全に潰れ、3次剛性に移行する場合の圧縮量が圧縮率70%と非常に大きいことから、クリアランスが少ない場合においても、大きなエネルギー吸収が可能である。このため、タイプⅡ地震動のような加速度の大きい地震波において、遊間を実橋設計より広げることなく高い緩衝効果が得られる緩衝材といえる。

4. 8 課題と今後の展望

ハニカム型ダンパーは復元力が期待できず、1回の衝突により潰れてしまうため、地震波の様な繰返し荷重による複数回の衝突に対して、完全には対応できていない。このため、ゴム製緩衝材など、新たな緩衝材の研究が進んでいる。