

鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと 耐震設計法の高度化

平成12年 4 月

(社) 土木学会 鋼構造委員会
鋼構造物の耐震検討小委員会

(社) 鋼材倶楽部 委託

(社) 日本鋼構造協会次世代土木鋼構造研究特別委員会
鋼橋の耐震設計小委員会

登 録	平成 12年 12月 15日
番 号	第 48157 号
社団 法人	土 木 学 会
附 属	土 木 図 書 館

まえがき

本報告書は、日本鋼構造協会（JSSC）内に平成9年4月に設置された「次世代土木鋼構造研究特別委員会・鋼橋の耐震検討小委員会」および同年10月に土木学会に設置された「鋼構造委員会・鋼構造物の耐震検討小委員会」の第3および第5分科会の最終報告書である。両委員会は、共同で鋼構造物の耐震設計の高度化に関する調査研究にあたってきた。

本委員会の前身は土木学会鋼構造委員会の下に設けられた鋼構造新技術小委員会・耐震設計WG（平成3年4月～平成8年3月）である。新技術小委員会の設立当初は鋼構造の耐震設計に対する関心は必ずしも高くはなかったが、平成7年1月17日に発生した阪神・淡路大震災以降、急速に研究者、技術者の関心を引くようになった。この委員会の成果は「鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術（平成8年7月）」として報告書の形で纏められており、鋼構造物の耐震設計の研究と実務に関する唯一のまとまった参考文献として現在でも広く使用されている。この報告書で提案されている耐震照査法は、コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚に対する保有水平耐力法で、保有耐力あるいは変形性能を求めるために、Pushover解析（静的複合非線形解析）が必要である。

その後、平成8年12月に道路橋示方書が改訂され、鋼製橋脚の耐震・免震設計に関する規定が新たに設けられた。鋼製橋脚はコンクリート充填橋脚とコンクリート無充填橋脚に分類され、前者については静的解析（Pushover解析）に基づく保有水平耐力法、後者については動的解析（弾塑性時刻歴応答解析）が推奨されている。しかしながら、コンクリート無充填橋脚に関しては一般的な復元力特性モデルの作成方法が示されていないため、設計への適用が困難な場合があり、設計実務家からはこの方面の研究と同時に解析ソフトの開発に対する強い要望がある。

一方、土木構造物に対する性能照査型（あるいは、性能規定型）設計が現在各種委員会で検討されるようになってきている。性能設計では、設計あるいは検証段階で、外力によって構造物に生ずる応答値（Demand）および構造物が保有する性能（Capacity）を算定するための解析ツール（解析ソフト）を必要とし、しかもそれぞれの段階で異なったレベルの解析を必要とされる場合がある。すなわち、検証段階では一般に設計時より高いレベルの、より精緻な解析を必要とされる場合がある。現行道路橋示方書によるコンクリート無充填鋼製橋脚の設計法も一種の性能設計スタイルになっているが、前述のようにモデル化の考え方および解析ツールが十分整備されていないため、規準が十分機能しない状態になっている。

以上述べてきたように、耐震設計の高度化が進むにつれて設計時に構造物の降伏、

弾塑性域から崩壊に至るまでの挙動，すなわち損傷過程を追跡する複雑な非線形解析が余儀なくされ，そのために信頼性のあり，しかも適用範囲が広い解析ソフトの開発・普及がますます重要になってくる．それに伴い，電算プログラム検証用の多種多様なベンチマークも必要となってくる．

本委員会では，以上のような現状認識および将来展望のもとに，耐震設計の高度化に必要な，(1)照査方法，(2)解析ツールとベンチマーク，(3)実験手法の標準化，および(4)設計コンセプト，などの検討を主目的として調査研究を行ってきた．具体的には，委員会内に2つのWG，すなわち設計WG(主査：北田委員)および解析WG(主査：後藤委員)を設置し，設計WGは設計コンセプトと照査法の整備および実験手法の標準化，解析WGは解析ツールとベンチマークの作成を担当してきた．本報告書は，3年間の委員会活動の成果をとりまとめたものである．

最後に，種々有益なご意見をいただいた，土木学会・鋼構造委員会（前委員長：佐伯彰一氏，現委員長：坂井藤一氏）および日本鋼構造協会・次世代土木鋼構造研究特別委員会（委員長：伊藤 學教授）の委員諸氏に深く感謝する．

平成12年4月21日

土木学会・鋼構造物の耐震検討小委員会
日本鋼構造協会・鋼橋の耐震検討小委員会
委員長 宇佐美 勉 （名古屋大学）

土木学会・鋼構造委員会・鋼構造物の耐震検討小委員会
日本鋼構造協会・次世代土木鋼構造研究特別委員会・鋼橋の耐震設計小委員会
委員名簿

大学

委員長 宇佐美勉* (名古屋大学)
伊藤義人* (名古屋大学)
北田俊行* (大阪市立大学)
後藤芳顕* (名古屋工業大学)
杉浦邦征* (京都大学)
中島章典* (宇都宮大学)
中村聖三* (長崎大学)
幹事 葛 漢彬* (名古屋大学)

オブザーバー

崎元達郎* (熊本大学)
鈴木森晶 (愛知工業大学)
松村政秀* (大阪市立大学) [平成11年度]
渡辺 浩* (熊本大学)

鉄鋼メーカー

上村明弘 (川崎製鉄) [平成11年度]
大谷 修* (コベルコ科研)
小林洋一* (住友金属工業)
寺田昌弘 (新日本製鐵) [平成9年度]
富永知徳 (新日本製鐵) [平成10, 11年度]
水谷慎吾* (NKK)
安波博道 (新日本製鐵)

重工・橋梁製作メーカー

池田 茂* (住友重機械)
織田博孝* (瀧上工業)
岸田和人* (川崎重工)
吉光友雄 (三菱重工)

コンサルタント

清水忠幸 (長大)
鈴木泰之 (建設技術研究所)
須田隆文* (日本電子計算)
野中哲也* (ヤマト設計)
西森孝三* (総合技術コンサルタント)
劉 銘崇 (日本技術開発)

官公庁

今村幸一 (首都高速道路公団) [平成10, 11年度]
岡本真吾 (名古屋高速道路公社) [平成9年度]
小野 潔 (建設省土木研究所) [平成11年度]
木代 讓 (阪神高速道路公団) [平成9年度]
田嶋仁志 (首都高速道路公団) [平成9年度]
堂上幸男 (福岡北九州高速道路公社) [平成9年度]
徳林宗孝 (阪神高速道路公団) [平成10, 11年度]
前野裕文* (名古屋高速道路公社)
前原健一 (福岡北九州高速道路公社) [平成10年度]
水口和之 (日本道路公団)
村越 潤 (建設省土木研究所) [平成9, 10年度]
村山隆之 (福岡北九州高速道路公社) [平成11年度]

土木学会鋼構造物の耐震検討小委員会委員

(第3,5分科会, JSSC耐震委員会委員を除く)

青木徹彦 (愛知工業大学)
大塚久哲 (九州大学)
酒井正和 (三井造船)
島村和夫 (石川島播磨重工業) [平成9年度]
田中元章 (石川島播磨重工業) [平成10, 11年度]
平山 博 (大日本コンサルタント) [平成9, 10年度]
松田 宏 (日本電子計算)
山口栄輝 (九州工業大学)
吉澤 努 (大日本コンサルタント) [平成11年度]

* : 報告書執筆者

目 次

まえがき

1. 序論	1
1.1 性能設計と耐震設計の高度化	1
1.2 研究目的	2
2. 研究成果概要	4
2.1 鋼橋の耐震設計技術の現状(第3章)	4
2.2 鋼橋の耐震設計法に対する基本的考え方(第4章)	4
2.3 耐震解析法とベンチマーク(第5章)	5
2.4 耐震設計ガイドライン(第6章)	7
2.5 既設鋼製橋脚の耐震補強事例(第7章)	8
3. 鋼橋の耐震設計技術の現状	9
3.1 鋼構造物の崩壊に至るまでの基本挙動	9
3.2 各種基準・指針における耐震設計法の比較	10
3.3 鋼製橋脚の耐震性能レベル	13
3.3.1 鋼製橋脚の変形能に関する研究の現状	13
3.3.2 震度法で設計された鋼製橋脚の耐震性能レベル	14
3.4 まとめ	17
4. 鋼橋の耐震設計法に対する基本的考え方	19
4.1 基本概念	19
4.2 要求性能	19
4.2.1 要求耐震性能マトリックス	19
4.2.2 設計地震動	21
4.3 耐震解析法	22
4.3.1 分類	22
4.3.2 設計段階で用いられる耐震解析法の範囲	22
4.3.3 P- Δ 効果が無視できる範囲	24
4.4 材料定数の設計値と構成則	27
4.4.1 σ - ε モデル(ファイバーモデル)	27
4.4.2 M- Φ モデル	29
4.4.3 H- δ モデル	29
4.5 構造安全性に対する耐震照査法	30
4.5.1 経験式に基づく法	32
4.5.2 静的解析に基づく方法	34
4.5.3 静的/動的解析併用方法	34
4.5.4 動的解析に基づく方法	35
4.6 地震後の使用性に対する耐震照査法	36
4.6.1 残留変位による方法	36
4.6.2 最大応答変位によって照査する方法	37
4.6.3 応答ひずみによって照査する方法	38

4.7	まとめ	39
Appendix 4.1	非線形応答を求めるための経験則	41
(1)	変位照査法 (Displacement-based approach)	41
(2)	保有耐力法 (Force-based approach)	42
(3)	まとめ	45
Appendix 4.2	一自由度系構造物の Pushover 解析と復元力モデルの作成	46
(1)	橋脚のみの Pushover 解析	46
(2)	橋脚・支承一体構造の Pushover 解析	48
(3)	適用例	49
Appendix 4.3	等価 1 自由度系モデルによる多自由度構造物の応答解析	51
(1)	概要	51
(2)	適用例	54
(3)	適用限界	55
Appendix 4.4	破壊基準と有効破壊長	57
(1)	破壊ひずみと有効破壊長	57
(2)	ひずみの大きさ	58
5.	耐震設計法とベンチマーク	63
5.1	耐震解析法の概説	63
5.1.1	概要	63
5.1.2	静的解析	64
5.1.3	静的繰り返し解析	65
5.1.4	応答スペクトル解析	65
5.1.5	時刻歴応答解析	65
5.1.6	材料的非線形解析	66
5.1.7	幾何学的非線形解析	66
5.2	時刻歴応答解析における減衰	68
5.2.1	はじめに	68
5.2.2	比例減衰の設定法	68
5.2.3	異なる減衰マトリックスをもつ系の減衰性能の比較例	70
5.2.4	弾塑性地震応答解析時の減衰の取り扱いについて	73
5.2.5	まとめ	74
5.3	鋼製橋脚	75
5.3.1	鋼材の繰り返し荷重下の材料構成則	75
5.3.2	コンクリートの材料構成則	76
5.3.3	橋脚のモデル化	78
5.3.4	まとめ	80
5.4	鋼製橋脚アンカー部	81
5.4.1	アンカー部の構造	81
5.4.2	震度法レベルでのモデル化	82
5.4.3	アンカー部の終局挙動を考慮した地震時保有水平耐力法に用いるモデル	83
5.4.4	レベル 2 の地震動による動的解析に用いるアンカー部の復元力モデル	86

5.4.5	まとめ	87
5.5	高架橋のモデル化	88
5.5.1	概要	88
5.5.2	支承	88
5.5.3	上部構造	90
5.5.4	耐震連結装置	90
5.5.5	桁間衝突	91
5.5.6	基礎・地盤	91
5.5.7	まとめ	92
5.6	ベンチマーク問題と解析例	93
5.6.1	概要	93
5.6.2	静的解析	93
5.6.3	鋼製橋脚の静的繰り返し解析	132
5.6.4	鋼製橋脚の時刻歴応答解析	141
5.6.5	連続高架橋の時刻歴応答解析	177
5.7	各種解析法の適用限界に対する考察	201
5.7.1	概要	201
5.7.2	微小変位解析の適用限界	203
5.8	まとめ	210
Appendix 5.1	局部座屈を考慮したファイバー要素用復元力モデル	213
Appendix 5.2	コンクリート部分充填鋼製橋脚の 静的繰り返し解析および動的解析	222
6.	耐震設計ガイドライン	232
6.1	設計フロー	232
6.2	単柱式鋼製橋脚の設計法	240
6.2.1	設計方針	240
6.2.2	鋼製橋脚の設計例	243
6.2.3	コンクリートを部分充填した鋼製橋脚の設計事例	262
6.3	ラーメン橋脚の2次設計法	276
6.3.1	設計方針	276
6.3.2	地震時保有水平耐力法を適用する場合の留意点	282
6.3.3	動的解析法を適用する場合の留意点	285
6.3.4	コンクリートを充填した鋼製ラーメン橋脚の設計事例	287
6.4	まとめ	298
Appendix 6.1	単柱鋼製橋脚に関する補足検討	299
7.	既設鋼製橋脚の耐震補強事例	306
7.1	耐震補強要領の比較	306
7.2	補強設計条件	309
7.3	各公団の補強設計要領による試設計	312
7.3.1	首都高速道路公団	312
7.3.2	阪神高速道路公団	317

7.3.3	名古屋高速道路公社	319
7.3.4	福岡北九州高速道路公社	321
7.4	まとめ	323
7.4.1	設計結果のまとめ	323
7.4.2	今後の課題	323
8.	今後の研究課題	329
8.1	設計法に関する課題	329
8.3.1	鋼製橋脚における課題	329
8.3.2	今後の検討が必要な橋梁形式	329
8.3.3	地盤との相互作用に関する課題	330
8.3.4	地震荷重の入力形態に関する課題	330
8.3.5	橋梁の重要度に関する課題	330
8.2	性能評価法に関する課題	331
8.3.1	実験的評価法	331
8.3.2	解析的評価法	331
8.3.3	耐震診断	332
8.3	新技術の適用	332
8.3.1	制震構造	332
8.3.2	新素材，高機能鋼材の活用	333
8.4	その他	333
付録		337
付録 1	用語の定義	337
付録 2	鋼橋の耐震設計のための基礎知識	342
付録 3	「鋼製橋脚の耐震設計に関するアンケート」集計結果	358
付録 4	ベンチマーク問題における各機関の解析手法の概要	378
付録 5	耐震実験手法の標準化	403