

橋の動的耐震設計

目 次

編 動的解析による橋の耐震設計の原則

| | |
|----------------------------------|---|
| 1章 総 則 | 1 |
| 1.1 適用の範囲 | 1 |
| 1.2 用語の定義..... | 1 |
| 2章 耐震設計の原則 | 2 |
| 2.1 一 般..... | 2 |
| 2.2 橋の重要度 | 2 |
| 2.3 設計地震動 | 2 |
| 3章 耐震性能 | 3 |
| 3.1 橋の耐震に関わる基本性能 | 3 |
| 3.2 性能水準の設定 | 3 |
| 3.3 基本性能と性能水準 | 4 |
| 3.4 基本性能と限界状態 | 4 |
| 3.4.1 構造安全性能と限界状態 | 4 |
| 3.4.2 地震後の使用性能と限界状態 | 4 |
| 4章 動的解析による耐震性能照査の基本 | 6 |
| 4.1 一 般..... | 6 |
| 4.2 耐震性能照査の基本 | 6 |

編 動的解析による橋の耐震設計

| | |
|-----------------------|----|
| 1章 総 則 | 11 |
| 2章 地震の影響 | 11 |
| 2.1 一 般..... | 11 |
| 2.2 設計地震動 | 11 |

| | | |
|-----------|--------------------|-----------|
| 2.3 | 設計地震動の設定方向 | 13 |
| 2.3.1 | 一般 | 13 |
| 2.3.2 | 基盤面 | 15 |
| 2.4 | 土圧の影響 | 16 |
| 2.5 | 水圧の影響 | 16 |
| 3章 | 材料の設計用値 | 18 |
| 3.1 | 一般 | 18 |
| 3.2 | コンクリート | 18 |
| 3.3 | 鋼材 | 20 |
| 3.4 | 地盤 | 24 |
| 4章 | 応答解析 | 25 |
| 4.1 | 一般 | 25 |
| 4.2 | 解析手法の選定 | 25 |
| 4.3 | 構造モデル | 28 |
| 4.4 | 減衰の設定 | 29 |
| 4.5 | 部材の力学モデル | 31 |
| 4.5.1 | コンクリート部材 | 31 |
| 4.5.2 | 鋼部材 | 35 |
| 4.5.3 | 支承・落橋防止構造 | 36 |
| 4.6 | 地盤および基礎のモデル | 37 |
| 4.6.1 | 一般 | 37 |
| 4.6.2 | 地盤・構造全体モデル | 38 |
| 4.6.3 | 地盤・基礎の集約ばねモデル | 38 |
| 5章 | 性能水準の照査方法 | 40 |
| 5.1 | 一般 | 40 |
| 5.2 | 橋全体系の照査 | 40 |
| 6章 | 上部構造の健全度の照査 | 47 |
| 6.1 | 一般 | 47 |
| 6.2 | コンクリート部材 | 47 |
| 6.3 | 鋼部材 | 51 |
| 7章 | 橋脚躯体の健全度の照査 | 52 |
| 7.1 | 一般 | 52 |
| 7.2 | コンクリート部材 | 52 |

| | | |
|------------|--------------------------------|-----------|
| 7.2.1 | 健全度レベル1に対する照査 | 52 |
| 7.2.2 | 健全度レベル2, 3に対する照査 | 53 |
| 7.2.3 | 健全度レベル4に対する照査 | 55 |
| 7.3 | 鋼部材 | 55 |
| 7.3.1 | 健全度レベル1 | 55 |
| 7.3.2 | 健全度レベル2及び健全度レベル3 | 56 |
| 8章 | 基礎構造の健全度の照査 | 57 |
| 9章 | 支承・伸縮装置および落橋防止構造の健全度の照査 | 59 |
| 9.1 | 一般 | 59 |
| 9.2 | 支承 | 60 |
| 9.3 | 伸縮装置 | 60 |
| 9.4 | 落橋防止構造 | 61 |
| 10章 | 免震橋の健全度の照査 | 61 |
| 10.1 | 一般 | 61 |
| 10.2 | 免震装置 | 62 |
| 10.3 | 伸縮装置 | 63 |
| 10.4 | 落橋防止装置 | 63 |
| 10.5 | 上部構造 | 63 |
| 10.6 | 橋脚躯体 | 63 |
| 10.7 | 基礎構造 | 66 |
| 10.8 | 地盤 | 66 |
| 10.9 | 制震構造 | 67 |

| |
|-----------------|
| 編 動的解析法に関する参考資料 |
|-----------------|

| | | |
|-----------|------------------------|-----------|
| 1章 | 動的解析用入力地震動の設定方法 | 69 |
| 1.1 | 震源断層を想定した地震動の設定 | 69 |
| 1.1.1 | 理論的手法 | 69 |
| 1.1.2 | 半経験的手法 | 70 |
| 1.1.3 | 経験的手法 | 73 |
| 1.2 | 地震動の設定における不確定性の取扱い | 77 |
| 1.2.1 | 感度解析 | 77 |
| 1.2.2 | 非正常性の影響 | 78 |

| | | |
|-----------|-------------------------------|------------|
| 1.2.3 | 確率論的地震危険度解析 | 78 |
| 1.3 | やや長周期帯域を考慮した地震動の設定 | 81 |
| 1.4 | 各種構造物の設指針等で用いられているレベル2地震動の基盤波 | 82 |
| 2章 | 地盤と構造物との動的相互作用 | 88 |
| 2.1 | 地盤との動的相互作用の概要 | 88 |
| 2.1.1 | 一般 | 88 |
| 2.1.2 | 地盤との動的相互作用を考慮する必要性 | 90 |
| 2.1.3 | 基準類における地盤との動的相互作用の扱い | 93 |
| 2.2 | 解析方法の分類と概要 | 95 |
| 2.3 | 表層地盤の動的解析 | 98 |
| 2.3.1 | 解析法とモデル化 | 98 |
| 2.3.2 | 必要な土質定数と土質試験 | 103 |
| 2.3.3 | 土質定数の設定に際しての留意事項 | 106 |
| 2.4 | 動的解析における基礎のモデル化 | 109 |
| 2.4.1 | 各基礎形式の特徴と留意点 | 109 |
| 2.4.2 | 基礎のモデル化 | 110 |
| 2.4.3 | 基礎のモデル化に際しての留意事項 | 118 |
| 2.4.4 | 基礎構造物の耐震性能照査に関する参考事例 | 119 |
| 2.5 | 異なる基礎のモデル化による解析事例 | 124 |
| 2.5.1 | 検討概要 | 124 |
| 2.5.2 | 対象構造，地盤条件および地盤の地震応答解析 | 124 |
| 2.5.3 | 集約ばねモデルによる検討 | 128 |
| 2.5.4 | 2次元骨組モデルによる検討 | 131 |
| 2.5.5 | 2次元FEMによる検討 | 133 |
| 2.5.6 | 各解析法の結果の比較 | 133 |
| 2.6 | 地盤種別が異なる地盤を跨ぐ連続橋の動的挙動 | 140 |
| 2.6.1 | 検討概要 | 140 |
| 2.6.2 | 解析条件 | 141 |
| 2.6.3 | 地盤の地震応答解析 | 142 |
| 2.6.4 | 橋梁の動的解析 | 143 |
| 3章 | 連続鋼桁免震橋の動的解析 | 147 |
| 3.1 | 序論 | 147 |
| 3.2 | 検討概要 | 147 |

| | | |
|-----------|---------------------------------------|------------|
| 3.2.1 | 検討対象構造の概要 | 147 |
| 3.2.2 | 検討条件 | 149 |
| 3.3 | 解析モデルおよび解析結果 | 150 |
| 3.3.1 | レベル2地震動を対象とした検討 | 150 |
| 3.3.2 | レベル1地震動を対象とした検討 | 154 |
| 3.4 | 検討結果 | 157 |
| 3.4.1 | レベル2地震動を対象とした最適柱断面の検討結果 | 157 |
| 3.4.2 | レベル1地震動に対する耐震性能照査結果 | 157 |
| 3.5 | まとめ | 161 |
| 4章 | コンクリート橋の検討項目 | 162 |
| 4.1 | 過強度曲げ耐力が応答せん断力に与える影響（PC連続ラーメン橋） | 162 |
| 4.1.1 | はじめに | 162 |
| 4.1.2 | 検討対象橋梁および解析モデル | 162 |
| 4.1.3 | 橋脚の過強度曲げ耐力と応答せん断力 | 164 |
| 4.1.4 | まとめ | 169 |
| 4.2 | 上部構造端部と橋台との衝突が耐震性能に与える影響（PC連続ラ - メン橋） | 170 |
| 4.2.1 | はじめに | 170 |
| 4.2.2 | 検討対象橋梁および解析モデル | 170 |
| 4.2.3 | 上部構造端部が橋台と衝突する場合の動的応答 | 172 |
| 4.2.4 | 遊間の設定と耐震性能 | 173 |
| 4.2.5 | まとめ | 178 |
| 4.3 | 解析モデルの違いが応答値へ及ぼす影響（上路アーチ橋） | 179 |
| 4.3.1 | はじめに | 179 |
| 4.3.2 | 解析モデル | 179 |
| 4.3.3 | 固有値解析結果 | 180 |
| 4.3.4 | 橋軸方向の解析結果 | 181 |
| 4.3.5 | 橋軸直角方向の解析結果 | 183 |
| 4.3.6 | まとめ | 184 |
| 4.4 | 減衰マトリックスの違いが非線形応答に与える影響（PC斜張橋） | 185 |
| 4.4.1 | はじめに | 185 |
| 4.4.2 | 減衰について | 185 |
| 4.4.3 | 検討結果 | 186 |
| 4.5 | 解析モデルの相違による検討（エクストラードード橋） | 188 |

| | | |
|-----------|-----------------------------|------------|
| 4.5.1 | はじめに | 188 |
| 4.5.2 | 検討対象橋梁 | 188 |
| 4.5.3 | 解析モデルおよび検討ケース | 188 |
| 4.5.4 | 照査結果の比較 | 189 |
| 4.5.4 | まとめ | 193 |
| 5章 | 鋼橋の検討 | 194 |
| 5.1 | ラーメン橋における残留変位の検討 | 194 |
| 5.1.1 | はじめに | 194 |
| 5.1.2 | 解析モデル | 194 |
| 5.1.3 | 照査方法 | 195 |
| 5.1.4 | 照査結果 | 195 |
| 5.1.5 | 考察及び結論 | 197 |
| 5.2 | 中路アーチにおける橋解析モデルの違いが応答に及ぼす影響 | 197 |
| 5.2.1 | 概要 | 197 |
| 5.2.2 | 動的解析における解析モデルの影響比較 | 197 |
| 5.2.3 | まとめ | 199 |
| 5.3 | 上路アーチ橋における幾何学的非線形性の影響 | 199 |
| 5.3.1 | 概要 | 199 |
| 5.3.2 | 活荷重による幾何学的非線形性の影響（静的解析） | 200 |
| 5.3.3 | 初期軸力が固有振動数に与える影響 | 200 |
| 5.3.4 | 動的解析における幾何学的非線形性の影響 | 200 |
| 5.3.5 | 結論 | 201 |
| 5.4 | 上路アーチ橋における床版のモデル化に関する検討 | 202 |
| 5.4.1 | 概要 | 202 |
| 5.4.2 | 構造モデル | 202 |
| 5.4.3 | 非線形性の考慮 | 203 |
| 5.4.4 | 従来モデル化との比較 | 204 |
| 5.4.5 | 結論 | 204 |
| 5.5 | 水管橋の通水機能確保に関する検討 | 206 |
| 5.5.1 | 検討概要 | 206 |
| 5.5.2 | 解析モデル | 206 |
| 5.5.3 | 解析条件 | 206 |
| 5.5.4 | 解析結果 | 207 |

| | | |
|-------|--------------------------------|-----|
| 5.5.5 | まとめ | 208 |
| 5.6 | 斜張橋における軸力変動と曲げモーメント相関の影響に関する検討 | 209 |
| 5.6.1 | 概要 | 209 |
| 5.6.2 | 解析モデルと解析条件 | 209 |
| 5.6.3 | 3断面力(M-M-N)の相関を考慮した降伏曲面の定義 | 210 |
| 5.6.4 | 解析結果 | 211 |
| 5.6.5 | まとめ | 212 |
| 5.7 | 吊橋における解析手法の影響 | 213 |
| 5.7.1 | 検討概要 | 213 |
| 5.7.2 | 検討内容 | 213 |
| 5.7.3 | モデル化の違いによる固有値への影響 | 214 |
| 5.7.4 | 動的解析における幾何学的非線形性の影響 | 214 |
| 5.7.5 | 結論 | 214 |

| |
|-------------------|
| 編 動的解析による橋梁の耐震設計例 |
|-------------------|

| | | |
|-----------|------------------------|-----|
| 1章 | 設計地震動の作成例 | 215 |
| 1.1 | 概要 | 215 |
| 1.2 | 計算方法 | 215 |
| 1.2.1 | 経験的手法(翠川・小林手法) | 215 |
| 1.2.2 | 理論的手法(ハイブリッド手法) | 216 |
| 1.2.3 | 半経験的手法(経験的グリーン関数法) | 217 |
| 1.3 | 計算条件 | 217 |
| 1.3.1 | 断層モデル諸元 | 217 |
| 1.3.2 | 地盤条件 | 220 |
| 1.3.3 | その他の条件 | 221 |
| 1.4 | 計算結果 | 222 |
| 2章 | PC連続ラーメン橋の耐震設計例 | 229 |
| 2.1 | 概要 | 229 |
| 2.2 | 設計対象橋梁 | 229 |
| 2.3 | 設計条件 | 231 |
| 2.3.1 | 性能水準および限界状態 | 231 |

| | | |
|-----------|----------------------|------------|
| 2.3.2 | 設計地震動 | 231 |
| 2.3.3 | 地震時動水圧の影響 | 231 |
| 2.4 | レベル1地震動に対する性能水準1の照査 | 232 |
| 2.4.1 | 解析モデル | 232 |
| 2.4.2 | 固有値解析結果 | 233 |
| 2.4.3 | 応答スペクトル法による動的解析結果 | 234 |
| 2.4.4 | 橋脚躯体の健全度レベル1の照査 | 236 |
| 2.4.5 | 上部構造の健全度レベル1の照査 | 237 |
| 2.5 | レベル2地震動に対する性能水準2の照査 | 238 |
| 2.5.1 | 解析モデル | 238 |
| 2.5.2 | 固有値解析結果 | 241 |
| 2.5.3 | 非線形時刻歴応答解析法による動的解析結果 | 242 |
| 2.5.4 | 橋脚躯体の健全度レベル2の照査 | 244 |
| 2.5.5 | 上部構造の健全度レベル2の照査 | 246 |
| 2.6 | 今後の課題 | 249 |
| 3章 | コンクリートアーチ橋 | 250 |
| 3.1 | 対象橋梁の概要 | 250 |
| 3.2 | 解析条件 | 251 |
| 3.3 | 固有値解析結果 | 253 |
| 3.4 | 性能水準1の照査 | 254 |
| 3.4.1 | 設計断面力の算出 | 254 |
| 3.4.2 | 性能水準1の照査 | 255 |
| 3.5 | 性能水準2の照査 | 256 |
| 3.5.1 | 性能水準2の照査レベル | 256 |
| 3.5.2 | 非線形時刻歴応答解析結果 | 256 |
| 3.5.3 | 曲げに対する照査 | 259 |
| 3.5.4 | せん断力、ねじりモーメントの照査 | 260 |
| 3.5.5 | 残留変位の照査 | 261 |
| 4章 | PC斜張橋 | 262 |
| 4.1 | 解析対象橋梁 | 262 |
| 4.2 | 解析モデルと解析条件 | 262 |
| 4.2.1 | 解析モデル | 262 |
| 4.2.2 | 解析条件 | 263 |

| | | |
|----------|-------------------------|------------|
| 4.3 | 固有値解析 | 264 |
| 4.4 | 応答解析結果 | 267 |
| 4.5 | 部材の健全度の照査 | 268 |
| 4.5.1 | 上部構造の照査（健全度レベル2） | 268 |
| 4.5.2 | 主塔および橋脚の照査（健全度レベル2） | 268 |
| 4.6 | 考 察 | 270 |
| 5 | PCエクストラードズ橋の耐震設計 | 271 |
| 5.1 | 概 要 | 271 |
| 5.2 | 設計対象橋梁 | 271 |
| 5.3 | 耐震設計条件 | 272 |
| 5.4 | レベル1地震動に対する性能水準1の照査 | 273 |
| 5.4.1 | 解析モデルおよび固有振動解析の結果 | 273 |
| 5.4.2 | 各部材の照査 | 274 |
| 5.5 | レベル2地震動に対する性能水準2の照査 | 275 |
| 5.5.1 | 解析モデル | 275 |
| 5.5.2 | 固有値解析 | 275 |
| 5.5.3 | 橋軸方向に対する健全度の照査 | 276 |
| 5.5.4 | 橋軸直角方向の健全度の照査 | 279 |
| 6 | PRC連続ラーメン橋 | 282 |
| 6.1 | 概 要 | 282 |
| 6.2 | 基本条件 | 284 |
| 6.3 | 解析モデル | 285 |
| 6.4 | 固有値解析 | 286 |
| 6.5 | 動的解析による性能水準2の照査 | 289 |
| 6.5.1 | 下部構造の健全度レベル2の照査 | 289 |
| 6.5.2 | 上部構造の健全度レベル2の照査 | 291 |
| 7 | 鋼ラーメン橋 | 294 |
| 7.1 | 概 要 | 294 |
| 7.2 | 設計条件 | 296 |
| 7.3 | 解析モデル | 297 |
| 7.3.1 | モデル化上の留意点 | 297 |
| 7.3.2 | 解析手法 | 298 |
| 7.3.3 | 部材のモデル化 | 298 |

| | | |
|-----------|---------------------|------------|
| 7.3.4 | 減衰特性 | 302 |
| 7.3.5 | 初期断面力 | 302 |
| 7.4 | 固有値解析 | 302 |
| 7.5 | レベル2地震動に対する性能水準2の照査 | 305 |
| 7.5.1 | 上部構造の健全度レベルの照査 | 305 |
| 7.5.2 | 下部構造の健全度レベルの照査 | 306 |
| 7.5.3 | 橋全体としての耐震照査 | 309 |
| 7.5.4 | 今後の課題 | 309 |
| 8章 | 上路式鋼アーチ橋 | 311 |
| 8.1 | モデル橋の概要 | 311 |
| 8.1.1 | 設計条件 | 311 |
| 8.1.2 | 橋の重要度と性能水準 | 311 |
| 8.2 | 耐震設計方針 | 312 |
| 8.3 | 解析モデルの検討 | 313 |
| 8.3.1 | 解析モデル | 313 |
| 8.3.2 | 床版モデル | 313 |
| 8.3.3 | 非線形モデル(材料構成則) | 313 |
| 8.3.4 | 解析ケース | 313 |
| 8.4 | 断面諸量 | 314 |
| 8.5 | 減衰 | 315 |
| 8.6 | 線形応答解析 | 316 |
| 8.6.1 | 解析方法 | 316 |
| 8.6.2 | 固有値解析及びRayleigh減衰 | 316 |
| 8.6.3 | 入力地震動 | 317 |
| 8.6.4 | 解析結果 | 317 |
| 8.7 | 非線形動的解析 | 318 |
| 8.7.1 | 解析方法 | 318 |
| 8.7.2 | 固有値解析 | 318 |
| 8.7.3 | 入力地震動 | 319 |
| 8.7.4 | 解析結果 | 319 |
| 8.7.5 | 照査結果 | 321 |
| 8.8 | 考察 | 322 |
| 9章 | 中路式鋼アーチ橋 | 324 |

| | | |
|------------|----------------------|------------|
| 9.1 | モデル橋の概要 | 324 |
| 9.1.1 | 設計条件 | 324 |
| 9.1.2 | 橋の重要度と性能水準 | 324 |
| 9.2 | 解析モデルの検討 | 325 |
| 9.2.1 | 解析モデル | 325 |
| 9.2.2 | 非線形モデル（材料構成則） | 325 |
| 9.2.3 | 幾何学的非線形について | 325 |
| 9.3 | 断面諸量 | 326 |
| 9.4 | 減衰 | 326 |
| 9.5 | 線形動的解析 | 326 |
| 9.5.1 | 解析方法 | 326 |
| 9.5.2 | 入力地震動 | 327 |
| 9.5.3 | 解析結果 | 327 |
| 9.6 | 非線形動的解析 | 328 |
| 9.6.1 | 解析方法 | 328 |
| 9.6.2 | 固有値解析 | 328 |
| 9.6.3 | 入力地震動 | 329 |
| 9.6.4 | 解析結果 | 330 |
| 9.7 | 照査結果 | 330 |
| 9.7.1 | アーチリブ部材の健全度レベルの照査 | 331 |
| 9.7.2 | 補剛桁部材の健全度レベルの照査 | 331 |
| 9.8 | 考察 | 331 |
| 10章 | ランガー形式水管橋 | 333 |
| 10.1 | モデル橋の概要 | 333 |
| 10.1.1 | 設計条件 | 333 |
| 10.1.2 | 橋の重要度と性能水準 | 333 |
| 10.2 | 耐震設計方針 | 333 |
| 10.3 | 解析モデルの検討 | 334 |
| 10.3.1 | 解析モデル | 334 |
| 10.3.2 | 非線形モデル（材料構成則） | 335 |
| 10.4 | 減衰 | 335 |
| 10.5 | 非線形応答解析 | 335 |
| 10.5.1 | 固有値解析および Rayleigh 減衰 | 335 |

| | | |
|------------|----------------------|------------|
| 10.5.2 | 入力地震動 | 336 |
| 10.5.3 | 解析結果 | 336 |
| 10.6 | 照査結果 | 339 |
| 10.7 | 考 察 | 339 |
| 11章 | 鋼斜張橋 | 340 |
| 11.1 | モデル橋の概要 | 340 |
| 11.1.1 | 設計条件 | 340 |
| 11.1.2 | 橋の重要度と性能水準 | 340 |
| 11.2 | 解析モデル | 340 |
| 11.2.1 | 全体系解析モデル | 340 |
| 11.2.2 | 基礎のモデル化 | 342 |
| 11.2.3 | 非線形モデル | 342 |
| 11.3 | 非線形応答解析 | 342 |
| 11.3.1 | 固有値解析および Rayleigh 減衰 | 342 |
| 11.3.2 | 入力地震動 | 344 |
| 11.3.3 | 解析結果 | 344 |
| 11.4 | まとめ | 349 |
| 12章 | 吊 橋 | 350 |
| 12.1 | モデル橋の概要 | 350 |
| 12.2 | 設計条件 | 350 |
| 12.2.1 | 基本諸元 | 350 |
| 12.2.2 | 橋の重要度と性能水準 | 351 |
| 12.2.3 | 設計地震動 | 351 |
| 12.3 | 解析モデル | 352 |
| 12.3.1 | 解析手法 | 352 |
| 12.3.2 | モデル化 | 352 |
| 12.3.3 | 減衰特性 | 354 |
| 12.4 | 固有振動特性 | 354 |
| 12.4.1 | 固有値解析結果 | 354 |
| 12.4.2 | Rayleigh 減衰 | 355 |
| 12.5 | 動的解析による照査 | 355 |
| 12.5.1 | 時刻歴応答解析結果 | 355 |
| 12.5.2 | 性能水準 1 に対する照査 | 356 |

| | | |
|------------|-----------------------|------------|
| 12.6 | まとめ | 358 |
| 13章 | 免震支承を用いたTラーメン橋 | 359 |
| 13.1 | 設計条件 | 359 |
| 13.2 | 免震支承の設計 | 365 |
| 13.3 | 性能水準1に対する照査 | 365 |
| 13.4 | 性能水準2に対する照査 | 367 |
| 13.4.1 | 解析手法と解析モデル | 367 |
| 13.4.2 | 部材のモデル | 367 |
| 13.4.3 | 減衰および固有値解析 | 368 |
| 13.4.4 | 設計地震動 | 371 |
| 13.4.5 | 解析結果 | 371 |
| 13.4.6 | 橋脚躯体の健全度レベル2の照査 | 373 |
| 13.4.7 | 上部構造の健全度レベル1の照査 | 374 |
| 13.4.8 | 免震支承の健全度レベル1の照査 | 375 |
| 13.5 | 支承構造の違いによる支承変位の比較 | 376 |