

PC連続ラーメン箱桁橋の動的解析による 大規模地震時耐震性能照査について

青木 圭一¹・長谷 俊彦²・清水 敬司³・梅本 和裕⁴・堀尾 哲也⁵

¹正会員 日本道路公団 静岡建設局建設部構造技術課（〒420-0857静岡県静岡市御幸町11-30）

²正会員 日本道路公団 静岡建設局建設部構造技術課（〒420-0857静岡県静岡市御幸町11-30）

³日本道路公団 静岡建設局静岡工事事務所（〒420-0804静岡県静岡市竜南町1丁目26番20号）

⁴第二東名高速道路 長尾川橋（PC上部工）上り線工事共同企業体（〒450-0002静岡県静岡市長尾418）

⁵第二東名高速道路 長尾川橋（PC上部工）上り線工事共同企業体（〒450-0002静岡県静岡市長尾418）

1. はじめに

平成14年3月に道路橋示方書V耐震設計編が改訂され、PC連続ラーメン箱桁橋の大規模地震時における耐震性能については、上部工と下部工が剛結合されていることから上部工の限界状態については基本的には主たる塑性化は橋脚に考慮するものとした上で、副次的な塑性化にとどまる限界の状態として性能規定化されている。そこで、上部工の副次的な塑性化については、交番載荷実験に基づくPC箱桁の復元力特性に関する研究結果⁵⁾によれば、塑性率2～3程度では、残留ひび割れは殆ど生じておらず、供用性、耐久性及び外観の観点からも恒久復旧を行わずとも長期的に供用性を維持できるとみなせる限界状態状態以下であると判断できるとしている。

耐震設計時の橋軸方向照査における応答曲げモーメントに対する許容曲率は、右記の通りで定められている。

①引張側に緊張したPC鋼材を配置している場合は
PC鋼材が弾性限界に達する曲率

②引張側に緊張したPC鋼材を配置していない場合は
最外縁鉄筋が降伏点に達する曲率

これまでPC上部工の耐震設計においては、地震時の応答断面力が初降伏モーメントを超えないことが望ましいとされてきており、特にPC連続ラーメン箱桁構造の上部工形式については、PC全外ケーブル構造を採用した場合に橋軸方向の最外縁鉄筋を降伏させないように、耐震性能照査で、大幅な鉄筋量が増加する傾向が見られた。

そこで、本検討の耐震性能照査では、レベル2地震時の耐震性能照査において、PC上部工の副次的な塑性化を最外縁鉄筋が降伏ひずみの3倍に達する応答曲率とした照査を行い、これまでの初降伏モーメントを超えないとした場合との比較した結果について報告するものである。

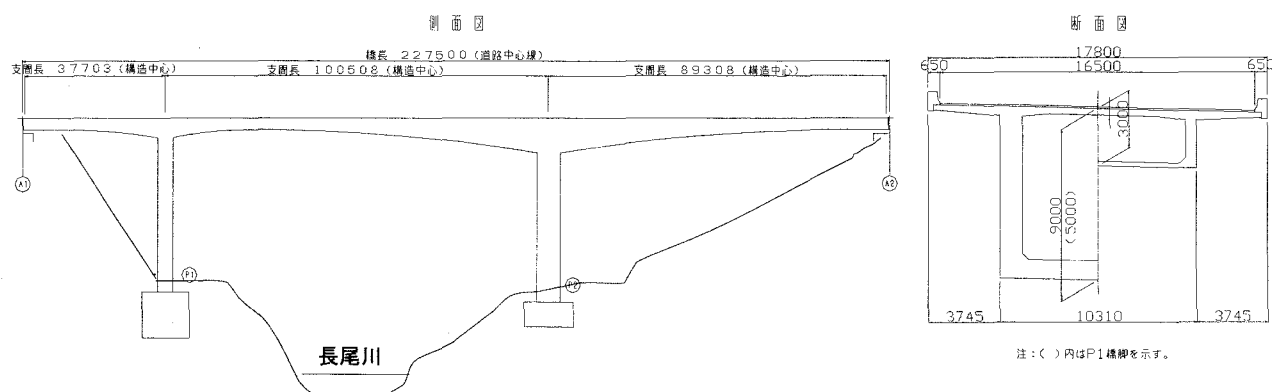


図-1 検討対象橋梁

2. 検討対象橋梁

解析対象橋梁を図－1に示す。

本検討を実施したのは、現在、建設中の第二東名高速道路長尾川橋（上り線）で、有効幅員16.5mを1室箱桁で断面構成された片持張出架設工法のPC3径間連続ラーメン箱桁橋である。

設計条件は、以下の通りである。

構造形式 : PC3径間連続ラーメン箱桁橋
道路規格 : 第1種 第1級 A規格
橋長 : 227.500m
支間長 : 37.703m+100.508m+89.308m
全幅員 : 17.800m
活荷重 : B活荷重
地盤種別 : I種地盤
地域区分 : A地域
重要度区分 : B種の橋

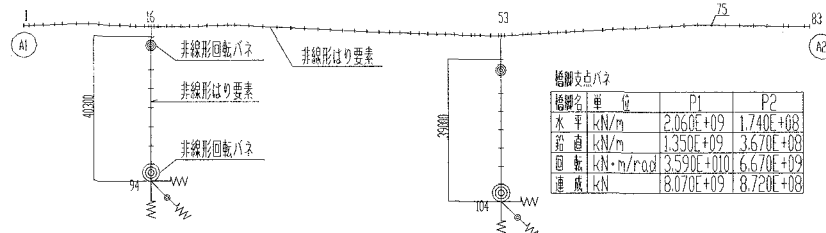
3. 解析手法および解析モデル

（1）解析手法

非線形動的解析手法としては、Newmark- β 法による直接積分法を採用した。また、入力地震動の時間ステップは、収束性を考慮して0.002秒とした。また、過去の事例等⁷⁾も参考にして、橋脚の軸力変動の影響は小さいと判断し、本解析では考慮しなかった。ねじりモーメントについては、直橋の連続ラーメン橋の場合は変形適合ねじりであると判断できること、および供用中に発生する確率は低い大きな強度を持つ地震動のような大きな外力に対しては、斜めひび割れが発生し、部材に作用するねじりモーメントが小さくなると判断して、ねじり剛性は全断面有効剛性の1/20として解析した⁸⁾。

（2）解析モデル

解析モデルは、橋梁全体を図－2に示すように橋軸方向、橋軸直角方向ともに橋梁全体をモデル化した。また、塑性ヒンジの発生する場所、すなわち橋軸方向に対して橋脚上下端、橋軸直角方向に対しては橋脚下端に、非線形バネを導入した。



図－2 解析モデル

さらに、塑性ヒンジ領域以外の橋脚は非線形はり要素としてモデル化した。

（3）部材モデル

a) 橋脚のモデル化

柱部材の非線形特性をM- ϕ 関係で表し、ひび割れ時、降伏時、終局時の3点で決められるトリリニア型の骨格曲線とした。また、履歴特性モデルとしては、剛性低下型トリリニアモデル（武田型）とした。

b) 上部構造のモデル化

上部構造のモデル化は、以下のようにモデル化した。

① 応力-ひずみ関係

「道示V」の応力-ひずみ曲線を使用した。ただし、コンクリートの引張応力度は、「コンクリート標準示方書」に示される曲げ強度 f_{bk} に対して、部材寸法を考慮した f_{dc} とし、コンクリートのひび割れ後は無視することとした。また、上部構造は横拘束筋の拘束効果が橋脚のように期待できないので無視した。

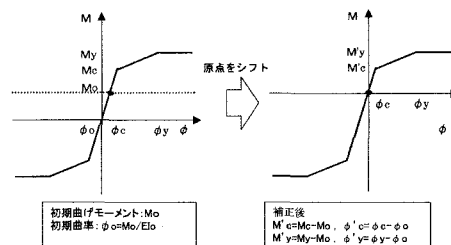
② M- ϕ 関係

上部構造の非線形特性をM- ϕ 関係で表し、上部構造の履歴特性モデルは、ひびわれ・初降伏・終局を結ぶトリリニア型の骨格線を有する非線形弾性モデルとした。

図－3にモデル図を示す。

（4）減衰特性

上部構造の減衰定数は非線形弾性モデルのため履歴減衰を考慮しないことから5%とし、橋脚の減衰定数は武田モデルより履歴減衰を考慮することから2%とした。また、動的解析では主要な振動モードに着目できるようRayleigh減衰を算定した。



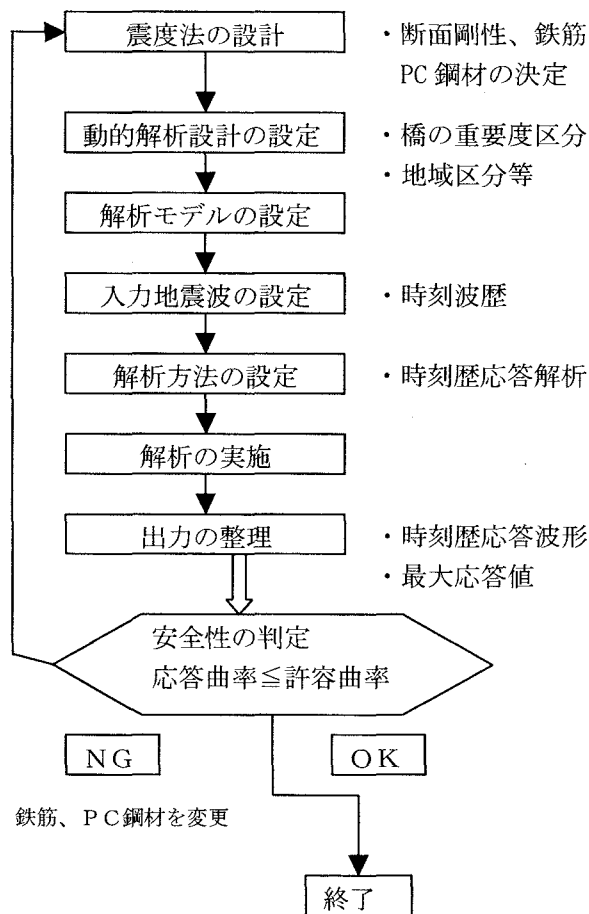
図－3 上部工の非線形性モデル

（５）入力地震波

今回用いた入力地震動はタイプⅠでは、1983年宮城県沖地震（２波）および北海道南西沖地震（１波）、タイプⅡでは1995年兵庫県南部地震（３波）の記録を用いた。本設計においては、タイプⅠ・タイプⅡそれぞれの３波入力地震の応答値の平均値を用いて照査を行った。

（６）上部構造照査の手順

図－４に上部構造の照査手順を示す。

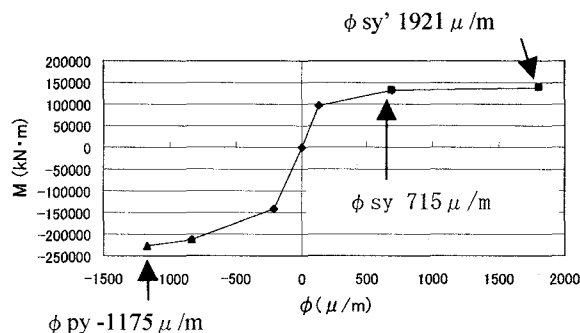


図－４ 上部構造の照査手順

（７）上部構造のM－φ 関係

上部構造の各部材はり要素においては、各部材断面諸数値より、各部材のM－φ 曲線を求めその結果を用いて解析を行った。

図－５および表－１に端支点付近のM－φ 関係を示す。この部材（75部材）での鉄筋の降伏ひずみが3倍に達する許容曲率φ sy' は、鉄筋の降伏ひずみに達する許容曲率φ sy の2.7倍(1921 μ/m/715 μ/m)となった。



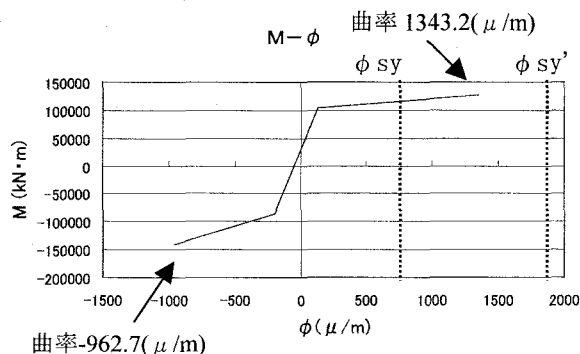
図－５ 曲げモーメントと曲率(部材番号75)

表－１ 曲げモーメントと曲率(部材番号75)

鉄筋が降伏点に達する曲げモーメント(kN・m)と曲率(μ/m)

	Mc	φ c	Msy	φ sy	Mpy	φ py	Msy'	φ sy'
+	103372	125	114530	715	0	0	118047	1921
-	-84945	-202	-138430	-866	-147571	-1244	-147571	-1175

注：Mc、Msy、Mpy、Msy' はひび割れ、鉄筋の降伏ひずみ、PC弾性限界、鉄筋の降伏ひずみ3倍の曲げモーメントを示す。φ c、φ sy、φ py、φ sy' はひび割れ、鉄筋の降伏ひずみ、PC弾性限界、鉄筋の降伏点ひずみ3倍の曲率を示す。



図－６ 応答曲率

４．解析結果

解析結果は、図－７着色部、部材番号75に特定して述べることにする。

（１）応答曲率

応答曲率結果を図－６に示す。

最大応答曲率φ maxは、鉄筋の降伏ひずみに対する曲率φ sy を越えるが鉄筋の降伏ひずみが3倍に達する許容曲率φ sy' 以下であり、本設計で規定した耐震性能2の条件を満足する。

（２）上部工の鉄筋補強

震度法で決定された鉄筋量について非線形動的解析を実施し、耐震性能照査を行った結果を図－７に示す。鉄筋の降伏ひずみ3倍に達する許容曲率を応答曲率が越える部材は、2つの部材76・77部材となる。震度法に対する鉄筋の増加量は約1tであり、鉄筋量の増加は少ない。

本結果を比較する目的で、従来の鉄筋の降伏ひずみに達する曲率を許容曲率とした場合の結果を求め、

図－８に示す．応答曲率がこの許容曲率を越える部材は18-26・33-34・75-79部材であり，震度法で求めた鉄筋量に対し50 tの鉄筋量を増加する必要がある．しかし，図－８に示すように端支点付近にてD25ctc125mm(SD345)を配置しても，応答曲率は許容曲率以下にならない為SD390にランクアップする必要がある．

橋軸直角方向は，最外縁鉄筋が降伏点に達する曲率以下で耐震性能2の条件を満足する結果になった．

5. まとめ

今回，第二東名高速道路長尾川橋（上り線）におけるPC連続ラーメン箱桁橋の耐震性能照査において最新の知見を踏まえ，最外縁鉄筋のひずみが降伏ひずみの3倍に達する曲率まで許容することで，主げたの動的解析に起因する副次的な塑性化を考慮した場合の比較を行った．

解析モデルは非線形はり要素とし，上部構造の履歴特性は弾性型トリリニアモデルを適用した．その結果，従来の上部構造の塑性化を許容しない設計法による大規模地震時の鉄筋補強量に対して，約1/50の程度の補強量となり，より合理的な耐震設計が可能になることが確認された．

<参考文献>

1) 日本道路公団：設計要領第二集，平成15年5月

2) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，平成14年3月

3) （社）プレストレストコンクリート技術協会：PC構造物耐震設計基準（案），平成11年12月

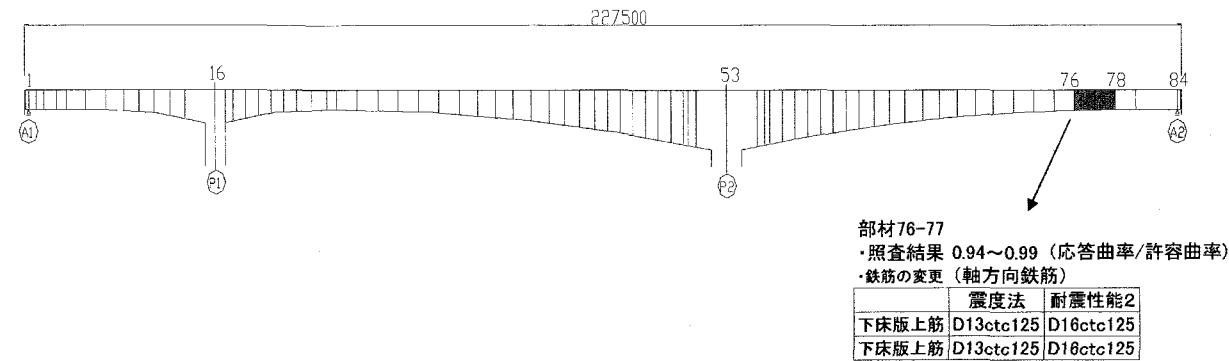
4) （社）プレストレストコンクリート技術協会：プレストレストコンクリート橋脚の耐震設計ガイドライン，平成11年11月

5) 大塚久哲・岡田稔紀・角本周・堤忠彦：PC箱桁の復元力特性に関する交番載荷実験，プレストレストコンクリートVol.42，No.2，2000年3月

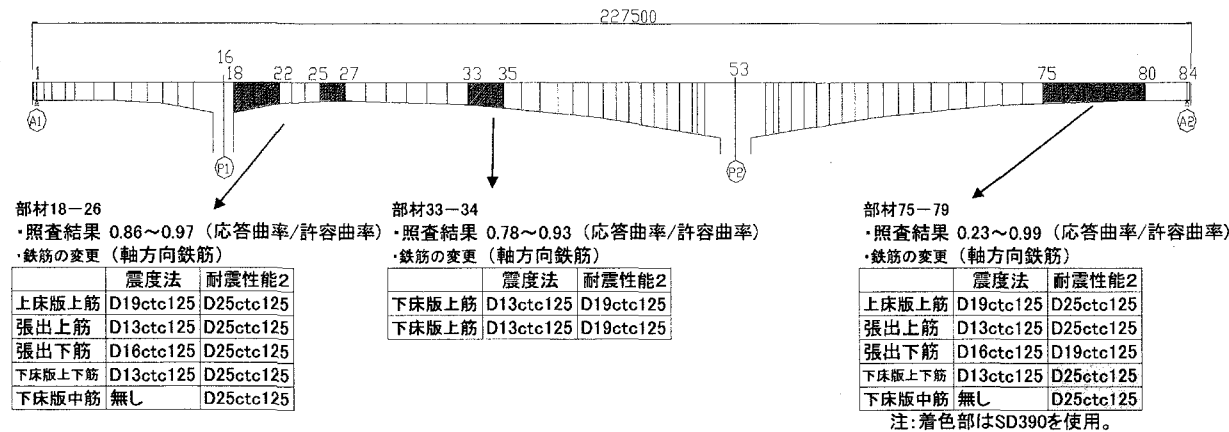
6) 大塚久哲・岡田稔紀・矢葦亘・角本周・堤忠彦：PC箱桁の復元力特性に関する交番載荷実験，プレストレストコンクリートVol.43，No.2，2001年3月

7) （社）日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料－PCラーメン橋・RCアーチ橋・PC斜張橋・地中連続壁基礎・深礎基礎等の耐震設計計算例－，1998

8) （社）土木学会地震工学委員会：橋梁の耐震設計法に関する講習会－海外から見た日本の耐震設計法－，1998



図－7 最外縁鉄筋のひずみが降伏ひずみの3倍に達する曲率を許容曲率とした場合の検討結果



図－8 最外縁鉄筋が降伏点に達する曲率を許容曲率とした場合の検討結果