

港大橋アプローチ耐震補強の設計

DESIGN ON SEISMIC RETROFIT OF THE MINATO BRIDGE APPROACH

岡田 昌樹¹⁾

Masaki Okada

西田 晃久¹⁾

Akihisa Nishida

1. まえがき

1995年の兵庫県南部地震以降、内陸直下型の活断層地震に対する耐震対策の重要性が認識され、道路橋の耐震基準は大きく改定されるに至った。さらに、海溝型地震の長期評価では、東南海・南海地震が今後50年以内に発生する確率は80%以上と推定されており、内陸直下型地震および海溝型のレベルⅡ地震動に対する耐震対策の緊急性は高まっている。しかし、一般高架橋については耐震補強が実施されている一方で、長大橋梁の場合、交通ネットワーク上重要な位置づけにあるにもかかわらず、その投資額、技術的難易度から一般高架橋の耐震補強に遅れをとっている状況である。

一般的な鋼橋における耐震補強は、時刻歴応答解析などから、主構を構成する鋼材の耐力が不足している部材

を抽出して、鋼材を当てて高力ボルトにより接合する補強（あて板補強）、および落橋を防止するための落橋防止装置・変位制限装置などの設置、支存取替・耐震連結装置の設置および取替が主な工種となる。しかし、これらの補強方法だけでは、死荷重比率の高い長大橋に対して有効な手段とは言えず、地震時における根本的な橋梁全体の挙動の改善を行わなければレベルⅡ地震に対する耐震性能を満足する補強を行うことができない。すなわち、長大橋において、地震発生時の挙動の改善と補強方法の選定が重要となる。本稿では港大橋のアプローチトラス橋（以下アプローチ橋という）に着目し、図-1、2に示すアプローチ橋単体の動的応答解析のみならず、図-3に示す本橋部も含めた港大橋全体の応答解析および、アプローチ橋の耐震補強設計について述べる。

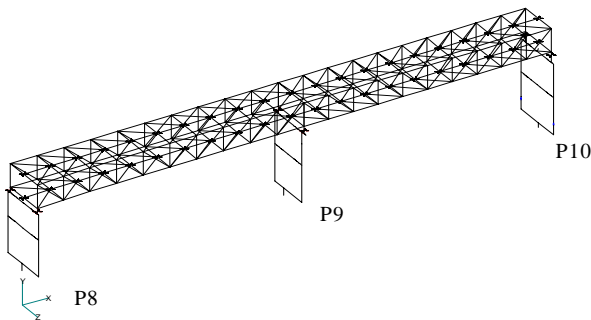


図-1 築港側アプローチ部モデル（節点数 744）

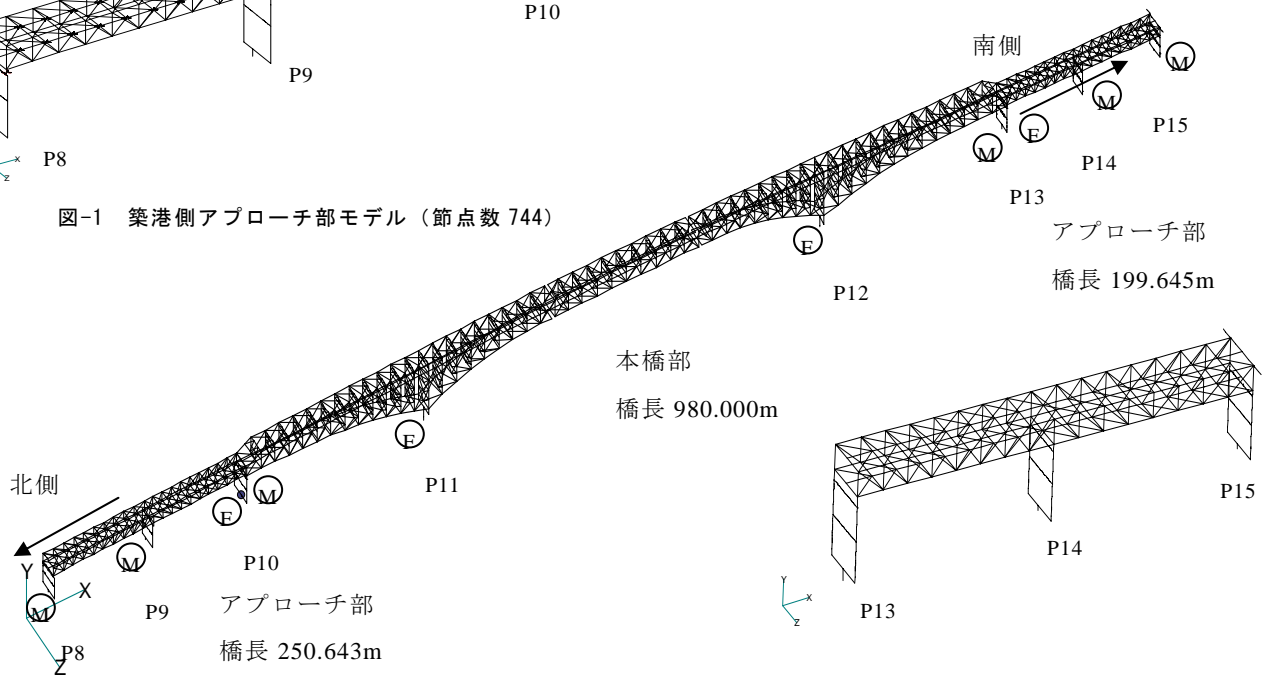


図-2 南港側アプローチ部モデル（節点数 692）

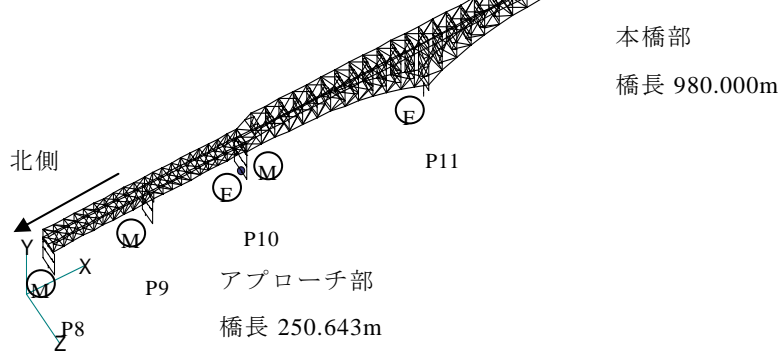


図-3 全体系モデル（節点数 4951）

1) 技術グループ 設計部 大阪チーム

2. 工事概要

本工事の工事概要を下記に示す。また、本橋の位置図を図-4に、工事概要図を図-5に示す。

工事名：港大橋アプローチ橋耐震補強工事(16-2-湾)

工事箇所：大阪市港区海岸通3丁目

大阪市住之江区南港東9丁目

施主：阪神高速道路株式会社

施工内容：トラス支承工 8箇所

移動制限工 8箇所

トラス主構補強 6箇所

橋脚補強工 6基



図-4 位置図

3. 設計方針

建設当時の耐震設計で用いられた本橋部の基本震度は0.25とされており、またアプローチ橋については0.27が用いられている。一般の耐震設計で行われるような設計震度×自重を水平力とする設計値を用いた場合と比べて、地震動を想定した動的応答解析では断面力や変形量が大きい値となる。このことは、長周期構造物に対して、特に動的な振動特性を考慮した設計が必要であることを意味する。

今回の港大橋耐震補強工事においては、巨大地震時に主構トラス部材は弾性挙動を期待し、非主構部材においては制御された損傷を許容する考え方とした(表-1)。すなわち、橋脚の基部および梁部において塑性ヒンジを許容したキャパシティデザインを長大橋に進化させた設計思想である。特に、塑性を許容する橋脚においては、非線形性を考慮して、安定した履歴減衰効果を期待する応答値の低減を図った設計とした。

表-1 上部構造部材の照査方法

部位	要求機能	要求性能	照査方針	
主構 (下弦材, 上限材, 斜材, 鉛直材)	曲げと圧縮を受ける部材	部材は損傷せず, 被災後に補修・補強を必要としない。	部材縁部の一部降伏や部分的な局部座屈は許容するが, 概ね弾性範囲にとどめる。	弾性要素として発生断面力を算定し, 部材としてほぼ線形挙動することを確認する。
	引張を受ける部材		部材縁部の一部降伏は許容するが, 概ね弾性範囲にとどめる。	弾性要素として発生断面力を算定し, 部材としてほぼ線形挙動することを確認する。
2次部材 (対傾構, 横構など)	曲げと圧縮を受ける部材	部材の損傷は許容し, 被災後に補強や取り替えを行うことにより復旧する。	構造系の耐力を保持できる範囲内で部材の降伏や座屈を許容する。	弾性要素として一次照査し, 降伏する部材については, 非線形要素として応答ひずみを評価する。
	引張を受ける部材		構造系の耐力を保持できる範囲内で部材の降伏を許容する。	弾性要素として一次照査し, 降伏する部材については非線形要素として応答ひずみを評価する。

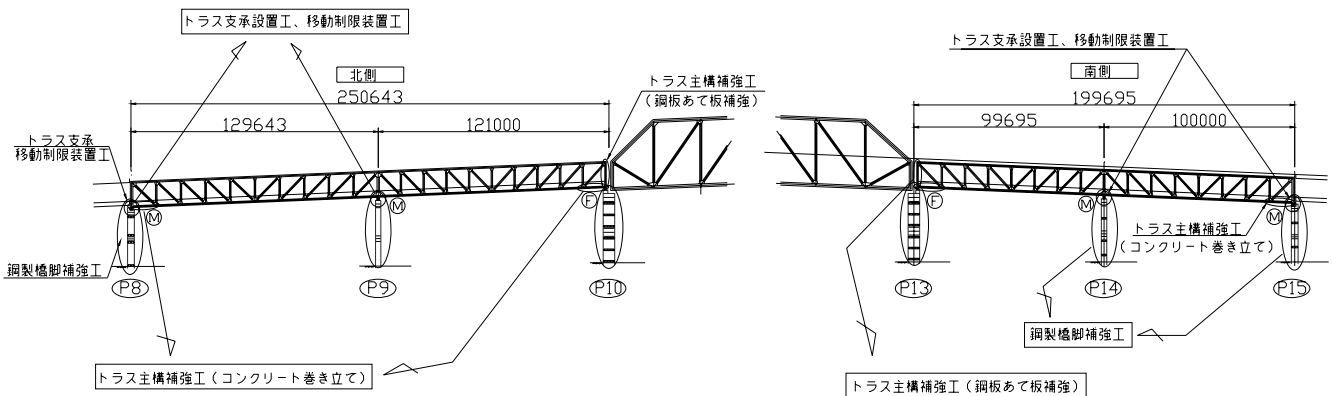


図-5 工事概要図

3.1 基本方針

レベルⅡ地震動に対する照査は、大きく区分して安全性照査と使用性照査を行うものとした。前者としては、落橋の回避は勿論のこと、港大橋のライフラインとしての重要性を重視し、地震直後にも緊急車両の通行が可能であることとした。また、後者としては、補修補強により再利用可能であることとした。さらに、部材の損傷としては規制下で一般車両が通行できる状態を目標とした。

3.2 想定地震

港大橋の耐震設計に用いられるレベルⅡ地震動は、内陸型地震として上町断層系地震（A3波）、海溝型地震として南海・東南海地震を想定した。これらの地震動は地表面付近の地盤の影響を強く受けるために地盤の非線形性を考慮した地盤の応答解析に基づき設定したものである¹⁾。また、本橋部においては図-6に示す重心波（A3LL波〈橋軸方向〉、A3TT波〈橋軸直角方向〉、A3UD波〈鉛直方向〉）、アプローチ橋では図-7に示す表面波（A3LLS波〈橋軸方向〉、A3TTS波〈橋軸直角方向〉、A3UD波〈鉛直方向〉）による3波同時入力とし、入力地震波は北側(P8橋脚)から南側(P13橋脚)において、それぞれ1,000 m/secの位相差を持って入力した。

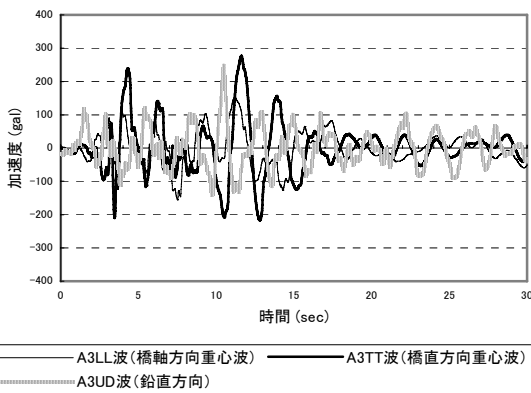


図-6 内陸直下型地震動（1A3重心波）

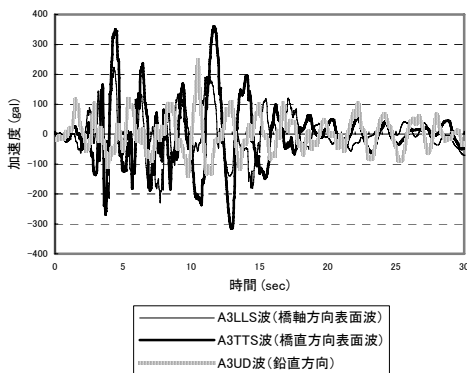


図-7 内陸直下型地震動（1A3表面波）

3.3 トラス主構補強

アプローチ橋の主構トラス（上下弦材、鉛直材、斜材）は死荷重を支えており、耐荷力の低下は致命的な被害となるだけでなく、損傷後の取り替えも困難である。よって、変形性能は期待せずに部材の最大耐力（5章参照）以内に抑えるものとした。また、水平荷重に抵抗する2次部材（横構、対傾構など）は補修・補強が可能であり、部材の損傷を許容するものとした。

3.4 鋼製橋脚補強

鋼製橋脚の耐震性確保については、橋脚基部の塑性化および、脚面内の挙動における梁中央部のせん断座屈先行の破壊形態も許容するものとした。

柱および、梁の内面にはリブによる補強を行い、座屈現象を防止することによって、橋脚の耐荷力および、変形性能の向上を図り、耐震性を確保することとした。

3.5 トラス支承

アプローチ橋の主構は2径間連続構造であり、本橋の端部橋脚（P10、P13橋脚）上に一点固定とされている。固定支承はピン支承、可動支承はピンローラー支承（P8、P9、P14、P15橋脚）である。大反力のため支承取替は困難であり、移動制限装置と補完しあって抵抗する構造とした。橋軸方向の移動に対しては、致命的な落橋を防ぐために落橋防止構造を設置するものとした。落橋防止構造の設計水平力としては、キャパシティデザインの観点から橋脚の降伏耐力より強くするものとし、その水平力を用いて移動制限構造の設計を行うことで、落橋防止構造を兼ねるものとした。

4. 時刻歴応答解析

4.1 解析モデル

解析は、図-1, 2に示すアプローチ単体モデル（以下アプローチモデルという）と、本橋部およびアプローチ部を含んだ全橋モデルの2種類について行った。各橋脚上の支承条件を表-2に示す。

表-2 各橋脚上の支承境界条件

脚	橋軸方向(x)	橋直方向(y)	鉛直方向(z)	回転
P8橋脚	可動	固定	固定	可動
P9橋脚	可動	固定	固定	可動
P10橋脚	固定	固定	固定	可動
P13橋脚	固定	固定	固定	可動
P14橋脚	可動	固定	固定	可動
P15橋脚	可動	固定	固定	可動

橋脚については、図-8 に示すとおり柱部はファイバー要素および非線形要素でモデル化を行い、梁部は、せん断非線形を許容する部分には非線形要素を用い、それ以外の部分には線形要素を用いてモデル化した。

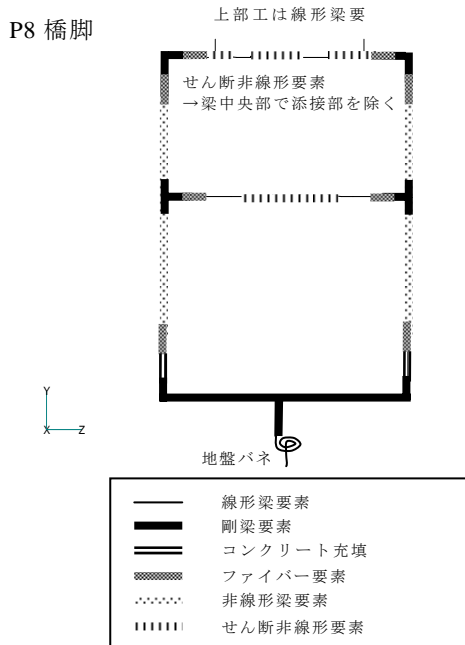


図-8 橋脚の要素構成

4.2 入力地震波

まずアプローチモデルにおいて、以下の入力地震波を用い解析を行った。

- ・ L1 地震動
- ・ 内陸直下型地震（上町断層系地震）
- ・ 海溝型地震（南海・東南海地震）

上記の結果、最も影響が大きくなる内陸直下型地震動を用いて、全橋モデルでの解析を行うこととした。

4.3 アプローチ単体モデルと全橋モデルの比較

現況構造のアプローチモデルと全橋モデルとの比較を行うため、掛違い部となる P10 橋脚の上段梁中央部の断面力を図-9、図-10 に、また各橋脚の基部に発生する橋軸・橋直方向に発生するひずみの靱性率 ϵ / ϵ_y による比較を図-11、図-12 に示す。

梁に発生するせん断力は、全橋モデルではアプローチモデルの 2 倍程度発生している。また、橋脚基部におけるひずみも全橋モデルとアプローチモデルでは大きな差異が生じている。以上より、アプローチモデルの解析では、質点を用いて本橋部をモデル化した解析を行うのは困難であると判断し、補強設計に用いる応答値は全橋モデルによる値を用いることとした。

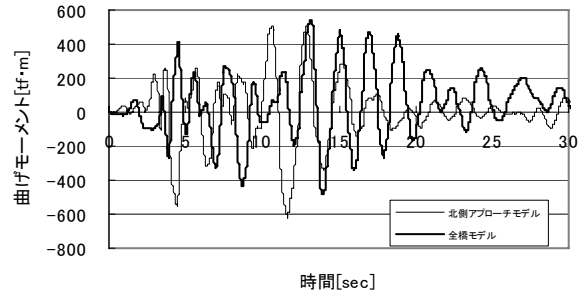


図-9 P10 橋脚の梁中央部の脚面内曲げモーメント

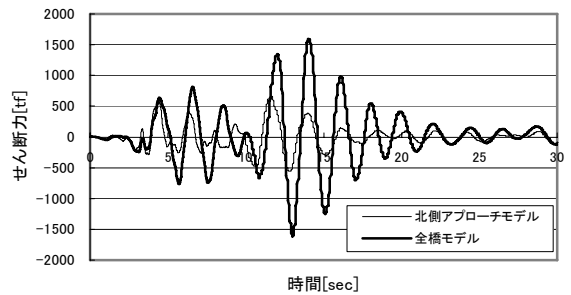


図-10 P10 橋脚の梁中央部の鉛直方向せん断力

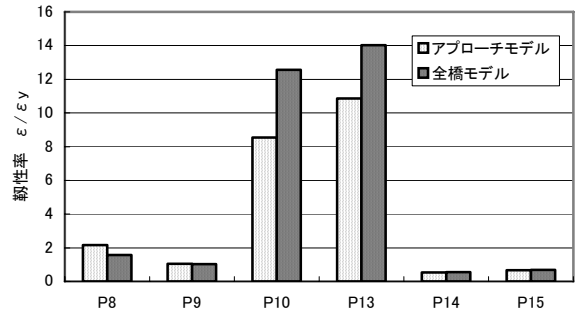


図-11 橋脚基部に発生する橋軸方向のひずみ比較

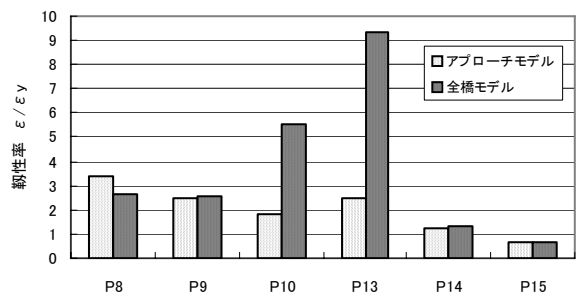


図-12 橋脚基部に発生する橋直方向のひずみ比較

4.4 改良構造モデル

橋軸方向における改良方法として、可動支承が設置されているP8, P9, P14, P15橋脚に水平力分散ゴム支承（以降、トラス支承と呼ぶ）を設置し、P10, P13橋脚の応答値を低減させた。すなわち、全橋モデルにトラス支承に見立てた非線形トラス要素を追加し、弾性定数を調整することで、P10, P13橋脚の応答値を低減させた。図-13にP8橋脚のトラス支承の移動量履歴曲線を示す。

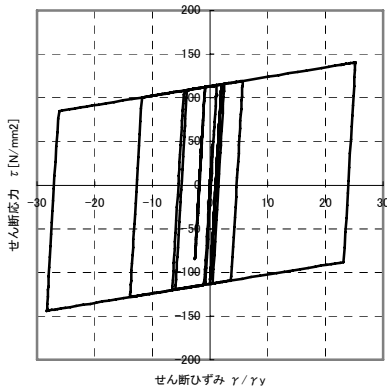


図-13 水平分散支承の水平力-移動量の履歴 (P8 橋脚)

橋直方向については、鋼製橋脚の梁中央部において、せん断座屈先行の破壊形態も許容するものとしているため、せん断非線形要素を作成してエネルギー吸収を図れる構造とした。図-14にP13橋脚のせん断非線形要素のひずみ履歴を示す。

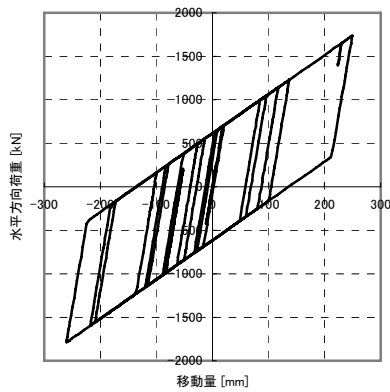


図-14 せん断非線形要素のひずみ履歴 (P13橋脚)

5. 部材耐荷力

5.1 耐荷力の判定式

耐荷力を評価する判定式は、道路橋示方書の軸方向力と曲げモーメントを受ける部材の照査式に準じて設定した。ただし、局部座屈に対する許容応力の算出は道路橋示方書と同等とするが、安全率1.7は考慮せず設計基準降伏応力とした。以下に耐荷力の判定式を示す。

① 軸方向力が引張の場合

$$S_{r_1} = \frac{\sigma_t + \sigma_{bty} + \sigma_{btz}}{\sigma_{ta}} \tag{1}$$

$$S_{r_2} = -\frac{\sigma_t}{\sigma_{ta}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy}} + \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{bao}} \tag{2}$$

$$S_{r_3} = \frac{-\sigma_t + \sigma_{bcy} + \sigma_{bcz}}{\sigma_{cal}} \tag{3}$$

② 軸方向力が圧縮の場合

$$S_{r_4} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{caz}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy}(1 - \sigma_c/\sigma_{eay})} + \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{bao}(1 - \sigma_c/\sigma_{eaz})} \tag{4}$$

$$S_{r_5} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{cal}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{cal}(1 - \sigma_c/\sigma_{eay})} + \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{cal}(1 - \sigma_c/\sigma_{eaz})} \tag{5}$$

ここに、

- S_r : 応力比 (≤1.2)
- σ_t, σ_c : それぞれ照査する断面に作用する軸方向力による引張および圧縮応力度
- $\sigma_{bty}, \sigma_{btz}$: それぞれ強軸および弱軸まわりに作用する曲げモーメントによる曲げ引張応力度
- $\sigma_{bcy}, \sigma_{bcz}$: それぞれ強軸および弱軸まわりに作用する曲げモーメントによる曲げ圧縮応力度
- σ_{ta} : 基準降伏点
- σ_{caz} : 弱軸まわりの許容軸方向圧縮応力度
- σ_{bagy} : 局部座屈を考慮しない強軸まわりの許容軸方向圧縮応力度
- σ_{bao} : 局部座屈を考慮しない許容曲げ圧縮応力度の上限値
- σ_{cal} : 許容局部座屈応力度
- $\sigma_{eay}, \sigma_{eaz}$: それぞれ強軸および弱軸まわりの許容オイラー座屈応力度

5.2 局部座屈を考慮しない橋軸方向圧縮応力度

柱部材の軸方向力に対する耐荷力は、材料特性と部材特性の二つの要因が影響する。材料特性は部材を構成する材料の力学的特性であるが、部材特性については様々な要因が関係している。部材特性の代表的な要因として、

- ① 部材長／部材の剛性／部材の断面積
- ② 部材の支持（固定）条件
- ③ 初期不整／残留応力
- ④ 断面形状／製造過程

などがあげられる。従って、細長比が等しい部材であっても断面形状の違いで部材の耐荷力は異なる。

道路橋示方書では、これらを考慮することにより局部

座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度を圧縮部材の不完全性を考慮した耐荷力曲線に基づいて定めている。道路橋示方書で用いられている耐荷力曲線は、様々な断面形状の耐荷力曲線の内、ほぼ下限値に相当する曲線を採用している。このため、本工事の部材耐荷力判定では、より適切な耐荷力判定を行うため「鋼構造物設計指針PART-A 一般構造物 5.4.鋼材の強度」²⁾において示される溶接箱断面（斜材については溶接I型）の耐荷力曲線を採用した。以下に基準耐荷力曲線を示す。

① $\lambda \leq \lambda_0$ の場合

$$\sigma_{cag} = F_u \times \left\{ 1 - (1 - \phi_c) \times \frac{\lambda}{\lambda_0} \right\} \quad (6)$$

② $\lambda > \lambda_0$ の場合

$$\sigma_{cag} = \frac{\phi_c \cdot F_u \left(\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\lambda^2} \right)}{2\lambda^2} \quad (7)$$

$$\beta = 1 + \alpha(\lambda - \lambda_0) + \lambda^2 \quad (8)$$

ここに、

- σ_{cag} : 局部座屈を考慮しない軸方向応力度
- F_u : 設計基準降伏応力度
- ϕ_c : 圧縮部材の部材強度係数
- λ : 細長比パラメータ
- λ_0 : 限界細長比パラメータ
- α : 初期不整係数

5.3 耐荷力判定の許容値の設定

部材としては、ほぼ弾性的な挙動を期待する設計を行う。従来までの報告³⁾では弾塑性有限要素解析による荷重-変位曲線の結果から、断面力の構成比率や部材特性にも左右されるが、最大耐荷力における荷重での判定値において、 S_r が概ね1.4~1.6程度まで得られている。これらから、ほぼ弾性域と判断される荷重での判定値は全て1.2以上であることが確認されているため、要求性能に相当する判定値を圧縮時では1.2、引張時では1.3と設定して補強の必要部材の選定を行った。また、アプローチ橋における判定値1.2を超過した部材については別途、弾塑性有限要素解析を行い、補強の必要性を検討した。

6. あとがき

以上、港大橋アプローチ橋の耐震補強設計について述べた。本工事は、現在設計が完了し、部材製作・現場施工が平行して進捗しており、平成19年12月完了予定である。

最後に、本工事の設計にあたり、多大のご指導をいただいた阪神高速道路株式会社、ならびに、ご協力いただいた関係各位にはこの場を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 金治英貞, 鈴木直人, 香川敬生, 渡邊英一: 長大トラス橋の耐震性能向上化における設計入力地震動と損傷制御構造, 土木学会論文集, No.787/I-71, I-19, 2005. 4
- 2) 土木学会: 鋼構造物設計指針PART-A, 1999.
- 3) 道菅裕一, 鈴木正直, 岩本 司, 金治英貞, 石橋照久: 鋼材付加による鋼トラス部材の耐震補強構造の検討, 第8回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2005. 2.