

大阪湾岸部に位置する鋼ニールセンアーチ橋の 耐震性能に関する基礎的検討

西岡勉¹・長沼敏彦²・金治英貞³・香川敬生⁴・中田恒和⁵・田中克典⁵

¹正会員 工修 阪神高速道路公団工務部（〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3）

²正会員 Dr.Eng.Sci. 阪神高速道路公団工務部（〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3）

³正会員 工修 阪神高速道路公団大阪建設局建設企画部（〒559-0034 大阪市住之江区南港北1-14-16）

⁴理博 （財）地域地盤環境研究所（〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2）

⁵正会員 工修 八千代エンジニアリング（株）大阪支店（〒540-0001 大阪市中央区城見1-4-70）

1. はじめに

兵庫県南部地震以後、阪神高速道路の耐震補強対策が順次進められている。本研究は、大阪湾岸部に影響を及ぼす内陸活断層地震、近い将来に発生が予想されている海溝型地震である南海・東南海地震に対して大阪湾岸部に位置する鋼ニールセンアーチ橋の地震時挙動を解析し、現状構造の耐震性能について検討した結果を報告するものである。

まず、大阪湾岸部に大きな影響を及ぼす可能性がある内陸活断層地震および海溝型地震による対象橋梁地点の強震動の予測を行う。大阪湾を含む大阪平野の深部地盤構造は、典型的な堆積盆地状を成しており、このような地盤構造では、地震動が長い継続時間を伴って複雑な挙動を示すことが認識されている。そこで、大阪湾を含む大阪平野の3次元地盤構造を考慮した断層モデルによる強震動の予測を行う。内陸活断層地震については、将来発生する断層破壊の不確定性を踏まえ、複数の断層破壊シナリオを想定した試算を行い、対象橋梁の固有周期付近に大きな応答が生じる地震動を発生させる断層破壊シナリオを選定する。

次に、予測した内陸活断層地震および海溝型地震をもとに大阪湾岸部に位置する鋼ニールセンアーチ橋の地震応答解析を行い、対象橋梁の現状構造の耐震性能について考察する。

2. 大阪湾岸部の強震動の予測

(1) 内陸活断層地震

大阪平野周辺の活断層を図-1に示す。図-1中の6つの断層系のうち、距離減衰式により推定した最大速度および最大加速度の分布をもとに、対象橋梁地点に大きく影響すると考えられる上町断層系および大阪湾断層を起震断層として選択した。地震規模は、入倉・三宅¹⁾による断層面積と地震規模のスケールリング則から設定した。また、地震規模に基づく地震動距離減衰式は、司・翠川²⁾の研究成果を用いた。なお、六甲一淡路断層系は、1995年の兵庫県南部地震の起震断層であるため対象から除外している。

上町断層系および大阪湾断層について、巨視的断層モデル（長さ、幅、走向、傾斜、地震モーメントなど）および不均質断層モデル（アスペリティモデル）のパラメータを設定し、断層破壊シナリオに沿った地震動を合成する。その際、不確定性の大きいアスペリティ配置（上町断層系4ケース、大阪湾断層2ケース）、破壊開始点位置（3ケース）を $(4+2) \times 3 = 18$ ケース設定し、18ケースから対象橋梁の固有周期付近に大きな応答が生じる地震動を発生させる断層破壊シナリオを5ケース選定した。上町断層系および大阪湾断層の断層パラメータを表-1に、両断層のアスペリティ配置の例を図-2に示す。

大阪平野の深部地盤構造が堆積盆地状のため、地震動の合成には3次元地盤構造を考慮した長周期差分計算を実施する。大阪平野の3次元地盤構造モデルは、宮腰ら³⁾のモデルを用いた。せん断波速度1,000m/s相当の大阪平野の基盤深度コンター図を図-3に示す。5ケースの断層破壊シナリオについて3次元差分法と統計的グリーン関数法を組み合わせたハイブリッド法⁴⁾を用いて内陸活断層地震による地震

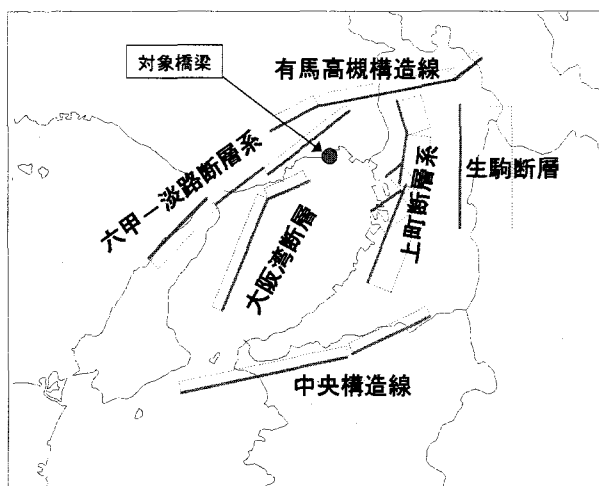


図-1 大阪平野周辺の活断層と対象橋梁の位置

表-1 上町断層系および大阪湾断層の断層パラメータ

	上町断層系					大阪湾断層	
	仏念 寺山 断層	上町 断層	汐見 橋 曲	住之 江 曲	南部 上町 断層	南部	北部
長さ (km)	8	12	4	6	24	26	10
幅 (km)	22					16	
走向 (deg.)	-16.2	7.4	48.4	55.8	21.4	-158	-114
傾斜 (deg.)	60					80	
モーメントマグニ チュード M_w	6.9					6.7	
地震モーメント (10^{19} N·m)	0.38	0.58	1.29	0.32	0.19	1.03	0.39

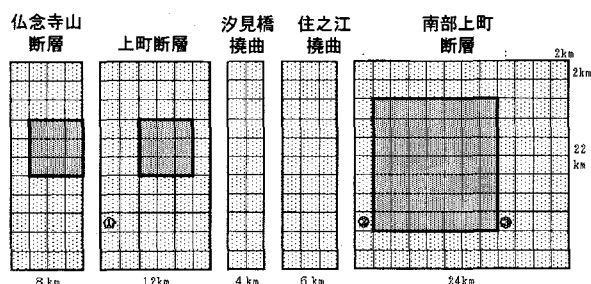
動を合成した。大阪湾岸部の内陸活断層地震による地震動予測の流れを図-4の左側に示す。

(2) 海溝型地震

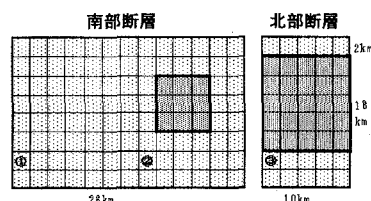
海溝型地震として、南海地震および東南海地震が同時に発生する場合を仮定した地震動の合成を行う。断層破壊シナリオは、中央防災会議により設定されている断層モデルを参考に図-5に示すような4枚の断層で近似した断層モデルを用いた断層破壊シナリオを設定した。南海・東南海地震の断層パラメータを表-2に示す。強震動の予測には、2000年10月31日に発生した三重県南部地震による観測記録をもとに、経験的グリーン関数法⁵⁾を用いて地震動を合成した。南海・東南海地震の地震動予測の流れを図-4の右側に示す。

(3) 推定した地震動の特性

内陸活断層地震については、5ケースの断層破壊シナリオのうち、対象橋梁の固有周期(橋軸方向 $T_L = 2.21s$, 橋軸直角方向 $T_T = 1.79s$)付近で加速度応答スペクトルが最も大きくなる大阪湾断層が破壊する



(a) 上町断層系



(b) 大阪湾断層

図-2 アスぺリティ配置の例

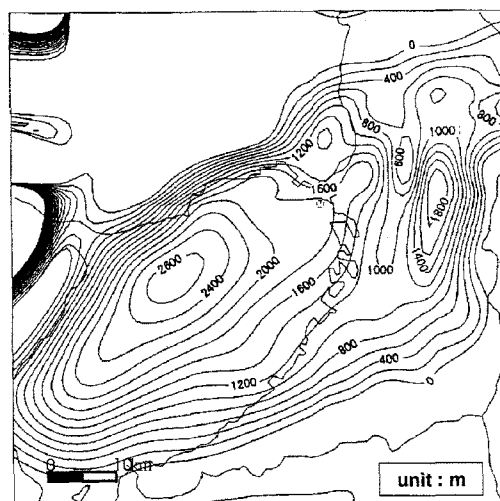


図-3 大阪平野の基盤($V_s=1,000m/s$ 相当)深度コンター図

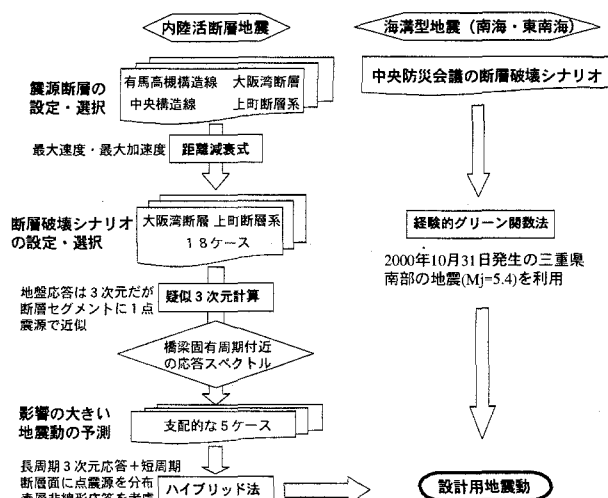


図-4 大阪湾岸部の地震動予測の流れ

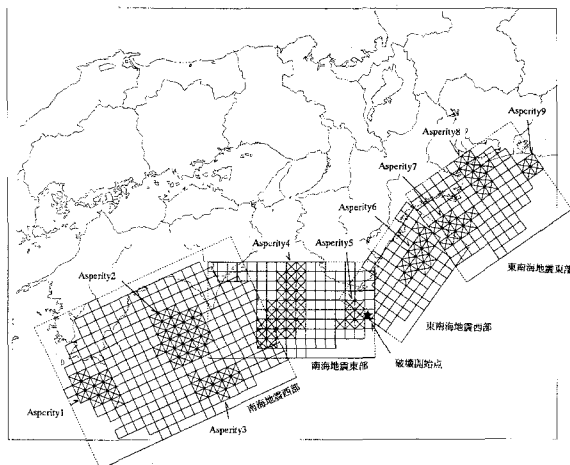


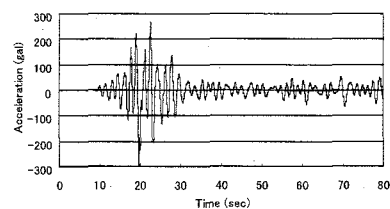
図-5 南海・東南海地震の断層モデル

表-2 南海・東南海地震の断層パラメータ

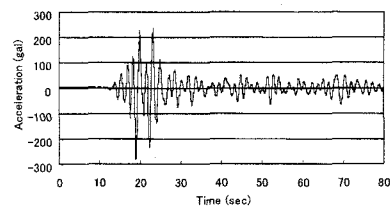
	南海地震		東南海地震	
	西部	東部	西部	東部
長さ (km)	220	170	120	130
幅 (km)	160	100	80	110
走向 (deg.)	245	270	215	235
傾斜 (deg.)	7	14	14	10
モーメントマグニ チュード M_w	8.6			
地震モーメント (10^{22} N·m)	1.08			

ケース(図-2 (b) に相当)を例として示す。大阪湾断層地震による対象橋梁地点の地表面の加速度波形と加速度応答スペクトルを図-6に示す。また、海溝型地震である南海・東南海地震による対象橋梁地点の地表面の加速度波形と加速度応答スペクトルを図-7に示す。なお、地表面地震動の算定には、等価線形化法による対象橋梁地点の表層地盤の非線形応答を考慮している。図-6 (c), 7 (c) には、それぞれ、道路橋示方書V耐震設計編 (以下、道示と略する)⁶⁾のタイプⅡ、タイプⅠ地震動の3種地盤の標準加速度応答スペクトルも併せて示している。

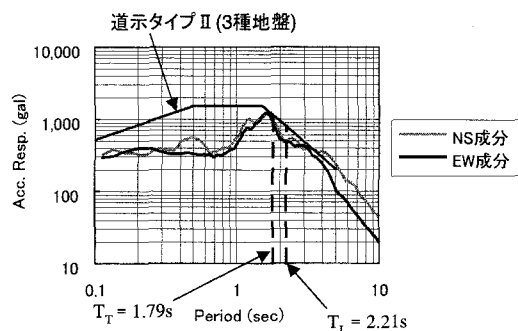
大阪湾断層地震による地震動では、1.7秒付近に極大値を有する加速度応答スペクトル、南海・東南海地震による地震動では、0.35秒と3.6秒付近に極大値を有する加速度応答スペクトルになる。対象橋梁の固有周期($T_L = 2.21s$, $T_T = 1.79s$)に対して、大阪湾断層地震では、道示タイプⅡの標準加速度応答スペクトルより若干小さい加速度応答スペクトルになり、南海・東南海地震では、道示タイプⅠの標準加速度応答スペクトルよりかなり小さい加速度応答スペクトルになる。南海・東南海地震では、対象橋梁と想定している南海・東南海沖に位置する断層までの距



(a) 加速度波形(NS成分)

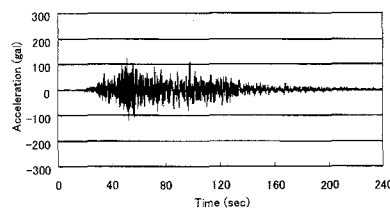


(b) 加速度波形(EW成分)

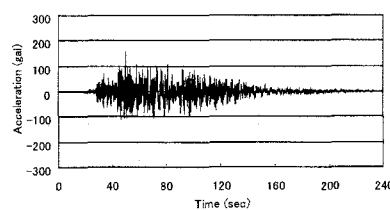


(c) 加速度応答スペクトル(減衰定数 $h=5\%$)

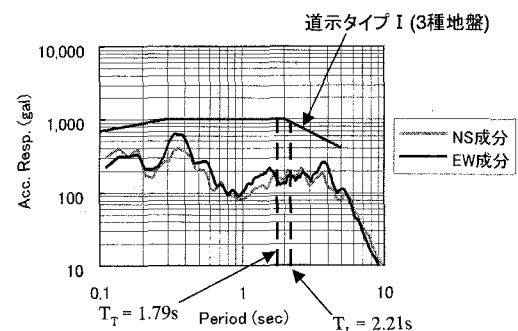
図-6 大阪湾断層地震による対象橋梁地点の地震動



(a) 加速度波形(NS成分)

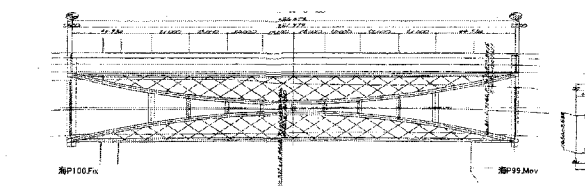


(b) 加速度波形(EW成分)

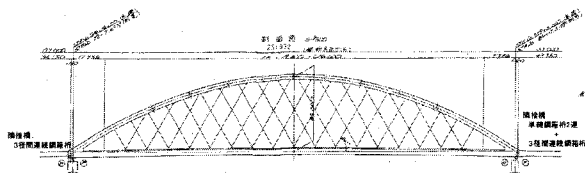


(c) 加速度応答スペクトル(減衰定数 $h=5\%$)

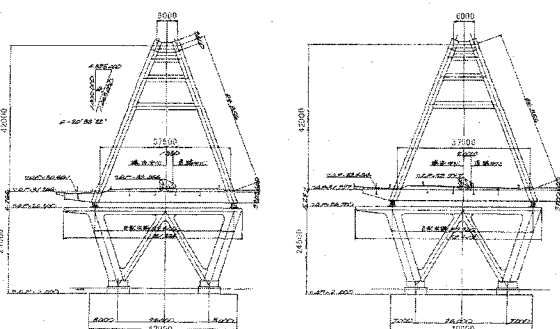
図-7 南海・東南海型地震による対象橋梁地点の地震動



(a) 平面図



(b) 橋軸直角方向から見た側面図



P100 (Fix.)

P99 (Mov.)

(c) 橋軸方向から見た側面図

図-8 対象とした鋼ニールセンアーチ橋の一般構造図

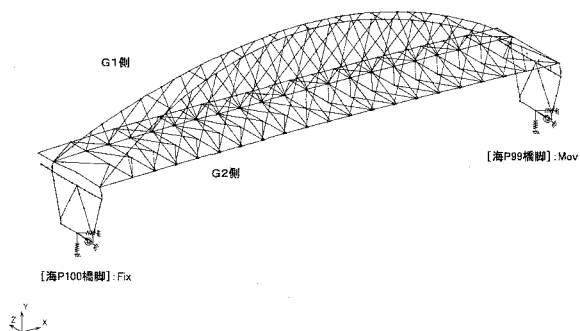


図-9 3次元骨組みモデル

離が大きいため、道示タイプⅠよりも小さい加速度応答スペクトルになると考えられる。

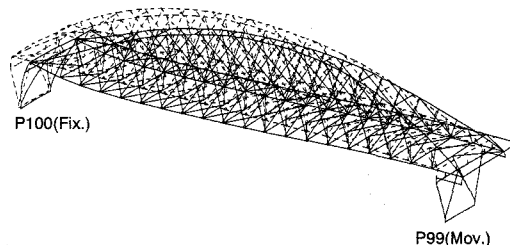
ただし、本研究での強震動予測は、現時点で得られている地震学の知見、観測記録に基づく推定結果であり、今後の地震学の発展や新しい観測記録を取り込み、推定精度を向上させていく必要がある。特に、南海・東南海地震による強震動予測については、三重県南部で発生した地震を経験的グリーン関数として用いており、高知沖や紀伊半島南西部沖の断層から生じる地震動の情報が経験的グリーン関数に十

表-3 解析モデルの要素特性および減衰定数

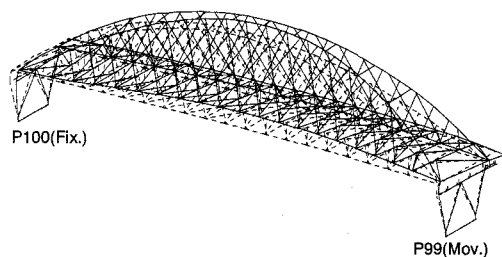
構造部材	要素特性	減衰定数
上部構造(吊材以外)	線形はり要素	0.02
吊材	線形棒要素	0.02
支承	線形ばね要素	0
鋼製橋脚	線形はり要素	0.03
基礎構造(3種地盤)	線形ばね要素	0.2

表-4 固有値解析結果

モード次数	固有周期(s)	有効質量率 (橋軸方向)	有効質量率 (橋軸直角方向)
1	2.21	0.86	0.00
2	1.79	0.00	0.62
5	0.63	0.00	0.06
7	0.45	0.00	0.20
9	0.34	0.04	0.00



(a) 橋軸方向 1 次



(b) 橋軸直角方向 1 次

図-10 振動モード

分に反映されていないので、今後、新しい観測記録などから上記の情報も反映させていく必要がある。

3. 対象橋梁の耐震解析

(1) 対象橋梁の概要

対象橋梁の一般構造図を図-8に示す。上部構造は支間長252mの鋼単純ニールセンローゼ桁、橋脚は鋼ラーメン橋脚、基礎構造はケーソン基礎である。

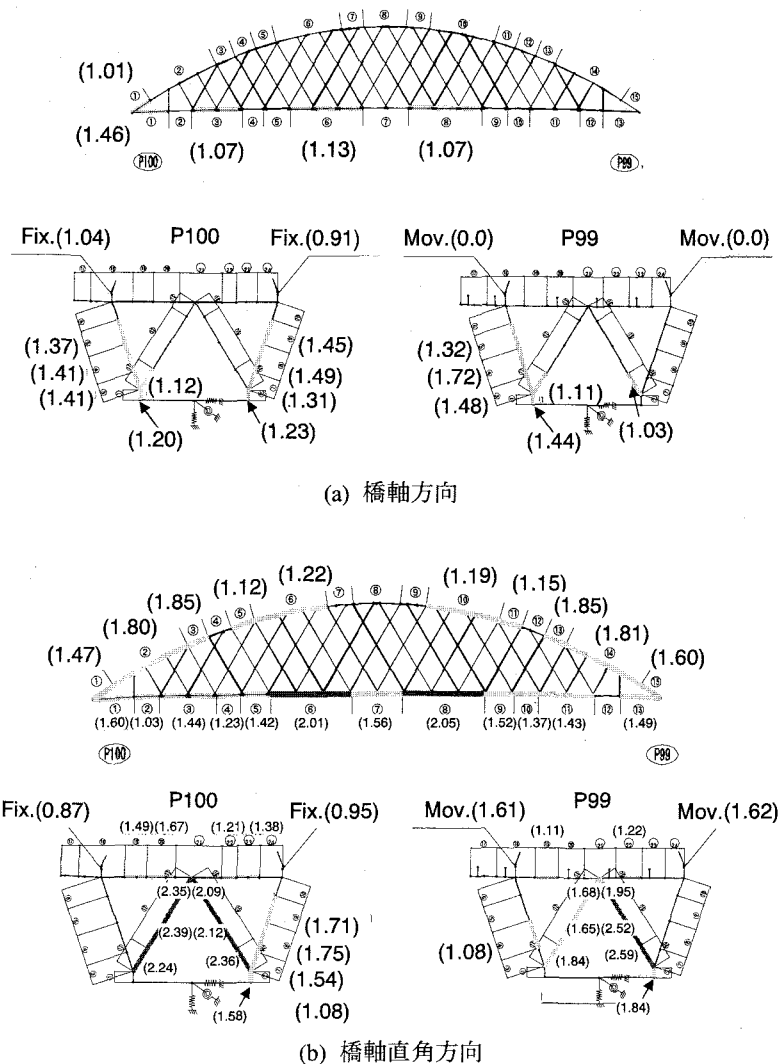


図-11 降伏耐力に対する最大発生断面力の比 (大阪湾断層地震)

また、図-1に示したように大阪湾岸部の埋め立て地に位置しており、地盤種別は3種地盤である。

(2) 解析条件

解析モデルは、図-9に示す3次元骨組みモデルとし、2章で推定した大阪湾断層地震および南海・東南海地震による地震動を用いた時刻歴応答解析を行う。地震動の入力成分について、対象橋梁の設置方向から橋軸方向にEW成分、橋軸直角方向にNS成分を入力した。解析モデルの各部材の要素特性と減衰定数を表-3に示す。ここでは、対象橋梁の基本的な地震時挙動を把握する目的から部材はすべて線形要素とした。

(3) 解析結果と耐震性能に関する考察

対象橋梁の固有値解析結果を表-4に示す。主要モードの固有周期と有効質量率を示している。橋軸方

向の1次固有周期が $T_L=2.21s$ 、橋軸直角方向の1次固有周期が $T_T=1.79s$ である。橋軸方向および橋軸直角方向の1次モード図を図-10に示す。橋軸方向の1次は、主に固定橋脚P100が橋軸方向に変形するモード、橋軸直角方向の1次は、アーチ上部構造がスパン中央付近を中心として撓むモードである。

大阪湾断層地震による橋軸方向および橋軸直角方向の時刻歴応答解析から降伏耐力を超過した部材を図-11に示す。図-11中の括弧内の数値が降伏耐力に対する最大発生断面力の比（以下、降伏耐力比という）である。アーチの上弦材、下弦材および橋脚については、降伏応力度 σ_y に相当する耐力に対する比、アーチ吊材については破断引張力 T_u に対する比としている。支承については、上杓ボス、下杓溶接部、ローラーストッパーなどの支承を構成する部材のうち、最も小さい降伏耐力を支承の降伏耐力 P_y とし、 P_y に対する支承要素の最大発生力の比を算定してい

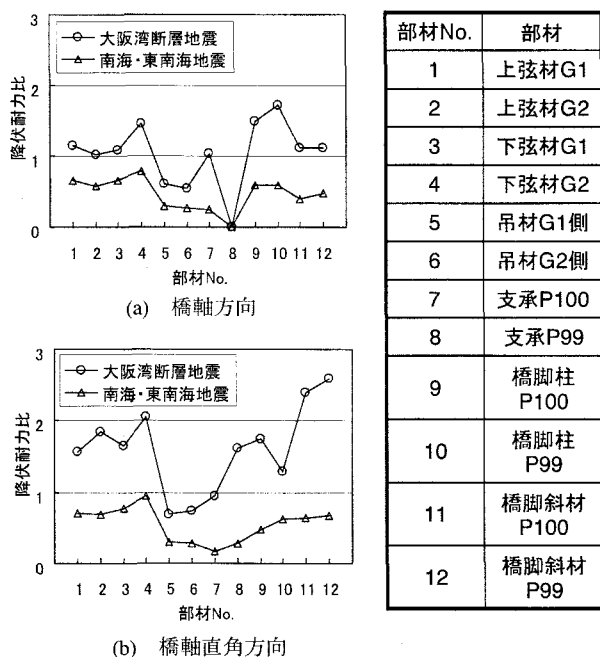


図-12 降伏耐力比(大阪湾断層および南海・東南海地震)

る。降伏耐力比は、橋軸方向で最大1.72、橋軸直角方向で最大2.59となり、降伏耐力を超過する部材が存在する。また、全体的に橋軸方向よりも橋軸直角方向の方が降伏耐力を超過する部材要素が多く、その超過率も大きい。

大阪湾断層地震および南海・東南海地震による部材の降伏耐力比の最大値を図-12に示す。降伏耐力比の最大値は、各部材を構成する要素の中の降伏耐力比の最大値である。なお、橋軸方向の部材No.8は可動支承であり、可動部の摩擦を考慮していないことから発生力が0となる。南海・東南海地震では、降伏耐力を超過する部材はなく、大阪湾断層地震が対象橋梁に対して厳しい地震であることがわかる。

吊材の降伏耐力比は、いずれの場合も1以下であり、比較的余裕のある部材となっている。一方、橋脚斜材は、大阪湾断層地震の橋軸直角方向で降伏耐力比が2を超えており、橋脚面内の斜材であることから、橋脚面内の変形に対して斜材の軸圧縮による座沓・降伏が問題になると考えられる。今後は、線形解析結果を踏まえ、部材の非線形性を考慮した非線形解析を行い、対象橋梁の耐震補強対策を検討していく予定である。

4. まとめ

大阪湾岸部のサイト特性を考慮した内陸活断層地震、近い将来に発生が予想されている海溝型地震で

ある南海・東南海地震による強震動の予測を行い、予測した強震動に対して大阪湾岸部に位置する鋼二ールセンアーチ橋の地震応答解析を実施した。部材をすべて線形とした時刻歴応答解析から現状構造の鋼二ールセンアーチ橋の基本的な耐震性能について検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) 対象橋梁の固有周期($T_L = 2.21s$, $T_T = 1.79s$)に対して、大阪湾断層地震では、道示タイプⅡの標準加速度応答スペクトルより若干小さい加速度応答スペクトルになり、南海・東南海地震では、道示タイプⅠの標準加速度応答スペクトルよりかなり小さい加速度応答スペクトルになる。対象橋梁と南海・東南海地震で想定している南海・東南海沖の断層までの距離が大きいいため、道示タイプⅠよりも小さい加速度応答スペクトルになると考えられる。
- 2) 大阪湾断層地震による橋軸方向および橋軸直角方向の部材を線形とした時刻歴応答解析による各部材の降伏耐力に対する最大発生断面力の比（降伏耐力比）は、橋軸方向で最大1.72、橋軸直角方向で最大2.59となる。また、全体的に橋軸方向よりも橋軸直角方向の方が降伏耐力を超過する部材要素が多く、その超過率も大きい。
- 3) 南海・東南海地震では、降伏耐力を超過する部材はなく、大阪湾断層地震が対象橋梁に対して厳しい地震となる。
- 4) 吊材の降伏耐力比は1以下であり、比較的余裕のある部材となっている。一方、橋脚斜材は、橋脚直角方向に対して降伏耐力比が2を超える場合があり、厳しい条件の部材となっている。

参考文献

- 1) 入倉孝次郎, 三宅弘恵: シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, No. 110, pp. 849-875, 2001.
- 2) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプおよび地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰, 日本建築学会構造系論文集, No. 523, pp. 63-70, 1999.
- 3) 宮腰研, 香川敬生, 趙伯明, 徳林宗孝, 澤田純男: 大阪堆積盆地における深部構造のモデル化(その1), 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 185-188, 1999.
- 4) Kamae, K., Irikura, K. and Pitarka, A.: A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 88, pp.357-367, 1998.
- 5) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, The 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 151-156, 1986.
- 6) (社)日本道路協会: 道路橋示方書, V耐震設計編, pp. 16-19, 2002.