

論文 PC連続ラーメン橋の損傷進展に関する解析的検討

濱本 朋久*1・松田 泰治*2・大塚 久哲*3・佃 友宏*4

要旨：一般に連続ラーメン橋は耐震性が非常に高い不静定構造物であるため、落橋させないという要求性能に対して橋梁全体系で崩壊に至るメカニズムを精度よく解明し耐震設計の合理化を図る必要がある。そこで本研究では、動的応答解析を中心に連続ラーメン橋の損傷進展から崩壊に至る過程に着目し、橋軸方向を対象に解析的検討を実施した。

キーワード：ラーメン橋、動的応答解析、静的解析、耐震設計

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震における道路橋の被災経験を踏まえて、1996年および2002年に改訂された道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編^{1)・2)}（以下、道示Ⅴと称す）では、地震時保有水平耐力法が耐震設計として位置づけられ、橋の耐震性能も規定された。連続ラーメン橋のように地震時の挙動が複雑な橋梁については動的解析に基づく耐震設計の照査が規定され、地震時保有水平耐力法による設計計算例³⁾では連続ラーメン橋の終局状態を「想定した複数の塑性ヒンジのうちいずれかが終局に達した時」を橋梁全体系での終局状態と規定している。この規定は等橋脚高を有する連続ラーメン橋に対して橋脚が崩壊に至る目安となり得ると考えられるが、この規定を忠実に守るが故に、不等橋脚高を有する連続ラーメン橋では橋脚の杭基礎に膨大な耐力を要求するケースが生じている。また既往の研究⁴⁾により、連続ラーメン橋の実務設

計における比較検討が報告されている。一般に連続ラーメン橋は耐震性が非常に高い不静定構造物であるため、落橋させないという要求性能に対して橋梁全体系で崩壊に至るメカニズムを精度良く解明し耐震設計の合理化を図る必要がある。さらに実務設計では、静的な地震時保有水平耐力法による耐震設計がレベル2地震動に対して安全側の設計手法と考えられ、安全性の判定結果では非線形特性を考慮した動的応答解析による応答結果と大きな差異が生じるケースが多々見受けられる。

そこで本研究では、不等橋脚高を有する連続ラーメン橋を対象に、地震時保有水平耐力法によるプッシュオーバー解析（以下、静的解析と称す）と時刻歴応答解析（以下、動的解析と称す）における塑性ヒンジ部の損傷進展などに着目し、連続ラーメン橋の橋軸方向を対象に解析的検討を実施した。

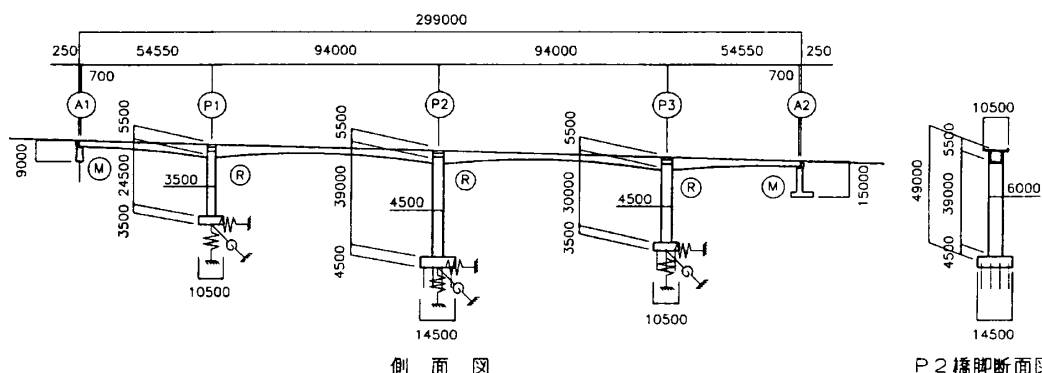


図-1 解析対象橋梁

- *1 パシフィックコンサルタンツ(株)九州本社 第二技術部水構造グループ 工修（正会員）
- *2 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門 工博（正会員）
- *3 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 工博（正会員）
- *4 九州大学工学部 建設都市工学科（非会員）

2. 解析条件

本検討は支間割りが対称であるPC4径間連続ラーメン橋を対象とした(図-1参照)。本橋梁の解析モデルは、橋長299.00m, 支間割54.55+94.00+94.00+54.55m, 橋脚高はP1橋脚が24.50m, P2橋脚が39.00m, P3橋脚が30.00mの不等橋脚高を有するモデルとする。高橋脚の応答が卓越するⅡ種地盤上に建設される橋とし、地域区分はA地域(地域別補正係数: $C_z=1.0$), 重要度区分はB種の橋とする。また橋梁全体系の破壊形態として、上部構造および基礎構造は降伏させずに橋脚の曲げ破壊先行型とする。

解析モデルの材料特性は上部構造を全断面有効時の線形部材で、はり要素とした。橋脚部の材料特性は降伏剛性を有する非線形部材で、はり要素とした。ただし橋脚の上下端には塑性ヒンジを考慮し、塑性ヒンジ領域の中央に非線形回転バネを設けた。履歴特性は完全バイリニア型のM- θ 特性(武田型)を設定した。橋脚のフーチング下端には動変形係数を考慮した線形の杭頭ばねを設けた。静的解析を行う際には、地盤の変形を無視して橋脚のみの変形性能に着目するため、橋脚下端を固定とした。また初期断面力として上部構造の施工段階に生じるプレストレス2次力、クリープ等による不静定力と橋梁自身の持つ自重を考慮した。図-2に検討解析時の初期状態における曲げモーメント分布を示す。さらに解析モデルの質量は、節点に集約した重量を重力加速度 9.8m/sec^2 で除した値とし、節点の自由度は水平2方向と回転を考慮した。

動的解析ではニューマーク β 法($\beta=0.25$)を用い、積分時間間隔は0.001秒とした。また共



図-2 初期状態
曲げモーメント分布

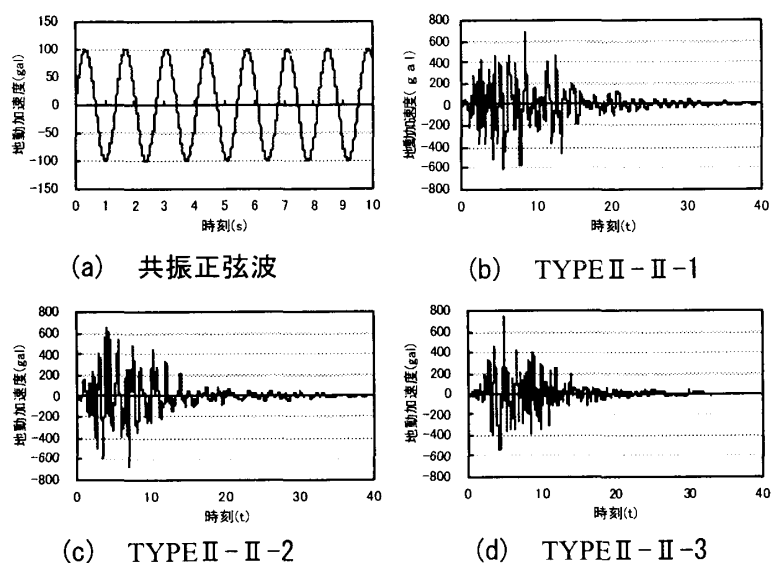


図-3 入力地震動波形

振正弦波とレベル2地震動として道示Vを参考に強震記録を振動数領域で振幅調整したⅡ種地盤用の加速度波形(以下、標準波と称す)3波(TYPE II-II-1, TYPE II-II-2, TYPE II-II-3)を入力地震動として用いた。共振正弦波の周期は固有値解析より得られた有効質量比の卓越する1次モードの周期とした。検討に用いた入力地震動波形を図-3(a)~(d)に示す。モード減衰定数をひずみエネルギー比例型減衰で計算する時に用いた各部材の減衰定数は、上部構造:3%, 橋脚部:5%, 塑性ヒンジ部:2%, 基礎構造:20%である。解析ソフトには汎用構造解析プログラムTDAPⅢを用いた。

3. 解析結果

3.1 固有値解析結果

動的解析で使用する減衰は、固有値解析により以下の式で規定されるレーリー減衰[C]で評

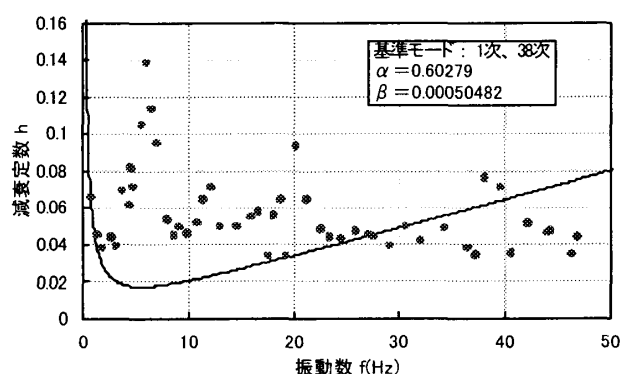


図-4 モード減衰

価した。

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]$$

ここに $[C]$: 減衰マトリクス

$[M]$: 質量マトリクス

$[K]$: 剛性マトリクス

α, β : 係数

ここで、係数 α, β は橋脚、上部構造および基礎構造部分にそれぞれ減衰定数 h を定義し固有値解析結果を基に算定されるモード減衰定数から、有効質量比が卓越する1次モードと累積有効質量比が100%となる38次モードを選択して設定した。図-4にモード減衰を示す。

固有値解析結果を表-1に示す。解析モデルでは1次モードの有効質量比が全体の約60%となっており、一般に連続ラーメン橋のような構造が複雑な橋梁は、橋軸方向において高次振動モードの影響を無視できないものと考えられる。また、10次モードにおける有効質量比が7%と1次モードの次に大きな値となっている。従って解析モデルでは、1次モード、10次モード応答に与える影響が大きいと考えられる。図-5(a)、(b)に1次と10次の主要モードを示す。

3. 2 静的解析結果

静的解析では、上部構造ならびに各橋脚に対して、同一の水平力を漸増的に作用させた。また加震方向は、不等橋脚高を有するためP1→P3方向に水平力を漸増させた場合とP1←P3方向に水平力を漸増させた場合を考える。例としてP1→P3方向入力時における曲げモーメント分布を図-6に示す。震度は、上部構造ならびに各橋脚の漸増した全水平力を上部構造ならびに各橋脚の全重量で除した値とする。塑性ヒンジ部の降伏順序、上部構造変位、降伏時における震度をまとめて表-2、図-7に示す。両ケースにおいてP1橋脚下端は最初に降伏に至る。P1橋脚下端ではP1→P3方向入力時の方が先に降伏に至る。逆に、P3橋脚下端ではP1←P3方向入力時の方が先に降伏に至る。理由として、不静定力を考慮し

表-1 固有値解析結果

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (s)	橋軸方向有効質量比 (累積%)	減衰比
1	0.7370	1.3569	62	0.066258
2	1.2789	0.7819	63	0.045681
3	1.7708	0.5647	63	0.038465
4	2.6399	0.3788	67	0.044348
5	3.0874	0.3239	67	0.039652
6	3.7184	0.2689	70	0.069779
7	4.3081	0.2321	70	0.061958
8	4.5045	0.2220	75	0.081948
9	4.7133	0.2122	75	0.071737
10	5.5636	0.1797	82	0.105145



(a) 1次モード



(b) 10次モード

図-5 主要モード



図-6 P1→P3方向入力時
曲げモーメント分布

表-2 静的解析の降伏順序

	(P1→P3)			(P1←P3)		
	降伏順序	上部構造変位 (m)	震度	降伏順序	上部構造変位 (m)	震度
P1上端	2	0.185	0.278	2	0.237	0.373
P1下端	1	0.129	0.216	1	0.196	0.328
P2上端	6	0.512	0.449	6	0.528	0.447
P2下端	5	0.419	0.440	5	0.401	0.435
P3上端	3	0.336	0.405	4	0.265	0.395
P3下端	4	0.384	0.430	3	0.258	0.391

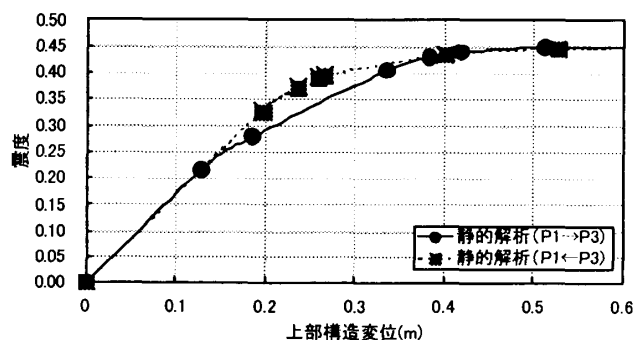


図-7 静的解析時・震度-変位関係

た初期断面力による曲げモーメントに対して、当該橋脚では曲げモーメントを増加させる方向に水平力が作用しているためと考えられる。さらに、降伏順序は両ケースともP1橋脚、P3橋脚、P2橋脚の順である。しかし、P3橋脚では橋脚上下端で降伏順序に相違が認められる。これは、初期断面力の影響がP1←P3方向に水平力を作用させると、橋脚上端よりも橋脚下端に対して損傷の進展を早めたためであると考えられる。

3. 3 動的解析結果

動的解析では、共振正弦波と標準波3波を入力した時の最大応答塑性率を表-3(a)~(h)に示す。共振正弦波は、塑性ヒンジ部が降伏に至る際の応答を詳細に評価するために、最大入力加速度の倍率 α は100galを基準として0.5倍、0.75

倍、1.0倍、1.5倍、以下3.0倍まで変化させた。また標準波は、最大入力加速度の倍率 α を0.1~1.0倍まで変化させた。最大応答塑性率とは最大応答回転角を降伏回転角で除した値である。

標準波入力時の結果(表-3(c)~(h))より、各橋脚の最大応答塑性率に余裕が生じているのは、設計上残留変位の照査などの要因から橋脚の軸方向鉄筋量が決定されるためと考えられる。またこれらの結果より、想定した塑性ヒンジ部が初めて降伏に至る倍率時での橋脚上端応答値・降伏順序を表-4(a)~(d)に示す。

共振正弦波入力時の結果(表-4(a))より、P1→P3方向入力時において降伏順序はP1橋脚下端、P1橋脚上端、P3橋脚下端、P3橋脚上端、P2橋脚上端、P2橋脚下端の順となった。また、P1←P3方向入力時においても前述と同様の順序となった。さらに各橋脚の降伏時における上部構造応

表-3 最大応答塑性率一覧

(a) 共振正弦波 (P1→P3方向入力時)

倍率 α	最大入力 加速度(gal)	最大応答塑性率					
		P1上端	P1下端	P2上端	P2下端	P3上端	P3下端
0.5倍	50	0.680	0.879	0.323	0.329	0.491	0.554
0.75倍	75	0.928	1.781	0.469	0.458	0.642	0.707
1.0倍	100	1.439	2.884	0.594	0.558	0.763	0.827
1.5倍	150	2.929	4.466	0.783	0.741	0.947	1.014
2.0倍	200	3.850	5.580	0.909	0.881	1.382	1.673
2.5倍	250	4.840	6.588	1.016	0.990	2.096	2.388
3.0倍	300	5.607	7.403	1.448	1.240	2.598	2.868

(b) 共振正弦波 (P1←P3方向入力時)

倍率 α	最大入力 加速度(gal)	最大応答塑性率					
		P1上端	P1下端	P2上端	P2下端	P3上端	P3下端
0.5倍	50	0.683	0.881	0.323	0.328	0.489	0.552
0.75倍	75	0.931	1.778	0.472	0.461	0.647	0.711
1.0倍	100	1.435	2.906	0.593	0.553	0.756	0.821
1.5倍	150	2.912	4.504	0.777	0.744	0.969	1.040
2.0倍	200	3.967	5.563	0.924	0.877	1.404	1.647
2.5倍	250	4.640	6.485	1.092	1.013	2.070	2.406
3.0倍	300	5.441	7.444	1.389	1.280	2.646	2.991

(c) TYPE II-II-1 (P1→P3方向入力時)

倍率 α	最大入力 加速度(gal)	最大応答塑性率					
		P1上端	P1下端	P2上端	P2下端	P3上端	P3下端
0.1倍	68.683	0.384	0.507	0.168	0.194	0.327	0.387
0.2倍	137.366	0.627	0.809	0.342	0.367	0.524	0.585
0.3倍	206.049	0.865	1.268	0.508	0.532	0.709	0.773
0.4倍	274.732	1.179	2.305	0.642	0.666	0.861	0.926
0.5倍	343.416	1.915	3.418	0.778	0.782	0.999	1.135
0.6倍	412.099	2.810	4.566	0.936	0.893	1.314	1.560
0.7倍	480.782	3.774	5.735	1.189	1.020	1.718	2.015
0.8倍	549.465	4.786	6.923	1.659	1.361	1.998	2.314
0.9倍	618.148	5.803	8.085	2.195	1.794	2.188	2.509
1.0倍	686.831	6.782	9.183	2.730	2.248	2.698	2.658

(d) TYPE II-II-1 (P1←P3方向入力時)

倍率 α	最大入力 加速度(gal)	最大応答塑性率					
		P1上端	P1下端	P2上端	P2下端	P3上端	P3下端
0.1倍	68.683	0.435	0.572	0.181	0.168	0.294	0.353
0.2倍	137.366	0.731	0.939	0.355	0.325	0.459	0.517
0.3倍	206.049	1.005	1.944	0.530	0.497	0.623	0.682
0.4倍	274.732	1.814	3.291	0.709	0.671	0.787	0.846
0.5倍	343.416	2.763	4.457	0.858	0.820	0.952	1.015
0.6倍	412.099	3.515	5.339	0.964	0.929	1.236	1.476
0.7倍	480.782	4.104	6.047	1.099	1.049	1.713	2.046
0.8倍	549.465	4.535	6.541	1.463	1.362	2.241	2.646
0.9倍	618.148	4.888	6.932	1.893	1.736	2.792	3.257
1.0倍	686.831	5.178	7.257	2.346	2.133	3.356	3.869

(e) TYPE II-II-2 (P1→P3方向入力時)

倍率 α	最大入力 加速度(gal)	最大応答塑性率					
		P1上端	P1下端	P2上端	P2下端	P3上端	P3下端
0.1倍	67.264	0.416	0.549	0.174	0.156	0.289	0.350
0.2倍	134.528	0.692	0.892	0.342	0.298	0.448	0.512
0.3倍	201.792	0.953	1.690	0.510	0.458	0.607	0.673
0.4倍	269.056	1.558	2.933	0.682	0.618	0.767	0.834
0.5倍	336.320	2.411	4.035	0.828	0.757	0.926	0.996
0.6倍	403.583	3.093	4.883	0.926	0.855	1.166	1.405
0.7倍	470.847	3.633	5.569	1.003	0.941	1.635	1.930
0.8倍	538.111	4.102	6.096	1.224	1.107	2.143	2.474
0.9倍	605.375	4.481	6.490	1.550	1.418	2.661	3.015
1.0倍	672.639	4.788	6.824	1.917	1.774	3.188	3.559

(f) TYPE II-II-2 (P1←P3方向入力時)

倍率 α	最大入力 加速度(gal)	最大応答塑性率					
		P1上端	P1下端	P2上端	P2下端	P3上端	P3下端
0.1倍	67.264	0.378	0.502	0.161	0.181	0.312	0.374
0.2倍	134.528	0.616	0.799	0.328	0.341	0.495	0.560
0.3倍	201.792	0.849	1.223	0.489	0.493	0.668	0.737
0.4倍	269.056	1.132	2.223	0.617	0.617	0.811	0.882
0.5倍	336.320	1.856	3.297	0.739	0.722	0.942	1.012
0.6倍	403.583	2.732	4.405	0.889	0.821	1.132	1.338
0.7倍	470.847	3.671	5.532	1.064	0.935	1.485	1.746
0.8倍	538.111	4.625	6.673	1.446	1.145	1.755	2.039
0.9倍	605.375	5.523	7.721	1.869	1.512	2.008	2.217
1.0倍	672.639	6.415	8.724	2.310	1.922	2.574	2.346

(g) TYPE II-II-3 (P1→P3方向入力時)

倍率 α	最大入力 加速度(gal)	最大応答塑性率					
		P1上端	P1下端	P2上端	P2下端	P3上端	P3下端
0.1倍	73.633	0.411	0.545	0.163	0.173	0.318	0.368
0.2倍	147.267	0.682	0.885	0.319	0.324	0.507	0.547
0.3倍	220.900	0.942	1.685	0.477	0.475	0.695	0.726
0.4倍	294.534	1.480	2.898	0.620	0.617	0.871	0.893
0.5倍	368.167	2.154	3.835	0.741	0.740	1.044	1.091
0.6倍	441.800	2.806	4.481	0.856	0.850	1.449	1.560
0.7倍	515.434	3.388	5.037	0.964	0.955	1.963	2.096
0.8倍	589.067	3.858	5.488	1.118	1.124	2.510	2.659
0.9倍	662.701	4.394	5.950	1.349	1.436	3.052	3.221
1.0倍	736.334	4.959	6.913	1.564	1.718	3.487	3.671

(h) TYPE II-II-3 (P1←P3方向入力時)

倍率 α	最大入力 加速度(gal)	最大応答塑性率					
		P1上端	P1下端	P2上端	P2下端	P3上端	P3下端
0.1倍	73.633	0.421	0.546	0.164	0.171	0.308	0.371
0.2倍	147.267	0.703	0.887	0.322	0.321	0.487	0.554
0.3倍	220.900	0.969	1.713	0.480	0.449	0.639	0.711
0.4倍	294.534	1.617	2.904	0.642	0.585	0.765	0.827
0.5倍	368.167	2.618	4.210	0.805	0.738	0.881	0.931
0.6倍	441.800	3.678	5.438	0.954	0.881	1.005	1.049
0.7倍	515.434	4.672	6.517	1.143	1.005	1.420	1.302
0.8倍	589.067	5.508	7.417	1.378	1.255	1.941	1.616
0.9倍	662.701	6.229	8.209	1.604	1.530	2.426	2.046
1.0倍	736.334	6.747	8.794	1.800	1.753	2.773	2.579

答変位においても、入力方向に依存しない傾向がみられた。共振正弦波に基づく動的解析では入力方向で降伏順序に相違が見られず、各橋脚の降伏時における上部構造応答変位もほぼ一致する。従って、共振正弦波以外の標準波においても同様の現象が生じ、降伏に至ると考えられる。

標準波であるTYPE II - II - 1 入力時の結果(表-4(b))より、両方向入力時での降伏順序は共振正弦波入力時の結果とほぼ同様の傾向が認められた。また、各橋脚部の降伏時における上部構造応答変位も共振正弦波入力時とほぼ一致した。P2橋脚で共振正弦波入力時と降伏順序、降伏時上部構造応答変位に相違が生じるのは、共振正弦波は非線形1次モードで振動しているのに対し、標準波は非線形高次モードの影響と時刻歴により順次塑性ヒンジが発生したことで橋脚の剛性が低下し、連続ラーメン橋の橋梁全体系が非線形モードで振動する影響と考えられる。

TYPE II - II - 2, TYPE II - II - 3 入力時の結果(表-4(c), (d))も、共振正弦波入力時の結果と同様の傾向が認められる。TYPE II - II -

3のP1←P3方向入力時においてP3橋脚で降伏順序に相違が認められる。これは、静的解析結果で確認したのと同様に、不静定力による初期断面力を考慮したためと考えられる。またP2橋脚で降伏順序に相違が認められるのは、TYPE II - II - 1 入力時でのP2橋脚における降伏順序、降伏時上部構造応答変位が異なる理由と同様と考えられる。

3. 4 損傷進展機構

損傷進展のメカニズムは、静的解析と動的解析の比較に際して、動的解析で得られた応答加速度の最大値を震度に換算して比較を行った。本解析モデルの慣性力については橋脚部全質量が上部構造質量の約43%であるため、橋梁全体系で大部分の質量が上部構造に集中している。そこで、橋脚上端の応答加速度を絶対応答加速度 9.8m/sec^2 で除した値を換算震度とした。それらの比較を図-8, 9, 10に示す。

静的解析と動的解析において、設計上最初に水平力が集中するP1橋脚、次にP3橋脚、P2橋脚の順に降伏する過程は一致する。また動的解析では、橋脚降伏時における上部構造応答変位は、共振正弦波、標準波のいずれのケースも静的解析とほぼ

表-4 塑性ヒンジ部降伏時における橋脚上端応答値

(a) 共振正弦波入力時降伏順序一覧表

動的解析						
(P1→P3)	降伏時刻(s)	上部応答加速度(m/sec ²)	上部構造応答変位(m)	上部構造変位絶対値(m)	換算震度	降伏順序
P1上端	2.750	-3.511	0.197	0.197	0.358	2
P1下端	2.744	-2.722	0.147	0.147	0.278	1
P2上端	2.840	-6.154	0.395	0.395	0.628	5
P2下端	1.378	-6.515	0.408	0.408	0.665	6
P3上端	2.078	5.674	-0.303	0.303	0.579	4
P3下端	3.546	4.623	-0.260	0.260	0.472	3

動的解析						
(P1←P3)	降伏時刻(s)	上部応答加速度(m/sec ²)	上部構造応答変位(m)	上部構造変位絶対値(m)	換算震度	降伏順序
P1上端	3.436	-3.707	0.204	0.204	0.378	2
P1下端	3.414	-2.872	0.151	0.151	0.293	1
P2上端	2.098	-6.431	0.393	0.393	0.656	5
P2下端	2.140	-6.151	0.398	0.398	0.628	6
P3上端	2.778	5.848	-0.309	0.309	0.597	4
P3下端	2.824	4.819	-0.263	0.263	0.492	3

(c) TYPE II - II - 2入力時降伏順序一覧表

動的解析						
(P1→P3)	降伏時刻(s)	上部応答加速度(m/sec ²)	上部構造応答変位(m)	上部構造変位絶対値(m)	換算震度	降伏順序
P1上端	6.546	-3.993	0.206	0.206	0.407	2
P1下端	6.536	-2.998	0.151	0.151	0.306	1
P2上端	6.674	-5.915	0.359	0.359	0.694	5
P2下端	5.958	6.692	-0.393	0.393	0.683	6
P3上端	5.920	5.892	-0.299	0.299	0.601	4
P3下端	5.888	6.198	-0.286	0.286	0.632	3

動的解析						
(P1←P3)	降伏時刻(s)	上部応答加速度(m/sec ²)	上部構造応答変位(m)	上部構造変位絶対値(m)	換算震度	降伏順序
P1上端	5.910	-3.388	0.197	0.197	0.346	2
P1下端	5.878	-2.468	0.140	0.140	0.252	1
P2上端	5.996	-5.521	0.361	0.361	0.563	5
P2下端	5.950	-6.810	0.414	0.414	0.695	6
P3上端	6.658	5.749	-0.298	0.298	0.587	4
P3下端	6.682	4.938	-0.260	0.260	0.504	3

(b) TYPE II - II - 1入力時降伏順序一覧表

動的解析						
(P1→P3)	降伏時刻(s)	上部応答加速度(m/sec ²)	上部構造応答変位(m)	上部構造変位絶対値(m)	換算震度	降伏順序
P1上端	6.060	-3.569	0.197	0.197	0.364	2
P1下端	7.432	-1.928	0.114	0.114	0.197	1
P2上端	6.122	-5.939	0.369	0.369	0.606	5
P2下端	6.146	-5.850	0.368	0.368	0.597	6
P3上端	6.768	5.492	-0.311	0.311	0.560	4
P3下端	6.774	4.813	-0.274	0.274	0.491	3

動的解析						
(P1←P3)	降伏時刻(s)	上部応答加速度(m/sec ²)	上部構造応答変位(m)	上部構造変位絶対値(m)	換算震度	降伏順序
P1上端	6.800	-3.115	0.187	0.187	0.318	2
P1下端	6.660	-2.921	0.154	0.154	0.298	1
P2上端	6.142	5.956	-0.359	0.359	0.608	6
P2下端	6.132	5.992	-0.359	0.359	0.611	5
P3上端	6.080	5.180	-0.304	0.304	0.529	4
P3下端	6.138	4.267	-0.260	0.260	0.435	3

(d) TYPE II - II - 3入力時降伏順序一覧表

動的解析						
(P1→P3)	降伏時刻(s)	上部応答加速度(m/sec ²)	上部構造応答変位(m)	上部構造変位絶対値(m)	換算震度	降伏順序
P1上端	6.052	-3.448	0.199	0.199	0.352	2
P1下端	6.038	-2.841	0.148	0.148	0.290	1
P2上端	5.426	6.629	-0.387	0.387	0.676	6
P2下端	5.282	6.756	-0.375	0.375	0.689	5
P3上端	5.420	4.607	-0.267	0.267	0.470	4
P3下端	5.398	5.152	-0.265	0.265	0.526	3

動的解析						
(P1←P3)	降伏時刻(s)	上部応答加速度(m/sec ²)	上部構造応答変位(m)	上部構造変位絶対値(m)	換算震度	降伏順序
P1上端	5.320	-3.040	0.203	0.203	0.310	2
P1下端	5.302	-2.625	0.148	0.148	0.268	1
P2上端	5.420	-6.274	0.382	0.382	0.640	5
P2下端	5.432	-6.062	0.384	0.384	0.619	6
P3上端	5.444	-4.278	0.336	0.336	0.437	3
P3下端	6.174	4.481	-0.268	0.268	0.457	4

一致する。さらにP2橋脚における上部構造応答変位に差異が認められる部分も存在するが、これは連続ラーメン橋の橋梁全体系が非線形モードで振動する影響と考えられる。従って上部構造応答変位は、静的解析による上部構造水平変位とほぼ近い値を示すことが確認できる。換算震度における差異については、橋梁全体系の慣性力は橋脚躯体にも作用しているため、本検討では上部構造に作用する慣性力のみを考慮したためと考えられる。

4. まとめ

本稿では不等橋脚高を有する連続ラーメン橋を対象に、静的解析と動的解析における結果の相違点に着目し、橋軸方向について比較検討を行った。その結果として本解析モデルの連続ラーメン橋では、以下の点が解析的に確認できた。

- ・動的解析結果では、共振正弦波と標準波の上部構造応答変位は同様の傾向を示し、交番载荷状態では入力方向に依存しない傾向が認められた。
- ・橋脚高さが低い場合最初に水平力が集中し、かつ損傷進展の起点となるP1橋脚から降伏状態に達した。
- ・静的解析と動的解析の比較結果では、静的解析の塑性ヒンジが発生する順序と動的解析の時刻歴による塑性ヒンジが発生する順序がほぼ一致し、各橋脚の降伏時における上部構造変位もほぼ一致した。

今後は、不等橋脚高を有する連続ラーメン橋を対象に、損傷進展に関するメカニズムに関して、レベル2地震動に対する各橋脚の塑性ヒンジ部が負担する水平力を明確にする必要がある。また塑性ヒンジ部が降伏状態に至った後、橋梁全体系での終局状態も明確にする必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，1996.12
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002.3
- 3) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する

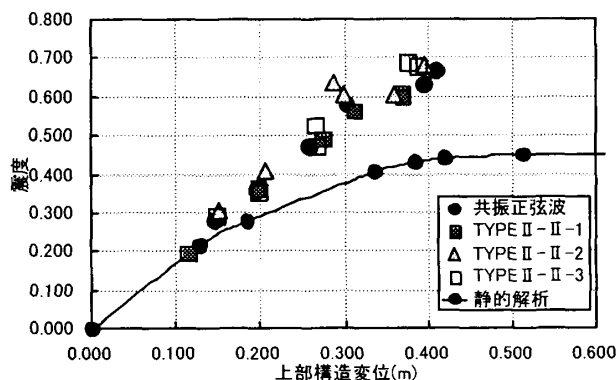


図-8 P1→P3方向入力時

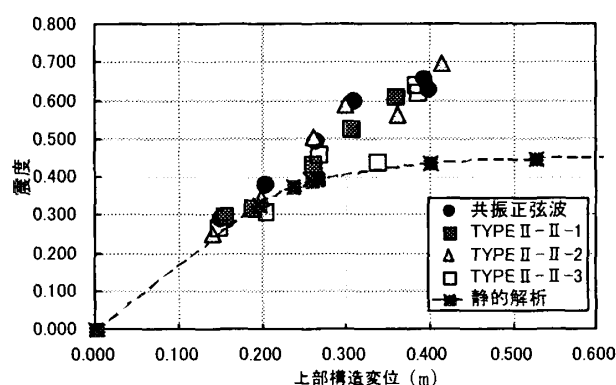


図-9 P1←P3方向入力時

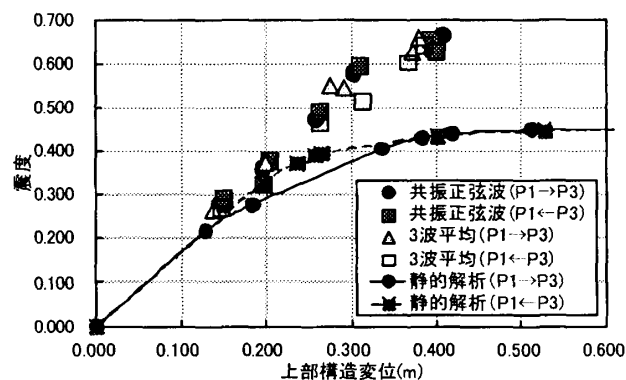


図-10 P1⇔P3方向入力時

資料，1998.1

- 4) 御園生，小倉，土田，永井，佐々木：不等の高橋脚を有するコンクリートラーメン橋の耐震設計に関する検討，第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 121-128, 1998.12,