

(90) 上部構造の剛性低下を考慮した非線形動的解析によるPCラーメン橋の設計

日本道路公団九州支社 構造技術課 前原 直樹
 ピーシー橋梁(株)九州支店技術部 正会員 大和 幸夫
 ピーシー橋梁(株) 同上 正会員 ○伊澤 成幸

1. はじめに

九州自動車道観音ヶ字都橋は、橋長113.440m、橋脚高21.3mを有する全外ケーブル方式PC2径間連続ラーメン箱桁橋で、架設工法は張出し架設工法を採用している。本橋の耐震設計においては、全体系の非線形動的解析により安全性を確認することとした。非線形動的解析は、上部構造のコンクリートのひび割れによる剛性低下を考慮して行った。

ここでは、剛性低下を考慮した耐震設計の設計手法、上部構造の剛性評価を1実施例として報告する。

2. 橋梁概要

橋梁概要を表-1に、橋梁一般図を図-1、2に示す。

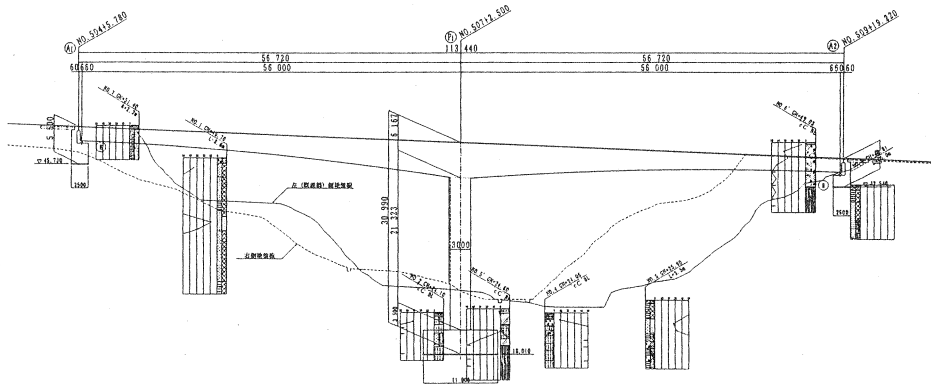


図-1 側面図

表-1 橋梁概要

橋種	プレストレストコンクリート道路橋
道路規格	第1種第3級B規格
構造形式	PC2径間連続ラーメン箱桁橋
橋長	113.440m
支間	56.000m+56.000m
有効幅員	8.675m (有効幅員)
勾配	縦断 4.000% 横断 2.000%
活荷重	B活荷重

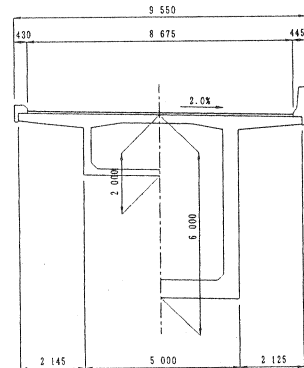


図-2 断面図

3. 解析モデル及び解析方法

3.1 上部構造の照査手順

図-3に上部構造の照査手順を示す。

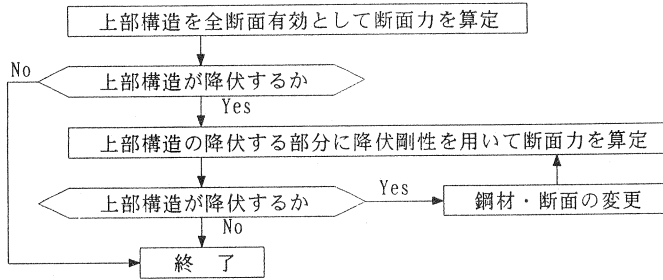


図-3 上部構造の照査手順

3.2 解析モデル

図-4に解析モデル、表-2に部材の減衰定数を示す。端支点及び橋脚下端の支持条件としては、端支点にはゴム支承のせん断及び鉛直方向バネを、橋脚下端には基礎の地盤バネを設けた。

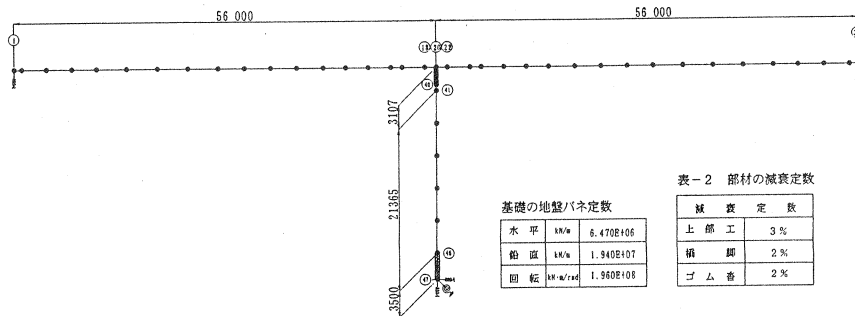


図-4 解析モデル

3.3 部材剛性

上部構造は線形部材、橋脚は非線形部材として解析を行った。橋脚は、コンクリートのひび割れ発生時及び引張鉄筋降伏時を考慮したトリリニア型のスケルトンカーブとし、剛性低下型トリリニアモデル(武田)を採用した。上部構造は全断面有効とみなす剛性を用いた解析を事前に行い、初降伏モーメントを超える部材のみに降伏剛性を用いた。

上部構造の初降伏としては、上部構造断面内の主要な構造部材の最外縁の鉄筋等が降伏した場合とした。

降伏剛性は、図-5に示すように、上部構造断面の上側引張り及び下側引張りではコンクリートのひびわれ時、初降伏時が異なるため、初期断面力状態と上側引張りとなる初降伏時とを結ぶ割線剛性と初期断面力状態と下側引張りとなる初降伏時とを結ぶ割線剛性を比較し、剛性の高い方を用いた。

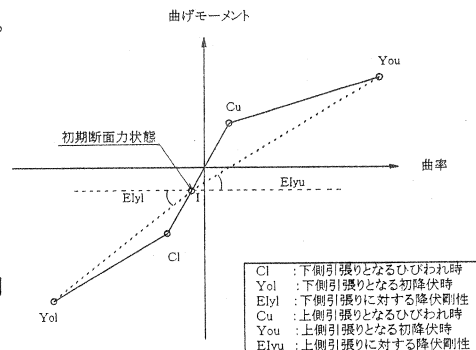


図-5 降伏剛性の算出

4 解析結果

4. 1 解析結果

上部構造の照査手順(図-3)に従って、全ての断面の初降伏モーメントが応答断面力(死荷重+地震)以上(上部構造は降伏しない)となるまで解析を繰り返した。

解析ケースと結果を表-3に示す。また、震度法にて決定された断面を全断面有効とした場合(ケース1)と降伏剛性を採用した場合(ケース5)の応答断面力(死荷重+地震)及び初降伏モーメントを表-4、-5に示す。

表-3 解析ケース

解析ケース	上部構造(剛性)	結果
ケース1	全断面有効	④~⑩断面が初降伏(表-4参照)
ケース2	④~⑩断面のみ降伏剛性	④~⑨断面が初降伏(正、負曲げモーメント)
ケース3	④~⑨断面の上床版鉄筋ピッチ変更(ctc250からctc125)	④~⑨断面が初降伏(正の曲げモーメント)
ケース4	④~⑨断面の下床版鉄筋径変更(D19,D22,D25)	⑤~⑦断面が初降伏(正の曲げモーメント)
ケース5	⑤~⑦断面のウェブ鉄筋径変更(D19,D22,D25)	全ての断面が初降伏しない(表-5参照)

表-4 全断面有効とした場合

断面	単位:(kN・m)					
	応答断面力		初降伏モーメント		比率	
	正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ
1	358.0	-358.0	24542.7	-27506.7	68.56	68.56
2	6462.9	-2453.7	25117.6	-26710.0	3.89	10.89
3	25049.3	-12751.4	27139.4	-24615.3	1.08	1.93
4	41274.1	-24290.1	29268.0	-23062.7	0.71	0.95
5	54786.7	-36798.1	33743.1	-27626.0	0.62	0.75
6	66926.6	-52853.3	35762.9	-33912.0	0.53	0.64
7	73639.4	-69676.7	39920.4	-43358.6	0.54	0.62
8	75722.5	-85628.1	43259.4	-56900.6	0.57	0.66
9	71251.2	-102157.1	47570.2	-75760.2	0.67	0.74
10	61518.1	-116756.1	51442.2	-99237.3	0.84	0.85
11	45401.2	-132205.2	53438.2	-130669.0	1.15	0.99
12	29262.6	-148436.8	55199.0	-167899.0	1.89	1.13
13	7645.1	-165888.1	57543.4	-215050.0	7.53	1.30
14	-14880.7	-182799.8	60105.0	-264015.0	17.74	1.44
15	-36467.8	-203634.2	61786.3	-321796.0	8.82	1.58
16	-58346.3	-230868.2	73998.8	-402219.0	6.89	1.74
17	-69020.4	-247463.9	75362.0	-428599.0	6.21	1.73
18	-89651.6	-283735.3	96981.9	-549125.0	6.13	1.94
19	-99360.5	-301830.0	96332.5	-548742.0	5.52	1.82
20	-97119.0	-300364.2	96623.7	-549023.0	5.65	1.83

表-5 降伏剛性を採用した場合

断面	単位:(kN・m)					
	応答断面力		初降伏モーメント		比率	
	正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ
1	358	-358	36590	-27815	102.21	102.21
2	6071	-1512	37165	-27037	6.12	17.89
3	23353	-8716	39221	-24925	1.68	2.86
4	38118	-17019	43272	-23827	1.14	1.40
5	49946	-26038	54930	-34582	1.10	1.33
6	59546	-37287	62162	-41397	1.04	1.11
7	63248	-48722	66671	-51066	1.05	1.05
8	61743	-58594	68858	-64938	1.12	1.11
9	53120	-68200	61025	-80941	1.15	1.19
10	39065	-76088	51442	-99237	1.32	1.30
11	19531	-85277	53438	-130669	2.74	1.53
12	433	-101698	55199	-167899	127.45	1.65
13	-16523	-129928	57543	-215050	13.02	1.66
14	-28089	-158398	60105	-264016	9.40	1.67
15	-40622	-192188	61786	-321796	7.92	1.67
16	-55147	-229321	73999	-402219	7.29	1.75
17	-64127	-249980	75362	-428599	6.66	1.71
18	-82967	-292799	96982	-549125	6.62	1.88
19	-92584	-313592	96333	-548742	5.93	1.75
20	-90334	-312362	96624	-549023	6.08	1.76

4. 2 必要鉄筋量と実配置

解析結果より、各断面の必要鉄筋量と実配置鉄筋量を図-6に、主要断面(⑥断面)の鉄筋配置を図-7に示す。尚、鉄筋の実配置は、各ブロックは同一鉄筋径とし、前後のブロックの鉄筋径差が大きい場合は、鉄筋径の調整を行った。

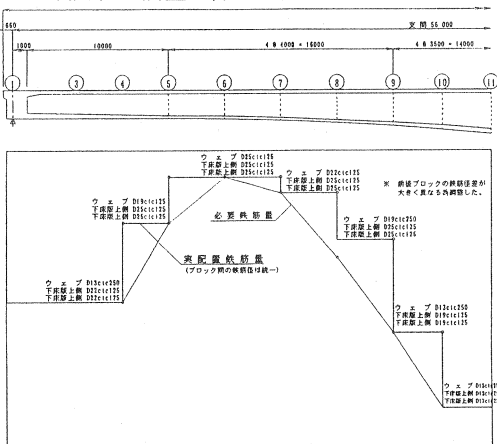


図-6 必要鉄筋量

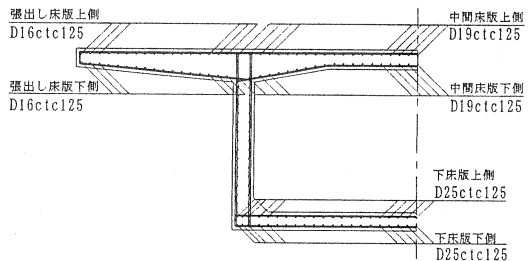


図-7 鉄筋配置

5. 上部構造の剛性評価

5. 1 全断面有効として解析を行った場合

応答断面力（地震）の比較を表-6に示す。全断面有効として解析を行った場合の応答断面力（地震）は、前項4の解析結果（④～⑪断面降伏剛性）に比べ1.11～2.00倍となり、降伏剛性を用いることにより応答断面力の分散が計れた。

配置鉄筋（⑥断面）の比較を表-7に示す。上側引張りに対して、張出し床版の鉄筋径をD16mmからD19mmに、中間床版の鉄筋径をD19mmからD29mmに、下側引張りに対して、下床版の鉄筋径をD25mmからD35mmに変更することにより応答断面力が初降伏モーメント以下となった。

5. 2 降伏剛性の考え方について

前項までの降伏剛性を用いた場合の解析では、剛性の高い方を用いていたが、ここでは、降伏剛性の採り方として、剛性の低い方を用いた場合と剛性の平均値を用いた場合について解析し比較を行った。表-8に解析ケースを、表-9に降伏剛性を、表-10に応答断面力（地震）の比較を示す。表-10よりケース1の降伏剛性が高い場合の応答断面力（地震）が最大となるが、各ケースの応答断面力（地震）比は、0.85～0.95程度となった。

表-6 応答断面力（地震）の比較

断面	全断面有効		降伏剛性		使用剛性
	100m/s	100m/s	100m/s	100m/s	
1	3.53	0.74	1.07	0.91	全断面有効
2	3.53	0.76	1.05	0.91	全断面有効
3	3.35	0.80	1.00	0.90	全断面有効
4	3.04	0.82	1.06	0.94	降伏剛性
5	2.80	1.03	1.34	1.19	降伏剛性
6	2.76	1.15	1.54	1.35	降伏剛性
7	3.23	1.34	1.79	1.57	降伏剛性
8	3.98	1.55	2.12	1.89	降伏剛性
9	5.54	2.07	2.33	2.20	降伏剛性
10	7.42	2.57	2.56	2.57	降伏剛性
11	10.05	3.61	3.35	3.48	降伏剛性
12	13.66	5.02	4.37	4.70	全断面有効
13	18.56	7.21	5.84	6.33	全断面有効
14	24.07	9.76	7.45	8.61	全断面有効
15	31.10	13.21	9.42	11.32	全断面有効
16	29.98	18.53	12.47	15.50	全断面有効
17	45.24	20.80	14.08	17.44	全断面有効
18	57.66	29.18	18.19	23.69	全断面有効
19	57.66	28.47	18.84	23.66	全断面有効
20	57.66	26.56	18.78	23.67	全断面有効

表-7 配置鉄筋（⑥断面）の比較

張出し部	降伏剛性		全断面有効
	上側	下側	
張出し部	上側	D16c125	→ D19c125
	下側	D16c125	→ D19c125
中間部	上側	D19c125	→ D29c125
	下側	D19c125	→ D29c125
下床版	上側	D25c125	→ D35c125
	下側	D25c125	→ D35c125

表-8 解析ケース

解析ケース	剛性
ケース1	上側引張りと下側引張りの剛性で高い方を用いて解析
ケース2	上側引張りと下側引張りの剛性で低い方を用いて解析
ケース3	上側引張りと下側引張りの剛性で平均値を用いて解析

表-9 降伏剛性

断面	単位:(kN・m)					
	全断面有効		降伏剛性		比	
	正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ
1	0	0	0	0	0.00	0.00
2	4194	-4723	3802	-3781	1.10	1.25
3	17779	-20921	16983	-15986	1.11	1.25
4	30834	-34720	27476	-27459	1.11	1.26
5	43055	-48530	38214	-37770	1.13	1.28
6	56265	-63515	48884	-47949	1.15	1.32
7	67253	-76953	58862	-55108	1.18	1.39
8	75562	-85759	61612	-59723	1.21	1.46
9	81046	-92362	62915	-58405	1.29	1.58
10	83146	-95128	66983	-54460	1.37	1.75
11	83083	-95523	56213	-49595	1.48	1.97
12	84024	-93676	55194	-46937	1.52	2.00
13	83853	-89950	59415	-53990	1.41	1.67
14	82231	-85688	69024	-61286	1.19	1.40
15	84713	-82453	80559	-71007	1.05	1.16
16	89542	-82980	92741	-81433	0.97	1.02
17	94125	-84319	99018	-86835	0.95	0.97
18	105167	-88916	111852	-97980	0.94	0.91
19	111047	-91423	117824	-103185	0.94	0.99
20	111541	-91644	118366	-103662	0.94	0.98

表-10 応答断面力（地震）の比較

断面	単位:(kN・m)									
	正の曲げモーメント			負の曲げモーメント						
	ケース1	ケース2	ケース3	ケース1と2の比率	ケース1と3の比率	ケース2と3の比率				
4	27678	25972	27063	0.94	0.98	-27459	-24308	-26939	0.89	0.95
5	38214	36666	37283	0.93	0.98	-37770	-33217	-35642	0.86	0.94
6	48884	45304	47482	0.93	0.97	-47949	-41617	-44995	0.87	0.94
7	56862	52084	54837	0.92	0.96	-55108	-46920	-51305	0.85	0.93
8	61612	55490	58832	0.90	0.95	-58725	-48579	-53991	0.83	0.92
9	62915	56351	63941	0.88	0.94	-58405	-46349	-52761	0.79	0.90
10	66983	52157	56886	0.86	0.94	-54460	-43521	-48588	0.78	0.89
11	55213	48544	52215	0.86	0.93	-48595	-40038	-43217	0.82	0.89

6. 考察

地震時の上部構造の剛性低下を考慮して解析した結果、応答断面力の分散が計れ、主要断面の断面力は低減でき、補強鉄筋も実利的な配置とすることができた。また、上部構造の剛性評価については、上部構造に発生する曲げモーメントに応じて正確な剛性を評価すべきであり、採用する剛性により応答断面力の変動は予想されるが、今回、安全側を目標として、構造部材の最外縁の鉄筋が降伏する直前の剛性（最大値）を便宜的に採用した。

7. おわりに

非線形動的解析では、上部構造の剛性の評価方法により、応答断面力（地震）が大きく変化し、配置鉄筋の算出が繁雑となる。本稿が、今後、耐震設計を行う上で参考としていただければ幸いである。

8. 参考文献

- 1) (社)日本道路協会 道路橋の耐震設計に関する資料（平成10年1月） pp.2-56-90
- 2) 日本道路公団 設計要領第二集 橋梁建設編（平成10年7月）