

場所打ち中空床版橋の解析手法に関する検討

金 性七^{*1}・藤井 学^{*2}・幸左 賢二^{*3}・高西 昇二^{*4}・樋上 登志夫^{*5}

1. まえがき

中小径間における連続中空床版橋は、景観に対する適応性が良く連続高架区間では主要な構造形式の一つになっている。この形式の設計における解析は、道路橋示方書では版理論で行うことが原則とされており、RC構造の場合はほとんどが版理論によっている。しかし、PC構造の場合は格子理論によっている傾向が見られ、解析方法の合理性に疑問が持たれる。今回、「阪神高速道路公団 PC 構造物検討委員会」では、連続中空床版橋の解析理論の比較検討を行い、各解析手法の特性に関する考察を行った。本報告は、この結果をとりまとめたものである。

のである。

2. 検討概要

比較検討の対象とする解析手法として連続中空床版橋の一般的な解析手法である

- ① 棒理論による方法 (FRAME)
- ② 版理論による方法 (OLSEN)
- ③ 格子理論による方法 (GRID)

の3理論を選定した。

計算モデルは、PC連続中空床版橋の標準スパンと考えられる3×20 mとし、横断構成は広幅員と狭幅員の比較のため図-1に示す「上下線一体断面」および「上

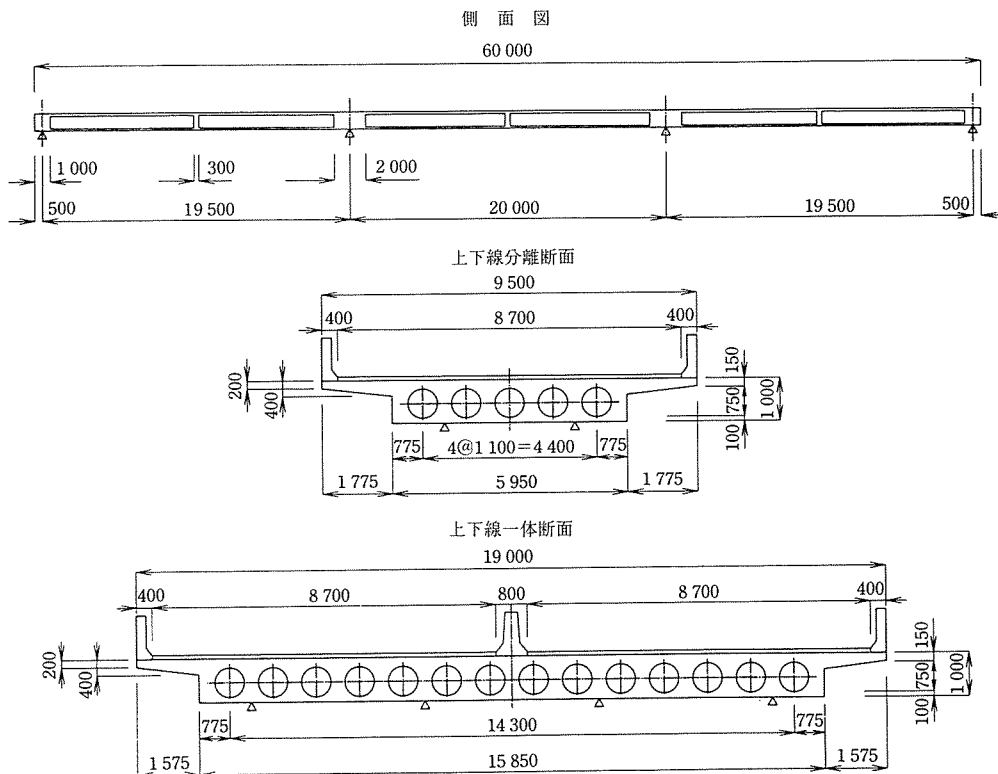


図-1 計算モデル形状図

*1 Kim SUNG CHIL : 京畿大学校工科大学 土木工学科 教授
 *2 Manabu FUJII : 京都大学 工学部土木工学科 教授
 *3 Kenji KOSA : 阪神高速道路公団 工務部設計課 係長
 *4 Shoji TAKANISHI : (株)安部工業所 大阪支店設計課 課長
 *5 Toshio HIGAMI : ドーピー建設工業(株) 大阪支店設計課 課長

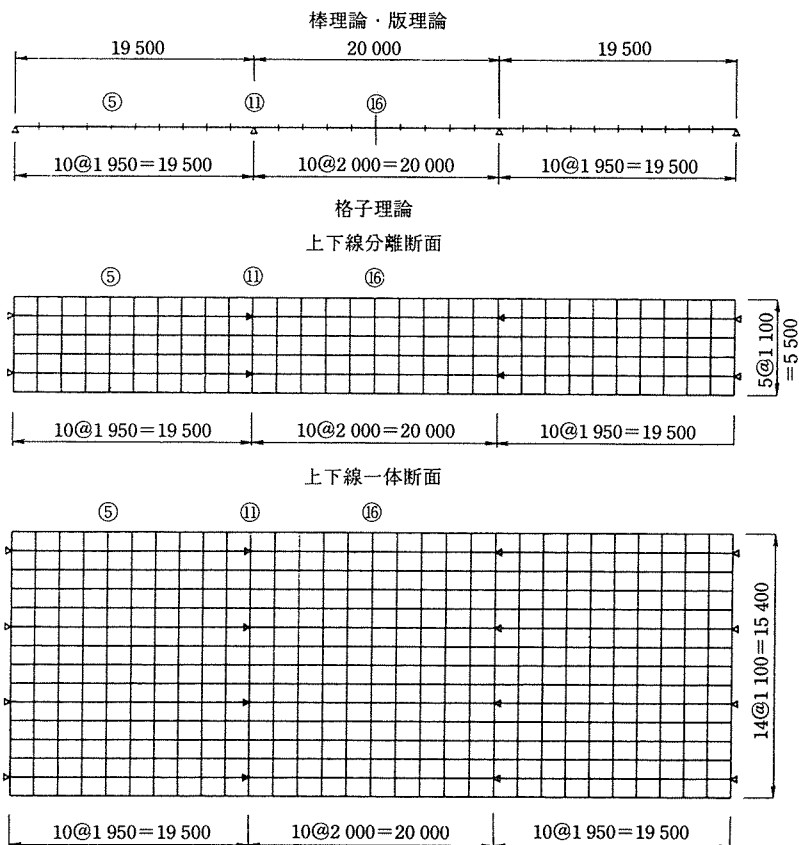


図-2 スケルトンおよび着目点

「下線分離断面」の2ケースを考慮した。図-2に骨組み図および着目点を示す。

また、上記3理論のほかに、解析誤差要因の分析のため有限要素法による解析を行い、各解析手法について比較検討した。主な設計条件を以下に示す。

〈設計条件〉

- 橋 長：60.0 m
- 形 式：PC 3 径間連続中空床版橋
- 活 荷 重：L-20
- 斜 角：90°

- 幅 員：分離構造 9.50 m
- 一体構造 19.00 m

ただし、橋面死荷重（地覆高欄・中央分離帯・舗装）による断面力は主版自重によるものと同じ傾向となるため、死荷重は主版自重のみを考慮した。なお、本報告では設計外力（死荷重、活荷重）による断面力に着目して比較検討を行うため、プレストレス力は無視した。

3. 一般的解析手法による断面力比較

棒・版・格子各理論による曲げモーメントの比較を表

表-1 一般的解析手法による曲げモーメントの比較

			着目点 ⑤		着目点 ⑪		着目点 ⑯	
			M (tf・m)	%	M (tf・m)	%	M (tf・m)	%
分 離 断 面	棒 理 論	死荷重	366.1	100.0	-475.4	100.0	136.4	100.0
		活荷重	289.8	100.0	-222.2	100.0	242.3	100.0
	版 理 論	死荷重	368.5	100.7	-469.2	98.7	142.6	104.5
		活荷重	289.8	100.0	-221.7	99.8	242.5	100.1
	格 子 理 論	死荷重	367.6	100.4	-467.9	98.4	141.1	103.4
		活荷重	302.1	104.2	-245.7	110.6	254.6	105.1
一 体 断 面	棒 理 論	死荷重	809.0	100.0	-1 046.0	100.0	301.0	100.0
		活荷重	483.0	100.0	-371.0	100.0	404.0	100.0
	版 理 論	死荷重	816.5	100.9	-1 040.4	99.5	316.8	105.2
		活荷重	483.7	100.1	-370.1	99.8	404.7	100.2
	格 子 理 論	死荷重	825.8	102.1	-1 050.4	100.4	318.6	105.8
		活荷重	551.8	114.2	-453.4	122.2	469.2	116.1

◇研究報告◇

-1に示す。この比較より下記の傾向が見られる。

- a. 格子理論の活荷重を除き、分離断面および一体断面とも棒理論に対する曲げモーメントの比率は同様であり、幅員による影響はほとんど見られない。
- b. 活荷重について、棒理論と版理論はほぼ同じ結果を得る。しかし、格子理論は棒理論に対し分離断面で約4~10%、一体断面で約14~20%の差異が見られる。
- c. 着目点⑩（中央径間中央）において、版理論および格子理論の死荷重が棒理論に対し約5%大きくなっている。また、活荷重では分離断面で5%、一体断面で16%の差異が見られる。

格子理論の活荷重は、分離断面・一体断面とも他の理論値に比べ大きい。これは格子理論の結果が各桁の最大値の合計となっていることによると考えられる。

これらの傾向を踏まえ分離断面について有限要素法による解析を行い検討を行った。

4. 有限要素法による解析

構造物をダイレクトに評価する手段として、有限要素

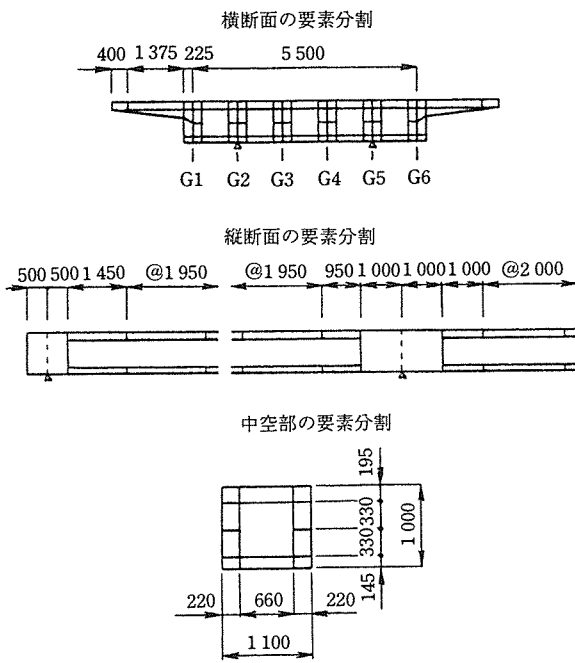


図-3 FEM 解析要素分割

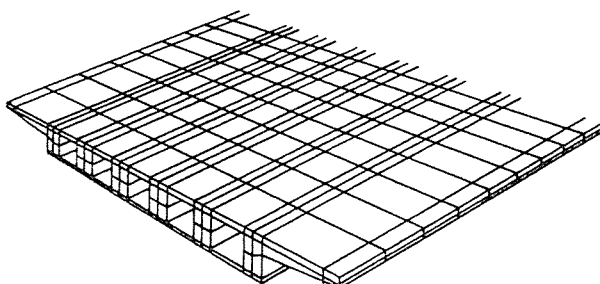


図-4 FEM 解析イメージ図

法による解析を行うに当たっては「FEM 解析のモデル化」および「活荷重の載荷位置」が問題となる。

FEM 解析のモデルは、中空部の評価より3次元モデル（ソリッド要素）とし、解析の対象モデルが大きいためデータの取扱い等を考慮し、複雑なモデルとしないように配慮した。また、中空部および部材厚が小さい径間部中間横桁の評価方法は、FEM 予備解析により下記のように決定した。

- a. 中空部は、その断面2次モーメントが等しくなるような正方形に置き換える。
- b. 中間横桁は、モデル化において部材は設けないが自重は考慮する。

また、横軸方向の要素分割は、支点部付近では横桁部材に合わせ、径間部はスパンの10等分とした。FEM 解析における要素分割イメージを図-3, 4に示す。

活荷重の載荷位置は、横軸方向と橋軸直角方向の両方向について下記のように決定した。

- a. 橋軸方向については、連続桁の影響線（図-5）よ

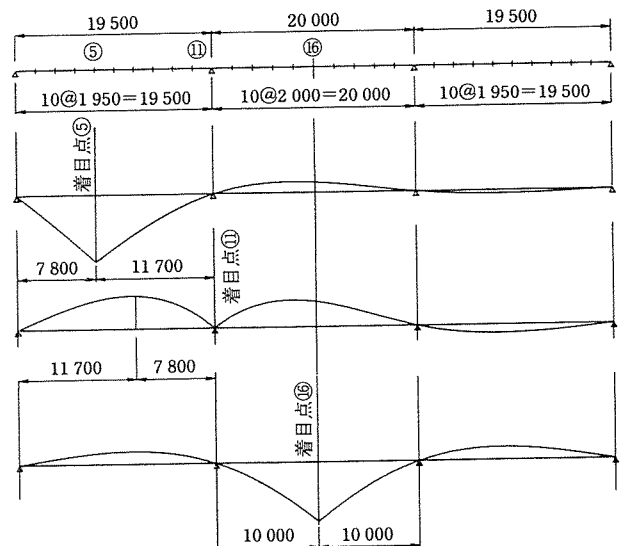


図-5 連続桁の影響線

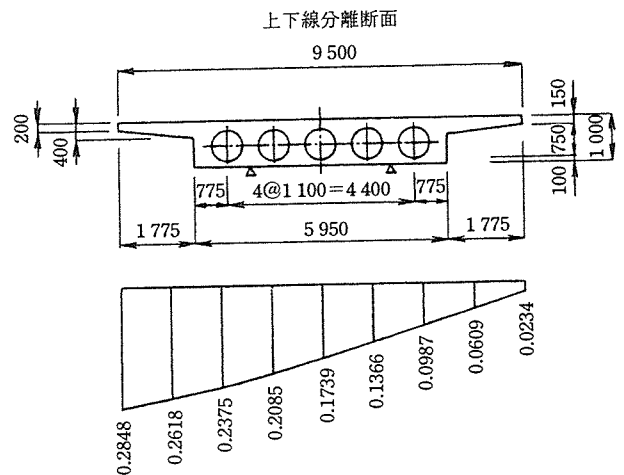


図-6 G2 桁の横方向影響線

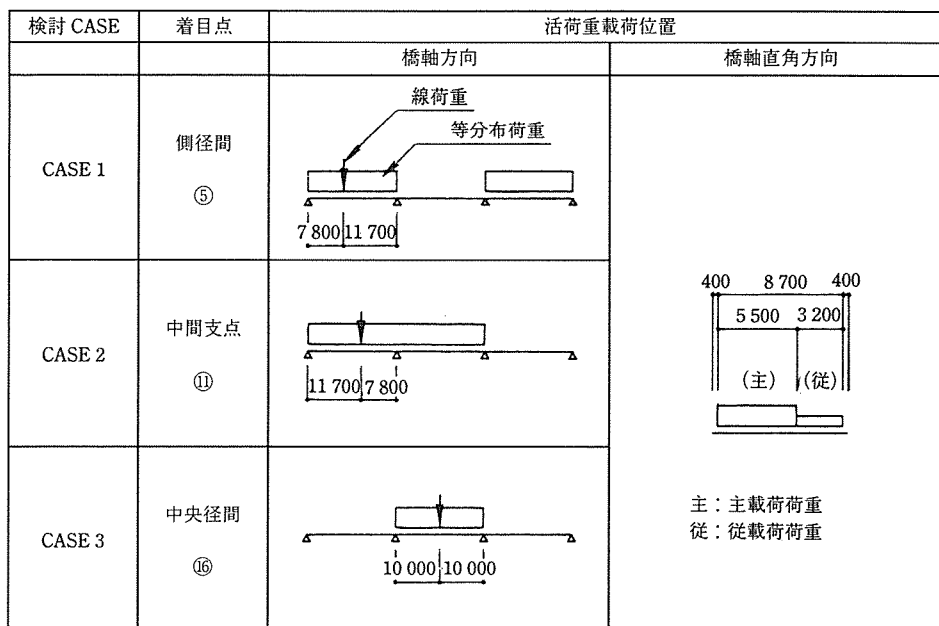


図-7 検討ケース

表-2 FEM 解析結果

(単位: kgf/cm²)

桁 No.	着目点 ⑤				着目点 ⑪				着目点 ⑬			
	死荷重		活荷重		死荷重		活荷重		死荷重		活荷重	
	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁
G 1	28.15710	-41.66616	24.21039	-35.61943	-32.20283	43.04340	-17.86453	23.98350	9.49073	-15.21503	19.98847	-27.00000
G 2	29.28254	-40.13261	24.59502	-33.14057	-37.51735	64.89826	-20.21036	34.96267	10.63571	-13.88541	20.37233	-27.42408
G 3	29.76021	-39.51372	24.39193	-31.97011	-34.05690	36.52371	-17.65233	19.08968	11.14638	-13.10571	20.20553	-26.14923
G 4	29.76021	-39.51372	23.86275	-31.29067	-34.05690	36.52371	-16.46009	17.79798	11.14638	-13.10571	19.71929	-25.43619
G 5	29.28254	-40.13260	22.69157	-30.93214	-37.51735	64.89826	-16.55893	25.26912	10.63571	-13.88541	18.60824	-25.05448
G 6	28.15710	-41.66616	21.58357	-31.88874	-32.20283	43.04340	-14.24593	19.32738	9.49073	-15.21503	17.56215	-25.95105
合計	174.39970	-242.62497	141.33523	-194.84166	-207.55416	288.93074	-102.99217	140.43033	62.54564	-84.41230	116.45601	-157.01503
平均	29.06662	-40.43750	23.55587	-32.47361	-34.59236	48.15512	-17.16536	23.40506	10.42427	-14.06872	19.40934	-26.16917

り決定する。

- b. 橋軸直角方向は、格子解析結果にて最大曲げモーメントの発生している G 2 桁（分離断面・一体断面とも）とし、Guyon-Massonnet の横方向影響線（図-6）より決定する。

以上の検討により決定した FEM 解析検討ケースを図-7 に示す。

上述の検討ケースにおける FEM 解析結果を表-2 にまとめる。

5. 各解析方法による応力度比較

棒・版・格子各理論での解析結果は断面力で得られるのに対し、FEM 解析結果は応力度で得られるため、比較レベルを合わせる必要がある。この場合の比較レベルとして、断面力比較と応力度比較の 2 ケースが考えられるが、FEM 解析結果を断面力に換算することは、1 断面内においても各主桁ごとに中立軸位置が変化すること

や応力分布が直線でないことによる上下縁の換算断面力の不一致等の問題がある。よって、応力度比較により検討を行った。

各解析方法による応力度比較を表-3 に示す。応力度比較の結果、次のような傾向が見られる。

- a. 応力度は、棒・版・格子各理論値のほとんどが FEM 解析値を上回っている。
- b. 着目点⑤（側径間）では、格子理論の活荷重にて 6 % の差異が見られるほかは、各理論値とも FEM 解析値と大差は見られない。
- c. 着目点⑪（中間支点）では、各理論値とも FEM 解析値に対し 10 % 程度の差異が見られるが、「道路橋示方書Ⅲ 10.3」に示される中間支点上の曲げモーメントの低減を考えると FEM 解析値に近い値になると考えられる。
- e. 着目点⑬（中央径間）では、各理論値とも FEM 解析値と約 5~15 % 程度の差異が見られる。

表-3 応力度比較

			着目点 ⑤		着目点 ⑩		着目点 ⑯	
			σ (tf/m ²)	%	σ (tf/m ²)	%	σ (tf/m ²)	%
FEM 解析	死荷重	上縁	290.7	100.0	-345.9	100.0	104.2	100.0
		下縁	-404.4	100.0	481.6	100.0	-140.7	100.0
	活荷重	上縁	235.6	100.0	-171.7	100.0	194.1	100.0
		下縁	-324.7	100.0	234.1	100.0	-261.7	100.0
棒理論	死荷重	上縁	292.6	100.7	-379.9	109.8	109.0	104.6
		下縁	-417.2	103.2	541.8	112.5	-155.4	110.4
	活荷重	上縁	231.6	98.3	-177.6	103.4	193.6	99.7
		下縁	-330.3	101.7	253.2	108.2	-276.1	105.5
版理論	死荷重	上縁	294.5	101.3	-375.0	108.4	114.0	109.4
		下縁	-419.9	103.8	534.7	111.0	-162.5	115.5
	活荷重	上縁	231.6	98.3	-177.2	103.2	193.8	99.8
		下縁	-330.3	101.7	252.6	107.9	-276.4	105.6
格子理論	死荷重	上縁	293.8	101.1	-373.9	108.1	112.8	108.3
		下縁	-418.9	103.6	533.2	110.7	-160.8	114.3
	活荷重	上縁	241.4	102.5	-196.4	114.4	203.5	104.8
		下縁	-344.3	106.0	280.0	119.6	-290.1	110.9

6. 解析結果における誤差の要因

各解析理論にそれぞれの解析上の仮定があり、この仮定が誤差を生じている原因となっていることが考えられる。このような誤差の要因を検討するにあたり、解析結果の誤差要因を挙げ、誤差内容の分析および検討方法を表-4にまとめた。

また、設計荷重は、死荷重と活荷重を対象としているが、解析結果に対する傾向は同様であると考えられることより、検討対象荷重は死荷重のみとする。

7. 誤差分析

7.1 中間支点上の曲げモーメント

棒・版・格子各理論による断面力を「道示Ⅲ10.3」により中間支点上の曲げモーメントの低減を行いFEM解析結果との応力度を比較した(表-5)。FEM解析値に対し、曲げモーメントの低減前では10%程度の差があるが、低減後では3%以下の差となり「道示Ⅲ10.3」の適用により解析誤差は補正されることがわかった。

7.2 ポアソン効果による影響

コンクリート部材のポアソン効果の影響は、FEM解

表-4 解析誤差の要因および検討

誤差の要因	解析法の対比	誤差の内容	検討の方法
中間支点上の曲げモーメント	FEM—その他	FEM解析以外では中間支点上で尖った分布を示すが、FEM解析ではスムーズな分布となる。	「道示Ⅲ10.3」により曲げモーメントの低減を行い、FEM解析と比較する。
コンクリートのポアソン効果による応力の増減	FEM—その他	コンクリート部材のポアソン効果の影響はFEM解析のように3次元ソリッドモデルの場合のみ表現できる。	FEM解析においてポアソン比 $\lambda=0$ の場合の応力度を求め、ポアソン比を考慮した場合の応力度と比較する。
床版張出し部剛度の影響	FEM } 版 格子 } 棒	主版幅を抵抗幅とする場合と張出し床版を含む全断面を有効とした場合に各々の断面力に差が生じることが考えられる。	断面力算出にて張出し部の剛度を考慮し、その影響を評価する。
影響線解析の誤差	格子 } FEM 版 } 棒	格子および版理論では、基本的に影響線を計算し、これに荷重を載荷して断面力を算出している。このため、ダイレクトに断面力を算出する梁理論と差が生じる。	梁計算においてダイレクトに断面力を計算するプログラムと影響線解析をするプログラムの計算結果を比較する。また、影響線解析にて分割数を2倍とした場合の比較を行う。
支点部剛性変化の影響	FEM—その他	棒・版および格子解析では断面をすべて等断面としているため、中間支点横桁区間($L=2.0$ m)の剛性変化を考慮していない。	梁計算にて中間支点部付近の部材剛度を充実断面として断面力を算出し、比較する。
支点部抵抗断面の影響	FEM—その他	FEM解析では各断面の境界条件から応力度を計算するため、中間支点横桁部は充実断面として計算している。また、他の解析による応力算定はすべて標準断面としている。このことにより、誤差の生じていることが考えられる。	中間支点部の応力度算出にて、充実断面とした断面係数により計算する。

表-5 中間支点上曲げモーメント低減後の応力度比較

		FEM 解析		棒 理 論		版 理 論		格 子 理 論	
		σ (tf/m ²)	%	σ (tf/m ²)	%	σ (tf/m ²)	%	σ (tf/m ²)	%
低 減 前	上縁	-345.90	100.0	-379.90	109.8	-375.00	108.4	-373.90	108.1
	下縁	481.60	100.0	541.80	112.5	534.70	111.0	533.20	110.7
低 減 後	上縁	-345.9	100.0	-347.56	100.5	-342.68	99.1	-341.64	98.8
	下縁	481.6	100.0	495.61	102.9	488.66	101.5	487.18	101.2

析のように3次元ソリッドモデルの場合に表現できる。今回のFEM解析では、コンクリートのポアソン比を $\lambda=1/6$ としているが、 $\lambda=0$ としてFEM解析を行い、 $\lambda=1/6$ と $\lambda=0$ の応力度を比較しその影響を調べた(表-6)。この結果、着目点⑩の下縁にて支点反力の影響により14%程度の差がみられるが、他点では、最大3%程度の差であり、ポアソン効果による影響は無視できると考えられる。

表-6 ポアソン効果による応力度比較

		着目点⑤		着目点⑩		着目点⑫	
		(tf/m ²)	%	(tf/m ²)	%	(tf/m ²)	%
$\lambda=1/6$	上縁	290.7	100.0	-345.9	100.0	104.2	100.0
	下縁	-404.4	100.0	481.6	100.0	-140.7	100.0
$\lambda=0$	上縁	292.9	100.8	-336.7	97.3	107.8	103.5
	下縁	-402.9	99.6	412.8	85.7	-142.6	101.4

7.3 床版張出し部剛度による影響

主版幅を抵抗幅とする場合と張出し床版を含む全断面を有効とした場合に各々の断面力に差が生じることが考えられるため、それぞれの断面力を比較しその影響を調べた。検討は、構造の評価が明確である棒理論と格子理論の比較で行ったが、同じ結果が得られ張出し部剛度による影響はみられなかった。

7.4 影響線解析の誤差

断面力の算出方法として変形法を用いる場合が多いが、各固定荷重に対して各々変形法により断面力を算出する場合(以後、固定解析と称する)と、単位荷重による断面力を変形法により算出し、これをその構造系に対する影響線として各実荷重ごとに影響線面積を求め二次的に断面力を算出する場合(以後影響線解析と称する)がある。プログラムの都合上、表-1に示される各解析方法についても、棒理論死荷重は固定解析であるが、その他は影響線解析である。断面力の差異は、この算出方法の誤差による場合も考えられる。

これを確認するために、固定解析と影響線解析の解析結果の比較検討を行った。また、影響線解析において分割数を2倍とした場合についても解析を行い、分割数の差による影響を検討した。表-7, 8にそれぞれ棒理論および格子理論の影響線解析の誤差を示す。

棒理論・格子理論ともほぼ同様の傾向となっており、

表-7 棒理論における影響線解析の誤差

	単 位	着目点⑤	着目点⑩	着目点⑫
固 定 解 析	M (tf・m)	366.1	-475.3	136.2
	%	100.0	100.0	100.0
影 響 線 解 析	M (tf・m)	368.6	-469.2	142.6
	%	100.7	98.7	104.7

表-8 格子理論(面外載荷)における影響線解析の誤差

	単 位	着目点⑤	着目点⑩	着目点⑫
固 定 解 析	tf・m	367.6	-467.9	141.1
	%	100.0	100.0	100.0
影 響 線 解 析	tf・m	365.7	-472.6	136.5
	%	100.5	99.0	103.4

表-9 影響線の分割数による誤差(棒理論)

	単 位	着目点⑤	着目点⑩	着目点⑫
固 定 解 析	tf・m	361.2	-467.7	133.1
	%	100.0	100.0	100.0
10分割影響線解析	tf・m	363.0	-463.0	137.7
	%	100.5	99.0	103.5
20分割影響線解析	tf・m	361.6	-466.5	134.2
	%	100.1	99.8	100.8

注) 荷重は標準断面の自重のみで横桁自重を含まない。

着目点⑫で他点より大きな差がみられる。この結果より「3.c項」で述べた結果の主な理由は、影響線解析による誤差であると推察される。また、影響線の分割数の差による影響を棒理論により検証したが、表-9に示すように分割数を2倍にすることで解析誤差が小さくなっており、影響線の分割数が解析上の誤差になっていることがわかった。

7.5 支点部剛性変化の影響

棒・版・格子各理論では、等断面として解析しているため中間支点横桁区間(L=2m)の剛性変化が考慮されていない。この支点部剛性変化の影響を調べるために、棒理論において中間支点横桁の剛性を考慮した解析を行い断面力を比較した(表-10)。この結果、中間支点横桁の剛性を考慮した場合、着目点⑤, ⑩での誤差は小さい

表-10 横桁剛性による断面力比較

	単 位	着目点⑤	着目点⑩	着目点⑫
標準断面剛性による曲げモーメント	tf・m	366.1	-475.4	136.4
	%	100.0	100.0	100.0
支点横桁剛性考慮の曲げモーメント	tf・m	362.8	-483.5	128.3
	%	99.1	101.7	94.1

◇研究報告◇

が、着目点⑩では6%程度の誤差が現れている。これは中間支点部の部材剛性が大きくなったために、着目点⑩での曲げモーメントが負側に移行したものと考えられる。

7.6 支点部抵抗断面の影響

FEM解析では各断面の境界条件から応力度を計算するため、中間支点部横桁部は充実断面として計算されている。しかし、他の解析により応力度を算出する場合はすべて標準断面（中空断面）としているため、誤差が生じていることが考えられる。これを検証するため「7.5」での支点部剛性変化を考慮した断面力に対し充実断面の断面係数により応力度を求め、FEM解析結果との比較を行った。また、中間支点上の曲げモーメントの低減を考慮した結果についても併せて比較した（表-11）。この結果、支点上の曲げモーメントの低減を考慮した場合は、標準断面（中空断面）として応力度を算出した方が充実断面とした場合よりFEM解析値との誤差が小さくなることがわかった。

表-11 横桁剛性による応力度比較

		単 位	着 目 点 ⑩	
			上 縁	下 縁
FEM 解析		tf/m ²	-345.9	481.6
		%	100.0	100.0
標準断面剛性	中間支点曲げモーメント低減無し	tf/m ²	-379.9	541.8
		%	109.8	112.5
	中間支点曲げモーメント低減考慮	tf/m ²	-347.6	495.6
		%	100.5	102.9
横桁剛性考慮	中間支点曲げモーメント低減無し	tf/m ²	-353.2	435.8
		%	102.1	90.5
	中間支点曲げモーメント低減考慮	tf/m ²	-323.6	399.2
		%	93.6	82.9

8. 今回の検討結果のまとめ

8.1 棒・版および格子理論による断面力

一般的解析理論を本構造系に採用した場合の解析特性について、以下の傾向にあることがわかった。

- a. 各理論とも張出し床版の構造的影響は無視できる。
- b. プログラム上で影響線解析を行う場合、分割数が10等分程度では中央径間の支間中央にて4%程度の誤差が生じる。
- c. 格子解析の場合、断面力は幅員の程度により5~20%程度大きくなる。これは、格子解析の断面力が、各桁の最大断面力を合計したものを全体断面力としていることによる。
- d. 横方向影響線を考慮する必要のない幅員範囲では、棒理論と版理論の結果はほぼ同等となる。

8.2 各理論による断面力の差の要因

各解析理論に対して検討の結果、次に示す要因によって各理論による断面力に差が生じることがわかった。

- a. 中間支点上の曲げモーメントが尖った分布を示すこと。
- b. 影響線解析の採用の有無および影響線の分割数。
- c. 支点部剛性変化の考慮の有無

上記のうち、「a.」については道路橋示方書に従って曲げモーメントを低減すること、「b.」については影響線の分割数を大きくすることにより、誤差は小さくなることがわかった。また、「c.」については「道示Ⅲ10.3」に示されるように、支点上の横げたを無視した断面とするのがほぼ妥当であることがわかった。

8.3 結 論

以上から、連続中空床版橋の解析方法については、影響線の分割数に留意すれば、解析理論による差は小さいと考えられる。したがって、上記橋梁形式の解析方法は、設計の煩雑さおよび設計費用の面からみて、棒理論または版理論で充分であると考えられる。

今回の検討が直橋の単純なモデルを対象としているため、以上の結論は、斜橋や曲線橋の場合には適用することはできない。

10. おわりに

本報告は、「阪神高速道路公団 PC 構造物検討委員会」において「場所打ち PC 中空床版橋の解析手法の確認」というテーマで検討を行った結果をまとめたものである。本検討では、活荷重が現在の A・B 活荷重ではなく L-20 であるため活荷重の違いによる差はあるもののその傾向は参考になるものと思われる。

連続中空床版橋の一般的な解析手法である 3 理論を選出し、これらの解析結果を比較検討し、さらに FEM 解析をも加え誤差の要因分析を行い妥当な解析方法を検討したが、このような検討はこれまでにあまり例がないと思われ、連続中空床版の設計に際し少しでも参考になれば幸いです。

最後に、FEM 解析にあたり京都大学の井上先生ならびに当時に大学院生であった小林氏の多大な御協力、適切な御指導をいただき深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 秋元泰輔, 蓑作光一, 鈴木素彦, 一桝久允, 横溝幸雄: プレストレストコンクリート上部構造の設計計算例, 山海堂
- 2) 小林幸一, 金 姓七, 井上 晋, 宮川豊章, 藤井 学: 平成4年度関西支部年次学術講演会講演概要, 土木学会関西支部

【1994年12月5日受付】