

PC 多径間連続ラーメン橋に関する研究報告

(財) 高速道路調査会
橋梁研究委員会
PC 多径間連続ラーメン橋に関
する研究班

はじめに

近年、高速自動車道を中心に急速に採用されているプレストレストコンクリート（以下、PC と略記する）橋のうち、数多くの「多径間連続ラーメン橋」がある。

代表的な橋梁としては、中央自動車道に建設された岡谷高架橋があり、6 径間連続、最大支間長 148 m、橋長 593 m の規模を有している（写真-1）。

この形式の橋梁は、多径間連続化による走行性の向上、ラーメン化（上下部剛結一体構造）による耐震性の向上および支承や伸縮継手の維持管理費の削減などの有利性から施工実績も年々増加してきている。

本稿は昭和 61 年度から 2 年間、(社)プレストレストコンクリート建設業協会の委託により、(財)高速道路調査会に「PC 多径間連続ラーメン橋に関する研究班」（委員長：小村 敏・首都高速道路公団神奈川建設局長）を設置して、調査研究を行ってきた成果について、その概要を紹介するものである。

1. 研究概要

PC 多径間連続ラーメン橋（以下、「連続ラーメン橋」と略記する）とは、通常、主桁が PC 部材、橋脚が RC 部材で構成され、主桁と橋脚が剛結された 3 径間以上の PC 連続ラーメン橋をいい、一般に次のような構造面での特徴を有している。

- ① 有ヒンジラーメン橋で使われている支間中央部の伸縮継手を設けずに、また、連続桁橋に比べ中間支点部では支承を設けないため、走行性が良く、伸縮継手・支承等の維持管理業務が軽減される。
- ② 地震時水平力を各橋脚に分担させることができるとともに、橋脚と主桁が剛結されているので、地震時水平力による橋脚下端の曲げモーメントを小さくすることができる。
- ③ 上下部構造が一体で、高次の不静定構造であるため、部材の一部が降伏しても応力の再分配により、瞬時に橋梁全体の破壊につながるようなことは少ない。

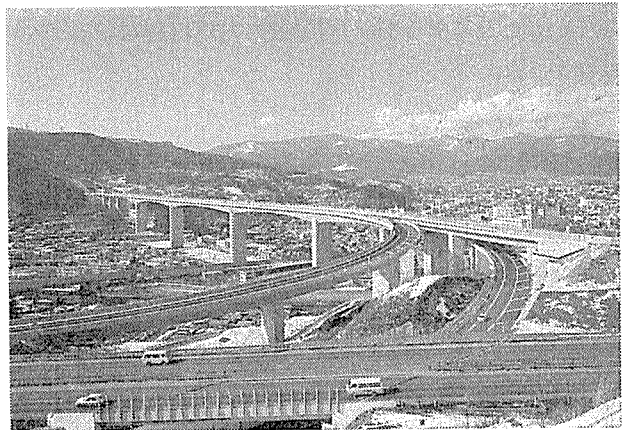


写真-1 中央自動車道岡谷高架橋

- ④ 橋脚が主桁に剛結されているため、温度変化、プレストレス力、クリープ・乾燥収縮等により、拘束力の影響を受け、常時、橋脚基礎に水平力が作用する。

本研究班では、昭和 61 年度に、内外で施工された連続ラーメン橋の施工実績調査を行い、各種設計要因の傾向分析や問題点の整理を行った。さらに、昭和 62 年度においては、限られた例ではあるが、モデルを設定して試設計を行い、長大化、多径間化における連続ラーメン橋の適用限界や設計手法等について詳細に検討した。

研究班では、今後の連続ラーメン橋の計画と設計の参考とするため、これらの成果に基づいて設計要領（案）を作成した¹⁾²⁾。

2. 実績調査

昭和 61 年度に行った施工実績調査では、わが国における連続ラーメン橋の施工実績は、橋数にして約 70 橋に達している。以下に、調査結果の一部を紹介する²⁾。

2.1 施工年度

年度別の施工実績件数を 図-1 に示す。

施工年度の大半は昭和 50 年以降であり、昭和 58 年以降に急激に多く採用されてきている。特に、昭和 50 年代後半においては、コンクリート構造物の塩害に端を発して、構造物の維持補修に対する重要性が再認識され

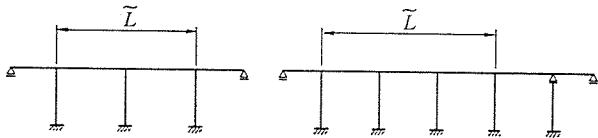
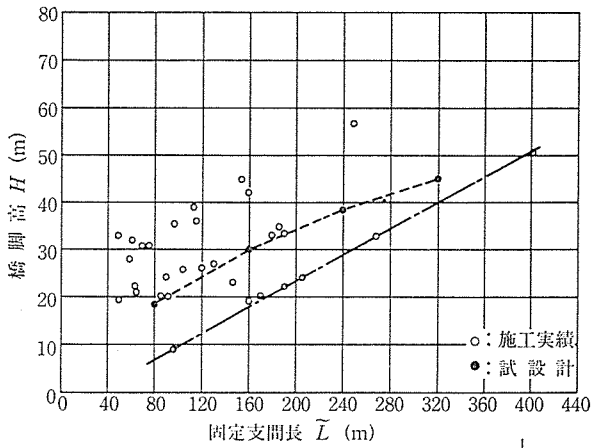


図-3 固定支間長 (\tilde{L})



--- : 試設計に基づく限界線
(等橋脚高さ、橋脚のクリープ無視、橋脚下端完全固定)
--- : 実績調査に基づく限界線

図-4 固定支間長と橋脚高の関係

を紹介する。

3.1 適用の範囲

本要領(案)の適用の範囲を示す指標として、「固定支間長」を設定し、その適用範囲を固定支間長 400 m 以下の連続ラーメン橋とした。固定支間長とは、図-3 に示すように、主桁が橋脚に剛結され、このため、温度変化、乾燥収縮等により拘束力の影響をうける、いわゆるラーメン構造となる支間長の総和をいう。

固定支間長 400 m 以下としたのは従来の実績に基づいて定めたものであるが、400 m を超えるものについても準拠できる。

また、有ヒンジラーメン橋ならびにπ型ラーメン橋についても、柱頭部、橋脚等の設計で適用可能な条項については参考となるものである。

3.2 設計一般

設計一般では、設計の手順、構造形式の選定、断面形状の選定ならびに荷重の組合せについて示している。

連続ラーメン橋の構造解析は、上下部構造を一体として行う必要があるため、部材断面の形状寸法やプレストレス力の仮定においては、設計計算の手戻りが少なくなるようにすることが望ましい。この点で、標準的な設計の手順を示すとともに、構造形式ならびに断面形状寸法の選定のための目安となる資料を示している。

連続ラーメン橋の構造形式の選定に際しては、固定支

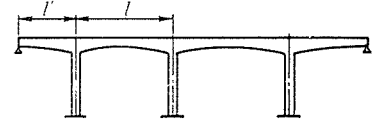
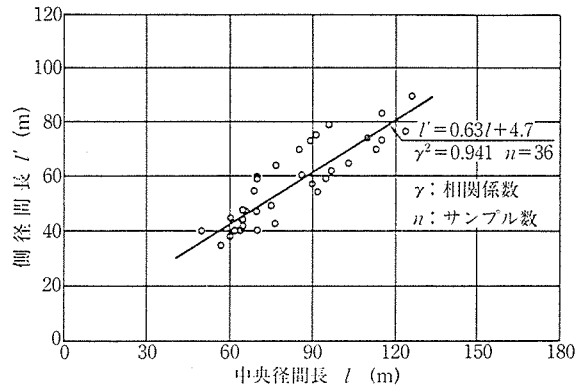


図-5 中央径間長と側径間長の関係(変断面桁)

間長に対する橋脚高の関係における適用限界を考慮することが重要となる。図-4 は、従来の施工実績ならびに試設計に基づいて、連続ラーメン橋の適用限界の目安を示したものである。図中の破線は等橋脚高さで、橋脚下端を完全固定として、橋脚のクリープを無視した場合の試設計により設定した限界線である。

また、図中の一点鎖線は、これまでの施工実績に基づいて、その適用限界を示したものである。これには橋脚のクリープの影響や基礎のバネの影響等が考慮されたものである。したがって、橋脚の高さが異なる場合、橋脚のクリープの影響や基礎の固定度を考慮する場合には図中の一点鎖線で示した限界線は一応の目安として参考となるものである。この場合、固定支間長の算定には温度変化や乾燥収縮の影響による主桁の変位の不動点の位置にも注意する必要がある。

連続ラーメン橋の支間割を決定する際、合理的な設計を行ううえで、側径間長と中央径間長との関係も重要となる。図-5 は、変断面桁を有する連続ラーメン橋の従来の施工実績に基づいて、中央径間長と側径間長の関係を示したものである。この図から、側径間長は、中央径間長の6割強の長さにとることが望ましいといえる。

主桁の断面形状の選定に際しては、最大支間長に相応した主桁高をとることが望ましい。この目安を与えるために、従来の施工実績から、これらの関係を整理したものを図-6~8 に示す。

荷重の組合せについては、設計荷重作用時と終局荷重作用時において示している。特に、終局荷重作用時の荷重の組合せについて、連続ラーメン橋特有のプレストレス力ならびにクリープ・乾燥収縮による不静定力は、荷重係数を 1.0 として組み合せている。これは、これらの不静定力が終局荷重作用時にどのような状態になるかは

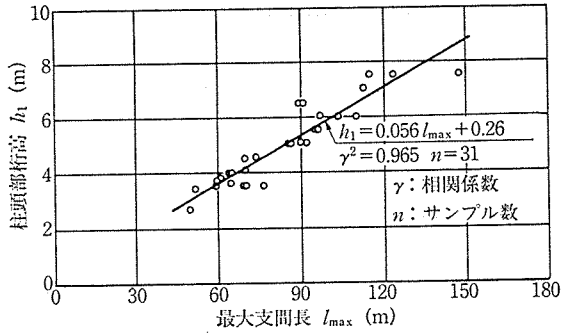


図-6 柱頭部桁高と最大支間長の関係 (変断面桁)

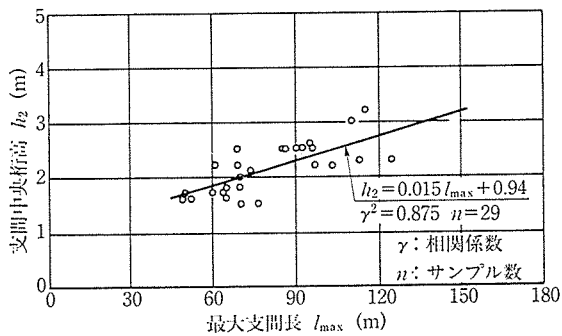


図-7 支間中央桁高と最大支間長の関係 (変断面桁)

把握できていない現状ならびに、断面が設計荷重作用時に決定され、終局荷重作用時にはこれら拘束力が断面決定に殆んど寄与していない現状を鑑み、当面、設計的に、より安全な断面が得られるように配慮したものである。

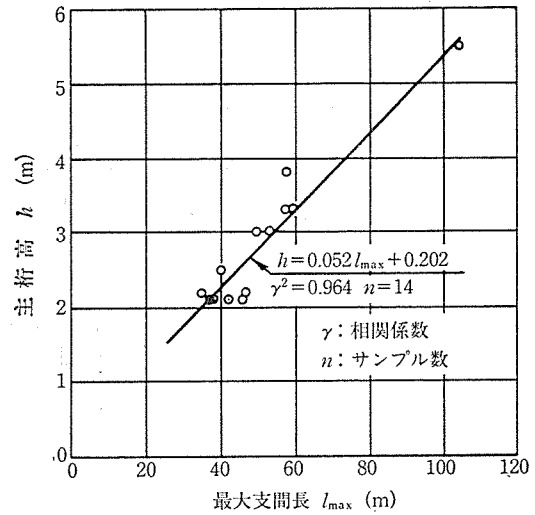


図-8 主桁高と最大支間長の関係 (等断面桁)

表-2 部材軸線の差による断面力の比較

項目	位置	主 桁 部				橋 脚 部				
		a	b	c	d	e	f	g	h	
曲げモーメントの比較 (t·m)	全静荷重	ケース①	-13748	-9930	-13787	-12201	-3077	7062	-2359	2540
	地震荷重 $k_h=0.2$	ケース①	-1814	2906	-2780	2740	-4018	10139	-4791	10557
		ケース②	-1862	2794	-2755	2662	-3936	10210	-4670	10597
	温度変化 $T=10^\circ\text{C}$	ケース①	868	-773	976	192	1306	-3629	664	-1324
		ケース②	858	-929	764	63	1407	-3828	696	-1384
	増減率* (パーセント)	地震荷重		0.3	1.1	0.2	0.6	-2.7	1.0	-5.1
温度変化			0.1	1.6	1.5	1.1	-3.3	-2.8	-1.4	-2.4
せん断力の比較 (t)	全静荷重	ケース①	-823	789	-889	846	338	338	130	130
	地震荷重 $k_h=0.2$	ケース①	-42	-69	-63	-64	373	570	413	610
		ケース②	-39	-73	-74	-71	373	570	410	608
	温度変化 $T=10^\circ\text{C}$	ケース①	18	11	35	-16	-165	-165	-67	-67
		ケース②	18	22	22	0	-175	-175	-69	-69
	増減率* (パーセント)	地震荷重		0.4	0.5	1.2	-0.8	0	0	-2.3
温度変化			0	1.4	1.5	1.9	-3.0	-3.0	-1.5	-1.5

* 増減率(%)=(ケース②-ケース①)÷全静荷重×100

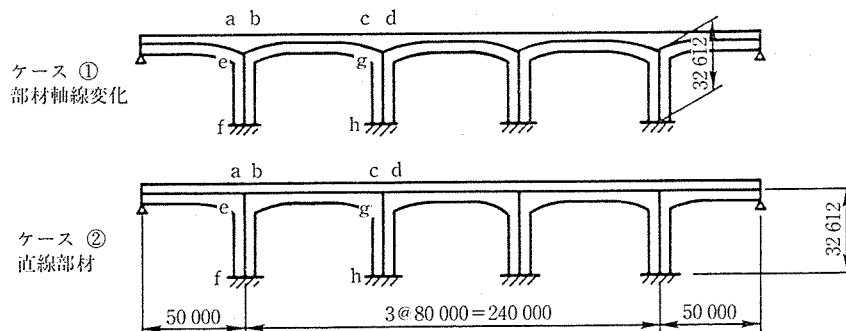
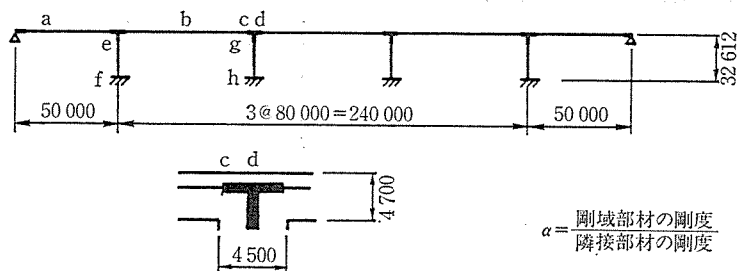


表-3 剛域部材の剛度差による断面力の比較

剛域部材の剛度倍率		位置	主 桁 部				橋 脚 部			
			a	b	c	d	e	f	g	h
死荷重 + 活荷重モーメント (t・m)	$\alpha=1$ 倍	(剛域無視)	2 815	3 346	-15 372	-16 350	3 649	-2 026	-1 863	1 277
	$\alpha=10$ 倍		2 752	3 235	-15 499	-16 424	3 675	-2 040	-1 893	1 291
	$\alpha=100$ 倍		2 745	3 223	-15 457	-16 432	3 677	-2 040	-1 896	1 293
	$\alpha=1 000$ 倍		2 745	3 222	-15 457	-16 432	3 678	-2 040	-1 897	1 293
増 減 率 (%)	$\alpha=1$ 倍	(剛域無視)	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\alpha=10$ 倍		-2.2	-3.3	0.5	0.5	0.7	0.7	1.6	1.1
	$\alpha=100$ 倍		-2.5	-3.7	0.6	0.5	0.8	0.7	1.8	1.2
	$\alpha=1 000$ 倍		-2.5	-3.7	0.6	0.5	0.8	0.7	1.8	1.2



3.3 構造解析

連続ラーメン橋の構造解析は上部構造と下部構造を一体として解析することを原則とし、構造モデルは主桁および橋脚のコンクリート全断面を有効とした部材剛度を用いて作成し、一般に平面骨組構造で解析してよいとしている。ただし、曲率の大きい曲線橋や広幅員の多主桁橋などの場合は、立体骨組構造あるいは格子構造として解析する必要がある。

また、構造解析に用いる主桁のラーメン軸線の取扱い方については、表-2 に示すように、軸線を部材図心にとる場合と直線とする場合について構造解析を行い、断面力の比較を行った。曲げモーメントならびにせん断力とも、主要な個々の荷重については若干差異があるものの全静荷重に対する増減率は数%程度の差に収まっている。このことから、一般の連続ラーメン橋では試算モデルに比べ橋脚は高く、軸線変化の影響も小さいと考えられ、設計計算を複雑にしないために直線として解析してよいものとしている。

剛域の取扱い方については、部材長に比べ部材寸法が大きい場合にはこれを考慮する必要があるが、表-3 に示すように、剛域の影響について検討した結果、通常の連続ラーメン橋においては、この影響は 4% 程度であり、無視してよい程度である。なお、せん断変形については、部材厚が部材長の 0.3 倍以上にならないと顕著な影響を与えないため、通常はこの影響を無視してよいものとされている³⁾。

構造物全体を一度に施工しない場合は施工時の構造系の変化に沿って断面力を算出することを原則としたが、コンクリートのクリープによる不静力については、一般

に橋脚のクリープを無視し、また、主桁のクリープ係数は平均材令に対する値を用いてよいものとしている。表-4 に施工工程を変えた場合の死荷重曲げモーメントの比較を示す。この表から、クリープによる不静定力は主桁の施工工程よりも主桁と橋脚との工程の差（橋脚のクリープ）による影響の方が大きいこと、また、主桁ではこの影響がほとんどないが、端部橋脚下端では大きな影響を受けていることから、設計の複雑さならびに安全側の設計を考慮して示したものである。

なお、橋脚のクリープによる影響は大きいので、施工工程等により明確にこの影響を算定できる場合は、この影響を検討してもよい。

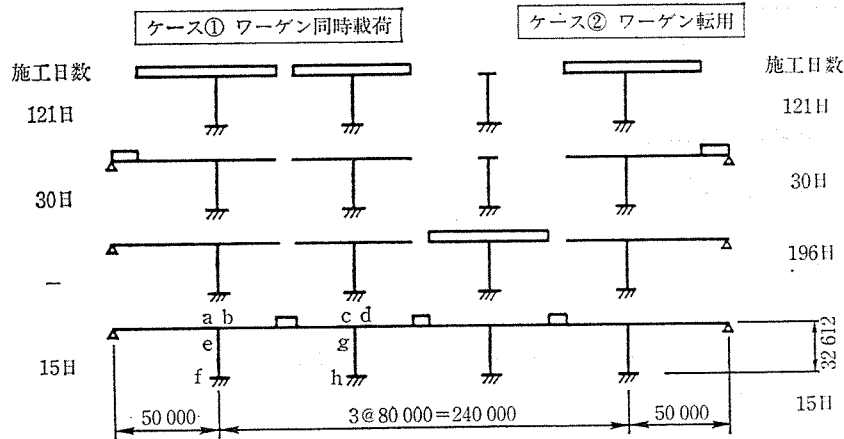
3.4 主桁の設計

主桁の設計は設計荷重作用時と終局荷重作用時に対して、断面の応力度と破壊に対する安全度の照査を行うこととしているが、橋軸直角方向の終局荷重作用時の曲げに対する照査は一般に省略してよいこととしている。これは、設計荷重作用時における橋軸直角方向の曲げ応力度の照査を行っておけば一般に破壊に対しては十分安全性が確保されていると判断したことによる。橋軸直角方向の曲げ照査を行う場合、厳密には二軸曲げに対して照査する必要があるが、一般には、活荷重および衝撃以外の主荷重作用時においては主桁は全断面圧縮状態となっている場合が多く、このため、コンクリートの全断面を有効として応力度を求め、これを橋軸方向の応力度と重ね合わせてよいこととしている。

また、柱頭部付近の主桁の設計断面力は、ラーメン構造であるので、曲げモーメントならびにせん断力に対して、それぞれ 図-9, 10 に示す位置における断面力を用

表-4 施工工程および施工法の差による断面力の比較

橋脚クリーブ	位置 施工法	主 桁 部				橋 脚 部				
		a	b	c	d	e	f	g	h	
死荷重 モーメント (t·m)	考慮しない	ワーゲン同時	-14 176	-9 861	-14 207	-12 432	-3 153	12 233	-1 416	4 172
		ワーゲン転用	-14 307	-9 712	-14 293	-12 450	-3 422	12 237	-1 461	4 468
	考慮する	ワーゲン同時	-13 748	-9 930	-13 787	-12 201	-3 077	7 062	-1 359	2 540
		ワーゲン転用	-13 868	-9 814	-13 857	-12 221	-3 284	7 317	-1 401	2 649
増減率 (%)	考慮しない	ワーゲン同時	0	0	0	0	0	0	0	0
		ワーゲン転用	0.9	-1.5	0.6	0.1	8.5	0.0	3.1	7.1
	考慮する	ワーゲン同時	-3.0	0.6	-3.0	-1.9	-2.4	-42.3	-4.0	-39.1
		ワーゲン転用	-2.2	-0.5	-2.5	-1.7	4.1	-40.2	-1.0	-36.5



注) 日数は、主桁の施工日数を示す。柱頭部の施工は別に60日とした。

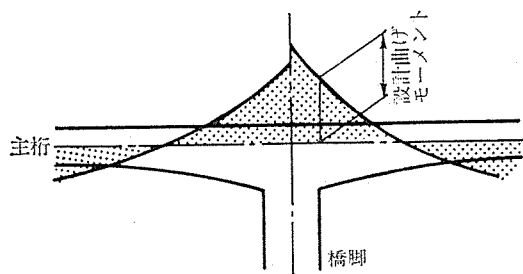


図-9 柱頭部付近の主桁の設計に用いる曲げモーメント

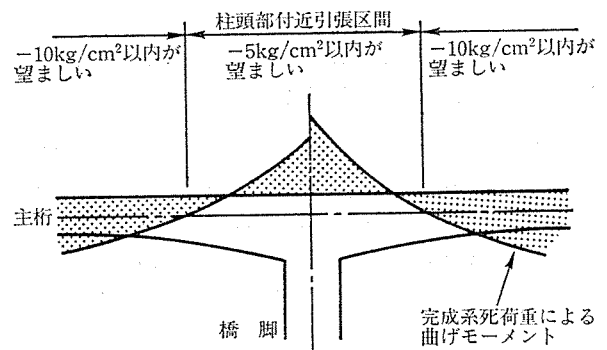


図-11 架設時許容曲げ引張応力度の目安

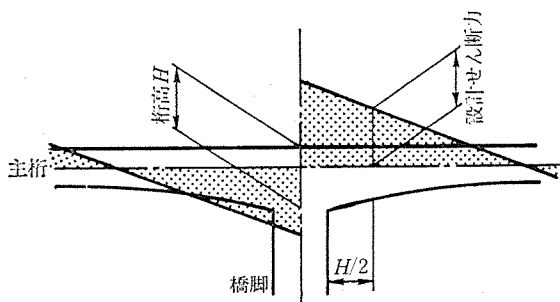


図-10 柱頭部付近の主桁の設計に用いるせん断力

いる³⁾。

さらに、上部工の張出し架設時における主桁の曲げ引張応力度をプレストレス導入時のプレストレス力を用い

て 図-11 に示すように制限することが望ましい。これは、上床版は車道部となるので、架設中に曲げひびわれが発生するのを防ぐこと、架設時のプレストレス力はクリーブ・乾燥収縮により導入時のそれから低下するが設計計算にこれを考慮することは繁雑であること、この制限により完成系で必要とされる PC 鋼材が増加することではなく、かつ、施工中のクリーブ・乾燥収縮による PC 鋼材の応力度の低減が生じて道路橋示方書に規定されている許容曲げ引張応力度 25 kg/cm^2 は十分満足していること等を総合的に考慮したものである。

3.5 橋脚の設計

橋脚の設計は原則として、設計荷重作用時と終局荷重

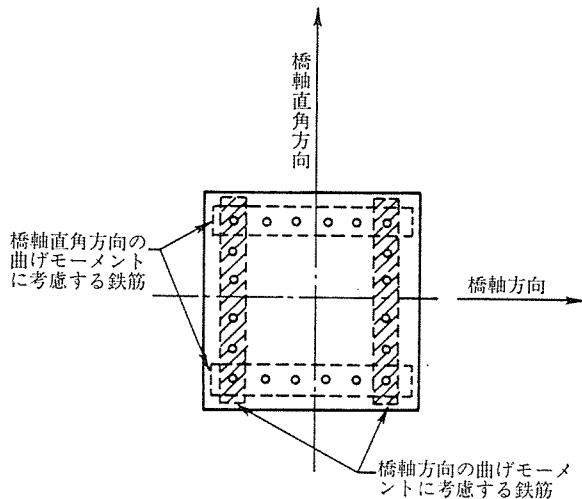


図-12 曲げモーメントの方向と考慮する鉄筋

作用時の応力度ならびに安全度に対して照査することとした。このとき、地震時のじん性向上のため、軸方向引張鋼材量は終局つり合い鋼材量の75%以下としている³⁾。

橋脚の断面決定にあたっては、完成時の全死荷重作用時ならびに張出し架設時のアンバランスモーメントに対して、RC橋脚の上下端断面において、コンクリート全断面を有効とした曲げ引張応力度をコンクリートの曲げ強度以下に制限することが望ましい。これは、主に、耐久性に対して配慮して規定したものであり、曲げ強度は文献3)に準拠して、 $0.9 \times \sigma_{ck}^{2/3} / r_c$ で求めることとしている。なお、 r_c は安全側に1.3を採用している。

また、橋脚の上端は主桁と結合する重要な部位であるため、ある程度の鉛直プレストレスを導入することが望ましい。この場合、PC鋼材は地震時にひびわれが発生しない位置まで下方に伸ばして定着する必要がある。

さらに、橋脚は橋軸ならびに橋軸直角の2方向に曲げを受ける部材となるが、二軸曲げの設計計算は一般に複雑であるため、図-12に示すように、各方向に直交する鉄筋のみを計算上考慮して、各々の方向に対して照査すればよいこととしている。

3.6 柱頭部の設計

連続ラーメン橋の柱頭部の構造は、実績調査によると1枚壁あるいは2枚壁構造の2つのタイプに分けられる(図-13)。また、それらの構造寸法を図-14に示すが、これによると、通常、1枚壁構造では橋脚厚 B は壁厚 t と等しく、また、2枚壁構造は $B=3.0\text{m}$ 以上で採用されており、 $t=0.7\text{m} \sim 1.0\text{m}$ の間にある。したがって、これらの実績を標準として、柱頭部の構造を選定してよいものとしている。

また、これらの壁の設計は、通常、FEM解析またはFSM解析が用いられているが、設計作業がかなり複雑

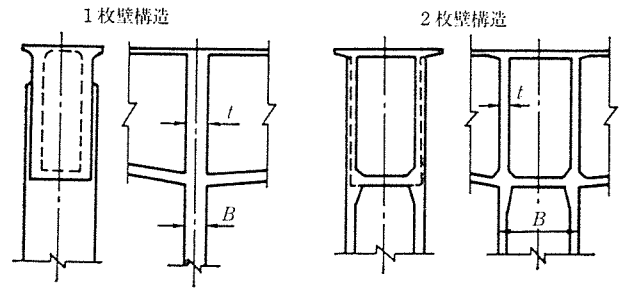


図-13 柱頭部の構造

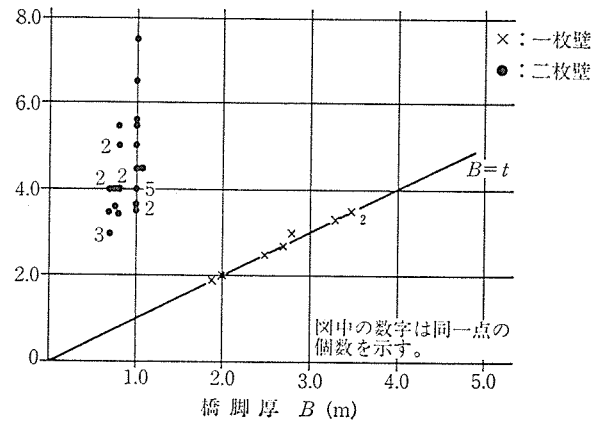


図-14 柱頭部の壁厚と橋脚厚の関係

となることから、ディープビームとして簡易的に設計してよいこととし、解説でその方法を示している。ディープビームとして設計した場合、通常、安全側の引張鋼材が算定されることになる。

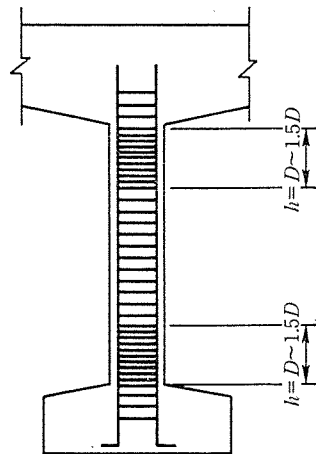
3.7 構造細目

構造細目では、連続ラーメン橋特有の橋脚と柱頭部の配筋について規定している。

橋脚の軸方向鉄筋を途中定着する場合、同一断面で定着する鉄筋の断面積は全引張鉄筋の断面積の1/2以下とし、かつ、計算上不要となる点から部材の有効高さ分延長し、そこから必要な定着長を確保することとしている。この場合、その間のせん断耐力は設計せん断力の1.5倍以上とする必要がある³⁾。

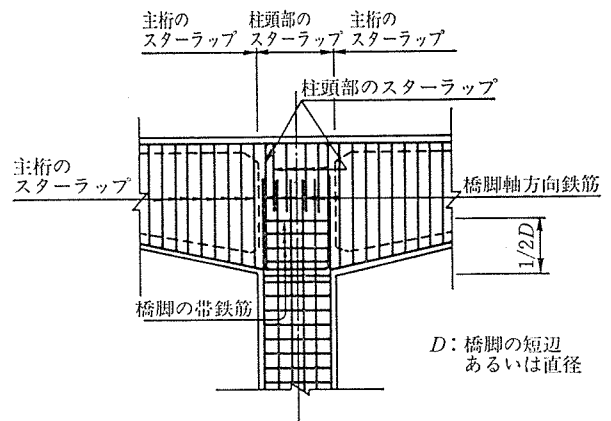
橋脚の帯鉄筋は、橋脚の上下端における接合部近傍あるいは、軸方向鉄筋量が大きく変化する部分では、その必要量の2倍程度の帯鉄筋を橋脚断面の短辺あるいは直径の長さの範囲に配置するものとしている。また、その配置間隔は、橋脚断面の短辺あるいは直径の1/4以下、軸方向鉄筋の直径の12倍以下かつ30cm以下とし、帯鉄筋比は0.2%以上とする(図-15)。

柱頭部はじん性を増すために、十分な帯鉄筋またはスターラップを配置するものとし、橋脚の主鉄筋は主桁図心から所定の定着以上、埋め込むものとしている(図-16)。

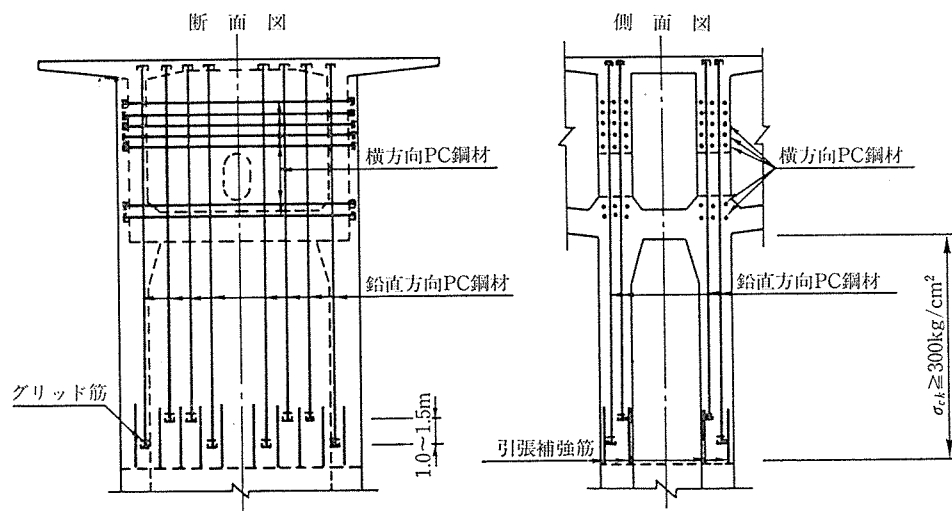


D: 橋脚の短辺あるいは直径

図一15 橋脚接合部の帯鉄筋



図一16 柱頭部の配筋



図一17 鉛直 PC 鋼材による補強

また、鉛直 PC 鋼材による補強を行う場合には、定着部より上部のコンクリートの設計基準強度は 300 kg/cm^2 以上とし、その定着部には十分な引張補強鉄筋を配置することとしている。(図一17)。

おわりに

本報告では、最近、コンクリート橋の分野で採用が急増している多径間連続ラーメン橋に関し、研究班における成果のうち、実績調査の概要と設計要領(案)の内容について紹介した。

2年間にわたる研究成果は、ぼう大な量であり、誌面の都合上、これらの全容を十分に紹介できなかったことをお詫びしたい。詳しくは文献 1) を参照されたい。

連続ラーメン橋は、経済性、維持管理面、耐震性、走行性、美観面等において多くの優れた特徴を有しており、今後、ますます多用されるものと思われる。

本報告が、今後の連続ラーメン橋の発展の参考になれば幸甚である。

参考文献

- 1) (財) 高速道路調査会：PC 多径間連続ラーメン橋に関する研究報告書，昭和 63 年 3 月。
- 2) (財) 高速道路調査会：PC 多径間連続ラーメン橋の紹介，高速道路と自動車，第 31 巻第 8 号，1988 年 8 月。
- 3) 土木学会：コンクリート 標準示方書〔設計編〕，昭和 61 年制定，昭和 61 年 10 月。

文責：

委員 (幹事長)

秋元泰輔 (首都高速道路公団工務部調査役)

委員 宮地 清

(ドーピー建設工業 (株) 常務取締役技師長)

幹事 石原重孝 (鹿島建設 (株) 土木設計本部設計主査)

【昭和 63 年 9 月 21 日受付】