

コンクリートを充てんした角形鋼製橋脚の 諸問題に関する基礎実験

大阪第一建設部 設計課 吉 川 紀
保全施設部 保全技術課 冨 田 穰
大阪管理部 調査設計課 中 村 一 平

要 約

本文はコンクリートを充てんした長方形断面の鋼製橋脚（合成柱）について、模型による破壊実験および実物での載荷実験を行った結果を報告するものである。コンクリートを充てんすることにより、①鋼板の局部座屈が防止され、加えてコンクリートとの共同作用によって耐力も上る。②剛性も著しく大きくなる。③柱基部内部の補剛材の簡素化もできる。④柱の隅角部の Shear lag 現象が緩和される。⑤振動特性も著しく改善される等のことが確認された。

まえがき

現在、阪神高速道路公団が管理している鋼製単柱は約300基ある。¹⁾ 鋼製単柱の形式は都市内高速道路の橋脚ということで用地上の制約を受けると同時に、最近では美観上の面からも断面寸法をできるだけ小さくしたいという状況から、鋼製単柱が採用されてきている。このような観点から今後とも柱断面の小さい、梁の長いスレンダーな鋼製橋脚が採用されるであろう。しかし、鋼製単柱は作業スペースが狭いため維持管理面では非常に困難であるとの報告がある。²⁾ また、このようなスレンダーな橋脚の場合には活荷重による梁先端の変位が道路橋示方書の許容値をオーバーしやすく、これが原因で支承に有害な損傷を誘起しているとも推察される。^{3), 4)} また、鋼I桁格点部の亀裂発生も鋼製単柱やPC単柱のように下部工の剛性の小さいものに多く発生していると推定される。⁵⁾

そこで、これらの諸点を改善した構造物として、

鋼管内部にコンクリートを充てんし、コンクリートと鋼の長所を共に生かした合成構造（以下、合成柱⁶⁾という）の採用が考えられる。

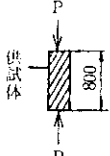
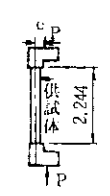
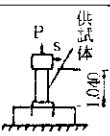
本報告は合成柱の合理的、経済的設計法を模索するために必要な資料を蓄積するという目的のもとに、模型実験ならびにコンクリートを充てんした実物橋脚の載荷実験から明らかになった諸点について報告するものである。

1. 合成柱の模型実験

コンクリート充てん角形断面鋼管柱に軸方向圧縮力が作用した場合には、その断面形状のために構成板パネルの面外曲げが支配的となり、円形断面のようにフープ作用効果が十分に期待できるかどうか不明である。

そこで、コンクリートの拘束効果、補剛材の効果、スタッドジベルの効果、柱の耐力、剛性、じん性、柱基部の内側補剛リブの簡素化の可能性を調べるため表-1に示す要領で模型実験を実施

表一 1 模型実験の概要

実験項目	载荷方法	供試体断面寸法	実験断面	備考
圧縮(実験A)		図一 1	<ol style="list-style-type: none"> 軸方向圧縮を受ける柱の耐荷力 <ol style="list-style-type: none"> コンクリートの拘束効果 補剛材の効果 スタッドジベルの効果 供試体数 <ol style="list-style-type: none"> 鋼管柱合計 5 体 合成柱合計 8 体 残留応力測定 	崩壊後、合成柱の鋼板をはがして、コンクリートの状況を調査。 合成柱の破壊実験後、鋼管をガスで切断し、窓をあけて、コンクリートの付着状況、充てんコンクリートのひびわれ状況の調査。
軸を方向受ける力と曲げ(実験B)		参 照	<ol style="list-style-type: none"> 軸方向力と曲げを受ける柱(長柱と短柱の中間的なもの)の耐荷力、剛性、じん性、付着の調査 供試体数 (i)スタッドジベルなし 2 体 (鋼管柱 1 体; 合成柱 1 体) (ii)スタッドジベルあり 1 本 (合成柱 1 体) 初期たわみ量の測定 残留応力の測定 	
柱実(実験C)の基部の験			<ol style="list-style-type: none"> 軸方向力、曲げならびに水平力を受ける柱基部の内側補剛材の簡素化の可能性の調査 供試体数 実験Aと同じ 	

P: 軸方向圧縮力 S: せん断力

した。

1-1 供試体

供試体の断面寸法および強度を図一 1 に示した。実験 A の断面寸法について、長さは長柱としての全体座屈が起らなく、短柱として局部座屈が卓越するように決定した。実験 B、C の供試体寸法は前者は実橋の 1/10 程度、後者は 1/5 程度の縮尺とした。実験 C では柱基部内部の補剛材はすべて省略した。

残留応力の測定は切断法により行った。板パネル部分の補剛材間で軸方向圧縮応力がほぼ台形に分布し、4 隅の溶接部付近で大きな軸方向引張応力約 2,600 kgf/cm² (255 Mpa) ~ 3,600 kgf/cm² (353 Mpa) が生じている。

初期たわみ量は $L/1,000^{7)}$ 以下におさまっていた。

1-2 载荷方法

1-2-1 実験 A

上下面で等分布载荷になるように、さらに偏心が生じないように配慮した。荷重-軸方向縮み曲線の勾配変化点で 2 ~ 3 回荷重を 5 tf (49.0 kN) まで戻し、残留変形を確認しながら最終崩壊まで载荷した。

1-2-2 実験 B

軸方向圧縮応力と曲げ応力の比率を下記のように設定した。

弾性実験; $\sigma_c/\sigma_{ca}:\sigma_{bc}/\sigma_{bao}=0.7:0.3$













破壊実験; $\sigma_c/\sigma_{ca}:\sigma_{bc}/\sigma_{bao}=0.2:0.8$

ここに、符号は道示⁷⁾に準じる。

鋼材またはコンクリートの応力が許容応力度に達するまで弾性実験を、その後破壊実験を行った。

1-2-3 実験 C

弾性実験は実験 B と同じにし、破壊実験は $\sigma_c/\sigma_{ca}:\sigma_{bc}/\sigma_{bao}=0.13:0.87$ となるようにした。これは、曲げモーメントの占める割合が軸方向圧縮力によるものより圧倒的に大きいという実績によるものである。载荷は実験 B に準じた。

	供試体断面寸法 (mm)	供試体長さ (mm)	断面積 A* (cm ²)	降伏点応力度 σ_y (kgf/cm ²)	圧縮強度 σ_{ck} (kgf/cm ²)	供試体個数
圧縮実験 (実験 A)	 SS41 鋼管柱	800	35.2	3,260 (320Mpa)	—	3
	 SS41 合成柱		82.6		230 (22.6Mpa)	
	 スタッドジベル M4x30 (72本) SS41 合成柱		38.1		—	
	 補剛材 3.2x42 SS41 鋼管柱		119.9	3,610 (354Mpa)	230 (22.6Mpa)	
	 補剛材 3.2x51 SS41 鋼管柱		46.9	—	230 (22.6Mpa)	
	 補剛材 3.2x51 SS41 合成柱	172.5	—	—	1	
軸方向力を受ける実験 (実験 B)	 SM50 鋼管柱	2,244	27.4	3,670 (359Mpa)	—	1
	 SM50 合成柱		74.0		380 (37.3Mpa)	
	 スタッドジベル M3x20 (408本) SM50 合成柱					
柱基部の実験 (実験 C)	 SM50 鋼管柱	1,040	78.9	4,050 (397Mpa)	—	1
	 SM50 合成柱		267.0		390 (38.3Mpa)	
	 スタッドジベル M5x30 (224本) SM50 合成柱					

* 鋼とコンクリートの弾性係数比 $n = E_s / E_c$ を実験 A では $n = 7.7$ 、実験 B では $n = 6.1$ 、実験 C では $n = 6.6$ として計算 図-1 供試体の断面寸法および強度等

1-3 実験結果と考察

1-3-1 実験 A

(1) 充てんコンクリートの有無による終局強度と座屈モード

鋼管柱のような局部座屈の発生は見られず、軸方向圧縮ひずみがすべて漸増してゆく挙動を示している(図-2)。

荷重の増大とともに、鋼板の柱内側へ向う座屈変形に対する拘束効果が生じ、合成柱では大幅な強度増加が現われた。

つぎに、各供試体の崩壊後断面内の座屈モードを示すと、図-3 に示すようにプロットされ、鋼板パネルの周辺が固定に近い境界条件で鋼板パネルが座屈したことが同われる。

(2) スタッドジベルによる外側鋼板の座屈防止

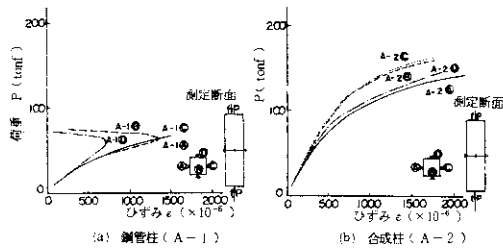


図-2 荷重-軸方向ひずみ曲線

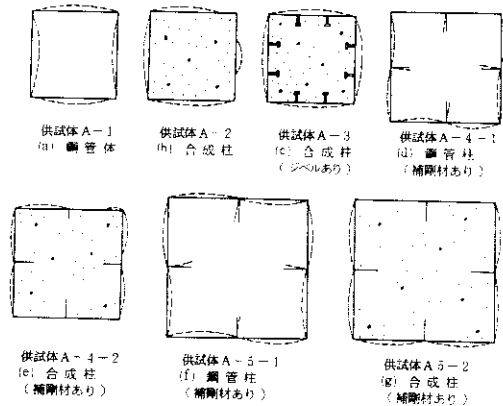


図-3 合成柱断面の圧縮崩壊モード

効果

図-4にスタッドジベルに作用するひずみと引張力との関係を示す。供試体3体ともスタッドジベルは低い荷重段階から引張力を受け、これらのうち2体は荷重が約100 tf (980 kN)を越えたあたりからスタッドジベルの引張力が急激に増加する傾向を示している。これは、鋼板の座屈荷重100 tf (980 kN)を越えたあたりから、鋼板が面外へはらみだそうとするのをスタッドジベルが拘束するため、スタッドジベルに大きな引張力が生じたものと考えられる。

(3) 補剛材とコンクリートの付着力に伴う外側鋼板の座屈防止の効果

合成柱における補剛材には、通常の補剛効果とともに、コンクリートとの付着あるいは摩擦による鋼板パネルの面外座屈変形の防止作用が期待される。そして、補剛材の幅厚比が大きい場合や剛度が比較的小さい場合でも、充てんコンクリートによる補剛材の局部座屈が防止され、曲げ剛度や

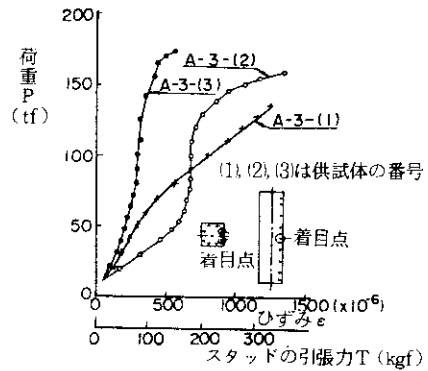


図-4 荷重とスタッドジベルに作用するひずみと引張力の関係

特にねじり剛度の増大が期待される。合成柱の場合、補剛材剛度には関係なく、鋼板パネルすべてが断面外側に向かってはらむ座屈モードとなった。これは、補剛材がコンクリートに包まれているため、曲げ剛度、およびねじり剛度が増加したこと、また、充てんコンクリートによる内側への座屈変形が防止されたため、鋼板パネルが周辺固定に近い境界条件で局部座屈したものと考えられる。局部座屈発生後の余剰耐荷力は、鋼管柱の場合よりもかなり大きい。

表-2 耐荷力の実験値と計算値との比較

供試体	構造	実験値 (ton)		計算値 ※ (ton)		Nu Per	Nu Py
		終局荷重 Nu	座屈荷重 Per	座屈荷重 Per	降伏荷重 Py		
A-1	鋼	75.0	64.4	107.1	1.16	0.70	
		77.5					
A-2	合成	151.5	144.2	178.4	1.05	0.85	
		154.0					
		172.5					
A-3	合成スタッドジベル付	149.7	144.2	178.4	1.04	0.84	
		170.0					
		172.5					
A-4	鋼剛材付	94.5	79.5	129.6	1.19	0.73	
	合成剛材付	210.0	224.4	254.7 (234.2)	0.94	0.82 (0.90)	
A-5	鋼剛材付	89.0	66.6	159.3	1.34	0.56	
	合成剛材付	293.0	293.4	351.0 (333.6)	1.00	0.83 (0.88)	

注) ※ 計算値は道示⁷⁾の方法により求めた。
()内の値は曲げを考慮した値。

表-3 耐 荷 力

[単位: 1tf (= 9.8 kN)]

実 験	供 試 体	実 測 値		CDC法による 計算値		①	②	備 考
		許容値 ※ ①	最大値 ②	許容値 ③	最大値 ④	③	④	
実験B	鋼 管 柱	9.1	18.4	-	17.7	-	1.04	$\sigma_c / \sigma_{ca} : \sigma_{bc} / \sigma_{bao}$ = 0.2 : 0.8
	合成柱 { ジベルなし ジベルあり	13.2	23.5	11.5	23.5	1.14	1.00	
		12.3	24.0	11.5	23.5	1.07	1.02	
実験C	鋼 管 柱	-	63	-	67	-	0.94	$\sigma_c / \sigma_{ca} : \sigma_{bc} / \sigma_{bao}$ = 0.13 : 0.87
	合成柱 { ジベルなし ジベルあり	61.2	98	34.8	88	1.76	1.11	
		64.8	100	34.8	88	1.86	1.14	

※印は鋼管縁ひずみが1,000 μ に達したときのゲージの読みから求めた許容耐力である。

(4) 圧縮耐力

各供試体別の耐力を表-2に示す。薄肉板要素を持つコンクリート充てん矩形断面柱の場合、コンクリートよりも鋼板の強度が耐力に対して支配的になるとと思われる。

1-3-2 実験B

(1) 耐力の解析法

軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける合成柱の耐力については、柱-たわみ曲線法(CDC法)を用いて解析を行った。⁸⁾ この考え方は、広く用いられており、鋼とコンクリートの応力-ひずみ曲線がわかれば合成柱にも適用可能である。⁹⁾

(2) 耐力

本実験では軸方向圧縮力による応力と比較して曲げ圧縮応力が卓越した状態を対象とした。実験値と理論値とを比較すれば、単なる中空鋼管柱よりも1.3~1.4倍大きな耐力を有していることが判明した(表-3)。これは充てんコンクリートの一部が軸方向圧縮力、および曲げモーメントを分担していることを意味している。

表-4 実験Bにおける供試体中央断面のたわみ量

$P = 10\text{tf} (= 98\text{ kN})$

供 試 体	たわみ量 (mm)	鋼管柱	ジベルなし	}
		合成柱	ジベルあり	
鋼 管 柱	10.1	-	-	1.06
合成柱 { ジベルなし ジベルあり	7.3	1.38		
	6.9	1.46		

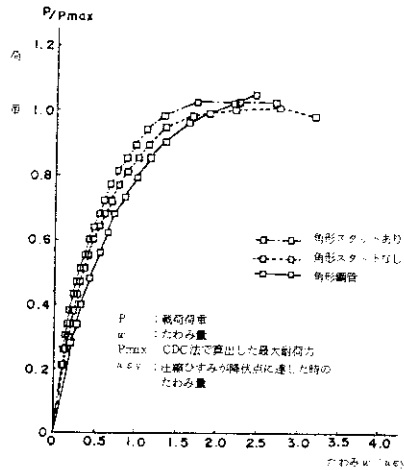


図-5 荷重-ひずみ曲線(実験B)

最大耐力とスタッドジベルの有無に関しては表-4からスタッドジベルの有無による有意差は認められない。

(3) 剛性

弾性範囲内におけるたわみの測定結果を表-4に示す。合成柱の曲げ剛度は中空鋼管柱の1.4~1.6倍であった。一方、合成柱のスタッドジベルの有無によるたわみ性状を図-5、表-4から比較すると、両者の有意差は認められなかった。

1-3-3 実験C

(1) 耐力

合成柱の最大耐力は、中空鋼管柱に比し、1.6~1.8倍の耐力を有している(表-3)。この実験では、せん断力が作用しているにもかかわらず

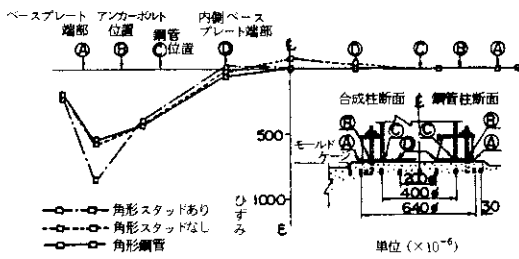


図-6 コンクリート台座のひずみ分布

ず、ジベルの有無は最大耐荷力には影響をおよぼしていないことがわかる(表-4)。さらに、文献10)で示されているように、繰り返し応力を受ける場合もジベルの有無はあまり影響していない。しかし、DIN¹¹⁾では荷重を導入する領域に、ずれ止めを配置することを規定しているので、さらにこの点に関する研究が必要であろう。

合成柱の柱基部のひずみは中空鋼管柱がすでに座屈状態にあるにもかかわらず合成柱の場合はひずみが低い値を示しており、柱基部内部の補剛材を省略しても充てんコンクリートが荷重を分担しているものと考えられる。図-6のコンクリート台座のひずみ分布からも柱基部内部の補剛材を省略して簡素で、しかも経済的な設計が可能であると推察される。

(2) 剛性

合成柱は中空鋼管柱より1.3～1.7倍の剛性を有している(図-7)。一方、鋼とコンクリートのヤング係数比 n を同様にたわみから計算すると、スタッドジベルなしで $n=15$ 程度、スタッドジ

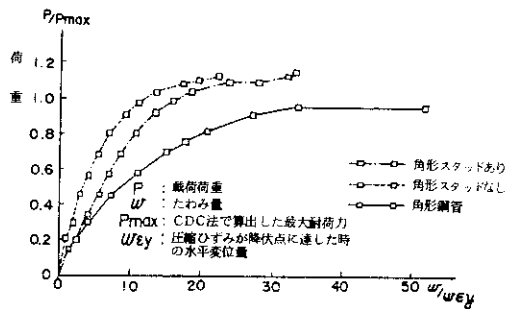


図-7 荷重-たわみ曲線(実験C)

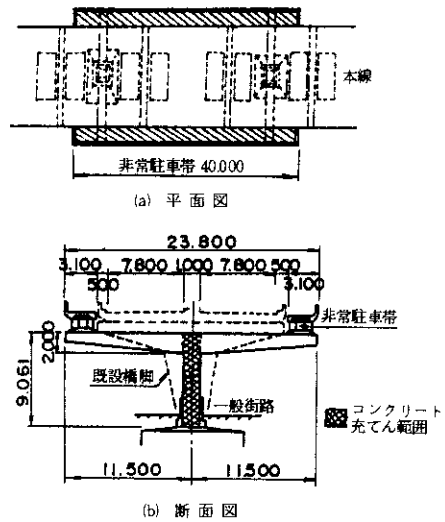


図-8 T形橋脚一般図

ルありで $n=10$ 程度であった。

1-3-4 破壊実験後のコンクリートの状況
破壊実験後、供試体にガスで観察用の窓を開けて目視による調査を実施した結果、以下のことを確認した。

- ① 鋼管とコンクリートとの肌すきは見られなかった。
- ② スタッドジベルはコンクリートと鋼管を十分に付着させる効果をもっていた。
- ③ 鋼板、鋼管の局部座屈は見られなかった。
- ④ 柱基部の引張側のコンクリートに幅0.2mm～0.5mmのクラックが生じていた。
- ⑤ 補剛材が局部座屈した箇所ではコンクリートが局部的に圧壊して粒状化していた。

2. 合成柱を有する橋脚の静的、動的現場実験

2-1 橋脚概要

実験橋脚は阪神高速道路大阪池田線に増設される非常駐車帯に計画され、図-8に概要を示す。

コンクリート充てん前後における橋脚各部の応力測定、片持部の先端のたわみ測定、さらに振動特性を調査するための一連の現場荷重実験を実施

した。充てんコンクリートは、普通ポルトランドセメントが使用され、設計基準強度は $\sigma_{ck} = 180 \text{ kgf/cm}^2$ (17.7 Mpa)、スランプ8 cm、最大骨材寸法40 mm、空気量4 %で、梁上面からトレーマーを通じて徐々に打設された。

2-2 荷重方法

静的荷重は自重37.2 tf (364.8 kN) のトラック・クレーンを梁先端より1.55 m の位置に吊り下げるといった方法による。

動的荷重も同じくトラック・クレーンを用いた。すなわち、内蔵したワイヤーを橋脚にまわし、こ

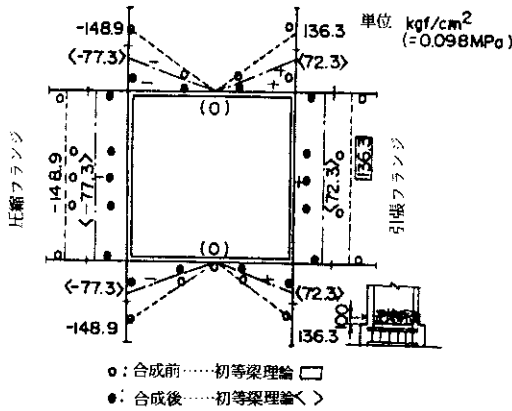


図-9 柱基部直上断面の垂直応力分布

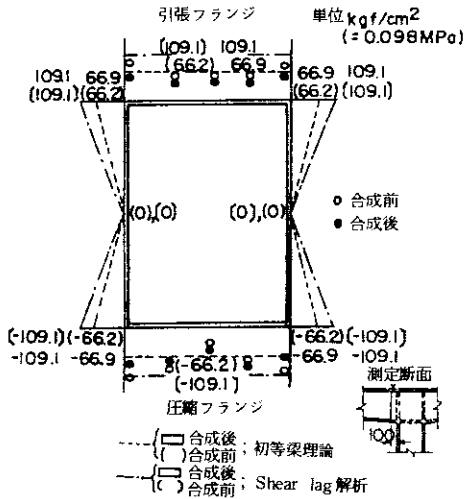


図-10 隅角部はり断面の垂直応力分布

れを引き込んで、一定の荷重として作用させておき、その荷重を瞬時に解放させて衝撃を与え、橋脚に自由振動を起こさせることにした。

2-3 静的実験結果と考察

2-3-1 応力分布

コンクリート充てん前後における橋脚各部の応力分布、特に柱基部、隅角部に発生する Shear lag に伴う応力測定結果を図-9~11 に示す。図-9 から柱基部直上に、図-10, 11 から隅角部のはり、柱のフランジにおいて、合成前では著しい Shear lag 現象が現われている。これらは奥村¹²⁾らによる解析結果とよい一致を示している。また、図-9 に示すように等曲げモーメントを受けるはずの柱基部においても Shear lag が生じているという事実も明らかになった。しかしながら、コンクリート充てん後、これらの断面においては充てんコンクリートによるせん断変形が防止され、フランジ内の応力分布は、図-9~11 に示すように、ほぼ均一な応力分布を呈し、全断面有効とみなせるようである。

以上のことから、コンクリートによる Shear lag 現象の低減効果が大きく、合成柱とすることにより隅角部等の細部設計も簡略化できると推察される。

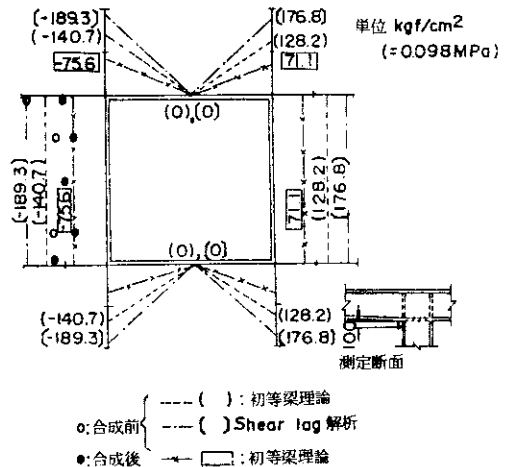


図-11 隅角部柱断面の垂直応力分布

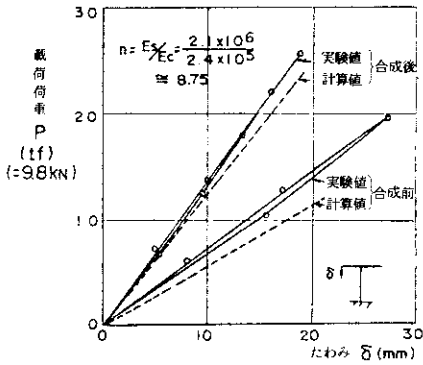


図-12 コンクリート充てん前後の荷重-たわみ曲線

2-3-2 たわみ

片持ばり先端部のたわみは合成後、約60%小さくなっており、橋脚の柱部材の剛性が相当に上昇することが判明した(図-12)。このことより、たわみ制限の厳しい鋼製橋脚に合成柱を活用すれば、著しい改善が行い得ることを示唆している。

2-4 動的実験結果と考察

2-4-1 橋脚の曲げ自由振動

図-8に示すように、実験橋脚上に非常駐車帯があり、この質量を考慮して片持ばりとしての曲げ自由振動解析を行った。

2-4-2 上部工のねじり自由振動

橋脚が曲げ振動を起こすと、その上に乗っている上部工はねじり振動を起こすので、上部工のねじり振動数を求めた。

2-4-3 連成自由振動

実際の橋梁の自由振動は2-4-1、2-4-1

表-5 固有振動数 f の実験値と解析値との比較

項目	f 実験値 f _{EXP} (Hz)	f 解析値 f _{AN} (Hz)	f _{EXP} / f _{AN} × 100 (%)
合成前	1.96	1.99	98.5
合成後	1.54	1.35	114.0

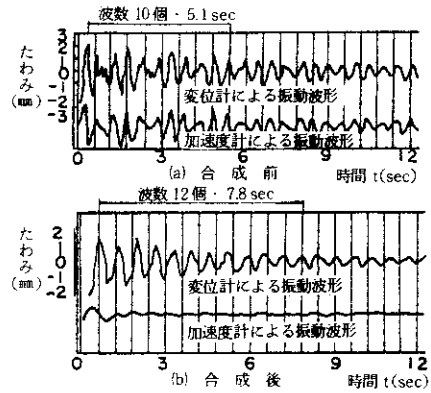


図-13 梁先端部における自由振動波形

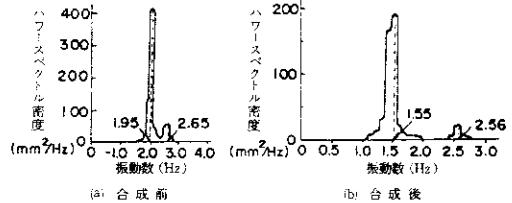


図-14 振動波形のパワースペクトル密度

2で述べたような橋脚の曲げ自由振動と上部工のねじり自由振動の連成振動として評価することができる。

工学上はこのような振動における最低次の固有振動数が重要となるので、これについてDunkerlyの方法¹³⁾を適用すると、上部工を含めた橋脚の最低次の固有振動数 f が求められる。表-5にこの方法による解析値を示す。

2-4-4 合成前後の振動記録

代表的な合成前後の振動記録を図-13に示す。

2-4-5 固有振動数

図-13に示すたわみ振動記録をスペクトル・アナライザーにかけパワースペクトル密度(図-14)を求めると、ピーク値は合成前後においてそれぞれ2個現われていたが、どちらも最低次のものが卓越していた。合成前後における最低次の固有振動数の実験値は、表-5に示すように、それぞれ1.96 Hz、1.54 Hzであり、解析値とほぼ一致していた。

コンクリートを充てんすることによる固有振動数は約40%上昇していたが、合成後の固有振動数の実測値と解析値とに若干の差異が認められる。このことより合成柱の剛度（ n 値のとり方）の評価にはなお研究の必要があろう。

2-4-6 対数減衰率

図-13の振動記録から、合成前後における振幅から対数減衰率 δ を求めた。合成前後における波数と振幅の関係を図-15に示す。図-15(b)中に示す直線は実験値を最小二乗法を用いて処理したものである。対数減衰率 δ の値は図-15中に示すとおりであり、合成後の δ は合成前の約2~5倍となっている。このようにコンクリート充てんによる減衰効果が大きいので、合成柱を採用することにより、橋脚の動的特性が著しく改善されるものと思われる。

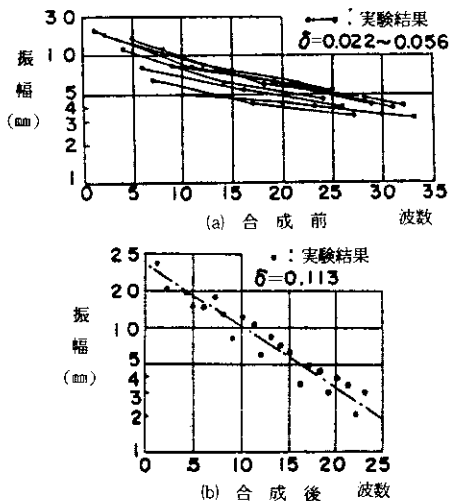


図-15 対数減衰率

3. まとめ

まず、模型実験から以下の結果を得た。

実験Aから

- ① コンクリートを充てんすると、鋼管の局部座屈モードが周辺固定に近い状態になり、著しい補剛効果が期待できる。そして、局部座屈発生後の余剰耐荷力を持たせるための効果も大きい。

② コンクリートを充てんした場合、補剛材の剛度が低くても、鋼板の局部座屈はコンクリートの拘束により著しく防止される。

③ スタッッドジベルによる鋼板の補剛効果は、それほど大きいものでなかった。

つぎに、実験B、Cから

④ 曲げ応力度の占める比率が高い場合でも合成柱としての耐荷力を十分に有し、しかもスタッッドジベルの有無にはあまり関係していない。荷重-ひずみ曲線は降伏点付近までは直線性を保持していることから、鋼管と充てんコンクリート間とのひずみの適合性は満たされていると推察される。

⑤ たわみに対する合成柱の剛性は、鋼管柱に比べて1.4~1.6倍となっていた。合成柱の剛度とスタッッドジベルの有無とはあまり関係していない。

⑥ たわみから逆算した鋼とコンクリートのヤング係数比 n は、 $n = 10 \sim 15$ 程度であった。

⑦ 合成柱の柱基部各部に発生するひずみは、中空鋼管柱の場合よりも約20%減少していた。

⑧ 合成柱の柱基部内部の補剛材を省略した場合でも、ベースプレート下面のコンクリートのひずみ分布に大きな変化はみられなかった。このことから内部の補剛材を省略し、簡素で経済的な設計が可能であろうと推察される。

⑨ 乾燥収縮による鋼管とコンクリートとの肌すきは、認められなかった。

最後に、現場実験から以下の結果を得た。

⑩ 合成前においては隅角部はり断面、柱断面、および柱部材の下端断面には顕著なShear lag現象が認められた。しかし、合成後では、隅角部、柱基部にはShear lag現象はほとんど認められず、隅角部柱断面、柱基部断面の垂直応力はともに減少し、隅角部腹板ではせん断応力の減少もみられた。このことから、今後、隅角部や柱基部の細部設計を行うにあたっては一考が必要であろう。一方、片持ばり部にはコンクリートを充てんしなかったにもかかわらず、隅角部はり断面の応力が減少することも認められた。

- ⑪ 合成後におけるはり先端のたわみは約60%も減少しており、著しく橋脚の剛性が増大しているため、橋脚のたわみ制限の厳しい鋼製橋脚には合成柱は有利な構造形式であると推察される。
- ⑫ 合成構造とすることによって、橋脚の固有振動数、すなわち動的剛性が著しく上昇する。
- ⑬ 合成柱とすることによって、対数減衰率が大きくなる。すなわち、減衰効果が増大し、動的特性が著しく改善されることを示している。

あとがき

合成柱は、鋼構造とコンクリート構造との境界領域にあり、最近になって多数の論文が発表されるようになったが、まだ、設計体系が確立されていない。鋼構造分科会・コンクリート分科会合同作業部会で現在種々検討中なので、成果を期待している。

謝 辞

実験を計画、実施するにあたり、大阪市立大学工学部中井博教授、そして、神戸大学工学部藤井学助教授ならびに大阪市立大学工学部北田俊行助教授から貴重なご意見をいただいたことに深謝の意を表す。さらに、実験の実施にあたっては東京エンジニアリング㈱の田中忠夫氏、㈱横河橋梁製作所の寺田博昌氏、㈱片山鉄工所の関係各位に厚く感謝する。また、保全施設部加藤修吾、神戸建設部瀬川章彦、神戸管理部神田正孝、(財)阪神高速道路管理技術センター山崎信之各位から本論文をまとめるにあたり貴重な資料をいただいたことを付記する。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団大阪管理部、神戸管理部；構造物管理台帳 昭和58年
- 2) 江上輝雄、佐竹秀徳；鋼製橋脚内部塗装の補修について、第17回技術研究発表会、阪神高速道路公団、昭和60年2月

- 3) 白野弘明、山崎信之；支承の損傷内容と要因の推定、技報4号、阪神高速道路公団、昭和59年
- 4) (財)阪神高速道路管理技術センター、新日本技研㈱；橋脚振動性状と支承挙動調査点検業務報告書、昭和59年12月
- 5) 阪神高速道路公団、内外工営㈱；鋼I桁格点部亀裂集計分析業務報告書 昭和60年3月
- 6) 河井章好、吉川紀、石崎浩；合成柱（充てんコンクリート方式）を有する鋼製橋脚の諸問題（上、下）、橋梁と基礎、1983年2月、3月
- 7) 日本道路協会；道路橋示方書・同解説（共通編、Ⅱ鋼橋編）、昭和55年2月
- 8) 中井博、吉川紀、富田穰、由井洋三；軸方向力と曲げモーメントを受ける合成柱の耐力、橋梁と基礎、1984年4月
- 9) Neogi, P.K and Sen H.K; Concrete-Filled Tubular Steel Columns under Eccentric Loading, The Structural Engineer, Vol,47, May 1969
- 10) 吉川紀、富田穰、瀬川章彦、木島信雄；合成柱（充てんコンクリート方式）を有する柱基部のくり返し載荷実験について、第29回構造工学シンポジウム、1983年2月
- 11) DIN18806, Teil 1, Tragfähigkeit von Verbundstützen Berechnung und Bemessung, 1981年9月
- 12) 奥村敏恵、石沢成夫；薄板構造ラーメン隅角部の応力計算について、土木学会論文集、第153号、昭和43年5月
- 13) 中井博；土木構造物の振動解析、森北出版、1983年