

(11) 合成柱(充てん方式)を有する鋼製橋脚の隅角部と柱基部の構造設計について

中井 博^{※1} 加藤 修吾^{※2}
吉川 紀^{※2} 木島 信雄^{※3}

1. まえがき

わが国の経済社会が安定成長期に移行しつつあるに伴い構造物に関しても質的向上が強く要請されている。すなわち、自然条件や環境の保全等を前提として建設に取り組まねばならない。そこで、構造物の合理的な設計、施工段階における管理の省力化、構造物の耐久性向上、維持管理の容易なものが要請されている。これらの一環として、ここでは鋼とコンクリートとの境界領域にある合成柱の経済性と施工性を検討したことについて報告する。合成柱は鋼管の外側だけを鉄筋コンクリートで被覆したもの、内側だけにコンクリートを充てんしたもの、両者を併用したものが考えられるが、本論文は充てんしたものに限定する。

コンクリートを充てんした合成柱は引張に対してじん性に富んだ鋼材と圧縮に対して有利なコンクリートとを一体とした構造物であり、耐荷性と剛性に富み、また耐震上も優れた構造物であるとともに、柱基部や柱とはりの隅角部の構造細部の簡素化が可能となるほか、防錆上も有利な構造形式であると考えられる。

しかしながら、反面、その力学的特性を十分熟知し、合理的で経済的な設計が行えるよう心がけることが重要である。そこで、合成柱の合理的設計法を模索するために必要な資料を蓄積する目的のもとに¹⁾、模型ならびに現場実験と若干の解析を通じて明らかにできた事項に基づき、隅角部と柱基部の構造設計の新しい方向を示すものである。

表-1 模型実験概要

2. 模型実験による合成柱の耐荷力

模型実験の概要を表-1に示す。

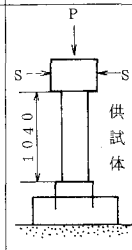
2-1 供試体

供試体寸法は実物橋脚の寸法比にできるだけ合致するようにした。なお、合成柱の挙動と比較するために、中空鋼管柱のみの実験も併せて行った。さらに、合成柱の断面形状としては、円形と角形の2種類を採用した。断面寸法は複雑な柱基部を再現するために、実橋の $\frac{1}{5}$ 程度の縮尺とした。なお、スタッドジベルの有無に関係なしに柱基部内部の補剛材はすべて省略した。

実験に使用した充てんコンクリートは早強ポルトランドセメントを使用し、設計基準強度は $\sigma_{ck} = 300 \text{ Kg f/cm}^2$ 、スランプ7~10cm、最大骨材寸法20mm、空気量3~5%とした。

2-2 載荷荷重

中空鋼管柱、合成柱の軸方向圧縮力 P_0 と曲げモーメント M_0 の比率は、弾性範囲の応力比が下記のようになるように設定した。(実績調査に基づく⁷⁾)

実験名	載荷方法	実験目的
柱基部の実験		1. 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 2. 供試体数 (i) スタッドジベルなし、4体(鋼管柱2体、合成柱2体) (ii) スタッドジベルあり、2体(合成柱2体)

※1 大阪市立大学工学部 ※2 阪神高速道路公団大阪管理部 ※3 東京エンジニアリング株式会社

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

破壊実験： $\sigma_c/\sigma_{ca}:\sigma_{bc}/\sigma_{bao}=0.13:0.87$

ここに、 σ_c ：軸方向圧縮力による鋼管の軸圧縮応力

σ_{ca} ：許容軸方向圧縮応力度

σ_{bc} ：曲げモーメントによる鋼管の曲げ圧縮応力

σ_{bao} ：許容曲げ圧縮応力度の上限値

2-3 耐荷力

鋼とコンクリートを合成した合成柱の耐荷力に対して、柱-たわみ曲線法 (Column Deflection Curves Method、CDC法)を用いて解析を行った。この方法は、材料の応力-ひずみ曲線をもとにし軸方向圧縮力、曲げモーメントから曲率を求め、スパン方向のいくつかの分割点の断面でつり合い条件 $M_{外力} = M_{内力}$ を満足させることを前提とし、作用荷重に対するたわみ曲線を数値積分法によって求め、はり-柱の耐荷力を把握するものである。²⁾

2-4 実験結果と考察

耐荷力は円形、角形両断面の合成柱とも実験値と理論値との比較において、中空鋼管柱よりも1.6～1.8倍大きな耐荷力を有していることが判明した(表-2)。

表-2 耐荷力

単位 tf (=9.8 kN)

供試体	実測値①	CDC法による計算値②	①/②	備考
			②	
円形鋼管柱	46	50	0.92	$\sigma_{ca}/\sigma_{bao}=0.13:0.87$
合成柱	ジベルなし	85	68	
	ジベルあり	85	68	
角形鋼管柱	63	67	0.94	
合成柱	ジベルなし	98	88	1.11
	ジベルあり	100	88	1.14

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。

最大耐荷力とスタッドジベルの有無に関しては表-2から円形、角形断面ともスタッドジベルの有無による有意差は認められなかった。

柱基部のひずみは、合成柱の場合は中空鋼管柱よりも20%程度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。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(図-1)。

一方、柱基部の内側補剛材

を省略した場合に高応力交番くり返し応力が作用した時の挙動は、以下の通りであった。図-2に示すよう

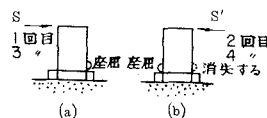


図-2 くり返し載荷時の座屈状況

に、圧縮側の鋼板に局部座屈が発生した。しかし、逆

方向に水平力を作用させると座屈した部分が引張応力

を受けると、局部座屈は外見上は消失してしまった。この現象は円形、角形両断面にも生じた。これは局部座屈がコンクリートによって鋼管の外側にしか発生し得ないため、引張応力を受けると容易に

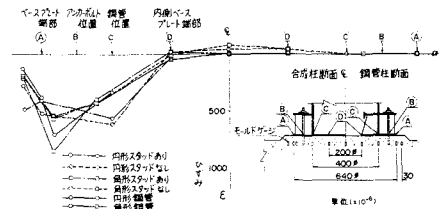


図-1 コンクリート台座のひずみ分布(静的実験)

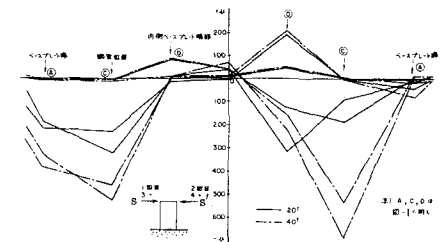


図-3 コンクリート台座のひずみ分布(くり返し実験)

消失するものと思われる。また、くり返し載荷を行った場合も耐荷力ならびに応力分布には変化が認められなかった³⁾。コンクリート台座のひずみ分布、最大ひずみとも、ベースプレート端部より、内側に入った所で発生している。第1サイクル、第2サイクルとも同じようなひずみ分布形状を示している(図-3)。

以上のことから、鋼管にコンクリートを充てんすることにより鋼とコンクリートは一体となった挙動をしており、柱基部の内部の補剛材を省略した簡素で、経済的な設計が可能であろうと推察される。

3. 現場実験による合成柱の静的・動的挙動

阪神高速道路公団で始めて使用された合成柱を有する橋脚の概況を図-4に示す。コンクリート充てん前後における橋脚各部の挙動を調査した。充てんコンクリートは、普通ポルトランドセメントを使用した。設計基準強度は $\sigma_{ck}=180\text{Kgf/cm}^2$ (17.7MPa)、スランプ8cm、最大骨材寸法40mm、空気量4%であった。

3-1 載荷方法

静的載荷は自重37.2tf(3648KN)のトラック・クレーンを橋脚先端より1.55mの位置に吊り下げるといった方法によった。動的載荷も同じくトラック・クレーンの荷重を内蔵のワイヤーを橋脚にまわし、これを引込んで、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。

3-2 静的実験結果と考察

(1) 柱基部、隅角部の応力分布

柱基部直上断面、隅角部はり断面ならびに柱断面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。しかしながら、合成後、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-5～7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。このことから、コンクリートによるShear lag現象の低下が大きく、合成柱とすることにより隅角部、柱基部の細部設計も簡略化が可能と推察される。

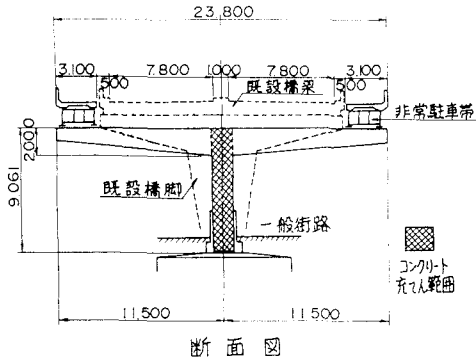


図-4 合成柱一般図

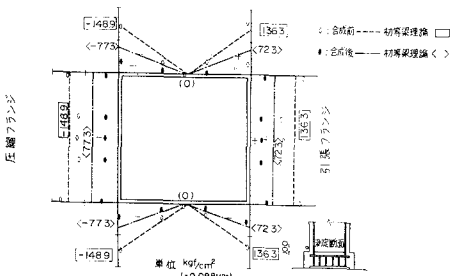


図-5 柱基部直上断面の垂直応力分布

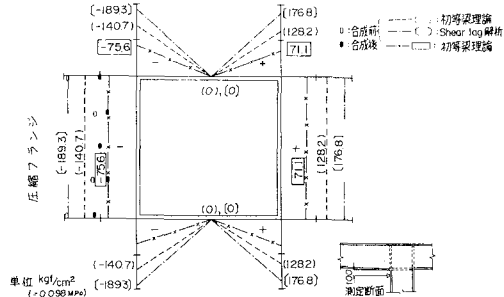


図-7 隅角部柱断面の垂直応力分布

柱基部のアンカーボルトの引張力はコンクリートを充てんすることによって、引張フランジの応力

度が約25%小さくなっている。コンクリート充てん前のアンカーボルトの最大引張応力度は $51.3\text{Kg}/\text{cm}^2$ (5.0MPa)であったのに対して、充てん後は $30\text{Kg}/\text{cm}^2$ (2.9MPa)と41%も減少が認められ、コンクリート充てんによる十分な補強効果が現われていることがわかる(図-8)。

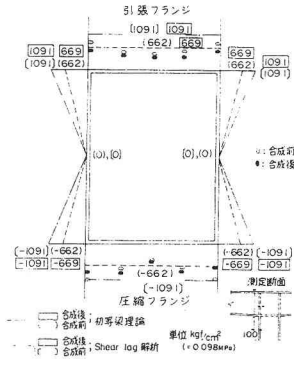


図-6 隅角部梁断面の垂直応力分布

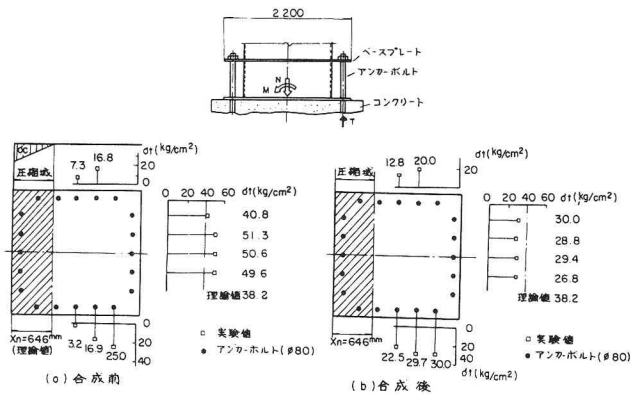


図-8 アンカーボルトに生ずる引張応力度

(2)たわみ

はり先端部のたわみは合成後、約60%小さくなっており、橋脚の柱部の剛性が相当に上昇することが判明した。

3-3 動的実験結果と考察

合成構造にすることによって、橋脚の固有振動数、すなわち、動的剛性が著しく上昇し、合成後の対数減衰率は合成前の約2～5倍となっている。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。

4. 合成柱を有する鋼製橋脚の隅角部、柱基部の細部構造の試算設計

隅角部に望まれる構造的な機能は、はりから柱へ断面力を円滑に伝えることであるが、この役目をはたす隅角部には大きなせん断力を生じる。この大きなせん断応力のために、隅角部近傍のはりや柱には初等はり理論によるものとは異なり、せん断遅れ現象の影響を著しく受ける。このことは、はりや柱のフランジプレートのせん断変形が無視しえないことを示している。一方、柱基部は柱からの力により、圧縮力に対してはベースプレート下面のコンクリートで、引張力に対してはアンカーボルト、および、アンカーフレームで抵抗させることになっている。

しかし、鋼製橋脚の柱部にコンクリートを充てんして合成柱とすると、上記2.3.で述べたように、隅角部ではせん断遅れ(Shear lag)の影響を除外し、柱基部では内側の複雑な補剛材を省略することが可能であると判断されたので、これに従って各部の試算設計を通じて種々検討した結果を報告する。

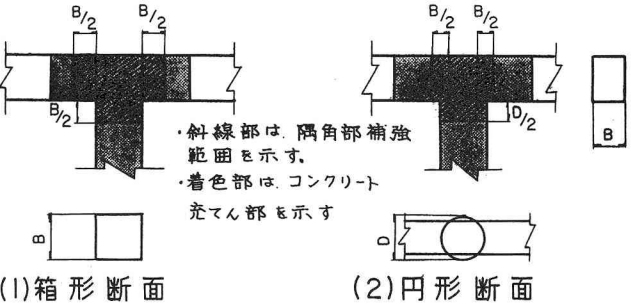


図-9 コンクリート打設範囲

なお、3-2のShear lagの結果は角形断面のものに限定したが、既応の研究によると、円形断面もほぼ同様の挙動を示すとの報告があるので以降では円形断面も角形断面と同じように扱うものとする。

4-1 隅角部

隅角部の範囲は阪神高速道路公団によると図-9に示すようにとっているので、コンクリート打設範囲を図中に示すことを前提に試算設計を行った。

1)設計条件

- ・上部構造からの荷重
 - ・死活荷重による最大鉛直反力
- $$G_1=730^{tf}, G_2=622^{tf}, G_3=612^{tf}, G_4=889^{tf}$$

2)設計計算

計算のフローを図-10に示す。

3)計算結果

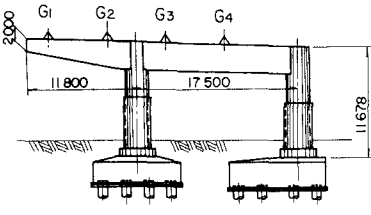


図-11 橋脚一般図

設計計算に用いた橋梁形式を図-11に示す⁵⁾。鋼重の比較を表-3に示す。合成柱とすれば鋼管柱より約18%鋼重が軽くなっている。これは、図-12に示すように、合成柱の上面のリップが省略でき、板厚も薄くできるためである。

表-3 隅角部概算鋼重表

	① 鋼管柱	② 合成柱	②/①
円形柱	19.3 ^t	15.9 ^t	0.82
角形柱	26.2 ^t	21.6 ^t	0.82

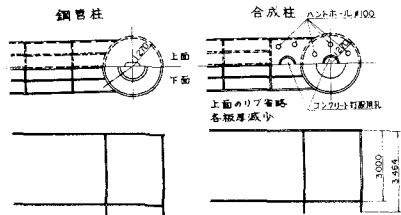


図-12 隅角部構造図(円形)

- ・風荷重による反力

$$\text{活荷重無載荷時合計 } H_W=3188^{tf}(79.7^{tf})$$

$$\text{活荷重載荷時合計 } H_{WL}=177.6^{tf}(44.4^{tf})$$

- ・地震荷重による水平反力 $H_E=860.0^{tf}(215.0^{tf})$

・設計震度: $k_H=0.25$ 温度変化: $t=\pm 35^\circ\text{C}$

・主要鋼材: SM58、SM50、SS41

・現場継手: はり部、摩擦接合高力ボルト F10T(M22)

柱部、現場溶接

・中畑コンクリート設計基準強度: $\sigma_{ck}=240\text{ kgf/cm}^2$

・基礎コンクリート設計基準強度: $\sigma_{ck}=240\text{ kgf/cm}^2$

・適用示方書: 道路橋示方書、(昭年55年2月)

阪神高速道路公団 設計基準(昭和55年4月)

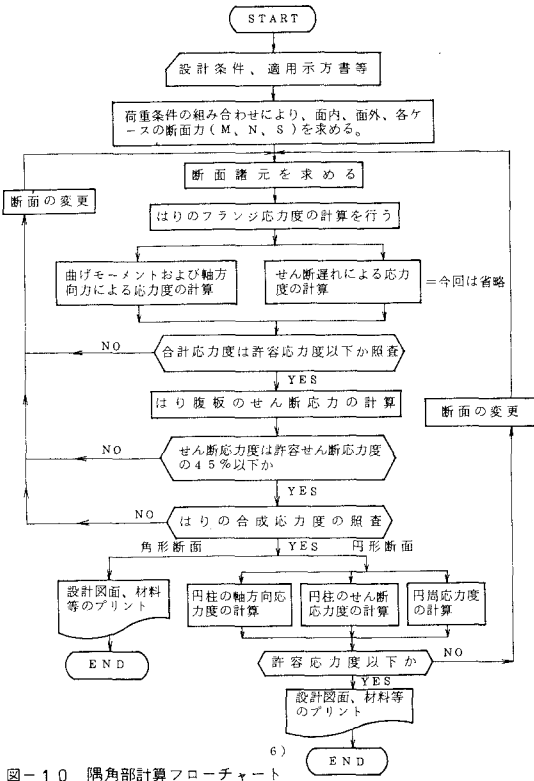


図-10 隅角部計算フローチャート

4-2 柱基部

1) 設計条件

主として4-11)に準じたが、構造詳細は下記によった。

①圧縮力に対してはベースプレート下面のコンクリートで、引張力に対してはアンカーボルト、および、アンカーフレームで抵抗させる。②内側の補剛材は省略する。なお、ベースプレートの中央部下面にモルタル打設用の孔を設ける。③内側ベースプレート厚は外側ベースプレート厚と同一とする。

2) 設計計算

計算フローを図-13に示す。

3) 計算結果

設計に用いた橋梁形式は図-11に示す⁵⁾。鋼重の比較を表-4に示す。合成柱とすれば、鋼管柱より、約17%鋼重が軽くなる。図-14に示すように内側補剛材が省略できて構造がすっきりし、施工が著しく容易となる。

表-4 柱基部概算鋼重表

	① 鋼管柱	② 合成柱	②/①
円形柱	1.9 ^t	1.5 ^t .8	0.83
角形柱	2.0 ^t .2	1.7 ^t .0	0.84

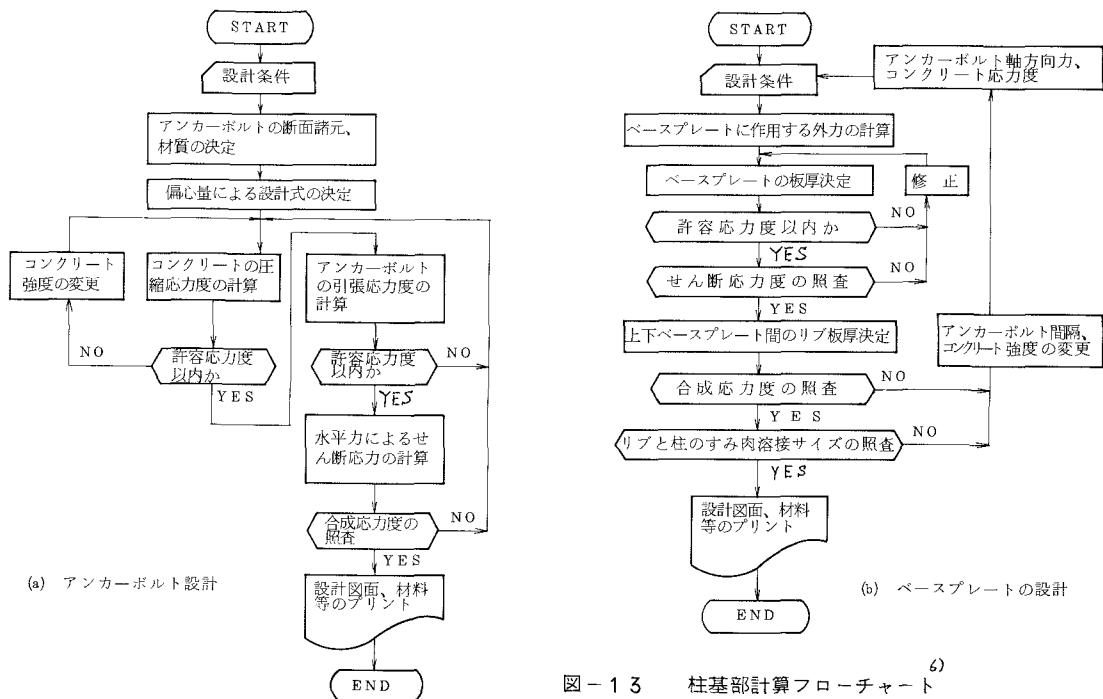


図-13 柱基部計算フローチャート⁶⁾

ラーメン全体としての鋼重減は約20%となる。角形断面の構造図も円形の場合と同様なので省略する。

5. まとめ

合成柱は鋼とコンクリートとを複合した新しい構造形式であり両者の利点を互いに活用したものである。今回の、合成柱の一連の実験ならびに試算結果から、経済性、合理性、施工性の面からみても実用化へ向って設計指針等の一層の整備が待たれる。

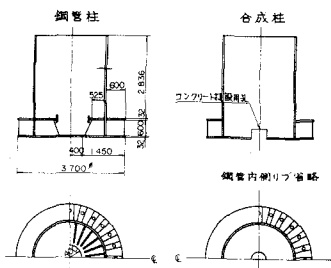


図-14 柱基部構造図(円形)

参考文献

- 1)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、PP42～50、PP45～47
- 2)W. F., Chen and Atsuta, T. ; Theory of Beam-Column vol.1. McGRAW-HILL, 1976 年
- 3)吉川紀、富田穰、瀬川章考、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 P.P.153～159
- 4)奥村敏恵、石沢成夫；薄板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
- 5)小松定夫、田井戸米好、河井章好、吉川紀、林秀侃；鋼製ラーメン橋脚の設計と解説、理工図書、昭和54年11月
- 6)阪神高速道路公団、設計基準、第2部、構造物設計基準 昭和55年4月 P.P.179～193
- 7)中井博、北田俊行、河井章好、酒造敏廣、吉川紀；鋼製ラーメン橋脚の実績調査（上、下）、橋梁と基礎、1982年6月、7月、PP35～40、PP43～49

On Structural Design of Corner and Basement for Steel Pier with Concrete Filled Columns

By Hiroshi NAKAI* Shugo KATO**
Osamu YOSHIKAWA** Nobuo KIJIMA***

It is clarified that the concrete filled steel column can sufficiently be provided with strength, rigidity and ductility against not only statical forces but also dynamical forces, through a series of model tests.

The excellent properties of concrete filled steel pier, which constructed at a route in Hanshin Expressway, were also examined by the field tests.

From these model and field tests, it is possible to simplify the structural details of basement of column to the footing and corner of the column to the beam by omitting the stiffening ribs.

This paper reports these test results. Based upon these conclusions, a trial design concerning basement and corner parts of concrete filled steel column are also shown and the economy of steel material is discussed by comparing with non-composite steel column.

The contents of this paper are as follows;

1. Introduction
2. Ultimate Strength of Concrete-filled Columns by Model Tests
3. Statical and Dynamical Field Test of Concrete-Filled Steel Pier
4. Design of Structural Details of Basement and Corner Parts of Concrete-Filled Steel Piers
5. Conclusion

Finally, the main conclusions of this paper can be summarized as follows;

- a. The shear lag phenomena at basement and corner parts of concrete-filled steel column can remarkably be decreased after composited.
- b. The deflection of the steel pier having the concrete-filled column is reduced to about 60% in comparisons with those of non-composite column.
- c. The natural frequency and damping coefficient of the concrete-filled steel pier are significantly greater than those of non-composite column.
- d. The results of the economy of steel material in weight at corner and basement parts by the trial design can be illustrated by the following table.

Table - A Economy of Steel Material in Weight

Type of Column Item	Circular Column	Square Column
Corner Part	18%	18%
Basement Part	17%	16%

* Professor, Department of Civil Eng., Osaka City University, Osaka.

** Engg., Management Div., Hanshin Expressway Public Corp., Osaka

*** Consultant Engg., Tokyo Engineering Co., Ltd., Tokyo