

(26) 鉄筋コンクリート被覆鋼管の耐力特性

運輸省港湾技術研究所 構造部 ○ 清宮 理

運輸省港湾技術研究所 構造部 横田 弘

運輸省港湾技術研究所 構造部 千葉照男

1. まえがき

船舶の荷役等に利用される栈橋では、多数の鋼管杭が用いられている。建設後長期間にわたって海洋環境下にある鋼管杭の一部では、腐食が著しく進行している。施設の安全性の観点から、利用が制限されることもあり、補修対策を施す必要性に迫られている。補修工法の一つに鉄筋コンクリートで鋼管杭を被覆し、強度の低下した鋼管杭を所定の強度に戻す方法がある。このような事態の緊急性を考えると、鉄筋コンクリート被覆による補修工法的设计・施工法の整備を早急に行う必要がある。この補修工法では、鉄筋コンクリート被覆部と腐食した鋼管杭が一体となって、地震力、接岸力等の外力に対して抵抗できるよう、補修工的设计・施工を行う。この補修工の技術的課題の一つとして、合成された鉄筋コンクリート被覆鋼管の耐力性状の把握がある。合成に必要なスタッドジベルの配置、鉄筋コンクリート被覆長等の要因が、どの程度耐力性状に影響を及ぼすか調べるため、各種の試験体を製作して載荷実験を行ったので、この結果について報告する。

2. 鋼管杭の腐食の実態と対策工¹⁾

運輸省が鋼管及び鋼矢板を主に使用して築造した港湾施設は、ここ30年間で500余りに達している。築造後長期間経過している施設の中には、鋼管杭がかなり腐食しているのが調査から判明した。今回、試験の対象としている鋼管杭は、図-1に示す栈橋の基礎に用いられている。鋼管杭は、栈橋上部の床版下端より海底地盤内まで位置している。海中及び海底地盤内のように酸素の供給が少ない環境下においては、腐食の進行は遅い。しかし、H.W.L.からL.W.L.までの干満帯では、鋼管杭が乾湿を繰返し腐食の進行が速い。この状況を図-2に示す。鋼管杭の肉厚測定結果によるとこの付近で肉厚が非常に薄くなっている。ときには、孔が生じている場合もある。電気防食の実施あるいは腐食代を設計時に見込む等で、鋼管杭の腐食対策が築造時に考えられていたが、腐食の進行が予想を上回る状況も生じている。このような状況下では、地震時あるいは船舶の接岸時に許容値を上回る応力が鋼管杭に生じることが想定され、施設の安全性を確保するために対策を施す必要がある。補修工法には、いくつかの工法が提案されているが確実性、経済性、実績等の観点から、腐食した鋼管杭に鉄筋コン

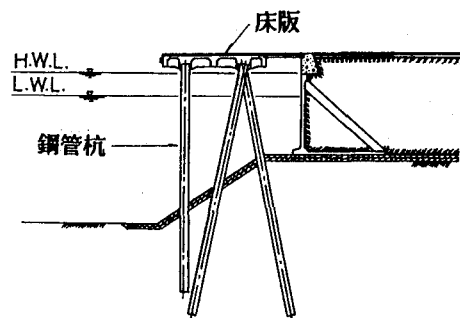


図-1 横栈橋の断面図

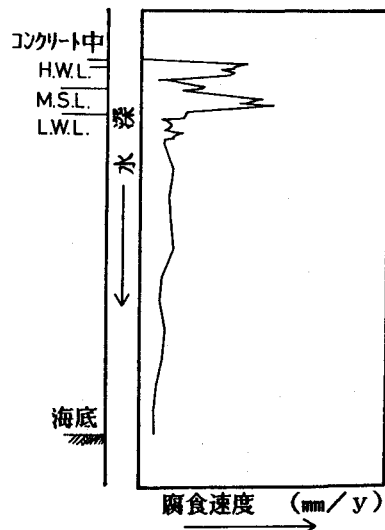


図-2 鋼管杭の腐食傾向

クリートを被覆する工法が有力となっている。この工法の概要を図-3に示す。腐食した鋼管杭表面の錆、生物等を除去した後、残存肉厚が5mm以上の箇所にスタッドジベルを水中あるいは空中で溶接する。主鉄筋及び帯鉄筋を配置した後、コンクリート（普通コンクリートあるいは水中コンクリート）を打設する。鉄筋コンクリートの被覆厚さは、15～20cmが目安となっている。腐食が著しく進んだ箇所では鉄筋コンクリートのみで、また鉄筋コンクリートを被覆していない箇所では既存の鋼管杭のみで、外力に抵抗することになる。

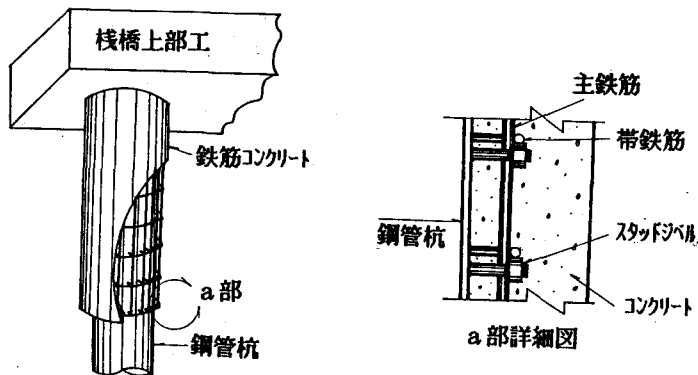


図-3 鉄筋コンクリート被覆工法概略図

3. 合成鋼管の設計概要(2.3.4)

3.1 合成鋼管の抵抗曲げモーメントの計算

橋の鋼管杭には、主に頭部に水平方向に作用する外力（地震時、接岸時）によって曲げモーメント及び軸力が生じる。鉄筋コンクリートと鋼管杭とを合成した合成鋼管の曲げモーメントに関する設計は、許容応力度法によって現在行われているが、ここでは限界状態設計法による方法を採用する。

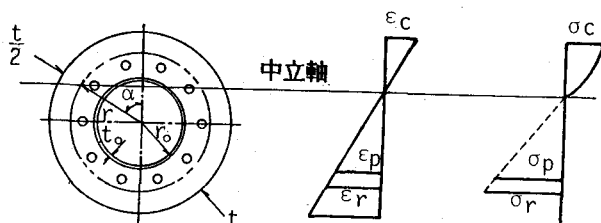


図-4 合成鋼管の断面内ひずみ分布及び応力分布

図-4に合成鋼管の断面と断面内のひずみ分布及び応力分布を示す。圧縮側でのコンクリートの抵抗力(C)は、次式で得られる。

$$C = \int_0^\alpha \sigma_{cu} t r d\theta = 2rt\sigma_{cu}\alpha \quad \dots\dots ①$$

引張側での鉄筋と鋼管との抵抗力(T)は、次式で得られる。

$$T = \{(\pi - \alpha)\cos\alpha + \sin\alpha\} / (1 + \cos\alpha) \cdot (A_p\sigma_s / \pi + 2t_o r_o \sigma_o) \quad \dots\dots ②$$

ここで、 σ_{cu} : コンクリートの圧縮強度 A_p : 主鉄筋の断面積

σ_o : 鋼管杭の応力度 σ_s : 鉄筋の応力度

上記の2式の釣り合い $C=T$ から α を求めて中立軸位置を設定する。

圧縮側コンクリートの抵抗モーメント(M_c)は、次式で得られる。

$$M_c = 2\sigma_{cu} t r^2 (\sin\alpha - \alpha\cos\alpha) \quad \dots\dots ③$$

引張側の鉄筋と鋼管杭との抵抗モーメント(M_t)は、次式で得られる。

$$M_t = \{A_p r \sigma_s / \{\pi(1 + \cos\alpha)\} + 2t_o r_o \sigma_o / (1 + \cos\alpha)\} \cdot \{(\pi - \alpha)\cos^2\alpha + 3(\sin 2\alpha)/4 + (\pi - \alpha)/2\} \quad \dots\dots ④$$

全抵抗モーメント(M)は、 $M_c + M_t$ より得る。以上の抵抗モーメント計算は、コンクリートが圧縮破壊を生じる時点で引張側の鉄筋及び鋼管が降伏応力度を越えていない場合のものである。鋼材が降伏応力度を越える

場合、あるいは中立軸が鋼管位置より外側のコンクリートに出る場合等での抵抗モーメントは、④式より若干異なる。

3.2 スタッドジベルの配置

鉄筋コンクリートと鋼管との合成はスタッドジベルを介して行う。スタッドジベルは軸径12～16mm、高さ数～10cm程度のものが使用される。スタッドジベルの所用本数は、次式によって求める。

$$N+2M/r_o < Q_a N_{st} \quad \cdots \cdots \textcircled{5}$$

ここで、N : 作用する軸力

M : 作用する曲げモーメント

N_{st} : スタッドジベルの本数

Q_a : スタッドジベルの1本当たりの許容せん断力

r_o : 鋼管杭の外径

スタッドジベルの1本当たりの許容せん断力は、道路橋示方書・同解説⁸⁾に示される式で算定できるが、ここでは、BS 5400, PART(5) (1979年)⁷⁾に示される許容せん断力を設計に用いることにする。例えば、スタッドジベルの軸径が16mm、高さ75mm、コンクリートの設計基準強度(σ_{cu})が266kgf/cm²の場合の許容せん断力の公称静的強度は、7.6tfである。従って1本当たりの許容せん断力は安全率を3とすると約2.5tfである。スタッドジベルは、鋼管軸線方向及び円周方向に、基本的には等間隔に配置する。スタッドジベルの間隔は80mm以上と設定し、スタッドジベルの溶接に必要な鋼管の最小肉厚は5mm以上、あるいはスタッドジベルの軸径の1/3以上と設定する。

4. 載荷実験

4.1 試験体の概要

載荷実験の対象とした試験体の概要を図-5に示す。鋼管の外径は31.85cmで、肉厚は6.9mmである。材質はSTK41である。試験体の全長は、350cmである。この中央部50cmの範囲には、鋼管が入っていない。この部分は、腐食が著しく進行し、鋼管杭の剛性を期待できない領域と想定した。この鋼管杭に鉄筋コンクリートを被覆した。配筋図を図-6に示す。主鉄筋は、材質がSD30、直径が16mmである。主鉄筋の本数は10本である。帯鉄筋は、材質がSD30、直径が10mmであり、15cm間隔に配置されている。スタッドジベルは直径が16mm、高さが75mmで頭部にねじ

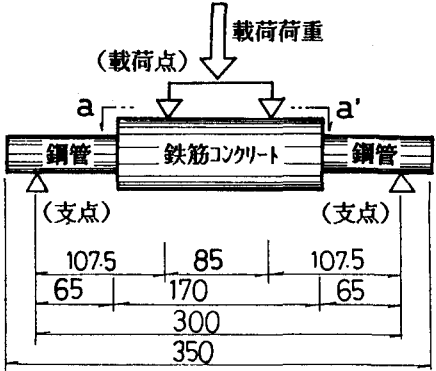


図-5 載荷実験の概略図 (単位;cm)

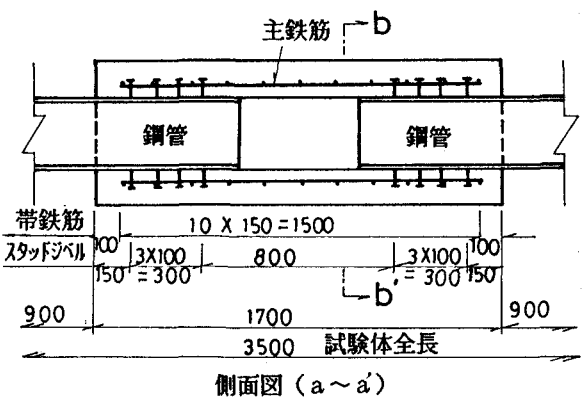


図-6 試験体の配筋図(No.4 試験体)

が取付けてある。コンクリートは普通コンクリートで、粗骨材最大寸法が10mm、設計基準強度が240 kgf/cm²である。コンクリートの被覆厚さは15cmで、かぶり厚さは10cmである。スタッドジベル頭部の内側に鉄筋が位置するように配筋を行う。表-1に製作した試験体の種類を示す。鉄筋コンクリートの被覆範囲及びスタッドジベルの本数を変えて、7種類の試験体を製作した。

4.2 載荷方法

載荷に用いた静的ジャッキの能力は100tfであり、試験体の中央

部で2点載荷とする。載荷は、2tf刻みによる荷重制御で行う。載荷段階は、ひびわれ発生時及び鉄筋の降伏時で除荷し、その後終局に至るまで載荷荷重を増加させる。

4.3 計測方法

計測は、① 載荷荷重、② 試験体の軸方向に沿った変位、③ 鋼管、コンクリート及び鉄筋のひずみ、④ 鋼管と鉄筋コンクリート間の相対的ずれ、⑤ コンクリートのひびわれの進展及びひびわれ幅に関して行う。測定点数は試験体毎で異なるが、例えばNo.3試験体では、鋼管のひずみ23点、コンクリートのひずみ32点、鉄筋のひずみ32点、変位10点、ひびわれ幅9点である。

4.4 実験結果

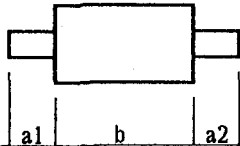
(A) 破壊状態

図-7にNo.4試験体での破壊状態を示す。載荷荷重が8tfの時、試験体中央の鉄筋コンクリート部の下端にいくつかの曲げひびわれが生じた。曲げひびわれの間隔は10~20cmであった。載荷荷重を増加させるに従いひびわれは上部へと進行していくとともに、載荷荷重が40tf位で合成部の鉄筋コンクリート中央付近からせん断ひびわれが見られるようになった。載荷荷重が44tfの終局時には、鉄筋コンクリート部の上端でコンクリートの圧縮破壊が生じ、載荷荷重はこれ以上増加しなかった。また、スタッドジベルの破断あるいは大変形は、見られなかった。また被覆コンクリートの端部では、載荷荷重が12tfでひびわれが鋼管表面から発生した。発生位置は、載荷位置より90度回った両側面である。他のいずれの試験体でも、曲げひびわれが載荷荷重の低い段階から発生し、終局時には、せん断ひびわれが発生し、試験体上端でのコンクリートの圧縮破壊により破壊に至った。

(B) 終局耐力

表-2に、試験結果の一覧を示す。また、図-8に荷重~変位曲線を示す。No.1試験体とNo.2試験体とでは、ひびわれ発生

表-1 試験体の種類

試験体名	スタッドジベル 本 数	寸 法			試験体概略図
		a 1	a 2	b	
No.1	—— (鋼管無)	——	——	3.5m	・ 試験体全長 3500mm ・ 試験体外径 600mm ・ 試験体内径 318.5mm 
No.2	片側32本 (8本X4列)	——	——	3.5m	
No.3	片側32本	0.9m	——	2.6m	
No.4	片側32本	0.9m	0.9m	1.7m	
No.5	片側24本 (8本X3列)	0.9m	0.9m	1.7m	
No.6	片側12本 (4本X3列)	0.9m	0.9m	1.7m	

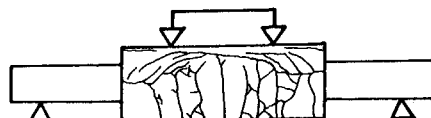


図-7 試験体の破壊状況(No.4 試験体)

表-2 試験結果の概要

試験体名	ひび割れ 荷 重	鉄筋降伏 荷 重	終局荷重
No.1	10.12tf	27.64tf	54.16tf
No.2	7.92tf	21.91tf	54.49tf
No.3	4.99tf	20.51tf	47.63tf
No.4	8.12tf	19.85tf	43.36tf
No.5	10.05tf	20.18tf	44.10tf
No.6	4.19tf	20.25tf	36.97tf

荷重および鉄筋降伏荷重は、No.2試験体の方が若干小さい値となったが、終局荷重は、両者がほぼ同じであった。No.3試験体、No.4試験体では、終局耐力が、No.1の試験体での終局耐力の各々87%と80%低下した。被覆範囲が鋼管径の3倍程度の時、終局耐力がやや低下すると言える。次に、No.5試験体とNo.6試験体とでは、No.6試験体の方がNo.5試験体よりも終局耐力が16%程度小さかった。No.5試験体とNo.4試験体とでは、終局耐力がほぼ同程度であった。スタッドジベルの本数が少ない場合には、スタッドジベルが破壊に至らなくとも、試験体の終局耐力は小さくなった。図-9にNo.4からNo.6試験体の被覆コンクリートと鋼管杭との相対的なずれを示す。試験体が終局に至るまでの鉄筋コンクリート被覆端部で測定した相対的なずれは、1~3mmであった。しかし、スタッドジベルの本数が多い試験体での鉄筋コンクリートと鋼管の相対的なずれは、載荷荷重が20tfまでほとんど無かった。一方スタッドジベルの本数が少なくなるにつれ、載荷荷重の小さい段階から相対的なずれが生じており、完全に両者が合成しているとは言えない状況となっていた。図-10に、No.3試験体でのコンクリート、鋼管及び主鉄筋でのひずみ分布を示す。上側の図は鋼管とコンクリートのひずみ分布を示しているが、コンクリートを片側全部に被覆している右側部分では、鋼管にほとんどひずみは生じておらず、鉄筋コンクリートのみで外力に抵抗していたことが分かる。一方、コンクリートを片側一部に被覆している左側部分では、被覆している部分で、鋼管にも大きな値のひずみが生じており、鉄筋コンクリートと鋼管の両方で外力に抵抗していた。載荷荷重が増加し、終局近くになると、中央部鉄筋コンクリート上端および下端の主鉄筋及び鋼管に大きな値のひずみが生じていた。また、鉄筋コンクリートと鋼管との境界部に応力集中を示す特に大きなひずみ量は、検出されなかった。

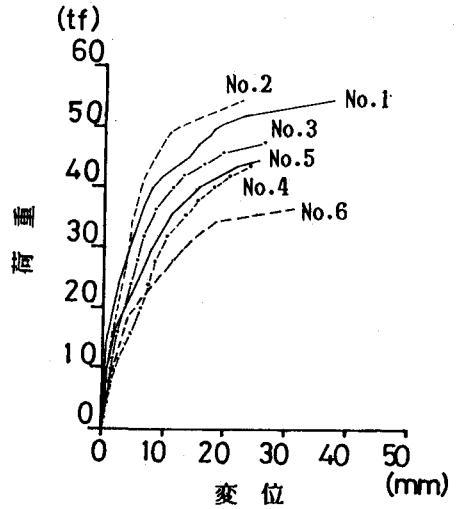


図-8 荷重—変位曲線

るとは言えない状況となっていた。図-10に、No.3試験体でのコンクリート、鋼管及び主鉄筋でのひずみ分布を示す。上側の図は鋼管とコンクリートのひずみ分布を示しているが、コンクリートを片側全部に被覆している右側部分では、鋼管にほとんどひずみは生じておらず、鉄筋コンクリートのみで外力に抵抗していたことが分かる。一方、コンクリートを片側一部に被覆している左側部分では、被覆している部分で、鋼管にも大きな値のひずみが生じており、鉄筋コンクリートと鋼管の両方で外力に抵抗していた。載荷荷重が増加し、終局近くになると、中央部鉄筋コンクリート上端および下端の主鉄筋及び鋼管に大きな値のひずみが生じていた。また、鉄筋コンクリートと鋼管との境界部に応力集中を示す特に大きなひずみ量は、検出されなかった。

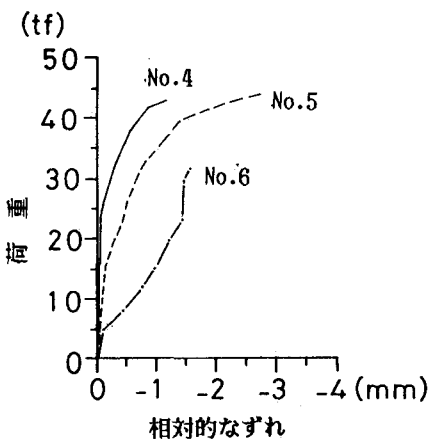


図-9 鋼管と鉄筋コンクリートの相対変位

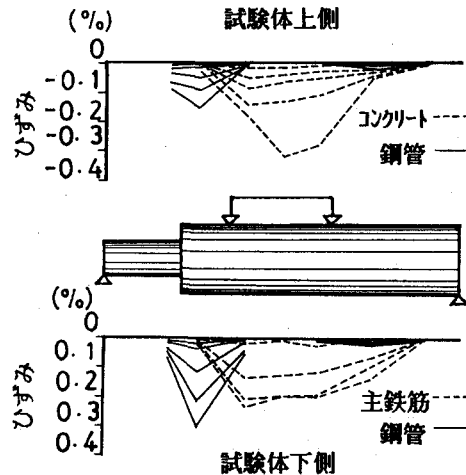


図-10 試験体軸方向のひずみ分布

5. 実験値と計算値との比較

3.1 に示した計算式を用いて合成鋼管の終局耐力を求める。今回の試験体では、コンクリートの圧縮強度

を 240kgf/cm^2 、鉄筋の降伏強度を 4100kgf/cm^2 、圧縮縁でのコンクリートの最大ひずみを 0.0035 と設定する。圧縮縁でのコンクリートのひずみが 0.0035 に達したときの、鉄筋コンクリート部分の終局モーメントは $16.8\text{tf}\cdot\text{m}$ （載荷荷重に換算すると 32.0tf ）、クラックモーメントは $4.8\text{tf}\cdot\text{m}$ （載荷荷重に換算すると 9.2tf ）である。合成鋼管部分の終局モーメントは $38.1\text{tf}\cdot\text{m}$ （載荷荷重に換算すると 72.6tf ）、クラックモーメントは $5.6\text{tf}\cdot\text{m}$ （載荷荷重に換算すると 10.6tf ）である。表-2に示す終局時の載荷荷重の実験結果と比較すると、各々の試験体とも実験での終局載荷荷重の値が計算値より上回っている。このことから、一応 3.1 に示した計算値で構造設計を行えば、安全側に設計ができるといえる。

6. 結論

- ① 現地での腐食状況を考慮して製作した試験体を対象とした今回の静的載荷試験では、鉄筋コンクリート部分に載荷荷重の小さいときに曲げひびわれが生じ、その後終局時付近でせん断ひびわれが生じ、破壊に至った。スタッドジベルの破断及び主鉄筋の破断は見られなかった。
- ② 鉄筋コンクリートの被覆範囲が鋼管杭全体に渡っているときは、ほとんど鉄筋コンクリート部分で外力に抵抗していたが、被覆範囲が狭くなると、鋼管と鉄筋コンクリートの両方で外力に抵抗していた。被覆範囲が鋼管径の2倍程度のとき、全体を被覆した場合と比較して、終局耐力が2割ほど小さくなった。また、鉄筋コンクリートを被覆している部分としていない部分との境界で鉄筋に著しい応力集中は見られず、力は比較的滑らかに伝達されていた。
- ③ 鉄筋コンクリート部分の終局時及びひびわれ発生時の載荷荷重を限界状態設計法により算定し、実験値と比較したところ、終局時の載荷荷重に関しては、実験値の方が計算値よりも2倍程度大きい値となった。今回の設計式では一応安全側に終局耐力を算定できた。
- ④ 鋼管と鉄筋コンクリートとの合成に必要なスタッドジベルの本数を、片側24本（スタッドジベルのせん断強度の安全率を2）及び片側32本（安全率3）と設定し試験体を製作した所、両者の終局耐力にはほとんど差が生じなかった。それ以上スタッドジベルの本数を少なくすると（片側12本）、終局耐力は2割程度小さくなった。

7. 今後の課題

港湾構造物の腐食は、ここ2～3年急激に顕在化してきた。鋼材の腐食に対する補修対策が急がれているが、補修工の選択や個々の補修工の設計・施工法、補修工の耐久性とともにまだ十分な知見が得られない。鉄筋コンクリート被覆による補修工法については、一応の設計・施工法が取りまとめられたが、①軸力と曲げを同時に受けるときの合成管の耐力、②コンクリート被覆部端部での鋼管の集中腐食、③スタッドジベルが十分に打てないときの補修工法等、技術的な課題がいくつか残されている。今後とも補修工法での技術的課題を克服して、経済的かつ現場での個々の状況に則した補修工法を開発して行く必要がある。

参考文献

- 1) 石渡、他：港湾鋼構造物腐食評価手法について、港湾技研資料 No.501、1984年12月
- 2) 日本コンクリート工業株式会社：NCS-PCパイプ技術資料、1972年
- 3) 土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法指針（案）、コンクリート・ライブラリー NO.52、1983年11月
- 4) 日本建築学会：鋼管コンクリート構造計算基準・同解説、1984年12月
- 5) スタッド協会：スタッド溶接、昭和57年
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、II鋼橋編、1972年
- 7) Steel, Concrete & Composite bridges Part 5. Design of Composite Bridges, British Standards Institution, London, 1979