

水中格点工法への重防食塗装鋼管杭の適用に関する研究

東亜建設工業(株) 正会員 小城 了
川崎製鉄(株) 金子 忠男
不動建設(株) 正会員 武藤 雅俊
清水建設(株) 別所 友宏
川崎製鉄(株) 村木 幸春

1. はじめに

水中格点工法^{1)・2)}は、図-1に示すように杭基礎の水中部に、鋼管杭(内管)と外管との間に充填された膨張モルタルと鋼管杭との付着結合によって成り立つ格点部を設け、この格点部をブレース材で連結することによってトラス構造を形成する剛性の高い海洋構造物構築工法である。工場で製作した小さな部材を現場で組み合わせて構造物を構築する工法であるので、大きな重機を必要とせず、現場での工期を短かくできる特長を持っている。このため、本工法は河川・港湾構造物だけでなく、比較的大水深の構造物にも適用可能な工法であるが、鋼管杭を水中部で使用するので杭の防食工が必要である。

防食工としては腐食代による方法や電気防食による方法など各種の方法があり、近年は鋼管の外表面にポリエチレン被覆等を行った重防食塗装鋼管杭を用いる例も見受けられる。重防食塗装鋼管杭は優れた耐食性能を有しているが、本工法の格点部に適用するためには、無塗装鋼管杭に比べると、軟らかく付着強度も小さい、重防食塗装鋼管杭の塗装面と膨張モルタルとの付着特性を明らかにしておかなくてはならない。

本研究はこのような観点から、設計の基本である許容付着応力度を定めることを目的に、格点部を想定した実物大の試験体によって付着強度試験を実施したものである。実施に当り調査した点の第1は、無塗装鋼管杭と重防食塗装鋼管杭との付着強度の差異を見出す事であり、第2は重防食塗装鋼管杭を用いた場合に格点部の付着強度が確保できるかどうかということである。

本研究では主として上記2点について調査したが、その他、無塗装鋼管杭と重防食塗装鋼管杭に関して、過去に実施した付着強度試験^{3)・4)・5)}に今回の試験のデータを含めてまとめ、鋼管の製造法(スパイラル鋼管と板巻鋼管)と付着強度との関係、鋼管の拘束比と付着強度との関係、モルタルの膨張圧と付着強度との関係を明らかにした。なお、本研究に用いた重防食塗装鋼管杭は、川崎製鉄(株)製のポリエチレン被覆を行ったKPPパイプ(Kawasaki Plastic-coated Pipe Pile, 以下KPPという)である。

2. KPPの付着強度試験

(1) 試験材料

(a) 鋼管

表-1 試験用鋼管の寸法

鋼管	外径 D (mm)	板厚 t (mm)	高さ (mm)	拘束比 R (%)
内管	508.0	9.0	500	3.54
外管	711.2	12.0	400	3.37

注) $R = t/(D/2) \times 100$

(b) 膨張モルタル

- ・膨張材 (A) : デンカタスコン
デンカCSA #20
- ・セメント(C) : 普通ポルトランドセメント
- ・細骨材 (S) : 川砂 (鬼怒川産)

(c) 膨張モルタルの配合

表-2 膨張モルタルの配合

W/(C+A) (%)	A/(C+A) (%)	S/(C+A) (%)	単位量 (kg/m³)			
			W	C	A	S
43	12.5	83	399	812	116	770

A = タスコン 102 kg/m³
+ CSA 14 kg/m³

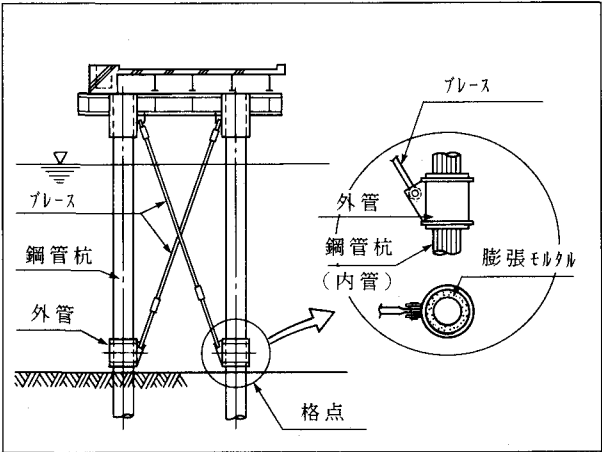


図-1 水中格点工法の構造形状

(2) 試験体数量と組合せ

試験体数量とその組合せを表-3に示す。なお表-3には、後述する付着強度に関する考察のため過去に実施した試験（1977年、1981年、1988年）の種類・組合せ及び数量についても示した。

表-3 試験体数量および組合せ

鋼管の種別	1977 年	1981 年	1988 年		1989 年			
	AS ROLL	AS ROLL	AS ROLL	K P P	AS ROLL	K P P	K P P	ブラスト
スパイラル鋼管	15	28	—	—	3	3	—	—
板 巻 鋼 管	12	—	—	—	3	3	3 ※	3
電 縫 鋼 管	—	—	2	3	—	—	—	—
計	27体	28体	5体		18体			

注) イ) AS ROLL : 鋼管外表面に塗装やブラスト処理を行わない、造管されたままの状態の鋼管をいう（鋼管外表面に錆や汚れのあるものを含む）。

ロ) K P P : 前出。K P PにおけるポリエチレンのみはK P P層という（図-7）。

ハ) ブラスト : 内管外表面にショットブラストを行った鋼管をいう。

ニ) 表-3, 表-4 中の※印は、試験体を1年間養生したのち付着強度試験を行うものである。

(3) 試験体

図-2に試験体の形状を示す。試験体は、外管の両端に取付けたプレートと内管との隙間（20mm）をシーリングした後、上端のプレートに設けた注入口より内外管の間に膨張モルタルを充填し製作したものである。

また、内管の内表面と外管の外表面には、モルタルの膨張圧の測定用として、ひずみゲージを1体当たり4枚、円周方向に貼付けた。

なお試験体の養生は気中（室内）養生である。

(4) 膨張モルタルの品質管理試験

膨張モルタルの品質管理は、J 14ロート法による流動性試験、一軸拘束膨張試験及び圧縮強度試験により行った。

(a) 流動性試験

J 14ロート法により測定した結果、フロー値は4.5 ~ 5.4秒（平均4.8秒）となり、管理目標とした 6.5 ± 2 秒を満足した。

(b) 一軸拘束膨張試験

試験は土木学会規準「膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法」により行った。膨張率は、材令7日で 632×10^{-6} と 691×10^{-6} となり、水中格点構造物設計施工指針²⁾で規定している 400×10^{-6} 以上（材令7日）に対し十分な値を示した。

(c) 圧縮強度試験

膨張モルタルの圧縮強度は材令28日で589 ~ 692

kgf/cm²となり、上記設計施工指針で規定している、設計基準強度 $\sigma_{ck} = 400$ kgf/cm² 以上に対し十分な値を示した。

(5) モルタル膨張圧の測定

表-4に、内管の内表面と外管の外表面に作用するモルタルの膨張圧（材令28日）を示す。

K P Pに作用する膨張圧は、外管では4.83~5.77kgf/cm²、内管では7.35~9.92kgf/cm²の範囲にある。

AS ROLL及びブラストは、外管では5.98~7.93kgf/cm²、内管では9.54~11.97 kgf/cm²の範囲にあり、K P Pより若干大きい。K P Pが小さいのは、鋼管に比べてK P P層は軟らかいので、膨張圧が吸収されたためと考えられる。

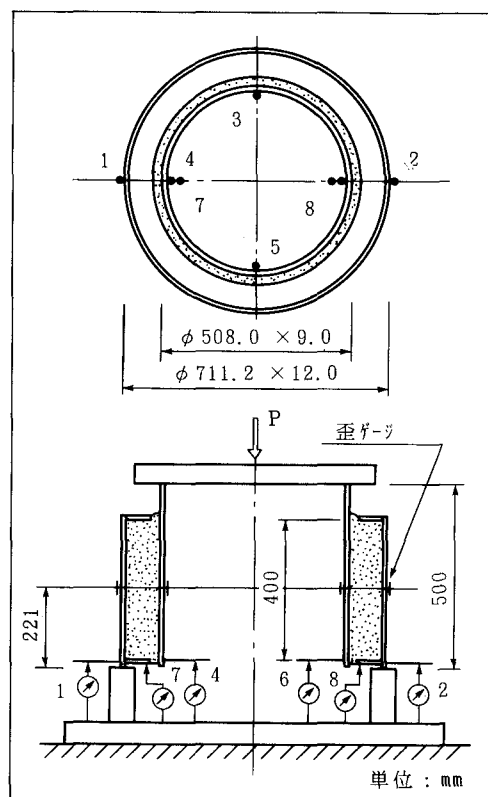


図-2 試験体及び載荷方法

(6) 圧縮せん断試験

(a) せん断試験方法

図－２に試験方法を示す。載荷方法は、降伏荷重までは荷重制御、降伏荷重後は変位制御である。荷重ステップは、降伏荷重までは0～2～5～10～15と5 ton ビッチである。内管外表面とモルタル面との相対変位量（ズレ量）は、内外管の下端及び側面に取付けた変位計（図－２に示すN0.1～8）により計測した。載荷は全体の変位量が15mmを示すまで行った。

表－４ モルタル膨張圧の測定結果一覧（材令28日）

表面状態	鋼管の種別	試験体の記号	膨張圧 (kg f/cm ²)		表面状態	鋼管の種別	試験体の記号	膨張圧 (kg f/cm ²)	
			内 管	外 管				内 管	外 管
AS ROLL	スパイラル鋼管	A-S-1	-10.83	6.70	K P P	スパイラル鋼管	K-S-1	-7.35	5.48
		A-S-2	-11.97	5.98			K-S-2	-7.42	5.77
		A-S-3	-11.29	6.56			K-S-3	-7.42	4.97
	板巻鋼管	A-I-1	-10.91	7.42		板巻鋼管	K-I-1	-7.50	5.77
		A-I-2	-10.83	7.50			K-I-2	-8.64	4.83
		A-I-3	-11.29	7.28			K-I-3	-7.58	5.48
プラスト	板巻鋼管	B-I-1	- 9.54	7.93		板巻鋼管	K-I-1 ※	-8.18	5.41
		B-I-2	- 9.77	6.92			K-I-2 ※	-9.09	5.48
		B-I-3	-11.21	7.93			K-I-3 ※	-9.92	5.55

(b) せん断試験結果

(i) 付着性状

表－５に各試験体の降伏荷重と付着強度を示す。降伏荷重は図－３に示す荷重～変位曲線（以下P～δ曲線という）の第1変曲点であり、降伏荷重を付着面積（6,384 cm²）で除したものが付着強度である。

表－５から明らかなように、AS ROLL の付着強度はスパイラル鋼管（A-S-1～3）が19.7～32.3kgf/cm²となり、板巻鋼管（A-I-1～3）の16.1～25.1kgf/cm²に対し、若干上回った値を示した。

K P P は、スパイラル鋼管（K-S-1～3）が 5.5～7.1 kgf/cm²、板巻鋼管（K-I-1～3）が3.9～8.6 kgf/cm²であるので、両者はほぼ同一の付着強度である。プラスト（B-I-1～3）は、B-I-2を除くと、AS ROLL に対して2倍以上の値（47.9～50.1kgf/cm²）を示した。プラストによって鋼管表面の粗度が高くなり、付着強度が大きくなったものと思われる。

表－５ 圧縮せん断試験結果

試 験 体			力 学 性 能				P～δ曲線の型
表面状態	鋼管の種別	記 号	降伏荷重 (tf)	降伏荷重時の変位量 (mm)	付着強度 (kg f/cm ²)	変位15mm時の荷重 (tf)	
AS ROLL	スパイラル鋼管	A-S-1	126.0	0.3	19.7	172.0	(a)型
		A-S-2	144.0	0.1	22.6	170.0	
		A-S-3	206.0	0.2	32.3	186.0	
	板巻鋼管	A-I-1	115.5	0.05	17.2	68.0	(b)型
		A-I-2	103.0	0.01	16.1	60.0	
		A-I-3	165.6	0.35	25.1	67.0	
K P P	スパイラル鋼管	K-S-1	40.0	0.45	6.3	90.0	(a)型
		K-S-2	35.0	0.15	5.5	85.5	
		K-S-3	45.0	0.01	7.1	83.0	
	板巻鋼管	K-I-1	25.0	0.08	3.9	81.0	(a)型
		K-I-2	45.0	0.02	7.1	81.0	
		K-I-3	55.0	0.03	8.6	79.5	
プラスト	板巻鋼管	B-I-1	320.0	0.6	50.1	—	(b)型
		B-I-2	186.0	0.2	29.1	106.0	
		B-I-3	306.0	0.6	47.9	128.0	

付着強度は、内管の表面状態が同一の3体の中でも大きく異なったもの（A-S-3、A-I-3、B-I-2、K-I-1）がある。これらの値の中で、A-I-3 は表面錆がかなり発生していたので、他のA-I-1、A-I-2 に比し付着強度が高くなったものと考えられる。B-I-2 はプラストが十分でなかったために、B-I-1、

B-I-3 に比し小さくなったが、AS ROLL (A-S-1~2、A-I-1~3)よりは高い値を示した。プラストをすることによって付着強度の増加を期待できるが、プラストが十分でない場合には AS ROLLと同程度になることを示している。このため、許容付着応力度については、プラストを行った場合でも AS ROLLと同程度とみなすのが適当であると考ええる。

K P P の付着強度は、試験結果を見ると大略5~8 kgf/cm²である。但し原因が不明であるが、k-I-1 は3.9 kgf/cm²と小さな値となった。即ち K P P の場合、このような付着強度があり得ることを認識しなければならない。

スパイラル鋼管の A-S-3も A-S-1、A-S-2に比し50%以上高い値を示した。これは、A-S-3 の発錆が他に比べて若干多かったためであると考えられ、錆の発生が付着強度の増加に良い影響を及ぼすことを示している。

(ii) 変位性状

P~ δ 曲線は、図-3 に示すように(a)型と(b)型の二つのタイプに分かれる。前者は降伏荷重後の載荷において荷重が増加し、後者は降伏荷重後の載荷において荷重が降伏荷重以下になるものである。

スパイラル鋼管は AS ROLL、K P P とも図-3 の(a)型を示すのに対し、板巻鋼管は AS ROLL、プラストが(b)型、K P P が(a)型を示す。K P P がスパイラル鋼管、板巻鋼管に拘わらず(a)型を示したのは、K P P 層の重ね巻き部が盛上がりスパイラル鋼管の溶接ビードと同様の効果を示したためと考える。

図-4 に P~ δ 曲線の一例 (K-I-1~3) を示す。この図は、図-2 に示す変位計「No.3, 4, 5, 6 の測定値の平均」から「No.1, 2 の測定値の平均」を差し引いたものをまとめたものである。

図-4 に示すように、荷重と変位の関係を見ると、降伏荷重に達するまでの P~ δ 曲線は、表面状態が同一の試験体の間でも大きく異なっているが、降伏荷重に達した後の塑性領域においては、ほぼ同じ性状となっている。これは、降伏荷重までは K P P 層とモルタルとの付着力が強度に影響を及ぼすのに対し、塑性領域では K P P 層とモルタルとの摩擦力の方が、強度に及ぼす影響が大きいからであると思われる。

3. 付着強度について

(1) 拘束比と付着強度との関係

表-3 に示す、77~89年までに行った付着強度試験の結果(計78体よりデータとして分析可能なもの49体分)をまとめたものを、鋼管の製造方法と表面状態ごとに分類し、外管拘束比 R と付着強度 τ との関係としてプロットすると図-5 のようになる。

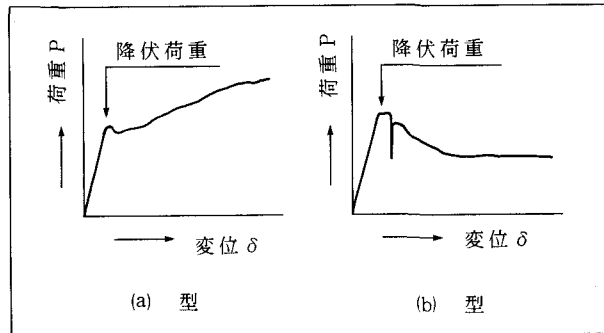


図-3 荷重~変位曲線の型

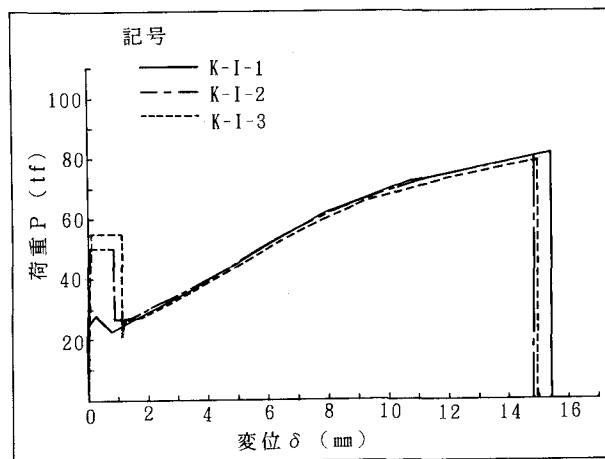


図-4 荷重~変位曲線の一例
(K-I-1~3)

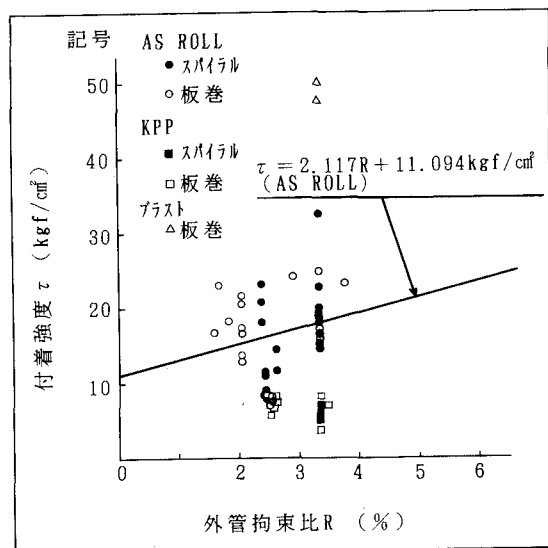


図-5 外管の拘束比と付着強度との関係

AS ROLL の場合、有意水準10%で有意な相関があり、 $\tau = 2.117R + 11.094$ (kgf/cm²) の回帰直線で表される。これは、格点に所要の拘束比を有する外管を用いると、十分な付着強度が得られることを示すものである。

なおK P P も含めた他の条件では外管拘束比を変化させたデータが少ないため分析から除外した。

(2) モルタル膨張圧と付着強度との関係

前記(1)と同様に、表-3に示す、77~89年までに行った試験の結果(計78体よりデータとして分析可能なもの45体分)をまとめたものを、鋼管の製造方法と表面状態ごとに分類し、モルタル膨張圧 p と付着強度 τ との関係としてプロットすると図-6のようになる。

AS ROLL の場合、有意水準5%で有意な相関があり、 $\tau = 0.471p + 15.668$ (kgf/cm²) の回帰直線で表される。これは、充填材に膨張モルタルを用いれば、格点部の結合力としての十分な付着強度が得られることを示すものである。

なお、K P P も含めた他の条件では膨張圧を変化させたデータが少ないため分析から除外した。

(3) K P P の付着強度について

K P P の付着強度は、K P P 層の表面状態、膨張モルタルの圧縮強度・膨張率、内外管の拘束比などによって決まるものと思われる。試験体に圧縮力を導入する単純せん断試験による境界面の付着強度は、表-5に示すようにスパイラル鋼管と板巻鋼管とではほとんど差異がなく、3.9 ~ 8.6 kgf/cm²の範囲にある。

また、これらの付着強度はK P P 層と膨張モルタルとの間の境界面にすべりを生ずる時点の強度であるが、変位そのものの値は、表-5に示すように0.01~0.45mmと非常に小さく、すべりを生じた後の $P-\delta$ 曲線も、図-4に示したものと同様である。即ち、スパイラル鋼管、板巻鋼管いずれの場合も変位にともなって荷重が増大する。これは、K P P 層が図-7に示す形状になっているため、初期すべりを生じたのち、K P P 層と膨張モルタルとで構成されるピッチ約160mm、波高約2mmの波形凹凸が、圧縮せん断力に抵抗するからである。

実験終了後の試験体解体によるせん断面の観察で、K P P 層の表面上にはほとんどすべり傷はなく、僅かにモルタルが波状に突出している斜面に沿って帯状のすべり傷が観察されたことから明らかである。他方、膨張モルタルとK P P 層との接触面は、上記帯状のいずれかに対応するすべり跡が見られるのみで、K P P 層表面と同程度の平滑面が形成され、その表面はほとんど荒れておらずモルタルの破壊も全く見られなかった。またK P P 層と内管外表面との間での剥離はなく、すべりは全てK P P 層とモルタルとの間で生じていた。

ポリエチレンの弾性係数は、20℃で9,000kgf/cm²程度であり、鋼材、モルタルに比べるとかなり小さい。格点部のようにモルタルと鋼管とで3次元的に密閉された場合には、強度がかなり向上すると思われるが、モルタルに圧壊などの損傷がないことから、かえってポリエチレンという軟らかい材料を用いることで応力の分布や伝達が極めてスムーズになったものと推察される。従って、K P P として図-7に示すような形状を採用した場合には、上述の力学特性が得られるため、図-4に示すような強度特性が再現され、すべりを生じた後も大きな後強度を期待することができる。

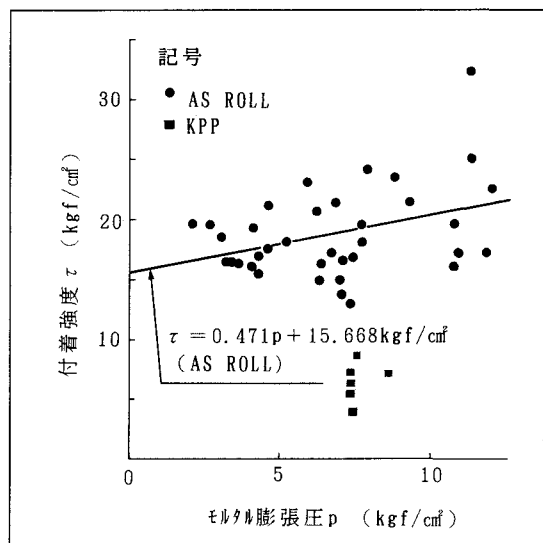


図-6 モルタル膨張圧と付着強度との関係

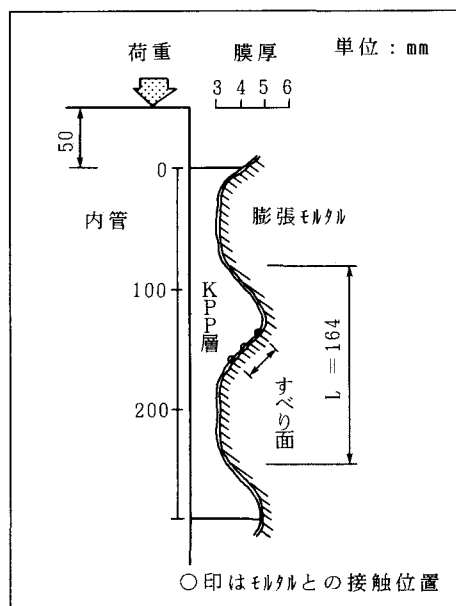


図-7 K P P とモルタルとの境界面
(K-I-2)

(4) K P P の許容付着応力度について

K P P の付着強度として、試験の結果大略5 ～8 kgf/cm²が得られた。この値は、水中格点工法へK P P を適用する上では十分なものであると考えるが、付着強度の試験値にバラツキがあるので、許容付着応力度 τ_{ca} を定めて設計に用いる必要があり、下記の通りとした。

K P P の付着強度のデータをまとめると表－6 の通りとなる。表に示すように、平均値 $\bar{\tau} = 6.70 \text{ kgf/cm}^2$ 、標準偏差 $\sigma = 1.48 \text{ kgf/cm}^2$ であるので、 2σ のバラツキを考えると、最小値 $\tau_{min} = \bar{\tau} - 2\sigma = 3.74 \text{ kgf/cm}^2$ となる。付着強度 τ には、表に示すように3.9 kgf/cm²と小さな値もあるが、上記 τ_{min} より大きい問題がないと考える。以上より、水中格点工法にK P P を適用する場合の設計許容付着応力度は、安全係数を3として $\tau_{ca} = 1 \text{ kgf/cm}^2$ とする。

表－6 K P P の付着強度 (単位：kgf/cm²)

試験年	1988年			1989年						$\bar{\tau}$	σ
付着強度 τ	5.83	7.64	8.30	6.30	5.50	7.10	3.90	7.10	8.60	6.70	1.48

4. おわりに

本研究は水中格点工法へのK P P の適用の可否について、付着強度試験を行って検討したものであるが、一方 AS ROLLについては過去のデータも含めて統計的手法によって検討した結果、付着強度に関して新たな知見を得た。結果を整理すると以下の通りである。

- (1) 格点部の圧縮せん断試験により求められる付着強度 τ は、AS ROLL ではスパイラル鋼管が19.7～32.3 kgf/cm²で、板巻鋼管の16.1～25.1kgf/cm²に対し若干上回った値を示した。K P P ではスパイラル鋼管が5.5 ～7.1 kgf/cm²、板巻鋼管が3.9～8.6 kgf/cm²であるのではほぼ同程度である。プラスト（板巻鋼管のみ）は29.1～50.1kgf/cm²であり、AS ROLLに対して大きく上回った。これはプラストすることによって鋼管表面の粗度が高くなり、付着強度が大きくなったものと考えられる。
- (2) 荷重～変位曲線（P～ δ 曲線）は、(a)、(b)の二つの型に分類される。(a)型は降伏荷重を示したのち荷重は若干低下するが、以後荷重は変位の増加と共に漸増して降伏荷重を大きく超える。この型に属するものはスパイラル鋼管のAS ROLL とK P P 及び板巻鋼管のK P P である。(b)型は降伏荷重に達したのち荷重は大きく低減し、以後荷重はほぼ一定値を保ちながら変位だけが增大する。この型に属するものは、板巻鋼管のAS ROLL とプラストである。
P～ δ 曲線が(a)型か(b)型になるかの支配的な要因は、鋼管表面の状態の違いによるものと考えられる。(a)型を示す要因としては、内管外表面の波形凹凸がモルタルの滑動に対し抵抗を増大させることによる。即ち、スパイラル鋼管は溶接ビードが盛り上がって突起を生じており、またK P P は、K P P 層の重ね巻きを生じた部分が盛り上がっていることによる。
- (3) 外管の拘束比R と付着強度 τ との関係は、過去に行われた試験のデータを含めて分析すると、AS ROLL の場合、外管拘束比の増加にともない付着強度も大きくなる傾向にあり、 $\tau = 2.117R + 11.094 \text{ kgf/cm}^2$ の回帰直線で表される。K P P を含めた他の条件ではデータが少ないため分析から除外した。
- (4) 内管外表面に作用するモルタルの膨張圧p と付着強度 τ との関係は、過去に行われた試験のデータを含めて分析すると、AS ROLL の場合、モルタル膨張圧の増加にともない付着強度も大きくなる傾向にあり、 $\tau = 0.471p + 15.668 \text{ kgf/cm}^2$ の回帰直線で表される。K P P を含めた他の条件ではデータが少ないため分析から除外した。
- (5) K P P の許容付着応力度は、 $\tau_{ca} = 1 \text{ kgf/cm}^2$ とする。

なお本研究は水中格点工法研究会（川崎製鉄㈱、清水建設㈱、東亜建設工業㈱、不動建設㈱の4社で構成）で実施したものであるが、実施に当たっては運輸省港湾技術研究所より技術指導を戴いた。ここに謝意を表する次第である。

5. 参考文献

- 1) 水中格点工法（水中格点工法研究会、パンフレット）
- 2) 水中格点構造物設計施工指針（水中格点工法研究会、1983年3月）
- 3) 川崎製鉄㈱千葉製鉄所水中格点工法実験報告書（清水建設㈱研究所、1979年）
- 4) 根井、岡田、今井：水中格点工法の格点部のせん断耐力に関する実験
(土木学会第37回年次学術講演会講演概要集、1982年10月)
- 5) 根井、岡田、今井：水中格点工法の格点部の付着強度に関する実験
(土木学会第38回年次学術講演会講演概要集、1983年10月)