

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1154 June 2007

海上空港FRPフェンスの破壊試験

春尾 和人
平石 哲也
田中 克己
大波多 昌志

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 波力の推定と改良フェンスの検討	5
2.1 フェンス被災の原因とメカニズム	5
2.2 フェンス被災時の波浪の推定	5
2.3 越流流速と波力の推定	6
2.4 対策技術の提案	6
3. 各種対策技術案の性能試験	7
3.1 性能試験方法	7
3.2 性能試験	10
3.3 性能試験結果	14
4. まとめ	14
謝辞	14
参考文献	15
記号表	15

Deformation Test on Fiber Reinforced Plastic Fence for Maritime Airport

Kazuto HARUO*
Tetsuya HIRAISHI**
Katsumi TANAKA***
Masashi OHATA***

Synopsis

Some of airports constructed offshore in Japan have been damaged in wave overtopping due to storms. Meanwhile all airports in Japan have to be protected in the high fences with a purpose of preventing the human invasion. The steel-type fence is widely employed in the surrounding fence of airports, but FRP (Fiber Reinforced Plastic) type fence is employed in the special area where the steel part may cause the disturbance in the landing guide signal for airplanes. FRP type fences have been broken by wave attacks during storms. The report describes the test to study on the strength of FRP fence and to develop a improved type fence.

Key Words: FRP fence, offshore airport, wave overtopping, seawall, wave force, material test

* Member, Wave Division, Maritime Environment and Engineering Department

** Head, Wave Division, Maritime Environment and Engineering Department

*** Ministry of Land, Infrastructure and Transport

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-8445042 Fax : +81-46-8413888 e-mail: hiraishi@pari.go.jp

海上空港FRPフェンスの破壊試験

春尾 和人*
平石 哲也**
田中 克己***
大波多昌志***

要 旨

海上空港では、海上からの侵入防止のため、フェンスの設置が義務づけられている。近年、地球温暖化による台風の大型化や高潮により、高波浪を受ける海上空港では、このフェンスがなぎ倒され、散乱する被害が頻繁に発生している。災害復旧の基本方針は原型復旧であり、従来のフェンスは、風荷重は考慮されているが、波力を考慮していないため、同様の台風が発生すると再び被災が起こっている。また、フェンスは、空港の大部分で鋼製フェンスを使用するが、一部、航空機離発着時の電波障害の影響でFRPフェンスを使用している。FRP(Fiber Reinforced Plastic)フェンスは鋼製フェンスに比べコストが高く、成型型枠以外の形に加工することも難しい。そこで、波力を考慮した改良フェンスについて検討することとした。波力は越流水深 $h=1\text{m}$ 、越流係数 $C'=2.5$ 、安全率 $S_f=3$ と条件を設定し推定した。なお、波力の設定はこれ以上の波力が発生した場合、冠水による滑走路の閉鎖や場周道路陥落を引き起こす可能性があるため、フェンス改良以前に抜本的な越波対策が必要になることや、FRPの強度増加が困難となり、高コストになることを踏まえて、FRPフェンスを設計する上での目標強度として設定した。この設定した波力に対し、FRPの改良案を提案し、性能試験を行った結果、支柱を生成する樹脂をUP（不飽和ポリエステル）から、VE（ビニルエステル）にし、FW（フィラメントワインディング）、クロス巻き補強をすると効果的であることが確認できた。

キーワード：海上空港，侵入防止策，波力，FRPフェンス，工場試験，衝撃荷重

* 海洋・水工部波浪研究室員
** 海洋・水工部波浪研究室長
*** 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 技術開発課
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5042 Fax：046-841-3888 e-mail:hiraiishi@pari.go.jp

1. まえがき

海上空港では、保安対策として、海上からの侵入防止のため、空港護岸が高さ3mの直立型である場合を除いて、フェンスを設置することが義務づけられている。(空港土木施設設計基準) 空港フェンスは、通常鋼製フェンスを使用するが、航空機離発着時の電波障害の関係で、電波誘導装置近傍では鋼製フェンスを使用できないため、FRP(Fiber Reinforced Plastic: 繊維補強プラスチック)フェンスを設置している。

近年、全国の海上空港では、地球温暖化による台風の大規模化や高潮がもたらす越波により、FRPフェンスが破壊される被害が多発している。(平山ら(2005)) 写真-1は大分空港で2005年9月6日に来襲した台風14号(以下台風0514号)によりもたらされた越波によるFRPフェンスの被災状況写真である。この台風はこの他に鋼製フェンスの変形、着陸帯・場周道路の冠水といった越波災害を引き起こしている。

フェンスの設置は保安対策が目的であるため、復旧が急がれるが、災害復旧の基本方針は原型復旧であることが多く、同等品により復旧することになる。従来のフェンスは、風荷重のみを対象として設計されているため、越波等の波力による波浪荷重を考慮した検討は実施されていない。よって、従来品により復旧しても再び同等の台風が来襲すると、同様の災害が起きることになる。このような背景により、FRPフェンスの改良は緊急の課題である。

本研究の目的は、波力を考慮した改良型フェンスを提案することであるが、FRPフェンスは、鋼製フェンスに比べコストが高く、成型型枠以外の形に加工することが容易にはできないため、飛躍的な強度の増加が期待できないので、越波に対して完全な補強は困難と考えられる。そこで、波力を考慮しつつも、生産性や経済性も考えて、現場で設置できるような構造を有する改良型のフェンスを提案することにした。

越流や越波時の波浪荷重については、従来から多くの研究がなされており、平石ら(2006)はオンサイト越波計の開発に関する模型実験において、護岸上の越流流速を推定し、越流水深と越流時の流速の関係を調べている。また、鈴木ら(2003)は階段状緩傾斜護岸を越波する波の流速を調べ、時間によって、流速の絶対値が大きく変動することを示している。また、越流時の手すり作用する波力については、親水性防波堤マニュアル(運輸省港湾局, 1991)に、越流流速の2乗の関数として表されている。また越流流速の最大値は、ほぼ波速と同等とされている。

本研究では、FRPフェンスが2年続けて破壊された大分空港や台風時に越波が顕著になる関西空港などをモデルとして、台風時の越波、越流を想定し、最大作用荷重を推定した。次に現地の標準的なFRPフェンス支柱を製作し、静的破壊試験を行った。その後、改良型FRPフェンス支柱を提案し、同様に破壊試験を行うことで、その効果を調べた。

本資料では、まず、第2章でモデル空港での被災時の波浪およびフェンスに作用する波力の推定を行う。次に



写真-1 フェンス被災の状況



写真-2 支柱の被災状況

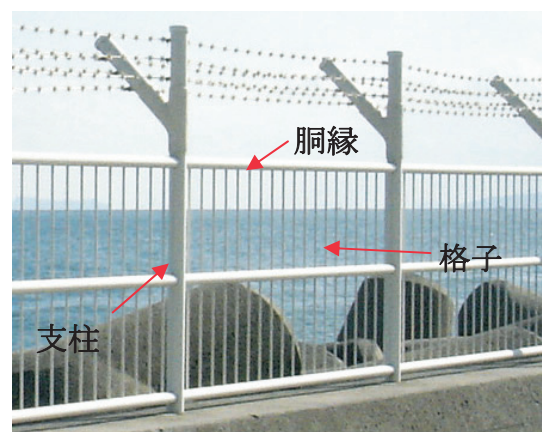


写真-3 FRPフェンス各部の名称

この波力に対し、技術的な対策案を提案する。そして第3章で対策案の性能試験結果を示し、第4章でまとめとして、対策技術の有効性と今後の課題を考察する。

2. 波力の推定と改良フェンスの検討

2.1 フェンス被災の原因とメカニズム

空港場周柵の設計は、「空港土木施設設計基準」により、支柱の風荷重は一般的な地域として $3,000\text{N/m}^2$ （風速：約 70m/s 程度）を用いることとなっている。前述の大分空港での被災時に、空港で観測された風速は最大風速 17.5m/s 、最大瞬間風速 37.5m/s （気象庁災害時自然現象報告書（気象庁，2005））であり、風による倒壊等は生じないと考えられる。台風来襲時には、大分空港では護岸上で越波が生じていたことが、護岸水たき部の被災によって確認されており、フェンス倒壊の主な原因は越波によるものと考えられる。現地でFRPフェンスの破壊状況を確認した結果、フェンスの形を残したまま支柱根元から折れる破壊が多く見られた。（写真-2）

FRPフェンスは、通常、写真-3のように支柱、胴縁、格子から構成される。フェンスが越波により波力を受けると、フェンスの構造上、格子は胴縁で支えられているため、格子にかかった波力は胴縁に伝わる。胴縁が受けた波力は、同様に支柱へ伝わるため、結局、フェンスが受けた波力は、ほとんどの成分が支柱根元に伝わることになる。また、支柱根元には胴縁を挿入するための断面欠損部があり、その部分が周りに比べると弱くなっている可能性があり、支柱根元の断面欠損部周辺での破壊が多かったと考えられる。

なお鋼製フェンスも被災していたが、折れ曲がるのみで、破断はしていなかった。すなわち、FRPの性質として、大きな荷重に対して抵抗できなくなると、一か所で破断してしまうことが推測できる。

2.2 フェンス被災の波浪の推定

フェンス破壊の主要な原因が越波であると考えられるため、フェンス被災時の波浪を推定し、大分空港を例としてフェンスにかかる波力を推定する。

大分空港の外周護岸の標準的な仕様を以下に示す。また、図-1に護岸断面を示す。

護岸天端高 DL+6.9m
 パラペット天端高 DL+7.4m
 設計潮位
 H.H.W.L.=+2.85m, H.W.L.=+2.5m, L.W.L.=+0.0m

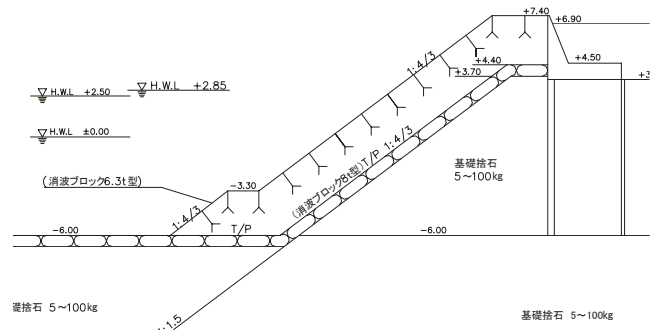


図-1 大分空港護岸断面図

被災時の台風0514号に対する波浪推算結果は、最高波を採用すると、2005年9月6日15:00、沖波波高 $H_0=5.18\text{m}$ 、沖波周期 $T_0=10.15\text{s}$ であった。空港護岸の設計条件は表-1のようにまとめられており、被災時の波は30年確率波の条件よりやや小さい。そこで、安全側の値として、本研究では、30年確率波に対して安全な構造となるように、波力に対するフェンスの安定性を検討する。なお、表中の H_0' は換算沖波波高である。

表-1 設計条件

確率年	5年	10年	30年
H_0' (m)	2.5	3.1	3.5
H_0 (m)	4.0	5.0	5.6
T_0 (s)	12.9	12.9	12.9

フェンスにかかる波力を推定するため、越流水深を推定する。越流水深は越流時のパラペット天端からの越流高さである。越流水深については明確な算定式がない。ただし、斜面上の波の打ち上げ高については、これまでに算定式が提案されている。そこで、図-1に示す護岸の前面斜面が上方にそのまま続いているとして、仮定の打ち上げ高最大値を推定し、それらを参考にして、越流水深を計算することにした。護岸を捨て石層で被覆された一様勾配($\tan\beta$)斜面と仮定すると、基準等で用いられている打ち上げ高の算定式によって斜面上の打ち上げ高が算定できる。様々な算定式があるため、結果を比較することにした。ここでは ξ はサーフシミュラリティパラメータで、次式で算定される。

$$\xi = \tan\beta / \sqrt{H_0 / L_0} \quad (1)$$

ここで、 H_0 は沖波波高、 L_0 は沖波波長である。ただし、表-2の下端4列では、式(1)の H_0 の代わりに堤脚水深での有義波高および L_0 を $gT_m^2/2\pi$ で計算している。 T_m は平均周期である。

表-2 波の打ち上げ高の比較

	条件	tan β	打ち上げ高(m)	越流水深(m)
高田(1970)	h=6	—	7.49	2.94
Mase(1989)	Rmax	0.10	7.24	2.69
Mase(1989)	R1/3	0.10	4.35	—
間瀬(2003)	0<ξ<2.2	0.10	4.4	—
Van(1992)	Rmax, ξ<1.5	0.10	3.46	—
Van(1992)	R1/3, ξ<1.5	0.10	2.2	—
Van(1992)	透過性(Rmax)	—	9.48	4.93
Van(1992)	透過性(R1/3)	—	4.96	0.41

波の打ち上げ高を比較した結果を表-2に示す。表-2の最も左の列に算定式を示した文献を示す。仮定の波の打ち上げ高をそのまま越流水深と考えると、パラペット上での越流水深は以下ようになる：

$$\text{越流水深} = \text{H.H.W.L.} + 2.85\text{m} + \text{最大仮想打ち上げ高 } R_{\text{max}} - \text{パラペット天端高(DL+7.4m)}$$

結果から、越流水深は最大で0m～4.93mになる可能性があり、ばらつきは大きい。越流時にはほぼフェンス全体が水没すると考えられる。一方、平石ら(2006)は関西空港1期島南側の消波工が沈下している不完全消波護岸を対象とした実験で、越流したあとの水面波形を示し、護岸上の越流水深は護岸前面波形の水面ピークと護岸天端高の差になることを示している。なお、実験での後述の表-3での条件下での越流水深は約1mであった。

ここでは、設計の対象とする越流水深を決定する必要がある。ただし、打ち上げ高算定式を参考にした結果がばらつくこと、写真-3で示したフェンスの支柱高さは1.4mで、上段胴縁までの高さは1mであり、荷重を受ける高さは1m程度であること、越流水深1mの場合には、平石ら(2006)の実験での値をある程度参考にできること、単純な数値目標で実験をすることにより、他の空港への適用がしやすいこと、あまり大きな目標荷重を設定してしまうとFRP支柱として製作できないこと、などを勘案して、破壊試験荷重を計算するための越流水深は1mとした。

したがって、4章の課題として後述するように、現場での設置位置や空港護岸全体の改良などを通じて、総合的にフェンスの安全性を高めていく必要がある。

2.3 越流流速と波力の推定

(1) 越流流速の推定

越波による越流流速について、平石ら(2006)は、模型

実験により越波流量と越流水深から、越流流速を求める係数を導いている。なお、長波波速を基にして越流流速を計算する手法は、運輸省港湾局(1991)と同様である。

護岸上の流速は、長波の波速に比例するものとして、次式で推定できる。

$$u = C' \sqrt{gh} \quad (2)$$

ここで、 g は重力加速度(9.8m/s²)、 h は越流水深、 C' は護岸上の越流係数である。

実験結果より越流係数は、表-3に示すように0.71～3.25となっている。表-3において-9m、-21mとは、護岸端から波が侵入すると考えて、護岸端を0としたときの観測点までの護岸上の距離である。ここでは用いる波が不規則波の場合には、平均的に $C'=0.71\sim 1.18$ となる。しかし、この値は有義波高に対する値である。規則波の場合には、 $C'=1.75\sim 3.25$ となり不規則波より大きく2倍になることから、安全側の数値として、 $C'=2.5$ を採用した。

表-3 越流係数の推定値

波種類	潮位	周期(s)	波高(m)	越波流量(m ³ /m/s)	越流係数 C' または C_0		
					-9m	-21m	直立部
規則波	+1.6m	10.0	4.0	0.453	3.09	0.74	0.24
	+2.3m	8.0	4.0	0.740	3.52	1.95	0.25
		10.0	4.0	0.736	3.37	2.06	0.26
不規則波	+1.6m	7.3	3.6	0.063	1.23	0.46	0.56
		11.1	3.5	0.156	1.12	0.95	0.15
	+2.3m	11.1	3.5	0.156	1.12	0.95	0.15
平均値				規則波	3.25	1.75	0.27
				不規則波	1.18	0.71	0.36

(2) 波力の推定

構造物に作用する流体による抗力は、親水性防波堤設計マニュアル(1991)に採用されている次式で表した。

$$P_H = \frac{1}{2} \rho C_D A_0 u^2 \quad (3)$$

ここに、 ρ : 水密度(1000kg/m³)、 C_D : 抗力係数(円柱=1.0)、 A_0 : 越波を受ける投影面積(= D : 円柱直径(m) × h : 越流水深(m))、 u : 流速(m/s)である。推定した越流水深(1m)、越流係数($C'=2.5$)により、単位幅当たりの全水平力を計算する。まず標準的なフェンスの構成を設計する(図-2)。すなわち、支柱間隔1m(支柱直径 $\phi=89\text{mm}$)、上段胴縁材の高さ1.4m($\phi=42\text{mm}$)、格子間隔10cm($\phi=10\text{mm}$)として、投影面積を算出し、式(3)を用いて水平力を計算すると、 $P_H=30,625\text{N}$ となる。

2.4 対策技術の提案

上記波力に対して、安全に自立できるフェンスを検討するため、以下の対策技術を提案する。詳細については、

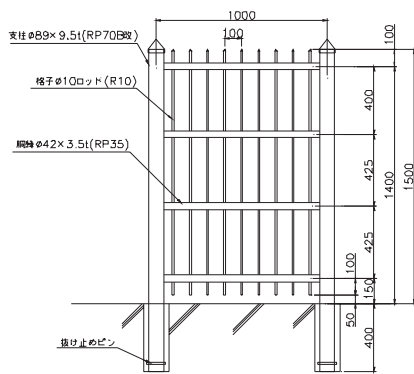


図-2 標準型として設計したモデルフェンス

3.1の(4)で説明する。

- ①FRPの支柱内部にレジンモルタルを充填させ、強度を高める。(支柱内部補強)
- ②支柱を生成する樹脂をビニルエステルにし、ガラス繊維による補強を行い、基材の強度を高める。(支柱基材補強)
- ③支柱根入れ部にゴム系緩衝材を被覆し、基部の柔軟性を高める。(支柱衝撃緩和)

3. 各種対策技術案の性能試験

3.1 性能試験方法

(1) 試験モデルフェンス

対策技術を考慮した改良フェンスの性能試験を行うにあたり、モデルフェンスを前述の図-2のように設定する。

(2) 試験方法

性能試験は、試験装置の都合上、モデルフェンスに直接波力をかけることができないため、支柱にかかる破壊荷重を測定し、その値とフェンス全体にかかる波力(目標強度)を比較することで評価をする。図-3に性能試験装置イメージ図を示す。架台は鋼製とし、油圧サーボ式圧縮・曲げ試験装置により試験を行う。

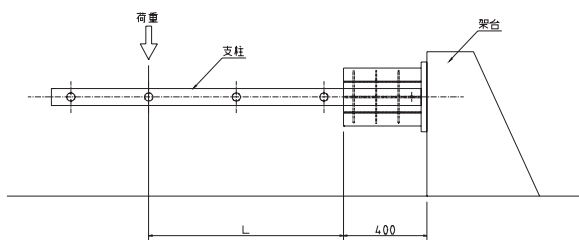


図-3 性能試験装置イメージ図

FRP支柱の性能試験では、FRPの特性として荷重をかけると弾性変形し、一定の荷重がかかると破壊する。そこで、破壊直前の最大変位を測定するため、破壊するまで静的荷重をかけ続ける。また、荷重と変位は荷重-変位の記録チャートとして試験装置により出力する。

(3) 目標強度

FRPの設計では、FRPが塑性変形せずに一挙に破壊するので、使用時に許容できる荷重値を表すために、FRP構造設計便覧(強化プラスチック協会、1995)により安全率を設定する。安全率は、影響する事項を考慮し、その各々に対応する各係数Lの相乗によって次式により求める。

$$S_f = L_0 \times L_1 \times L_2 \times L_3 \times L_4 \times L_5 \times L_6 \quad (4)$$

それぞれの係数の説明と今回の条件での値を以下に示す。

- $L_0=1.3$ 基本的安全係数
- $L_1=1.0$ 材料特性値の信頼度係数
- $L_2=1.0$ 用途・重要度係数
- $L_3=1.0$ 外力荷重の推定の不確定さ係数
- $L_4=1.15$ 構造計算での精度係数
- $L_5=1.0$ 材料特性値のパラツキ係数
- $L_6=1.2$ 衝撃的負荷を受ける係数

これにより安全率は $S_f=1.79$ となる。しかし、試験では静的荷重をかけるため、波による動的荷重は考慮できない。そこで、FRPと同様の破壊形態をもつ係留ロープ等の動的安全率(浮体構造物設計マニュアル(運輸省港湾局、1984))を参考に安全率を決定した。係留ロープやチェーンは表-4に示すように安全率が2.3~4.1である。チェーンの場合には、使用中の摩耗による強度低下も考慮して高い値が取られている。細い繊維の寄り合わせで作られているロープは、荷重が作用すると伸びることによって、衝撃的な荷重を、わずかでも吸収できる。そこで、FRP支柱の安全率は、ロープよりも大きく、チェーンよりは小さい平均的な値として、ここでは $S_f=3$ を採用した。

表-4 係留ロープの安全率

ポリアラミドロープ	ポリエステルロープ	ポリプロピレンロープ	チェーン
2.3	2.3	2.3	4.1

よって、目標強度は、モデルフェンス支柱にかかる曲げモーメントを考えた場合には、2.3で示した水平力に作用点の支点からの距離を乗じて計算し、さらに安全率を

乗じて、1本あたり15,772(N・m)とした。なお、試験時には、図-3に示したように1点で載荷しており、載荷点の支柱基部からの距離を1mとして、試験器の載荷荷重とし出力される値に1を乗じる（実際には、試験器の出力値そのまま）と、モーメント値に換算できる。

各種対策技術の評価としては、破壊荷重が同等の値をとっても、荷重による変位量が大きければ、それだけ多くのエネルギーを吸収したことになるため、破壊荷重およびエネルギー吸収量を比較する。エネルギー吸収量(以後S値とする)は、破壊荷重と最大変位量の積を1/2にした数値として求める。

(4) 性能試験用支柱

性能試験を実施するため、対策技術を施した試験用支柱を製作する。形状サイズは、地上高さ1500mm、根入深さ400mm、φ89mmとする。

支柱製作本数については、試験での支柱強度の製作上のばらつきを考え、1ケースあたり三本製作し、支柱の側方片側に胴縁を挿入するための断面欠損部を2箇所設ける。試験用支柱のケースと仕様を表-5に示す。また、各々の対策技術についての詳細説明を以下に述べる。

表-5 対策技術のケースと仕様

FRP		
構造	ケース	仕様
支柱内部補強	1	レジンモルタルを700mm充填
	2	レジンモルタルを1,000mm充填
支柱基材補強	3	樹脂変更
	4	樹脂変更+FW10mmピッチ
	5	樹脂変更+FW5mmピッチ
	6	樹脂変更+クロス巻き補強
	7	樹脂変更+FW10mmピッチ+クロス巻き補強
	8	樹脂変更+FW5mmピッチ+クロス巻き補強
支柱衝撃緩和	9	弾性緩衝材10mmを被覆
	10	弾性緩衝材20mmを被覆
標準	0	標準

a) 支柱内部補強

支柱内部補強とは支柱内部にレジンモルタルを充填する方法である。レジンモルタルは、ビニルエステル樹脂とケイ砂を混ぜ合わせたもので、FRPを生成する素材と同素材でできている。レジンモルタルを採用した理由は、セメントモルタルより以下の点で優れているためである。

- ①FRPと同素材であるため調達が容易
- ②FRP素材を浸食しない。
- ③打設後、3時間以下でほぼ完全強度を発現。
- ④圧縮強度、引張強度が高い。

レジンモルタルの充填量(充填部の支柱長さ)の違いによる強度効果を確認するため、ケース1は底面より700mm、

ケース2は底面より1,000mm充填したものである。補強イメージ図とレジンモルタルの原材料および充填状況を図-4と写真-4~5に示す。

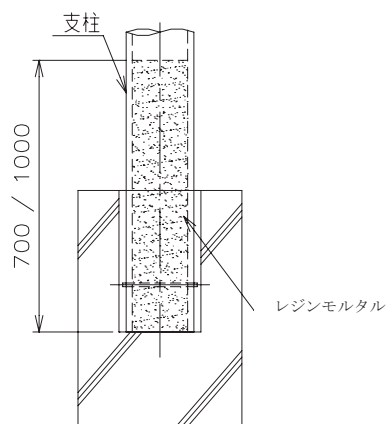


図-4 支柱内部補強イメージ図

b) 支柱基材補強

支柱基材補強とは支柱を生成する樹脂やガラス繊維の材質を変更することで、基材の強度を高める手法である。

まず、樹脂についてはFRPの樹脂として一般的に使用されている不飽和ポリエステル(UP)からビニルエステル(VE)にすることで材料的性質を向上させる。VEは、UPに比べ分子の構造上、伸縮やエネルギー吸収が比較的容易になり、物性的には引張り伸び率が大きく良好な耐衝撃性を示す。また、酸化やハロゲン化のような化学的攻撃を受けにくい構造であるため優れた耐食性能を示す。(前出のFRP構造設計便覧参照)

次に、ガラス繊維による補強として、フィラメント・ワインディング(FW)法がある。一般的なFRPは縦方向にガラス繊維が挿入されている。FW工法は図-5に

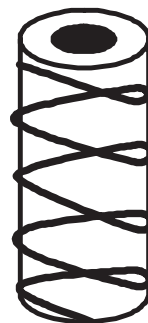


図-5 FW(フィラメント・ワインディング)法イメージ図(黒い太線は、円周に沿ってガラス繊維を巻き付けていくイメージを示し、実際のピッチは5mmおよび10mmである)

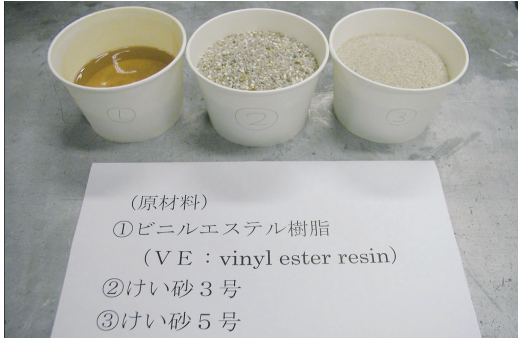


写真-4 レジンモルタルの原材料

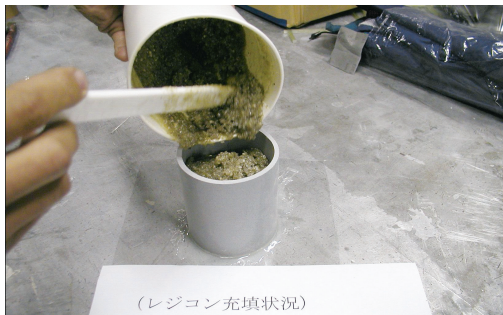


写真-5 充填状況

示すように、さらに円周上にも繊維を巻き付けることで強度を向上させる。図の黒太線は円周に沿って繊維を巻き付けるイメージを示す。また、この他に、クロス巻き補強があるが、クロス巻き補強の詳細説明は3.2の(4)で行う。

c) 支柱衝撃緩和

支柱衝撃緩和は、支柱根元に弾性緩衝材(ゴム)を巻き付け、荷重に対し変位を増加させエネルギー吸収量 (S 値) の増加を期待する補強方法である。イメージ図を図-6に示す。

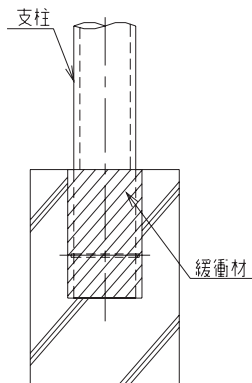


図-6 支柱衝撃緩和法のイメージ図

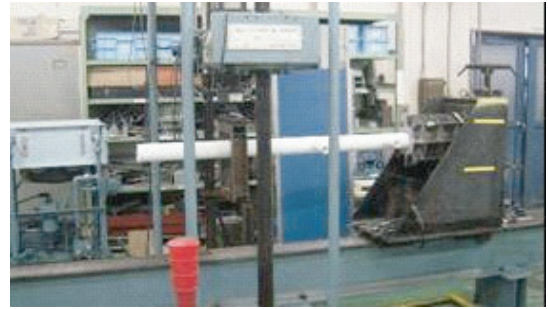


写真-6 試験状況



写真-7 破壊状況 (ケース 0)

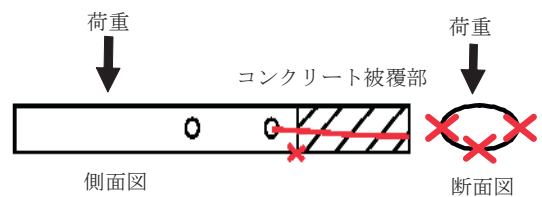


図-7 破壊箇所のイメージ図 (標準品)
(赤線および赤×は亀裂、ひび割れ箇所を示す)

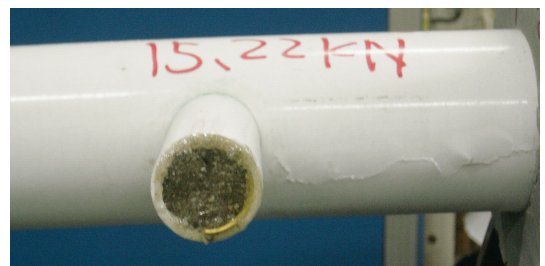


写真-8 破壊状況 (支柱内部補強)

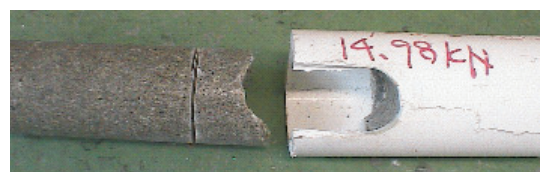


写真-9 剥離状況 (支柱内部補強)

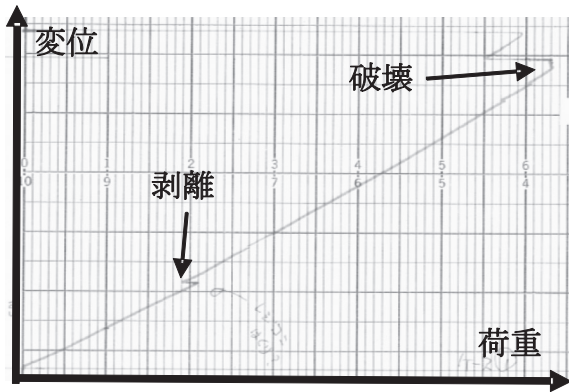


図-9 試験チャート

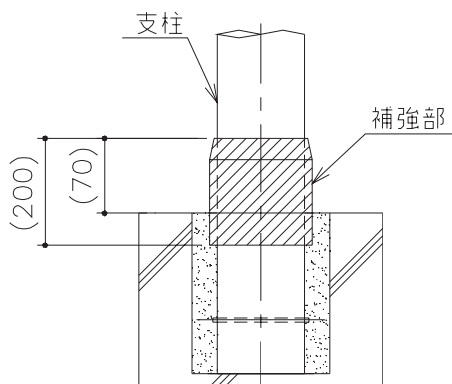


図-10 クロス巻き補強イメージ図



写真-10 破壊状況（支柱基材補強①）



写真-11 破壊状況（支柱基材補強②）

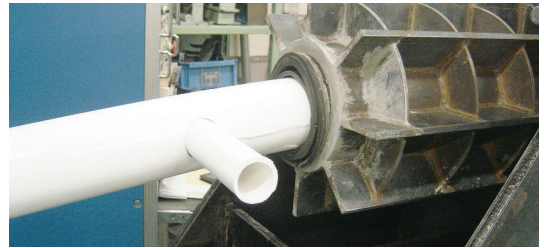


写真-12 破壊状況（支柱衝撃緩和）

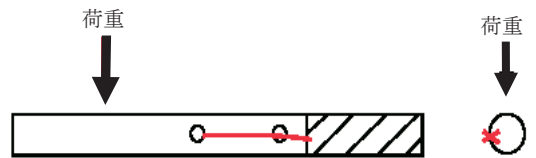


図-8 破壊箇所のイメージ図（支柱内部補強）
（赤線および赤×は亀裂，ひび割れ箇所を示す）

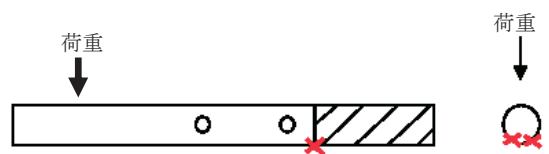


図-11 破壊箇所のイメージ図（支柱内部補強①）
（赤線および赤×は亀裂，ひび割れ箇所を示す）



図-12 破壊箇所のイメージ図（支柱内部補強②）
（赤線および赤×は亀裂，ひび割れ箇所を示す）

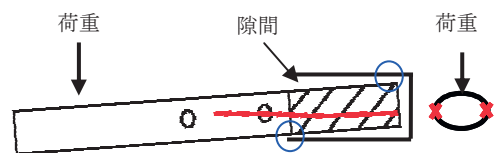


図-13 破壊箇所のイメージ図（支柱衝撃緩和）
（赤線および赤×は亀裂，ひび割れ箇所を示す）

3.2 性能試験

(1) 標準品（ケース0）

FRP支柱の性能試験では，各種対策技術の効果を把握するため，まず，ケース0の標準品を実施した．ここ

で標準品とは最も安い経費で製作でき、現在大分空港や関西空港で設置されている引き抜き成型法で形成された補強のないFRP支柱を示す。引き抜き成型法とは、熱硬化性樹脂と繊維基材との組合せによる成型材をあらかじめ製品形状に近似して金型に導入し、金型で樹脂が硬化するのに十分な熱を与え、その後、成型したものを引抜く手法である。支柱状に成型された製品が連続的に生成されるため、FRP成型法の中では省力化が容易であり、大きい生産性を要する。(前述のFRP構造設計便覧参照)

ケース0の試験状況、破壊状況を写真-6~7、図-7に示す。図は、側面図と断面図で赤線と赤×で亀裂およびひび割れ箇所を示している。また、図中の黒丸が胴縁挿入部の断面欠損部で、斜線部がコンクリート被覆部である。

破壊荷重は12,783Nで、目標強度に対する達成率は81.1%であった。ここで、達成率とは、目標強度に対する破壊荷重の割合である。破壊状況は、図-7の断面図のように断面が押しつぶされ、円筒表面に張力として作用するフープテンションがかかったための軸方向ひび割れが確認された。コンクリート被覆部分にも、軸方向ひび割れが確認された。

(2)支柱内部補強(ケース1, 2)

ケース1, 2の対策技術は、支柱内部にレジンモルタルを充填するものである。破壊状況を写真-8、図-8に示す。破壊荷重はそれぞれ13,407N, 14,773Nで達成率は85.0%, 93.4%であった。

強度が発現しなかった理由として、FRPとレジンモルタルの剥離が原因と考えられる。全ての試験支柱で、試験途中に一度大きな音がした。その際に荷重-変位の記録チャート上では図-9のように一度強度が落ちる現象が確認された。また、写真-9のように試験終了後、FRPを切断して内部状況を確認したところ、レジンモルタルが簡単に抜け出てきた。これは、レジンモルタルが剥離していたことと、断面欠損部で折れたことが原因と考えられる。このようにレジンモルタルが剥離し、断面欠損部で折れた時点で、ほぼ標準品と同条件となり、強度が発現しなかったと考えられる。

(3)支柱基材補強①(ケース3, 4, 5)

ケース3, 4, 5の対策技術は、樹脂をVEにし、FWにより基材強度の増加を期待する方法である。破壊状況を写真-10、図-11に示す。破壊荷重はそれぞれ13,153N, 14,933N, 15,347Nで達成率は83.4%, 94.7%, 97.3%で

あった。

目標強度までは至らなかったが、ケース0, 1, 2とは異なった破壊状況になった。ケース0, 1, 2の破壊状況は、フープテンションによる軸方向ひび割れであったが、ケース3, 4, 5では、引張り力がVEにより向上したことで、軸方向ひび割れは見られなかった。破壊状況は支柱根元での座屈であった。

FWの効果は、ケース3, 4, 5を比較することでその効果を確認できた。

(4)支柱基材補強②(ケース6, 7, 8)

ケース1~5すべてのケースで、目標強度を達成できなかったため、試験結果をもとに対策技術考えた。これまでの試験結果として、支柱内部補強では、レジンモルタルがFRPと一体化していなかったため、強度が発現しなかった。また、支柱基材補強では、樹脂をVEにすると引張り力が向上し、フープテンションによる軸方向ひび割れが発生せず、支柱根元に座屈が起こった。また、FWの効果は確実にあることを確認した。そこで対応策として、支柱基材補強のケースで座屈が確認された支柱根元に、FRPと一体化できるクロス巻き補強を行うことにした。(図-10)

クロス巻き補強とは、布状のガラス繊維に樹脂を含浸させ、FRPに巻き付けた補強である。接着剤等はなく樹脂の硬化によりFRPと一体化させる。

ケース3, 4, 5にクロス巻き補強をしたケース6, 7, 8の破壊状況を写真-11, 図-12に示す。破壊荷重は15,507N, 18,747N, 19,333Nで達成率は98.3%, 118.9%, 122.6%であった。

ケース7, 8で目標強度を達成することができた。破壊状況も今までケースとは違い、断面欠損部の胴縁部分で座屈であった。支柱根元へのクロス巻き補強は有効であることを確認できた。

(5)支柱衝撃緩和(ケース9, 10)

ケース9, 10の対策技術は、支柱根元に弾性緩衝材(ゴム)を巻き付ける方法である。吸収エネルギーの増大を期待する対策である。破壊状況を写真-12, 図-13に示す。

破壊荷重は11,827N, 11,900Nで達成率は75.0%, 75.5%であった。標準品より破壊荷重が低かった。その理由として、写真-12から分かるように、コンクリート部と緩衝材に隙間ができ、一体化が解消され、支柱根元に均等に力が伝わらず、部分的に支圧が発生したため、破壊荷重が低かったと考えられる。破壊状況はフープテンションによる軸方向ひび割れであった。

表-6 性能試験結果

[FRP]

構造	ケース番号	仕様	No	破壊荷重値(N)	目標強度(N)	変位量(mm)	S値(N・m)	達成率(%) =破壊荷重 /目標強度	判定
標準	0	標準品	8-1	13,300	15,771	138	918	84.3%	NG
			8-2	11,810	15,771	146	862	74.9%	NG
			8-3	13,240	15,771	141	933	84.0%	NG
			平均値	12,783	15,771	142	904	81.1%	NG
支柱 内部	1	支柱内部にレジンコン クリートを底面より700 mm充填	1-1	12,600	15,771	105	662	79.9%	NG
			1-2	14,020	15,771	114	799	88.9%	NG
			1-3	13,600	15,771	109	741	86.2%	NG
			平均値	13,407	15,771	109	734	85.0%	NG
補強	2	支柱内部にレジンコン クリートを底面より100 0mm充填	2-1	14,980	15,771	121	906	95.0%	NG
			2-2	14,000	15,771	118	826	88.8%	NG
			2-3	15,220	15,771	119	906	96.5%	NG
			平均値	14,733	15,771	119	879	93.4%	NG
支柱 基材	3	樹脂変更(UP→VE)	3-1	13,420	15,771	119	798	85.1%	NG
			3-2	13,400	15,771	114	764	85.0%	NG
			3-3	12,640	15,771	112	708	80.1%	NG
			平均値	13,153	15,771	115	757	83.4%	NG
補強	4	樹脂変更(UP→VE) + FW10mmピッチ	4-1	14,400	15,771	129	929	91.3%	NG
			4-2	15,000	15,771	143	1,073	95.1%	NG
			4-3	15,400	15,771	143	1,101	97.6%	NG
			平均値	14,933	15,771	138	1,034	94.7%	NG
	5	樹脂変更(UP→VE) + FW5mmピッチ	5-1	16,440	15,771	152	1,249	104.2%	OK
			5-2	15,200	15,771	131	996	96.4%	NG
			5-3	14,400	15,771	125	900	91.3%	NG
			平均値	15,347	15,771	136	1,048	97.3%	NG
	6	樹脂変更(UP→VE) + クロス巻き補強	6-1	16,600	15,771	153	1,270	105.3%	OK
			6-2	14,460	15,771	122	882	91.7%	NG
			6-3	15,460	15,771	125	966	98.0%	NG
			平均値	15,507	15,771	133	1,039	98.3%	NG
	7	樹脂変更(UP→VE) + FW10mmピッチ + クロス巻き補強	7-1	18,800	15,771	179	1,683	119.2%	OK
			7-2	17,660	15,771	157	1,386	112.0%	OK
			7-3	19,780	15,771	175	1,731	125.4%	OK
			平均値	18,747	15,771	170	1,600	118.9%	OK
	8	樹脂変更(UP→VE) + FW5mmピッチ + クロス巻き補強	8-1	19,580	15,771	167	1,635	124.2%	OK
			8-2	18,620	15,771	164	1,527	118.1%	OK
			8-3	19,800	15,771	174	1,723	125.5%	OK
			平均値	19,333	15,771	168	1,628	122.6%	OK
支柱 衝撃	9	支柱根入れ部に弾性 緩衝材10mm被覆	9-1	12,440	15,771	124	771	78.9%	NG
			9-2	11,400	15,771	111	633	72.3%	NG
			9-3	11,640	15,771	118	687	73.8%	NG
			平均値	11,827	15,771	118	697	75.0%	NG
緩和	10	支柱根入れ部に弾性 緩衝材20mm被覆	10-1	12,260	15,771	145	889	77.7%	NG
			10-2	11,540	15,771	134	773	73.2%	NG
			10-3	11,900	15,771	134	797	75.5%	NG
			平均値	11,900	15,771	138	820	75.5%	NG

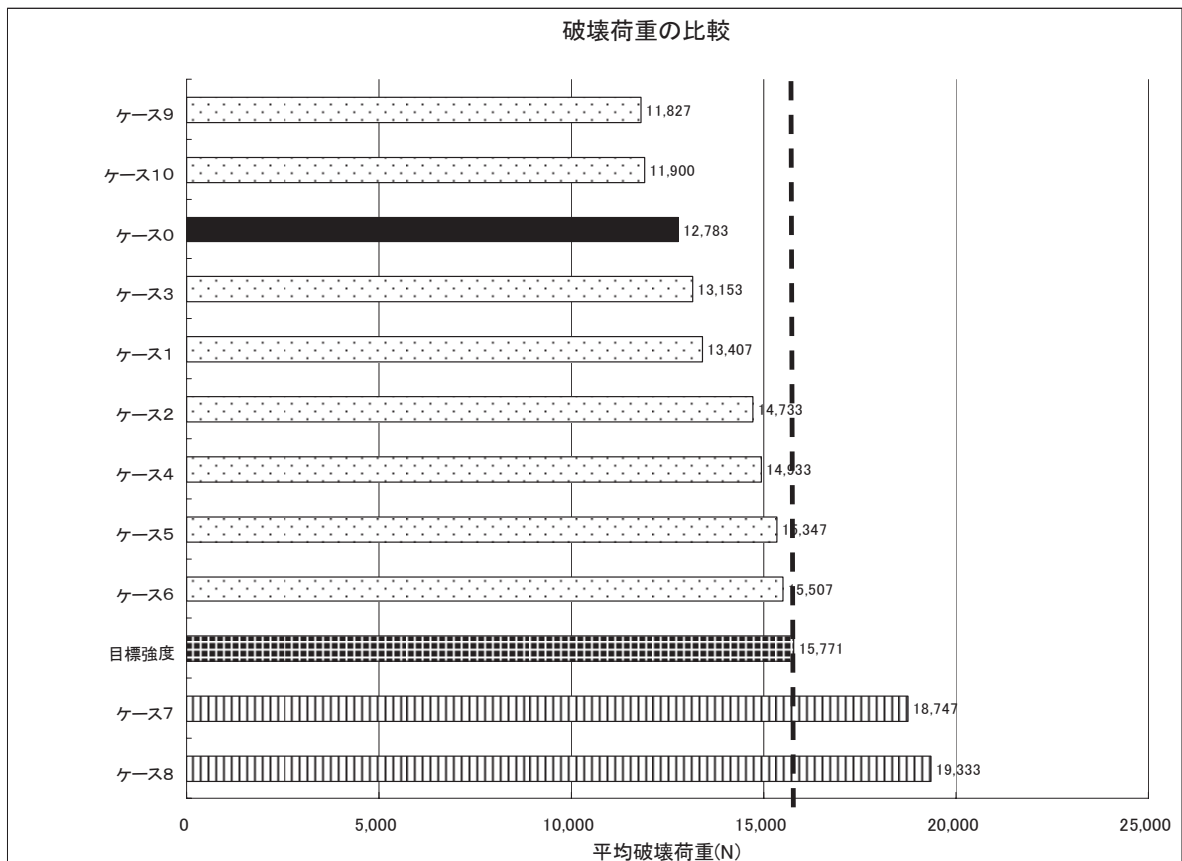


図-14 破壊荷重の比較

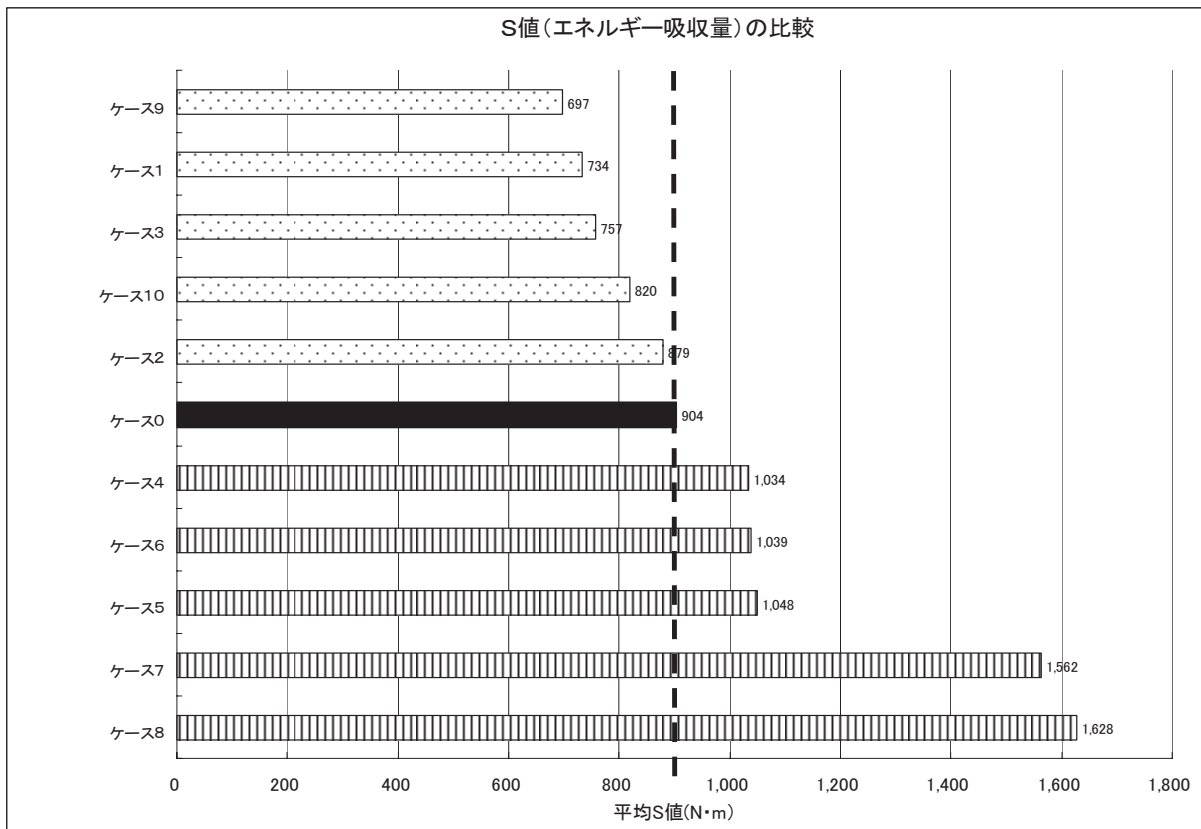


図-15 S値の比較

3.3 性能試験結果

対策技術の性能試験結果一覧および破壊荷重と S 値の比較グラフを表-6、図-14、15 にまとめる。図-14 の破線は、目標強度を示し、図-15 の破線は、標準品の S 値を示している。 S 値には目標変位がないため標準品を基準にしている。

結果として、表-6 に示すように目標強度より大きな破壊荷重を有したケースは、ケース7とケース8だけであった。図-14 で目標強度と破壊荷重の比を示すと、破壊荷重および S 値で最大値を示したケース8は、標準品に比べ荷重で1.51倍であって、 S 値は1.80倍に改良できた。図-15 に示す S 値は破壊までに吸収できるエネルギーとして評価できるものである。 S 値を比べるとケース4、5、6も改良の効果があらわれている。すなわち、破壊荷重は目標値に至らないが、やや曲がる性質を有するようになるため、破壊する場合でも、すべてが破断されるわけではなく、鉄製品のように曲がったままでその場に留まる可能性は高くなる。

4. まとめ

波力を考慮したフェンスの検討を行った結果、以下のことが結果として導くことができた。

- ①引き抜き成型工法で製作されたFRPの強度を高めるためには、支柱を生成する樹脂をUP（不飽和ポリエステル）からVE（ビニルエステル）にし、FW（フィラメントワインディング）を実施すると有効である。
- ②レジンモルタルによる内部補強はFRP本体との一体化が重要で、剥離した場合には、破壊荷重が大きくならず、達成率は高くない。
- ③断面欠損部分でひび割れ等が生じていることが多く、強度低下の一つの要因となっている。
- ④ゴムを用いた弾性緩衝材は、支柱を支えるコンクリート基部の内部で、支柱と内壁面に支圧が発生するため有効な対策とはならない。
- ⑤FRPの薄板を巻き付けたクロス巻補強法は、破断箇所を直接強くできる効果があり、達成率が最も高くなった。

以上の試験結果から、改良型フェンスとしては、樹脂をビニルエステル製としてFWによる補強を行い、さらに基部にクロス巻き補強を行うことが適切と考えられる。

今後の課題としては、以下のことが考えられる。

本文中で触れたように、設計に用いた越流水深は1mであり、これより大きい越流水深に対応できるかどうか不明である。安全率は3を取っているため、越流水深が

1mを越えても直ちに破壊されるような構造とはなっていないが、フェンスの設置場所や設置法を改良することによって、安全性を高めることができる。たとえば、フェンスをパラペット上ではなく、護岸水たき部に少し後退させて設置する、胴縁部分は台風期には取り外せる構造とするなどである。

また、現地FRPフェンスの破壊状況から、当初、支柱根元部の切断が原因で支柱が破壊されていると推測していたが、性能試験では、フープテンションによる軸方向ひび割れや、座屈がおこった。したがって、現地でも軸方向ひび割れと座屈が複雑に相互作用を起こして、支柱根元部付近の切断を生じていると考えられる。フェンス構造が変化すると破壊の状況も異なるため、今後できるだけ類似品の破壊について資料を収集しておく必要がある。

従来、フェンスの設計は風荷重を考慮するだけで対応できていた。しかし、近年の大型台風等がもたらす越波によるフェンスの被災が多発したため、波力を考慮したフェンスを提案することとなった。今回の研究では、波力を考慮するものの、生産性、経済性を検討しながら、現場に設置可能なフェンスを提案することを前提条件として、対策技術を検討した。設計条件としては、越流水深 $h=1\text{m}$ 、越流係数 $C'=2.5$ 、安全率 $S_f=3$ と仮定をして目標強度を設定し、対策技術の評価した。したがって、FRPフェンスは、この条件下では破壊することなく、波浪に耐えうるが、これ以上の波力では安全性を保証できない。また、そのような大きな波浪作用下では、冠水による滑走路の閉鎖や、周回道路の陥落等の越波災害を引き起こす可能性が高く、フェンスだけではなく、護岸の改良や嵩上げ等による越波対策が必要と考えられる。

また、本研究では、1.5m高さの標準的なモデルフェンスを想定して試験を行った。現地FRPフェンスの破壊状況から、現地に適用する際は、波力の検討は勿論のこと、部材（支柱・胴縁・格子）間隔及び外径・肉厚の検討、断面欠損の有無、補強方法の選択等、コストも含め個別の条件を総合的に考慮し、その場所に適したフェンスの設計を行う必要がある。

(2007年3月9日受付)

謝辞

被災現場の現地調査に関して、国土交通省九州地方整備局別府港湾・空港整備事務所の皆さまから懇切なご協力を受けており、ここに深く感謝するものである。

参考文献

- 運輸省港湾局(1984): 浮体工法開発調査ワーキンググループ報告書, 浮体工法開発ワーキンググループ, 617p.
- 運輸省港湾局(1991): 親水性防波堤設計マニュアル, 海域制御構造物の設計技術に関するワーキンググループ, 437p.
- 気象庁(2005): 災害時自然現象報告書2005年第1号, pp.28.
- 社団法人強化プラスチック協会(1995): F R P構造設計便覧pp.15.196-198.358-359.
- 鈴木崇之・岡安章夫・田中真史(2003): 緩傾斜護岸の越波水理特性実験とLES数値計算, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.631-635.
- 高田 彰(1970): 波の遡上, 越波および反射の関連性について, 土木学会論文報告集, 第182号, pp.19-30
- 平石哲也・長谷川巖(2006): 水圧センサーを用いたオンサイト越波計の開発に関する模型実験, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.1421-1425
- 平山克也・南靖彦・奥野光洋・峯村浩治・河合弘泰・平石哲也(2005): 2004年に来襲した台風による波浪災害事例, No.5, pp.649-664
- 間瀬肇・T.S.Hedges, M.Shareef, 永瀬俊二(2003): 波の打上げを考慮した傾斜護岸に対する越波流量算定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.636-640
- Mase H.(1989): Random wave runup height on gentle slope, J.Waterway, Port, Coastal and Ocean engineering, ASCE, Vol.118, No5, pp.649-664
- Van der meer, J.W. and C.M.Stam(1992): wave runup on smooth and rock slopes of Coastal and Ocean engineering, ASCE, Vol. 118, No.5 pp.534-550

主要記号表

- A_0 : 越波を受ける投影面積(m^2)
- C' : 越流係数
- C_D : 抗力係数
- g : 重力加速度(m/s^2)
- h : 越流水深(m)
- H_0 : 沖波波高(m)
- H_0' : 換算沖波波高(m)
- L_0 : 基本の安全係数
- L_1 : 材料特性値の信頼度係数
- L_2 : 用途・重要度係数
- L_3 : 外力加重の推定の不確定さ係数
- L_5 : 構造計算での精度係数
- L_5 : 材料特性値のバラツキ係数
- L_6 : 衝撃的付加を受ける係数

P_H : 構造物に作用する流体による抗力(N)

S : エネルギー吸収量($N \cdot m$)

S_F : 安全率

T_0 : 沖波周期(s)

u : 越流流速(m/s)

ρ : 水の密度(kg/m^3)

港湾空港技術研究所資料 No. 1154

2007. 6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 新高速印刷株式会社

Copyright © (2007) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。