
高炉スラグ・セメント安定処理舗装工法の製品倉庫床への適用

Application of Pavement Method Utilizing Blast Furnace Slag Cement to Storage Yard Floor

岡本 勝昭(Katsuaki Okamoto) 谷敷 多穂(Kazuho Tanishiki) 上赤 正和(Masakazu Kamiaka)

要旨：

当社では、スラグ破砕材の有効活用の一環として、高炉スラグ・セメント安定処理舗装工法を開発し、製品倉庫床に適用した。本工法は、高炉スラグ破砕材に若干のセメントと適量の水を混合したドライミックス材料をアスファルトフィニッシャーでまき出した直後に、マカダムローラーや振動ローラーで転圧締固めし、舗装の表層に適用することで、コンクリート舗装に比べて養生を含む施工期間を著しく短縮することができる。また、高炉スラグの潜在水硬性が発揮され、アスファルト舗装に比べて高い剛性を有し、その剛性は貧配合のコンクリート舗装と同程度の剛性が確保されるとともに、強度の面でも使用条件を満足するものである。

Synopsis：

Kawasaki Steel Corp. newly developed a pavement method with cement utilizing blast furnace slag, and applied it to the foundation slab in the product warehouse, thereby proving that the crushed slag can be used effectively. The execution procedure of this method is that a dry-mixture, which consists of crushed blast furnace slag, a certain volume of cement and water, is spread by an asphalt finisher, and then compacted by a macadam or vibratory roller. When this is adopted for surface course of paving, the duration of construction period, including curing time, will be radically minimized in comparison with the normal concrete paving method. In addition, it can be expected that the potential hydraulicity of blast furnace slag becomes apparent and its rigidity is ensured in the same way as that of poorly-mixed concrete pavement. Further, its strength will also satisfy design requirements.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

高炉スラグ・セメント安定処理舗装工法の 製品倉庫床への適用*

川崎製鉄技報
23 (1991) 1, 69-74

Application of Pavement Method Utilizing Blast Furnace Slag Cement to Storage Yard Floor



岡本 勝昭

Katsuaki Okamoto
水島製鉄所 土建技術
部水島土建技術室 主
査(課長)



谷敷 多穂

Kazuho Tanishiki
水島製鉄所 土建技術
部水島土建技術室



上赤 正和

Masakazu Kamiaka
水島製鉄所 土建技術
部水島土建技術室

1 はじめに

製品倉庫の地盤は、建設時にサンドドレーン工法やサンドコンパクションバイブル工法等により改良をされたが、地盤沈下に対応できるように床面は未舗装のままであった。倉庫建設後15年以上が経過し、地盤沈下もほぼ終了した。近年、作業環境改善や品質対応の観点から床面の舗装化が望まれていた。

製品倉庫は、製品のハンドリングに天井クレーンを使用することが多く、床面は軽車輛の走行、作業員の歩行に限定されるため、道路舗装の表層ほどは耐摩耗性が要求されない。また、製品に応じて多種多様な製品置台を使用しているが、製品置台は一定の位置に固定されるため、アスファルト舗装などのたわみ性舗装では、置台直下が局所的に沈下する傾向がある。そのため、一般的には荷重分散効果の大きいコンクリート舗装に代表される剛性舗装が適用されることが多いが、コストが高く施工期間が長いといった問題点がある。

水島製鉄所では、製品倉庫の舗装化にあたり、溶鉱炉から発生する徐冷スラグを粒度調整したスラグ破砕材(HMS-25)の潜在水硬性を利用した高強度のセメント安定処理舗装工法「高炉スラグ・セメント安定処理舗装工法」を開発し、舗装の表層として使用している。

本論文では、材料特性、設計・施工方法、さらに、本工法の舗装を基盤とした埋込ボルトの引抜耐力について各種の室内および現場試験結果をもとに述べる。

要旨

当社では、スラグ破砕材の有効活用の一環として、高炉スラグ・セメント安定処理舗装工法を開発し、製品倉庫床に適用した。本工法は、高炉スラグ破砕材に若干のセメントと適量の水を混合したドライミックス材料をアスファルトフィニッシャーでまき出した直後に、マカダムローラーや振動ローラーで転圧締固めし、舗装の表層に適用することで、コンクリート舗装に比べて養生を含む施工期間を著しく短縮することができる。

また、高炉スラグの潜在水硬性が発揮され、アスファルト舗装に比べて高い剛性を有し、その剛性は貧配合のコンクリート舗装と同程度の剛性が確保されるとともに、強度の面でも使用条件を満足するものである。

Synopsis:

Kawasaki Steel Corp. newly developed a pavement method with cement utilizing blast furnace slag, and applied it to the foundation slab in the product warehouse, thereby proving that the crushed slag can be used effectively.

The execution procedure of this method is that a dry-mixture, which consists of crushed blast furnace slag, a certain volume of cement and water, is spread by a asphalt finisher, and then compacted by a macadam or vibratory roller. When this is adopted for surface course of paving, the duration of construction period, including curing time, will be radically minimized in comparison with the normal concrete paving method. In addition, it can be expected that the potential hydraulicity of blast furnace slag becomes apparent and its rigidity is ensured in the same way as that of poorly-mixed concrete pavement. Further, its strength will also satisfy design requirements.

2 工法の概要

本工法は、HMS-25に高炉セメントと水を添加し、コンクリートミキサーにて混練した材料をアスファルト・フィニッシャーで所定の厚さにまき出し、マカダムローラー、振動ローラー、タイヤローラーで転圧、締固めするもので、RCCP工法に分類される舗装であり、低価格、早期供用の可能な舗装工法である。Photo 1に施工状況を示す。また耐摩耗性の向上を図る場合には、前述した施工の後、表層からセメントグラウトを含浸させる。一般の場合および表層グラウト処理をした場合の舗装表面の状態をPhoto 2(a)および(b)にそれぞれ示す。

* 平成2年10月26日原稿受付

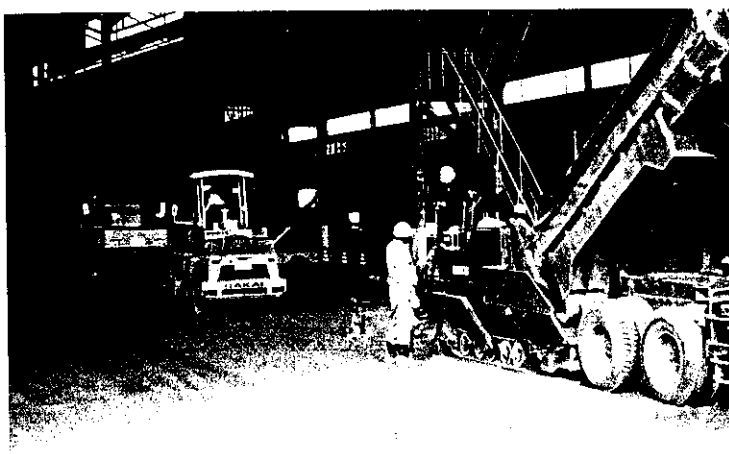
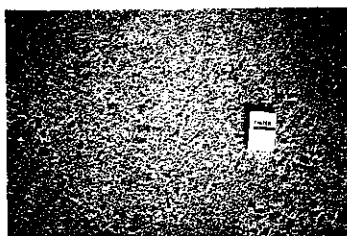
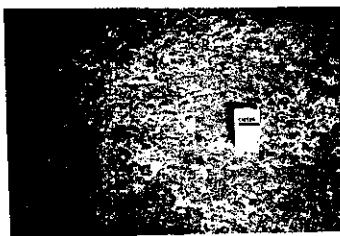


Photo 1 Execution of work



(a) Cement grout no executed



(b) Cement grout executed

Photo 2 Surface roughness condition

3 確性試験と配合決定

3.1 試験概要

試験材の配合を Table 1 に示す。エージング(材質を安定させるための放置)した HMS-25 の粒度分布としては、JIS A-5015 に規定されている通過重量百分率の許容範囲内における上限(粒径が細かい)、中央、下限(粒径が粗い)の3ケース、含水量は最適含水化(w_{opt})と $w_{opt}+2\%$ の2ケース、セメント添加量は HMS-25 に対する重量百分率で3%、5% および7% の3ケースを用いた。また締固め条件は、HMS-25 用締固め条件、ソイルセメント用締固め条件、HMS-25 用締固め条件とソイルセメント用締固め条件の中間の条件の3ケースとし、供試体を作成し、一軸圧縮試験(No. 1~9)および摩耗試験(No. 10~17)を行った。

w_{opt} は、Table 2 に示した各締固め条件ごとの締固め試験による結果を用いた。各締固め条件における W はラム重量、 N は締固め回数、 L は層数を示すものである。セメントは高炉セメントB種を用いた。

試験方法は、一軸圧縮試験については JIS A-5015、摩耗試験については JIS A-1451 に基づいて行った。またセメントグラウト処理の効果確認試験は基本配合決定後に行ったが、摩耗試験は車輛走行に対する効果を確認するために、アスファルト舗装要綱に定める

Table 1 Trial mix

Test	No.	HMS-25 grading curve*1	Water content*2	Cement content	Compact condition
Strength test	1	U	A, B	3	HMS-25 Compact condition
	2	M	A, B	5	
	3	L	A, B	7	
	4	U	A	3	Intermediate between HMS-25 and Soilcement
	5	M	A	5	
	6	L	A	7	
	7	U	A, B	3	Soilcement Compact condition
	8	M	A, B	5	
	9	L	A, B	7	
Wearing test	10	M	A	3	Intermediate between HMS-25 and Soilcement
	11	M	A	5	
	12	M	A	7	
	13	M	A, B	3	
	14	M	A, B	5	
	15	M	A, B	7	
	16	L	A, B	5	
	17	U	A, B	5	

*1 U: Upper grading
M: Middle grading
L: Lower grading

*2 A: W_{opt}
B: $W_{opt}+2\%$

ホイットラッキング試験に基づいて行った。セメントグラウトは、半たわみ性、半剛性舗装に使用するセメントグラウトを用いたが、その配合は Table 3 に示すとおりである。

Table 2 Results of compaction test

No.	Compact condition			Grading curve	W_{opt} (%)	$\gamma_{d max}$ (gf/cm ³)
	W (kgf)	N (time)	L (layer)			
1*1	4.5	42	3	Upper	8.4	2.254
				Middle	8.3	2.239
				Lower	7.4	2.197
2*2	4.5	25	3	Upper	8.9	2.197
				Middle	8.7	2.196
				Lower	8.7	2.142
3*3	2.5	25	3	Upper	9.6	2.104
				Middle	9.4	2.047
				Lower	8.8	2.012

*1 HMS-25 compact condition

*2 Intermediate between HMS-25 and soilcement

*3 Soilcement compact condition

Table 3 Mix proportion on cement grout

Material	Mix proportion (%)
Cement	40.0
Fly ash	14.0
Sand	11.0
Sebian-A 45000	4.5
Water	30.5

Execution flow

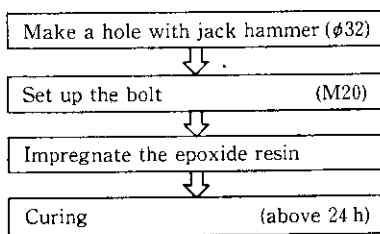


Fig. 1 Execution flow of anchor bolt set by adhesives

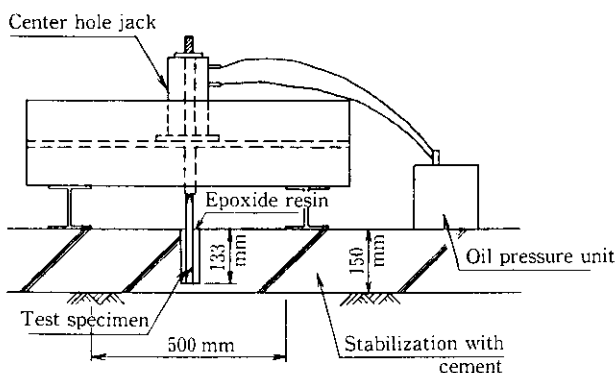


Fig. 2 Pull-out test equipment

埋込ボルトの引抜耐力試験については、Fig. 1 に示す施工フローによって、高炉スラグ・セメント安定処理層へ埋め込まれた樹脂アンカーを、Fig. 2 に示す実験装置を用いて行った。高炉スラグ・セメント安定処理層は、セメントグラウト処理を実施したものと未処理の2ケースとし、養生期間は40日とした。また、樹脂アンカーの養生期間は1日と5日とし、ボルトセット後は20°Cに24時間保持し、それ以後は室温放置(13°C~20°C)とした。

3.2 一軸圧縮強度

一軸圧縮試験結果を Fig. 3 に示す。一軸圧縮強度(q_u)は、セメント添加量および締固めエネルギーが増すにつれて上昇し、かつ養生日数にもなって増加する傾向を示した。セメント添加量と q_u の関係は、3%と5%添加時の強度増加勾配に比べて5%と7%添加時の強度勾配の方が小さい。粒度分布の違いによる q_u は中央粒度、上限粒度、下限粒度の順に小さくなり、締固めエネルギーが小さいほどその傾向は顕著である。締固めエネルギーが大きい場合、締固め時に骨材が粉碎、細粒化し、粒度性状が改善されて強度増加が図れたものと推測される。

q_u から配合を検討すると、セメント添加量は5%ないし7%、HMS-25の粒度分布は中央粒度ないし上限粒度が望ましいといえる。締固め条件は、HMS-25用締固め条件(ラム重量4.5 kgf 締固め回数42回、層数3層)であれば粒度の影響を受けにくい。また、含水量については、締固め時に w_{opt} であることが望ましい。

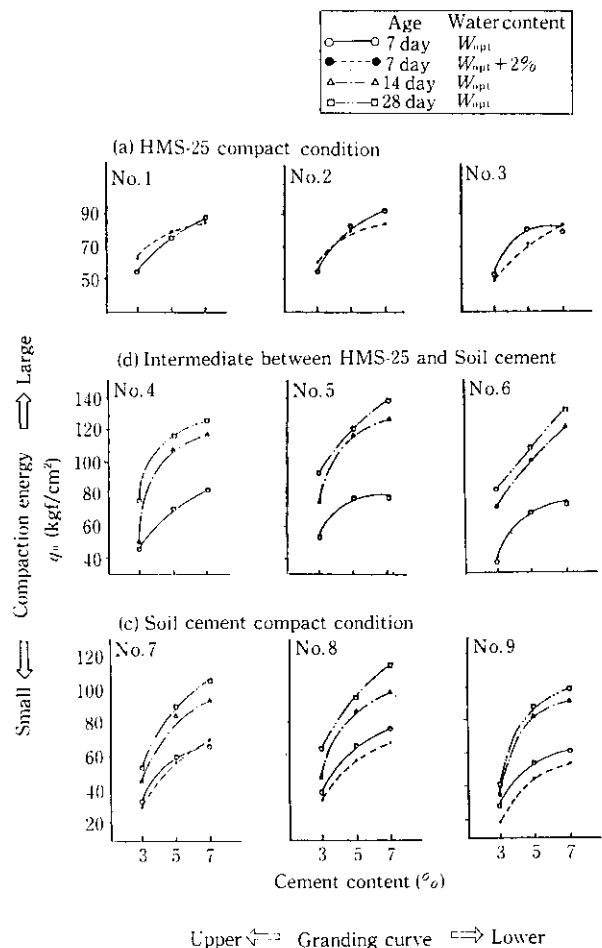


Fig. 3 Results of unconfined compression strength

3.3 摩耗特性

摩耗試験結果を Fig. 4 に示す。セメント添加量との関係は、 q_u とセメント添加量の関係と同様の傾向を示し、セメント添加量が増大するほど摩耗率が減少し、添加量が3%と5%の場合の減少勾配に比べて5%と7%の場合の勾配の方が小さい。粒度分布による差は、下限粒度の場合のみが著しく劣るが、これは、粒径が大きい表面骨材の剝離による供試体の損傷が原因である。含水量との関係は、 w_{opt} に対して含水比を2%増加させると著しく摩耗量が增大する。表面の状態は $w_{opt}+2\%$ の方が細粒分が表面に浮き上がり緻密な状態となるが、細粒分はレイタンス状のもので摩耗しやすいことがわかった。

摩耗特性から配合を検討すると、セメント添加量は5%ないし7%、HMS-25の粒度分布は中央粒度ないし上限粒度が望ましい。また、含水量については w_{opt} で管理することが重要であることがわかった。

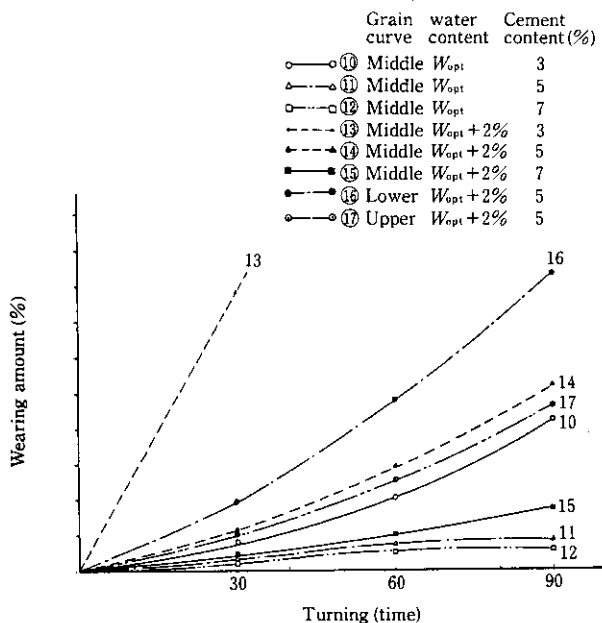


Fig. 4 Results of wearing test

3.4 決定配合とセメントグラウト処理

室内試験結果から材料の基本配合として、Table 4 に示す配合に決定した。ただし、HMS-25 は強度増加を図るために、未エージング材を使用することとした。

HMS-25 は、通常は材質を安定させるためエージング処理を行っているが、エージングによって q_u が低下することが知られている²⁾。Fig. 5 に示す呈色試験結果により、材齢が15日を越えれば材質が安定することを確認し、未エージング材の HMS-25 を使用することにした。未エージング材を用いた供試体の q_u および曲げ強度試験結果を Table 5 に示す。Fig. 3 に示した結果と比較すると、 q_u はエージング材に比べて10%~20%向上している。

つぎにセメントグラウト処理効果について述べると、 q_u は未処理のものに比べて10%増加した。耐摩耗性については、Table 6 に示すように未処理のものに比べて向上していることがわかる。セメ

Table 4 Standard value of mix proportion

Item	Standard value
HMS-25 Grading curve	Middle grading
Cement content	5%
Water content	W_{opt}
Maximum dry density	2.24 gf/cm ³

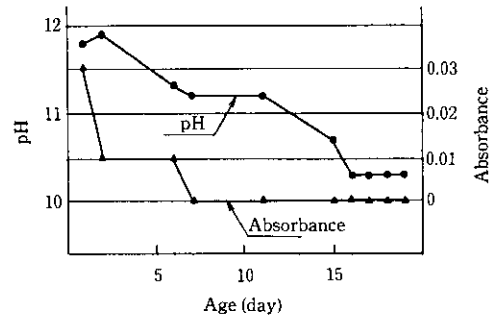


Fig. 5 Leaching test for blast furnace slag

Table 5 Results of test with blast furnace slag before aging

	Age	7 day	28 day
Unconfined compression strength q_u (kgf/cm ²)		113	123
Bending strength (kgf/cm ²)		8.5	19.1

Table 6 Results of wheel tracking test

Test specimen	Contact pressure (kgf/cm ²)	Deformation content (mm)		D_s^{*1} (N/mm)
		45 min	60 min	
Cement grout no executed	6.4	2.55	2.64	7 000
	10.0	3.04	3.17	4 850
Cement grout executed	6.4	1.27	1.31	15 750
	10.0	2.46	2.52	10 500

*1 Dynamic stability

ントグラウトの浸透厚さは、舗装時にグラウト処理を行った場合には表面から4cm程度であるが、未処理の状態で供用した後、セメントグラウト処理を行った場合の浸透厚さは、表面の目詰まりにより2cmにとどまることを確認した。ただし、耐摩耗性については差異は見られなかった。

3.5 埋込ボルトの引抜試験結果

結果を Table 7 に示す。すべての供試体においてボルト素材の降伏応力 (1 800 kgf/cm²) 以上、引張強さ (4 100 kgf/cm²) 以下で抜けた。コンクリートに樹脂アンカーをセットする場合、コンクリートへのボルトの埋込みはボルト径の10倍以上あれば十分な引抜耐力が確保できることがわかっているが³⁾、今回の試験では埋込長の短い樹脂アンカーを用いているので、引抜耐力は減少している。また、セメントグラウト処理の有無による引抜耐力の差は認められなかった。これは、セメントグラウトの浸透厚さがセメント安定処理

Table 7 Results of pull-out test

No.	Cement grout	Bolt diameter (mm)	Hole diameter (mm)	Hole length (mm)	Age (day)	Maximum load (tf)	Axial stress on bolt (kgf/cm ²)	Expected axial stress on bolt (kgf/cm ²)
1	Executed	20	33	133	1	9.0	2 864	3 080
2					5	10.7	3 405	
3	No executed				1	8.5	2 705	2 738
4					5	10.8	3 437	

層の1/3程度であることと、 q_u の増加が10%程度のため、せん断強度が多少の増加にとどまっていることが原因かと思われる。

4 設計計算例

本工法の倉庫の床舗装の設計例について述べる。水島製鉄所で生産する製品は、鋼板(薄板, 厚板), 形鋼(鋼矢板, H形鋼), 棒鋼など重量および形状ともに異なり, 荷重条件も各倉庫ごとに異なる。今回は, 縦1 m, 横10 mの荷重面積を定め, 製品荷重を, 5 tf/m², 10 tf/m², 15 tf/m²の3ケースを設定し検討した。

計算式には, Boussinesqの弾性理論に基づく遠藤の解法⁴⁾を用いた。この解法は, 載荷重を長方形荷重あるいは三角形荷重で与えることができ, 製品倉庫の荷重条件に合ったものである。遠藤の解法によると, 上層下面の引張応力 σ_b (kgf/cm²)は(1)式で表わされる。

$$\sigma_b = \frac{3\sigma_0}{2\pi} \times f_1 \dots \dots \dots (1)$$

$$f_1 = \alpha m n \times \frac{1 + \alpha^2 + 0.81m^{2/3}n^2(5 + 3\alpha^2 + 3.24m^{2/3}n^2)}{(1 + 0.81m^{2/3}n^2)^2 \times (1 + \alpha^2 + 0.81m^{2/3}n^2)^{3/2}}$$

σ_0 : 製品荷重 (kgf/cm²)

α : 荷重面積の長辺長/荷重面積の短辺長

m : 上層の弾性係数/下層の弾性係数

n : 2×上層の版厚/荷重面積の短辺長

ここで, 上層の版厚は15 cm, 弾性係数は 2×10^3 kgf/cm²を定数とし, 下層の弾性係数は 1×10^3 , 2×10^3 , 3×10^3 kgf/cm²の3ケースとして, 本工法によって舗装するセメント安定処理層下面の引張応力と下層部の必要強度を検討した。

計算結果を Fig. 6 に示す。セメント安定処理層下面の引張応力が, Table 5 に示した曲げ強度 $\sigma_b = 19.1$ kgf/cm²に等しくなる場合の荷重を許容荷重とすると, 下層の弾性係数の低下にともない, 許容荷重は小さくなる。また, セメント安定処理層下面の引張応力は, 荷重条件が大きいはど下層の弾性係数の影響を受けやすい。

水島製鉄所の製品倉庫の床面は, 未舗装の状態で製品置場として使用しており, 30 cm 平板載荷試験による地盤反力係数は $k_{30} = 20 \sim 30$ kgf/cm³である。 k_{30} と弾性係数との関係は, (2)式および(3)式で示されることから³⁾, 下層部の弾性係数は 2×10^3 kgf/cm²程度を有するものと考えられる。

$$k_{30}/2.2 = \frac{1}{4} \times \text{CBR} + 1 \dots \dots \dots (2)$$

$$E = 50 \sim 100 \text{ CBR} \dots \dots \dots (3)$$

ここで, CBRは, 材料および地盤の強度特性値を示すものである。

したがって, 荷重条件が15 tf/m²以上の場合には, 上層下面の応力が曲げ応力強度を超えるため, セメント安定処理層の版厚を15 cmより厚くする必要がある。なお, セメント安定処理層の最小版厚は施工性から12 cmとしている。

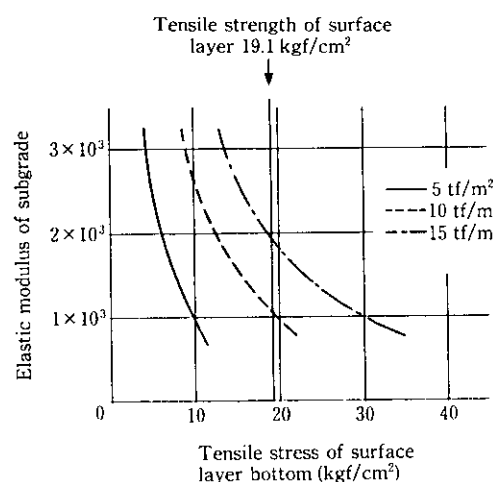


Fig. 6 Tensile stress on elastic design

5 施工法

5.1 最適転圧条件

本工法の施工フローを Fig. 7 に示す。本工法の材料は, 締固めエネルギーの違いにより強度が変化する材料であり, Fig. 7 における転圧工の管理が重要な施工管理項目となる。

現場施工における転圧工は, マカダムローラー, タイヤローラーおよび振動ローラーの舗装用機械を使用するが, それぞれの機械の転圧回数の違いによる乾燥密度(γ_d)を測定し, 最適転圧回数を定めた。

5.2 施工管理

マカダムローラー, タイヤローラーおよび振動ローラーの転圧回数組み合わせと, 3.2.1 で本工法に適していると判断された HMS-25 用締固め条件による γ_d を100%とした時の締固め率の結果を Table 8 に示す。同表から, HMS-25 用締固め条件の場合以上の γ_d を得るためには, 振動ローラーを使用することが必要であることがわかる。振動によって締固め率が向上する性質は, 砂質系材料の締固め特性と一致している。

したがって, 本工法の転圧工には, マカダムローラーが5回, 振動ローラーが15回, タイヤローラーが q 回の組み合わせの転圧を用いることとした。管理基準は工法規定とするが, 品質規定も併用し, γ_d を HMS-25 用締固め条件による γ_d と定めた。

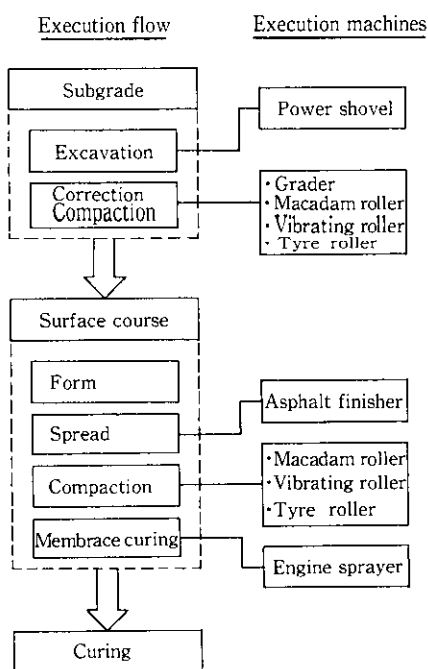


Fig. 7 Execution flow of new method

Table 8 Combination on the number of compaction times and coefficient of compaction

No.	The number of compaction times (N)			Coefficient of compaction
	Macadam roller	Vibrating roller	Tyre roller	
1	5	—	10	90.4
2	10	—	15	93.2
3	5	15	8	100.6
4	10	15	15	100.3

5.3 埋込ボルトの施工法

高炉スラグ・セメント安定処理舗装工法を製品倉庫床へ適用し、製品置台等の固定用ボルトを必要とする場合、埋込長の短い樹脂アンカーを採用すれば、ボルト素材の降伏応力 (1800 kgf/cm^2) 以上の引抜耐力を確保することができる。

6 おわりに

当社では、スラグ破砕材の有効活用の一環として、高炉スラグ・セメント安定処理舗装工法を開発し、製品倉庫床に適用した。適用によって得られた知見をまとめると次のとおりである。

- (1) 材料には、HMS-25の中央ないし上限粒度のものと、HMS-25に対する重量比5%のセメントに最適含水比の水を加え、コンクリートミキサーにて混練したドライミックスのものをを用いる。
- (2) 現地施工は、アスファルト・フィニッシャー、マカダムローラー、振動ローラーおよびタイヤローラーの舗装用機械を用いて転圧、締固めを行い、最大乾燥密度が 2.24 gf/cm^3 以上となるように管理する。
- (3) 設計は、下層の弾性係数と荷重条件によりセメント安定処理層下面の引張応力を検討し、舗装厚を決定する。
- (4) セメントグラウト処理を行うと耐摩耗性が向上する。この方法は補修方法としても有効である。
- (5) 床面へのボルト取付は、埋込長の短い樹脂アンカーを採用することによって対応できる。

高炉スラグ・セメント安定処理舗装工法によって施工された倉庫床面は、白色系の仕上がりになることから、当社では、本工法をホワイトベースと称し、またセメントグラウト処理を施したものをホワイトベースの改良タイプであったため、ホワイトベースBと称しており、現在までに約 15 万 m^2 の製品倉庫床舗装工事が完了した。

最後に、本工法の開発にあたって多大な御協力をいただきました日本道路株式会社および日本舗道株式会社の諸氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) セメント協会: 「RCCP 欧米調査報告書」, (1988), [セメント協会]
- 2) 鉄鋼スラグ協会: 「高炉スラグ路盤設計施工指針」, (1982), 52, [鉄鋼スラグ協会]
- 3) 片岡 洋, 岡本勝昭, 谷敷多穂, 上赤正和: 「接着剤を用いて固定したアンカーボルトの引抜耐力」, 川崎製鉄技報, 20 (1988) 1, 76
- 4) 遠藤 靖: 「長方形荷重と舗装」, 道路建設, (1966) 12, 日本道路建設業協会
- 5) 土質工学会: 「土質工学ハンドブック」, (1982), 861, [土質工学会]