プロセス管理法を用いたウレタンゴム系塗膜防水の品質管理

QUALITY CONTROL OF POLYURETHANE WATERPROOFING MEMBRANES USING THE PROCESS MANAGEMENT METHODS

名知博司 — * 1 法身祐治 — * 2
竹本喜昭 — * 1 石原沙織 — * 3
渡辺 光 — * 4 熊谷健二 — * 5
中島由美子 — * 5 田中享二 — * 6

Hiroshi NACHI — * 1 Yuji HOSSHIN — * 2
Yoshiaki TAKEMOTO — * 1 Saori ISHIHARA — * 3
Hikaru WATANABE — * 4 Kenji KUMAGAI — * 5
Yumiko NAKAJIMA — * 5 Kyoji TANAKA — * 6

キーワード：
ウレタンゴム系塗膜防水, 膜厚, 塗布量, プロセス管理

Keywords:
Polyurethane waterproofing membrane, Thickness of membrane, Application quantity, Process management methods

Polyurethane waterproofing membrane is constructed at the building site by applying liquid material to substrate. Therefore, the performance of waterproofing membrane depends on the quality of construction. In this study, we firstly indicated the way of thinking on process management methods on polyurethane waterproofing membrane, and secondly the experiment was conducted to verify how much process management methods have influence on its performance. Finally, effect of process management methods and problems to be solved were pointed out in conclusion.

1. はじめに

ウレタンゴム系塗膜防水（以下、ウレタン防水と記す）は、施工現場で下地に液状材料を塗布し、その硬化により防水層を形成する湿式工事である。現場施工ゆえに、出来上りの品質が、工事の質に依存される。下地の状態、施工時の環境、作業者の技能などで、防水層の膜厚は不均一になりやすい。

法身¹⁾は、ウレタン防水層の膜厚測定法に関して実験を行い、測定作業性、精度および測定上の制限など、膜厚検査への適用性を検討した。その結果、防水層の構成や測定装置の特徴等を十分に理解すれば、実務で膜厚検査が可能なことを明らかにした。

他方、ウレタン防水のような湿式工事は、出来上がり後の最終品質（膜厚）を管理しても、そこに潜む不具合の本質を把握することが難しい。現場で安定した品質を得るためには、工事途中における品質管理の積み重ねが極めて重要である。より好ましい出来上りの品質は、適切な施工プロセスの積み重ねの結果として得られるものと考えられる。

そこで、本報告はウレタン防水の膜厚管理に着目して、施工途中におけるプロセス管理の進め方とその要点を整理した。次に、プロセス管理を実施した場合と、実施しない場合で、出来上りの膜厚のばらつきに及ぼす影響を把握する目的で、プロセス管理法の検証実験を行った。最後に、ウレタン防水における施工途中でのプロセス管理法の導入効果および技術的課題について考察した。

2. プロセス管理法の考え方

プロセス管理とは、生産過程を管理することで、目標とする品質

を達成するためのマネジメント手法のことである。好ましい結果に至るためには、それに至るためのしかるべきプロセスがある。ゆえに、結果はプロセスの延長であるという理念に基づいている。

ウレタン防水の膜厚は、塗布量管理が一般的である。施工範囲を決めて、指定された膜厚に必要な塗布量を均一に塗布する。これで、施工範囲の膜厚が平均的に確保できるという考え方に基づいた管理方法²⁾である。しかし、ウレタン防水の場合、下地の勾配や平滑性の影響を受けやすく、部分的に膜厚の薄い箇所が生じることが懸念される。

ここで、施工によるばらつきの概念を図1に示す。上段は、管理値の平均とそのばらつきのヒストグラムを模式的に示した。品質管理上の下限を下回ると、不良として扱われる。中段は、管理値のばらつきを考慮して、平均値を割り増したヒストグラムである。これは、アップグレードとなる。一方、下段は、管理値のばらつきを制御・低減したヒストグラムである。施工の質を高めるプロセス管理法の導入は、この下段のヒストグラムの分布を狙う手法である。

ウレタン防水の施工標準は、2層塗りである²⁾。ここで、プロセス管理法を導入した膜厚管理工程を図2に示す。ウレタン塗り工程の中で、専門工事業者が自主検査を実施する。これは、作業者自らがウェットゲージを用いて塗布量のばらつきを確認・是正する方法である。他に、工程終了時または次工程前に、施工者の立会いのもとで、実際の膜厚を測定して、数値管理を行う方法が考えられる。既報¹⁾から、膜厚の測定には、針入式膜厚計や渦電流式膜厚計などの計器が活用できる。

¹⁾ 清水建設技術研究所 博士（工学）
（〒135-8530 江東区越中島3-4-17）

²⁾ ㈱長谷工コーポレーション建設部門

³⁾ 千葉工業大学 准教授・博士（工学）

⁴⁾ レオン工業㈱

⁵⁾ ㈱ダイフレックス

⁶⁾ 東京工業大学 名誉教授・工博

¹⁾ Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

²⁾ Construction Engineering Dept., Haseko Corporation

³⁾ Assoc. Prof., Chiba Institute of Technology, Dr. Eng.

⁴⁾ Leon Kogyo Co., Ltd.

⁵⁾ Dyflex Co., Ltd.

⁶⁾ Prof. Emeritus, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

図1 施工によるばらつきの概念

図2 プロセス管理法による膜厚管理工程

このように、日常的な品質管理としてプロセス検査が実施され、その結果が施工記録として残されていれば、施工段階における現場の施工品質を証明する資料と位置付けることができる。

3. プロセス管理法の検証実験

3.1 実験概要

施工実験は、経験豊富な熟練技能工に対して、塗布必要量を渡し、所定の面積に塗布した。実験の水準は、(1) 通常施工の実施 (2) ウェットゲージによる膜厚管理の実施 (3) 1 層目塗布後の膜厚測定の実施と膜厚の開示 (4) 1 層目塗布後の膜厚の開示と薄い箇所の補修塗りの実施とした。塗布作業における時間の計測と 1 層目硬化後と 2 層目硬化後に、膜厚を測定した。

3.2 施工実験方法

施工実験は、埼玉県戸田市の研修所を利用して、2016 年 10 月 17 日～10 月 19 日にかけて実施した。施工実験の要因と水準を表 1 に示す。ウレタン防水の膜厚は、3mm を目標とした。施工場所の区割りを図 3 に示す。区割りは、1 箇所あたり 24.5m² (3.5m×7m) とした。既存コンクリート下地の上に、石膏ボードと合板で防水下地を作製した。防水層の施工は、ウレタン防水の絶縁仕様を採用し、経験年数 20 年以上の熟練者 1 名が行った。

最初に、下地の勾配や凹凸が膜厚に与える影響を確認するために、レーザー変位計を用いて、図 4 に示す各工区を 1m 間隔で 18 点測定した。

次に、2 液型のウレタンを混練し、施工箇所ごとに所定の塗布量を計量して供給した。防水層の塗布作業は、写真 1 に示すように、1 施工区割りあたり 3 列に防水材を均等に撒き、コテで左右に均して仕上げた。施工途中のウレタン検査は、塗布量管理を前提として、塗布作業中にウェットゲージを使用して、塗り厚を確認しながら施工する方法、1 層目塗布後に、膜厚を測定し、測定箇所膜厚を記入する方法、1 層目塗布後に、膜厚を測定し、測定箇所膜厚を記入し、特に膜厚の薄い箇所を補修塗りする方法を試みた。作業の順序は、A 工区、B 工区、C 工区、D 工区の順で行い、作業時間を計測した。

膜厚の測定は、既報¹⁾を踏まえ、アルミニウム合金薄膜処理された通気緩衝シートを用いて、2 機種の渦電流式膜厚計を使用した。膜厚の測定箇所を図 4 に示す。膜厚は、ばらつきの分布を詳細に検

表 1 施工実験の要因と水準

要因	水準
仕様	絶縁仕様(通気緩衝シート+下塗り+上塗り)
下地	下張り:石膏ボード(t=9.5mm) 上張り:合板(t=3mm)
部位	平場(24.5m ²)
作業者	熟練者(経験年数20年以上)
施工場所の区割り	A工区:塗布量管理(2回塗り 1.5mm+1.5mm) B工区:塗布量管理+ウェットゲージによる管理 C工区:塗布量管理+1層目塗布後の膜厚測定+膜厚の表示 D工区:塗布量管理+1層目塗布後の膜厚測定+補修塗り
膜厚計	渦電流式膜厚計(a,b)
測定	1) 下地の平滑さ 2) 各工程の作業時間 3) 1層目塗布後の膜厚 4) 2層目塗布後の膜厚

図3 施工場所の区割り

討できるように 500mm 間隔で測定した。膜厚は、アクリル板 (t=2mm) を測定中心に設置して、5 箇所を測定し、最大と最小を除いた 3 点の平均値を算出した。また、渦電流式膜厚計の精度を確認するため、12 箇所の防水層を切り取って、ダイヤルゲージ式膜厚計で膜厚を測定した。

3.3 施工実験結果と考察

3.3.1 合板下地面の平滑さ

施工区割りごとの合板下地面の平滑さを表 2 に示す。合板下地面の平滑さは、平均値からの高低差で表示した。施工区割りごとの高低差の標準偏差は、1.6~3.7mm となった。最大勾配 (隣接する測定点の最大高低差) は、約 6mm/m と緩やかで、この程度の不陸はウレタン防水層の塗膜厚さにはそれほど影響しない範囲であると思われる。

3.3.2 各工程の作業時間

各工程の作業時間の集計を表 3 に示す。1 列あたりの撒き時間は 2 分前後、塗布時間が 5~10 分となった。列によって塗布時間にむらがあり、ばらつきが出た。普段の仕事とは要領が異なり、作業者はやや戸惑いながら施工していたものの、作業する順序 (A→B→C→D 工区) による数値の変動、いわゆる習熟効果は見られなかった。

施工区割りで比較すると、ウェットゲージによる膜厚管理を行った B 工区では、塗布時間が 2 分以上延びた。作業途中にウェットゲージで膜厚を測る作業は手間である。全体を通じて、今回の施工区割り (24.5m²) は、30 分前後の作業時間であった。なお、作業時間の集計に、渦電流式膜厚計を用いた膜厚の測定時間と D 工区の補修塗りに要した時間を含めなかった。これらの作業は、手間と時間を要するため、費用対効果を詳細検討する必要がある。

3.3.3 渦電流式膜厚計の精度検証

渦電流式膜厚計で測定した膜厚と、防水層を切り取ってダイヤルゲージ式膜厚計で測定した膜厚の比較を図 5 に示す。

膜厚の平均値を比較すると、ダイヤルゲージ式 3.34mm、渦電流

図 4 膜厚の測定箇所

写真 1 作業状況

表 2 合板下地面の平滑さ

	施工区割り			
	A工区	B工区	C工区	D工区
標準偏差(mm)	1.85	3.68	2.07	1.58
最大値(mm)	2.3	6.3	4.8	2.7
最小値(mm)	-2.8	-6.7	-3.8	-3.1
最大勾配(mm/m)	3.1	3.6	6.3	4.6

式 a 3.23mm、渦電流式 b 3.26mm であった。標準偏差を比較すると、ダイヤルゲージ式 0.975mm、渦電流式 a 0.974mm、渦電流式 b 0.968mm であった。

いずれの渦電流式膜厚計においても、ダイヤルゲージ式膜厚計と遜色ない結果が得られた。両計器とも、実用に供することができる十分な精度を有していると判断できる。

表 3 各工程の作業時間の集計

層	区割り 項目	A工区			B工区			C工区			D工区		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	撒き時間(秒)	100	79	136	113	102	120	106	114	116	108	102	115
	塗布時間(秒)	500	435	563	505	542	622	480	401	520	421	401	602
	小計(秒)	600	514	699	618	644	742	586	515	636	529	503	717
	合計(秒)	1813 (30分13秒)			2004 (33分24秒)			1737 (28分57秒)			1749 (29分9秒)		
2	撒き時間(秒)	119	123	129	117	114	118	168	188	152	178	145	144
	塗布時間(秒)	361	309	440	497	527	601	469	344	532	301	330	467
	小計(秒)	480	432	569	614	641	719	637	532	684	479	475	611
	合計(秒)	1481 (24分41秒)			1974 (32分54秒)			1853 (30分53秒)			1565 (26分5秒)

図5 渦電流式膜厚計と切り取りサンプルの膜厚の比較

3.3.4 渦電流式膜厚計を用いた膜厚の分布

渦電流式膜厚計で測定した膜厚のヒストグラムを図6に示す。紙面の都合で、渦電流式膜厚計aのデータのみ表示した。

A工区、C工区、D工区は同じ施工法で1層目を塗布した。B工区は、1列につき1回ウェットゲージで膜厚を確認した。1層目の膜厚の平均値（目標1.5mm）は1.54～1.60mm、標準偏差は0.314～0.361mmとなった。2層目塗布前にC工区とD工区は1層目の膜厚を作業者に開示した。さらに、D工区は、1層目で1.20mmを下回った箇所を補修塗りした。2層目の膜厚の平均値（目標3mm）は、3.16～3.30mm、標準偏差は、0.469～0.542mmとなった。

全般的な傾向として、膜厚の平均値は、目標膜厚に近い値に収まった。これは、ウレタン混練の際に、所定の塗布量を計量してから

供給したことが影響したと考えられる。すなわち、供給されたウレタンを全量均一に均すことができれば、平均膜厚は目標値に近づく。この結果から、塗布量管理の有効性が示唆された。

次に、膜厚検査の有効性を検証するため、目標値 $\pm 10\%$ の膜厚の分布（図6中に枠表示）に着目し、20%占有率と定義した。20%占有率と標準偏差の関係を図7に示す。標準偏差が減少すれば、20%占有率は増加する。1層目の標準偏差と20%占有率には、負の相関が認められた。一方、2層目に着目すると、C工区とD工区で、20%占有率が顕著に増加した。図6のヒストグラムの分布からも分かるように、C工区やD工区では、1層目の膜厚を開示したことで、2層目の膜厚に対する修正効果が表れたと考えられる。

図7 20%占有率と標準偏差の関係

図6 膜厚のヒストグラム（渦電流式a）

表4 プロセス管理法の導入効果と技術的課題

項目	手法	品質管理の進め方	導入効果	技術的課題
塗布量管理	塗布量管理法	・施工範囲の中で、指定された膜厚に必要な塗布量を決めて塗布する。	・膜厚の平均値は、目標にした膜厚に近い値になる。 ・施工面積が狭いほど有効に機能する。 ・下地の勾配や平滑度の影響を受けやすく、部分的に膜厚の薄い箇所が生じる。	・防水材の可使時間や作業者の技量に合わせて、適切な施工面積の区画化が必要である。 ・缶表示を質量ではなく容積で表示するなど、現場の使い勝手を工夫する。
プロセス検査	ウェットゲージ	・塗り作業中に、作業者自らがウェットゲージにて、膜厚を測る。薄い箇所や厚い箇所があればその場で是正する。	・ウェットゲージは、部分的な確認になるため、全体的に膜厚を是正することは難しい。 ・ウェットゲージを継続的に使用することは、作業者の技量向上に有効なツールである。	・ウェットゲージによる測定値を記録することが難しい。 ・現状のウェットゲージは、測る時の姿勢と操作性が悪い。
	渦電流式膜厚計	・2層目塗りの前に、ウレタン1層目塗り後の膜厚を測定し、作業者に開示する。作業者は予め膜厚の不足している薄い箇所を確認した上で、次工程の作業を行う。	・渦電流式膜厚計は十分な精度があり、作業する前に膜厚の分布を提示できれば、膜厚のばらつきを低減することができる。 ・渦電流式膜厚計を用いた測定には相応の時間を要する。	・膜厚の集計を現場でリアルタイムに行うのは難易な作業である。 ・膜厚の測定から検査結果の記録・保管に至るまでの一連のプロセスをIT化して、自動処理できるとよい。

4. プロセス管理法の導入効果と技術的課題

プロセス管理法の導入効果と技術的課題を整理して表4に示す。

(1) 塗布量管理

膜厚を目標値に近づける管理法として、塗布量管理は有効である。

1人が塗布できる可使時間を考慮すると、施工面積はほぼ決まってくる。ここに、品質・コストを考慮した施工区画の考え方を図8に示す。施工区画を増やせば、膜厚のばらつきが低減される反面、施工手間が増えて、コストが上がる。品質とコストはトレードオフの関係にある。1区画の施工面積は、防水材の可使時間と作業者の技量などを考慮して決めることが、実用的である。また、計量手間を極力削減するために、容器の混入形態や表示についても工夫する余地がある。

図8 品質・コストを考慮した施工区画の考え方

(2) ウェットゲージによる膜厚のばらつき是正

自主的な検査として実施したウェットゲージ法は、部分的な確認になるため、全体的に膜厚を是正することは難しい。作業者からは、コテ使いのくせなどが分かり、個人の技量向上に有効であるとの意見があった。日常教育的なツールとしての活用が考えられる。しかし、現状のウェットゲージは、記録の保存が難しく、測る時の姿勢も悪い。日常的な使い方を踏まえて、改善の余地がある。

(3) 渦電流式膜厚計による膜厚の検査

本実験から、渦電流式膜厚計を用いて、2層目を塗る前に膜厚を測定し、作業者に開示することで、膜厚を修正する効果が認められ

た。一方で、渦電流式膜厚計を用いた膜厚測定は、かなりの時間を要しており、また、現場でリアルタイム集計することも難易である。

防水工事の実務で、このようなプロセス検査を実施する場合、プロセス検査労務の取り扱いについて、関係者で協議する必要がある。

(4) プロセス検査のIT化

施工管理の実情を踏まえると、労務不足・高騰で、品質管理・検査を手作業で行えるようなゆとりがない。膜厚の測定から検査結果の記録・保管に至るまでの一連の作業をIT化によって自動処理できるような検査プロセスを検討すべきと考える。

5. まとめ

本報告は、ウレタン防水の施工工程におけるプロセス管理の進め方とその要点を整理し、プロセス管理を活用した品質管理手法の防水工事への導入可能性について検討した。

その結果、ばらつきの大きい実験データではあるが、プロセス管理法の有効性が確認された。しかし、実務にプロセス管理法を導入するには、塗布量管理法の標準化や労務軽減のための膜厚検査の簡略化など、技術的課題が残されている。今後も、これらの技術的課題の解決に向けて研究を継続してゆく。

謝辞

本研究は、(一社)建築防水安全品質協議会・建築防水品質委員会の活動の一環として行われたものである。丸山好清氏、山崎元博氏、中村翔太郎氏、河又大氏、大西允人氏、三原徹氏、野沢正志氏の関連各位に幸甚の謝意を表すものである。

参考文献

- 1) 法身ほか：ウレタンゴム系塗膜防水層の膜厚測定の特徴とその信頼性に関する調査研究，日本建築学会技術報告集，第21巻，第47号，pp.23-27，2015年2月
- 2) 日本建築学会編：建築工事標準仕様書・同解説 JASS8、2014年11月

[2017年6月3日原稿受理 2017年7月31日採用決定]