

論文 鋼板格子筋を用いて配置法の異なる PCM 増厚補強を施した下水用マンホールの補強効果に関する実験研究

熊谷 光記*1・水口 和彦*2・師橋 憲貴*3・阿部 忠*4

要旨: 本研究は、老朽化が進む下水用マンホールの補強工法の開発を目的として、鉄筋に替わる補強筋に鋼板格子筋を用いた接着剤塗布型ポリマーセメントモルタル増厚補強を施した供試体に側方曲げ試験による静的載荷試験を実施した。また、施工性を考慮して鋼板格子筋の配置法を変えた2種類の供試体を作製し、鋼板格子筋の配置の違いが耐荷性能に及ぼす影響について検討を行った。その結果、基準となる供試体に対して各種格子筋を配置して20mm増厚補強した供試体は1.66~1.72倍の補強効果が得られており、格子筋の配置の違いが耐荷性能に影響を及ぼさないことを示した。

キーワード: 下水道マンホール, 鋼板格子筋, 耐荷性能, 補強効果

1. はじめに

現在、我が国の下水道普及率は80%を超え、総延長距離は約49万kmに及んでいる。また、我が国の下水道施設の建設の特徴として、短期間に集中的に整備されたことから、今後20年程度で供用後50年が経過する下水道が急増することが予測されている^{1,2)}。よって、この膨大なストックを有する下水道施設においては、計画的に調査・点検を実施し、適切に補修・補強を施すことで長寿命化を図るとともに再構築事業を計画的に平準化したうえで実施することが喫緊の課題とされている。

一般的にコンクリート構造物における化学的劣化としては中性化、塩害作用、アルカリシリカ反応などが知られているが、下水道施設においては硫化水素による腐食劣化が著しいとされている。物理的要因としては活荷重の影響によるひび割れの発生、地震動に伴う損傷などが挙げられる。また、建設当時の設計荷重の変遷に伴い、設計荷重が増加されている。したがって、老朽化対策および設計荷重の増加に対応するための補修・補強法の開発が必要となる。これらのことから筆者らは、道路直下に建設される下水道マンホール（以下、マンホールとする）に着目し、長寿命化が期待できる補強対策について新技術を提案し、実用性を評価することを目的とした。

そこで本研究では、化学的要因により老朽化したマンホールの耐荷力の向上が図れる補強法について、コンクリート製マンホールを用いて静的載荷実験を行い、耐荷性能を検証する。実験では、基準となる新設マンホール供試体、腐食劣化などによる断面欠損20mmを考慮し、これを基準となるマンホール供試体と同厚となるように2種類の接着剤とポリマーセメントモルタル（以下、

PCMと称す）を用い、さらに耐荷性能の向上を図るために鉄筋に替わる新たな補強材として、一面加工した鋼板格子筋（以下、格子筋と称す）を配置した供試体を作製した。また、格子筋に関しては、現場での施工性を考慮して形状寸法の異なる2種類の格子筋を用いて配置した供試体を作製し、合計3種類の供試体に対し側方曲げ試験を実施し、耐荷性能および補強効果を検証することで、老朽化したマンホールの更生工法の一助とする。

2. マンホールの現状

供用後約50年が経過したマンホールの損傷状況の一例を図-1に示す。

図-1(1)は、車両の活荷重の影響によりマンホールのふた直下に発生したひび割れ損傷である。マンホールに対して垂直方向にひび割れが進展しており、最大ひび割れ幅は2mmを超えている。下水道管路施設の点検・調査マニュアル³⁾における判定基準によると、評価ランク(b)に該当する損傷である。図-1(2)は、管きよとの接合部に近い位置での損傷であり、上部の白色個所は既に部分補修がなされており、補修箇所から縦方向へひび割れの進展がみられ、評価ランクは(c)に該当する損傷である。図-1(3)は、硫化水素の影響でマンホール表面全体が腐食劣化し、断面欠損している。

以上のように、現在供用されているマンホールの点検・調査において、腐食劣化やひび割れ損傷が数多く報告されており、これらのマンホールに対しては適切な表面補修や耐荷性能の向上が図れる補強対策を講じる必要がある。

*1 日本大学大学院 生産工学研究科博士後期課程土木工学専攻 (学生会員)

*2 日本大学 生産工学部土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 生産工学部建築工学科教授 博士(工学) (正会員)

*4 日本大学 名誉教授 博士(工学) (正会員)



(1) ひび割れ損傷



(2) 補修後のひび割れ損傷



(3) 硫化水素による腐食

図-1 マンホールの劣化損傷

3. マンホール供試体の使用材料

3.1 使用材料

(1) コンクリートおよび鉄筋

本実験に用いたマンホール供試体には、普通ポルドランドセメントと 5mm 以下の砕砂および 5mm~20mm の砕石 (JIS-A5005) を使用し、コンクリートの要求性能は、東京都下水道設計標準に規定される 18N/mm² を目標として配合した。また、本実験では破壊時に脆性的な圧壊が想定されることから、その対策として壁厚中央部に SD345 D10 を用心鉄筋として配置した。ここで、コンクリートの配合条件を表-1 に示す。なお、実験時のコンクリートの圧縮強度は 22.1N/mm² であった。

(2) ポリマーセメントモルタル

増厚補強に使用するモルタルには、PCM を用いた。本実験で使用した PCM は、下水道施設における腐食劣化が生じたマンホール等の補修材として市販されている。また、コンクリートとの付着性能が高く、吹付け施工にも適している。PCM は、吹き付け用であることから、専用のプレミックス材が使用されており、材令 3 日での圧縮強度は東京都下水道局規格値である 25.0 N/mm² 以上の強度発現が可能な材料である。ここで、本実験に用いたモルタルの配合条件を表-2、材料物性値を表-3 に示す。なお、実験時の圧縮強度は供試体 3 本の平均で 53.0N/mm² であった。

(3) 鋼板格子筋

格子筋の製作方法を図-2 に示す。格子筋の製作方法は、縞鋼板あるいは鋼板を設置し、直接レーザーで格子状に切断加工する (図-2(1))。切断加工された格子筋は図-2(2) に示す形状となり、軸直角方向 (主鉄筋) および軸方向の配力筋、それぞれの断面積を任意で切断加工することが可能である。切断加工された格子筋を補強部材に合わせて折り曲げ加工することが可能で、必要に応じて防錆材を塗布する (図-2(3))。

以上のように、鋼板を直接レーザー加工することから鉄筋を用いた従来の加工・組み立て作業に対してプレキャスト化が図られた材料である。また、一面加工であることから断面の薄肉化が可能で死荷重の軽減が図れる。な

表-1 コンクリートの示方配合

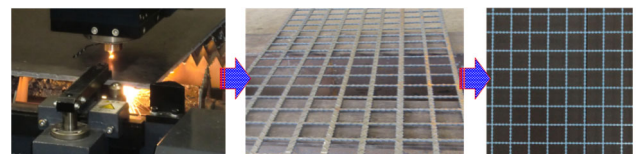
供試体	W/C (%)	単位体積重量(kg/m ³)				
		水	セメント	粗骨材	細骨材	混和剤
M-N M-GV M-GH	84.0	185	221	975	874	2.32

表-2 PCM の示方配合

項目	単位体積重量(kg/m ³)		
	プレミックス粉体	ポリマーエマルジョン	水
耐酸性モルタル	1939	106	166

表-3 PCM の材料特性値

項目	物性値	
単位容積重量	2.1	
耐硫酸性	重量変化	+4.0(%)
	浸透拡散抵抗性	2.0(mm)
付着強度	1.8(N/mm ²)	
長さ変化率	-0.08%	



(1)レーザー切断 (2)格子状に切断 (3)防錆材塗布

図-2 格子筋の製作方法

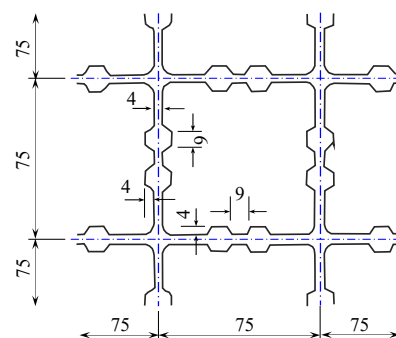


図-3 格子筋の形状寸法

お、格子筋は既に各種材料試験や付着試験、さらには、構造実験が実施^{4,5,6)}されており、市販材料として実構造物の補強法にも採用されている。本実験では、図-3に示すように厚さ4.5mmの一般鋼板を用い、格子間を75mmとして格子間中央部には付着性を高めるために高さ4mmの突起を設ける構造とした。なお、本実験ではマンホールの蓋の直径が600mmであることを考慮するとともに、格子筋の配置方法が耐荷性能に及ぼす影響を検証することから、格子筋の外寸は幅600mm、高さ825mmおよび幅1,150mm、高さ425mmの矩形形で切断した後に、マンホール内径に合わせて曲げ加工を施した2種類の格子筋を用いてそれぞれ補強を行った。ここで、本実験に用いた格子筋の材料特性値を表-4に示す。

表-4 格子筋の材料特性

一般鋼板 SS400	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
格子筋	325	559	200

表-5 接着剤の材料特性値

項目	浸透性接着剤	付着用接着剤	備考	
外観	主剤	無色液状	白色ペースト状	異物混入無
	硬化剤	無色液状	青色液状	異物混入無
混合比	10 : 3	5 : 1	重量比	
硬化物比重	1.20	1.42	JIS K 7112	
圧縮強さ	104.4 N/mm ²	102.9 N/mm ²	JIS K 7181	
圧縮弾性係数	3,172 N/mm ²	3,976 N/mm ²	JIS K 7181	
曲げ強さ	92.8 N/mm ²	41.6 N/mm ²	JIS K 7171	
引張せん断強さ	14.0 N/mm ²	14.9 N/mm ²	JIS K 6850	
コンクリート 付着強さ	2.6 N/mm ²	3.7 N/mm ² 以上 または母材破壊	JIS A 6909	

(4) 浸透性接着剤および付着用接着剤

腐食劣化したマンホール内側のコンクリート表面に増厚補強を行う場合、まずは内側内面をブレード等で衝撃を与えながら削り作業を行うのが一般的であるが、その際に既存コンクリート表面付近での微細なクラックが発生することが懸念される。そこで、本研究ではひび割れ補修用浸透性接着剤（以下、浸透性接着剤と称す）を用いた。この浸透性接着剤は、劣化したコンクリート部材の表面を強固にすることが可能で、ひび割れ幅0.05mmまでの浸透が可能な接着剤である⁷⁾。ここで、浸透性接着剤の材料特性値を表-5に示す。

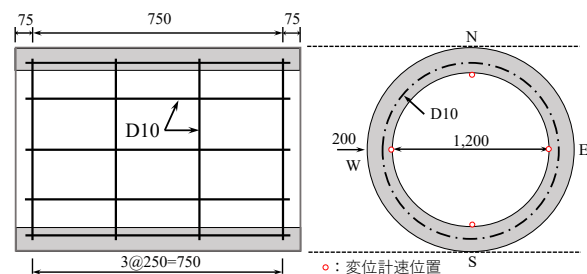
次に、既存コンクリートとPCMとの界面には、付着性を高めるために高耐久型エポキシ系樹脂接着剤（以下、付着用接着剤と称す）を用いた。この接着剤は、既設コンクリートとフレッシュモルタルもしくはフレッシュコンクリートとの付着性能を高めるために開発された材料である⁷⁾。よって、本実験においても界面の付着性能を向上させることで破壊時まで一体性を確保させることを目的として使用した。ここで、付着用接着剤の材料特性値を表-5に併記する。

4. マンホール供試体の概要

本実験では、基準とする通常マンホール供試体に対して、内面20mmに形状の異なる2種類の格子筋を用いて配置法を変えた後、PCMで増厚補強した2種類の供試体を作製した。ここで、各供試体の形状寸法および概要を図-4に示す。

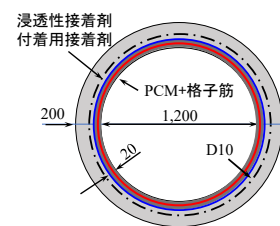
(1) 基準供試体

実験に用いる基準供試体の形状寸法は、A政令都市下水道局の下水道施設標準図を参考に、現場打2号マンホールを作製した。よって、供試体の寸法は、内径1,200mm、壁厚200mm、外径1,600mm、長手方向900mmである。また、用心鉄筋として壁中心部に鉄筋SD345 D10を配置した。これを基準として比較検討を行う。供試体名称は

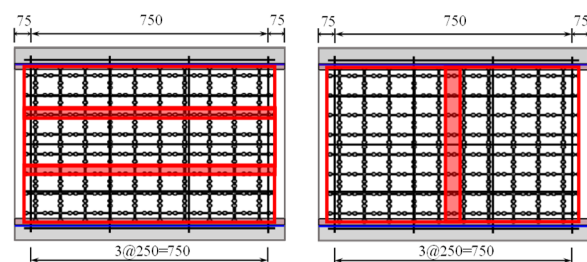


(1) 側面図

(2) 供試体M-N断面



(3) 供試体M-GV, GH断面



(4) 供試体M-GVの格子筋配置

(5) 供試体M-GHの格子筋配置

図-4 供試体形状

M-N とする。

(2) 補強供試体

マンホール内面に補強を行う供試体の寸法は、壁厚、外径、長手方向の寸法は基準供試体と同一とし、化学的劣化により20mm内面が減厚したことを想定して壁厚160mmで作製した。

補強手順としては、PCMとの付着性を高めるためにコンクリート表面に3mm程度の目荒らしを設けた。本実験では、幅600mm、高さ825mmの格子筋（供試体の

名称を M-GV とする。) および幅 1,150mm, 高さ 425mm の格子筋 (供試体の名称を M-GH とする。) を各 8 枚使用し, 格子筋は直径 1240mm に併せてあらかじめ円形に折り曲げ加工を施した。これらの格子筋をそれぞれマンホール内側に設置する。なお, 格子筋の配置方法は図-4(4), (5) に示すとおりである。格子筋の設置は, コンクリートネジを用いて行った。設置後, 浸透性接着剤を専用のリシガンで吹き付けにより塗布する。15 分後に付着用接着剤をリシガンにより吹き付けを行う。なお, 付着用接着剤は格子筋と PCM との付着力を高めることを目的として格子筋にも塗布した。接着剤塗布後, 1 層目 10mm を吹き付けし, その後, 残りの 10mm を吹き付け補強した後, 表面仕上げを行い完成とした。

5. 実験方法

本実験は, 下水道用マンホール改築・修繕工法に関する技術資料⁸⁾の工法の要求性能に関する試験方法に基づき, JSWAS (日本下水道協会規格) A-11⁹⁾に定義されている図-5 に示す側方曲げ試験を実施した。実験では, 図-5 に示すように供試体を水平に設置し, 上部より線荷重を載荷させる。

荷重載荷条件は 1 軸圧縮単調載荷とし, 荷重載荷方法は, 構造物試験機自動計測制御システム (載荷容量 5,000kN) を用いて, 荷重を 5kN ずつ増加させる段階載荷とした。また, 荷重 25kN 増加ごとに荷重を 0kN に除荷させる包絡荷重として繰り返し荷重を載荷した。計測は, たわみの計測を供試体内面の上部, 下部および側面の 2 ヶ所に変位計を設置 (図-1) し, 荷重 5kN 増減ごとに行った。

6. 結果および考察

6.1 実験耐荷力

実験より得られた各供試体の最大耐荷力を表-6 に示す。なお, 表中に示す耐荷力は, 本実験に用いた供試体の長さは 0.9m であるが, これを 1m 当たりに換算したものである。

表-6 より, 供試体 M-N の耐荷力は 83.8kN/m であった。これを基準に耐荷力の比較検討を行う。

2 種類の接着剤および内面 20mm にマンホールの長手方向に格子筋の長辺を配置 (図-4(4)) して PCM で増厚補強し, 供試体 M-N と同一の壁厚とした供試体 M-GV の耐荷力は 144.3kN/m で, 供試体 M-N に比して 1.72 倍の補強効果となっており, 格子筋を配置することで大幅な耐荷力の向上が確認された。

次に, 内面 20mm に 2 種類の接着剤およびマンホールの円周方向に格子筋の長辺を配置 (図-4(5)) して PCM で増厚補強し, 供試体 M-N と同一の壁厚とした供試体

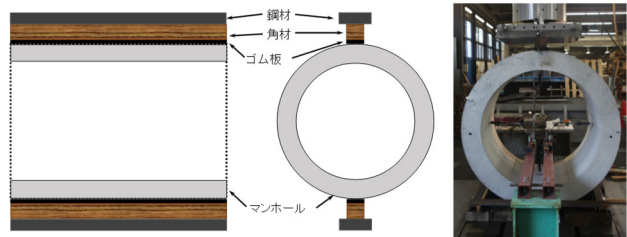


図-5 実験方法および状況

表-6 耐荷力および耐荷力比

供試体	最大載荷荷重 (kN)	耐荷力 (kN/m)	耐荷力比
M-N	75.4	83.8	—
M-GV	129.9	144.3	1.72
M-GH	125.6	139.6	1.66

※耐荷力 = 最大載荷荷重 / 0.9

M-GH の耐荷力は 139.6kN/m で, 供試体 M-N に比して 1.66 倍の補強効果となっており, 供試体 M-GV と同様に格子筋を配置することで大幅な耐荷力の向上が確認された。また, 供試体 M-GV との比較では, 0.96 倍と若干下回ってはいるもののほぼ同等の補強効果が得られている。

よって, 本提案の格子筋を用いた増厚補強は, 耐荷性能の向上を図る更生工法として有効であると考えられる。また, 本実験の範囲内においては格子筋の配置法が耐荷性能に及ぼす影響はないものと判断できる。

6.2 マンホールの変形挙動

各供試体の内面上部, 下部, 側面 2 ヶ所の荷重とたわみの関係を図-6 に示す。また, 比較のために各供試体の上部のたわみ挙動のみをまとめたものを図-6(4)に示す。なお, 計測位置については, 図-4 に示すとおりである。

図-6(1)より, 供試体 M-N の荷重とたわみの関係は, 上部においては最大荷重 75.4kN までは線形的な増加を示しており, 最大荷重時のたわみは 1.515mm であった。ひび割れの発生に伴い荷重の抜けが生じ, たわみが急激に増加している。その後の荷重増加においてはたわみの増加が著しく, 最終的な最大たわみは 31.14mm であった。また, 側面 2 ヶ所のたわみは同様の傾向を示しており最大荷重 75.4kN までは, 比較的線形的なたわみの増加を示している。最大荷重時のたわみは, それぞれ 2.95mm, 3.42mm であった。また, 最終的な最大たわみは 26.84mm, 21.30mm であった。

図-6(2)より, 供試体 M-GV の荷重とたわみの関係は, 上部ではひび割れが発生した荷重 115kN までは線形的なたわみの増加を示しており, 荷重 115kN 時のたわみは 2.21mm であった。供試体 M-N と同様にひび割れ発生に伴いたわみの増加がみられるが, 増厚内に格子筋を配置

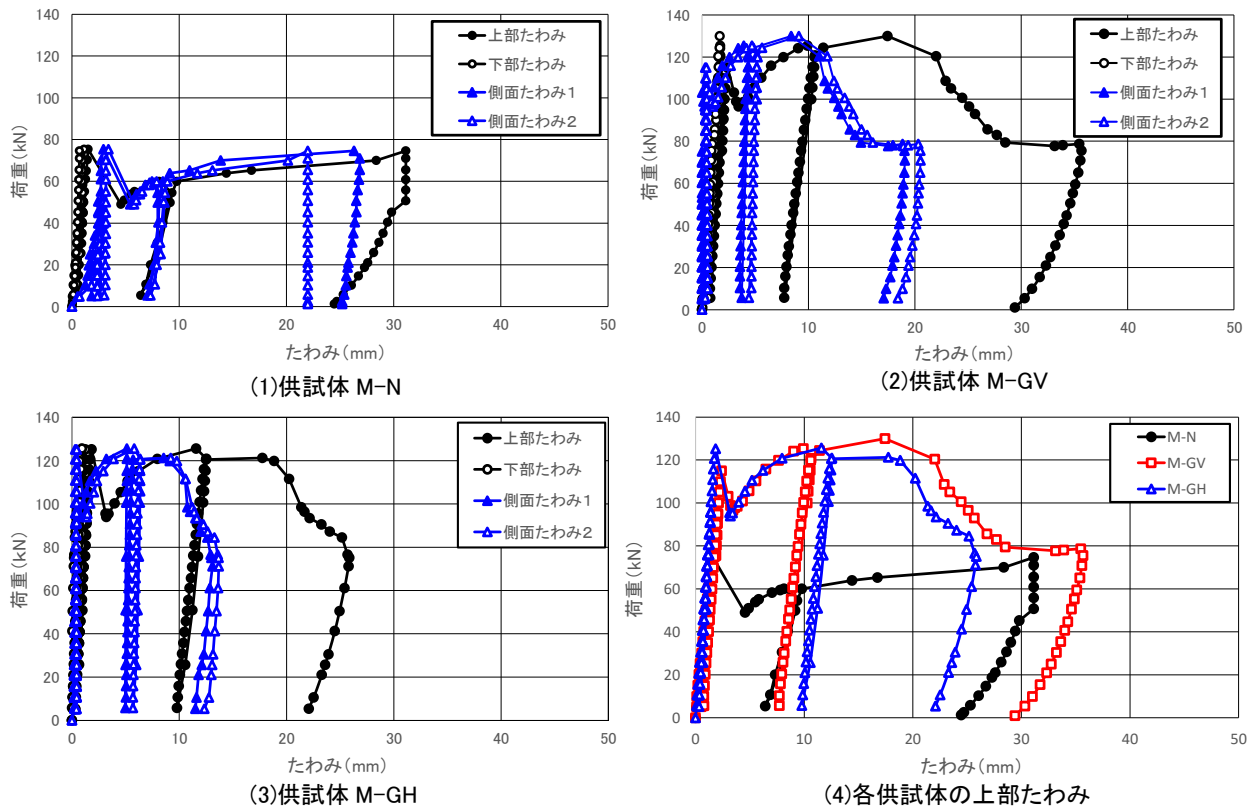


図-6 荷重とたわみの関係

したことから、その後の荷重増加に対してもたわみの増加傾向は比較的緩やかであり、最大荷重 129.9kN 時のたわみは 17.45mm であった。また、側面のたわみは同様の増加傾向を示しており、ひび割れ発生時のたわみは、それぞれ 0.31mm, 0.40mm で、最大荷重載荷時が 8.38mm, 9.10mm であった。

図-6(3)より、供試体 M-GH の荷重とたわみの関係は、上部では荷重 125kN までは線形的なたわみの増加を示しており、荷重 125kN 時のたわみは 1.84mm である。その後は、ひび割れの発生に伴いたわみの増加がみられるが、供試体 M-GV と同様に格子筋を配置したことから急激なたわみの増加は見られず、比較的緩やかな挙動を示している。最大荷重 125.6kN 時のたわみは 11.58mm であった。側面のたわみは側面 1,2 ともに同様の挙動を示しており、ひび割れ発生時のたわみは、それぞれ 0.31mm, 0.44mm で、最大荷重載荷時が 5.11mm, 5.81mm であった。格子筋の配置方法の違いによる比較では、変位量の違いは見られるもののほぼ同様の挙動を示していることから、配置法の違いが変形挙動に及ぼす影響は少ないものと判断できる。

6.3 破壊状況

各供試体の破壊状況を図-7 に示す。

供試体 M-N の破壊状況は図-7(1)より、供試体の上部、下部では最大荷重載荷時である 75kN 付近までひび割れは確認されず、最大荷重載荷時に供試体内面よりひび割れ

が発生し、荷重の抜けが生じた。その後の荷重増加によりひび割れは鉛直方向に進展し最終的には貫通に至った。側面においても同様に、最大荷重載荷まではひび割れは認められず、最大荷重作用時に側面の外側にひび割れが発生し、その後の荷重載荷によって水平方向にひび割れの進展がみられた。最終的には、マンホール内部に圧壊が生じた。

供試体 M-GV の破壊状況は図-7(2)より、供試体の上部、下部は荷重 115kN 付近で初期ひび割れが発生したが、供試体 M-N に比してひび割れ長さは短く、PCM 層内であった。これは、PCM 内に配置した格子筋によるものと考えられる。その後の荷重増加に伴ってひび割れは徐々に進展し、破壊に至った。また、側面のひび割れは、上部、下部同様に荷重 115kN 付近で初期ひび割れが発生したが、上部、下部同様に供試体 M-N に比してひび割れ長さは短いものであった。その後の荷重増加でひび割れは水平方向に進展し破壊に至った。なお、側面においては破壊時においても既存コンクリート部までのひび割れ進展となっている。また、破壊時においても既存コンクリート部と PCM との界面ではなく離は見られなかったことから、2 種類の接着剤を使用することで界面の付着性が高まり破壊時まで一体性が保たれていたものと推測される。

供試体 M-GH の破壊状況は図-7(3)より、供試体の上部、下部は荷重 125kN 載荷後の荷重除荷中である 120kN



(1)供試体M-N

(2)供試体M-GV

(3)供試体M-GH

図-7 破壊状況

付近でひび割れが発生したが、供試体 M-GV 同様に供試体 M-N に比してひび割れ長さは短いものであった。その後の荷重増加に伴いひび割れは進展し、破壊に至った。また、側面のひび割れは上部・下部同様に荷重除荷中の 120kN 付近で発生し、その後の荷重増加に伴い水平方向へのひび割れの進展がみられ破壊に至ったが、PCM 層へのひび割れの進展は認められなかった。供試体 M-GV との比較では、ほぼ同様のひび割れ形状を呈していることから、格子筋の配置の違いが破壊形状に与える影響はないものと思われる。

以上より、格子筋を配置することでひび割れ進展の抑制が認められるとともに、格子筋の配置法にかかわらず同様の破壊形状を示した。

7. まとめ

本実験では、2 種類の接着剤および格子筋を用いてマンホール内面を 20mm 減厚した供試体に増厚補強を行い静的載荷による側方曲げ試験を実施し、補強効果について検証を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 耐荷性能について、基準供試体に対して同一厚さで格子筋を配置して増厚補強を施した供試体 M-GV、GH の耐荷力比は、それぞれ 1.72 倍、1.66 倍となることから、格子筋を挿入することで大幅に耐荷性能が向上する結果が得られた。
- (2) 荷重とたわみの関係より、格子筋を配置することでひび割れ発生後においても急激なたわみ増加を抑制することが確認された。
- (3) 破壊状況より、全ての供試体において最終的に供試体の上部・下部の内面側、側面は左右の外側に発生したひび割れが進展し、破壊に至った。また、補強供試体では破壊時においても界面での離れは認められないことから 2 種類の接着剤を併用することで一体性が確保できる。
- (4) 本提案の格子筋を用いた接着剤塗布型 PCM 補強法

は、十分な耐荷性能を有していることから、マンホールの更生工法として実用性があるものと判断できる。

(5) 格子筋の配置法の違いによる補強効果および変形挙動への影響は、本実験の範囲内においては認められなかったことから、実施工においては施工条件に応じて配置法を使い分けることを提案する。

参考文献

- 1) (公社)日本下水道協会 HP：都道府県別の下水処理人口普及率，2023.4
- 2) 国土交通省 HP：下水道の維持管理「ストックマネジメントの推進」，2023.4
- 3) 日本下水道協会：下水道管路施設の点検・調査マニュアル(案)，2013.6
- 4) 阿部忠，新田裕之，塩田啓介，吉岡泰邦：展張格子筋を用いたボックスカルバートの補強技術および補強効果の検証，セメント・コンクリート論文集，Vol.71，pp.540-547，2018.3
- 5) 吉岡泰邦ほか：メタルグリット筋を用いて接着剤塗布型 PCM 増厚補強した RC 柱の耐荷性能および破壊状況，コンクリート構造物の補修・補強アップグレード論文集，第 21 巻，PP.574-579，2021.10
- 6) 新田裕之，水口和彦，阿部忠，塩田啓介：格子鋼板筋を配置した MGC 床板の耐荷力および耐疲労性の検証，コンクリート工学会年次論文集，Vol.40，No.2，pp.361-366，2018.7
- 7) 伊藤清志，阿部忠：2 タイプの接着剤を塗布した RC 床版の上面補修法の耐疲労性の評価および施工技術，コンクリート工学会年次論文集，Vol.39，No.1，p p.2131-2136，2017.7
- 8) (公財)日本下水道新技術機構，下水道用マンホール改築・修繕工法に関する技術資料，2014.12
- 9) 日本下水道協会：下水道用鉄筋コンクリート製組み立てマンホール JSWAS A-11-2005，2005.4