

論文 鉄筋との重ね継手を有する CFRP コンクリートはりの曲げ挙動

椎名 貴快^{*1}・伊藤 忠彦^{*2}・潮田 和司^{*1}・松野 繁宏^{*3}

要旨：連続繊維補強材の材料特性を有効活用した一例として、シールド直接発進・到達工法における立坑開口部補強材への適用が挙げられる。本研究では、熱可塑性樹脂で表面被覆された CFRP 補強材を開発し、鉄筋との重ね継手を有するコンクリートはりの曲げ載荷実験を実施し、その継手性能を確認した。実験の結果、重ね継手長を許容応力度設計法による CFRP の基本定着長とした場合、継手位置に関わらず良い性能が得られた。また重ね継手長を限界状態設計法による鉄筋の基本定着長として曲げ区間に設けた場合、力学的に厳しい構造となったが、せん断区間に設けた場合は耐力的に問題のないことを確認した。

キーワード：重ね継手, CFRP 補強材, CFRP コンクリートはり, 曲げ挙動

1. はじめに

シールド工法における発進・到達立坑の土留め壁は、鉄筋コンクリート部材や鋼製部材により構築されている。一般に、シールド発進・到達は、背面地盤を薬液注入工法、高圧噴射攪拌工法や凍結工法等で自立させた後、人力により土壁面を開口している。しかし、地山の開放に伴う施工上の危険性や、地盤改良に多額の費用と工期を要するなどの問題があった。

そこで、シールド発進・到達立坑の開口部に、切削性に優れ、大深度での土圧・水圧に耐えうる性能を有した新素材コンクリートを適用する工法が開発された¹⁾。本工法は、地盤改良が軽減または省略でき、かつシールドのカッタービットで壁面を直接切削できるので、工期・工費が軽減できるなどの利点がある。この開口部の部材補強筋には高水準の曲げ耐力と良好な切削性が要求されるが、著者らは本工法に適用可能な連続繊維補強材として、熱可塑性ポリサルフォン樹脂によって表面被覆された炭素繊維連続補強材（以下、CFRP 補強材）を開発した。

本論文は、開発した CFRP 補強材の基本特性を概略的に述べ、実際の立坑開口部周囲で必要

となる鉄筋との重ね継手の性能を確認するため、軸方向引張補強材に CFRP 補強材と鉄筋との重ね継手を有するコンクリートはり部材を作製し、一方向繰返し中央 2 点静的曲げ載荷実験により、その力学的挙動とひび割れ性能を把握し、直接発進・到達工法への適用性に関して検討した。

2. CFRP 補強材

開発した CFRP 補強材は、高強度・高弾性率の特徴を有する PAN 系炭素繊維を用いて特殊な熱硬化性樹脂をマトリックス樹脂とし、表面被覆樹脂材に耐熱性・耐アルカリ性・CFRP 層との接着性に優れた熱可塑性 PSF 樹脂を用いた引抜成形法によって製造される新素材である（図-1 参照）。エンボス加工を施した被覆樹脂によって、コンクリートとの高い付着性を期待することができる。

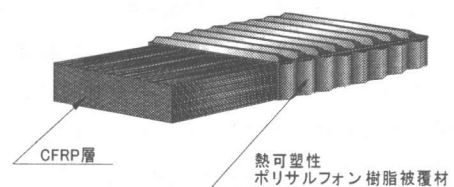


図-1 CFRP 補強材概略図

*1 西松建設(株)技術研究所土木技術研究課 材料・施工グループ 工修（正会員）

*2 西松建設(株)技術研究所土木技術研究課 材料・施工グループ係長 博士（工学）（正会員）

*3 宇部日東化成(株)研究開発部技術開発センター主任

表-1 使用材料の諸元

呼 称	断面形状	断面寸法 (mm)	単位重量 (g/m)	公称断面積 (mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断時伸び (%)	付着応力度* (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D10	異形鉄筋	φ 10	560	71.22	521	20.4	—	186
D22	異形鉄筋	φ 22	3040	387.1	564	21.5	—	193
CFRP	矩形	5.5×20.5	162	76.0	2180	1.6	10.0 23.0	147

* 鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法(JSCE-G 503-1999)を参考にして、CFRP 補強材のすべり量が
0.002B (=0.04mm) 時の付着応力度および最大付着応力度の値を示す。

表-2 コンクリート配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ 範囲 (cm)	空気量 範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材*1 S	粗骨材*2 G	AE 減水剤*3 A
20	8±2.5	4.5±1.5	53	42	156	294	764	1104	C×0.25%

*1 千葉県富津産(陸砂) *2 栃木県葛生産(砕石) *3 ポゾリス No.70

表-3 供試体諸元

供試体 NO.	軸方向 圧縮鉄筋	軸方向 引張鉄筋*	腹鉄筋*	継手位置	継手長 (mm)	継手長計算基準
1	3-D22	2-CFRP (0.20%)	試験区間 D10@150 (0.38%)	—	—	—
2		重ね継手 2-CFRP (0.20%)		曲げ区間	900	短期許容応力度設計法
3			継手区間 D10@100 (0.57%)		550	限界状態設計法
4		2-D22 (1.03%)	せん断区間	900	短期許容応力度設計法	
5				550	限界状態設計法	

* () 内の数値は、軸方向鉄筋比、軸方向 CFRP 筋比および腹鉄筋比を表す

3. 実験概要

3.1 使用材料

実験に用いた鉄筋および CFRP 補強材の諸元および力学的材料特性を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、コンクリートの配合は表-2 に示すとおりである。材料試験の結果、コンクリートの圧縮強度、引張強度およびヤング係数は、それぞれ 35.6 N/mm², 2.90 N/mm² および 29.4 kN/mm² である。

3.2 供試体諸元

供試体形状は、全長 4.1m、スパン長 3.5m、幅 25cm×高さ 35cm の長方形断面であり、有効高さは全て一定とした。供試体の諸元および配筋図はそれぞれ表-3 および図-2 に示す。鉄筋と CFRP との重ね継手部は、鉄筋に対しては断面内側から CFRP が当たるよう継いでいる。

通常、シールドの直接発進・到達工法において、CFRP 補強材と鉄筋との重ね継手長は、許容応力度設計法による CFRP の基本定着長としており、特に本工法におけるシールド開口部の土留め壁は仮設構造物扱いとなるため、短期割

増を考慮した設計とされている²⁾。

本実験では、鉄筋と CFRP 補強材との継手長の違いによる耐力レベルの比較および最短継手長に関する検討のため、供試体 NO.2 と NO.3 の 2 体を作製した。現設計では許容応力度設計法を採用しており、限界状態設計法による設計継手長は最短となる。シールド発進・到達立坑での内部掘削に伴う土留め壁体の応力状態は常に変化し、同部位は一般に切梁などのスパンが大きくなるため、曲げモーメントが支配的な部材として設計されることが多い。そのため通常は継手位置をモーメントの小さい区間に設定する。このことから、供試体 NO.2 および NO.3 の曲げ区間にある継手位置をせん断区間に替えた供試体 NO.4 および NO.5 を作製し、継手位置の違いによる影響を確認した。以上、本実験で作製した供試体は全部で 5 体である。

供試体 NO.1 は CFRP 補強材を軸方向引張側全長に配置した基準供試体である。供試体 NO.2 は許容応力度設計法(短期割増 1.5 を考慮)により求めた CFRP の基本定着長(900mm)を重ね継

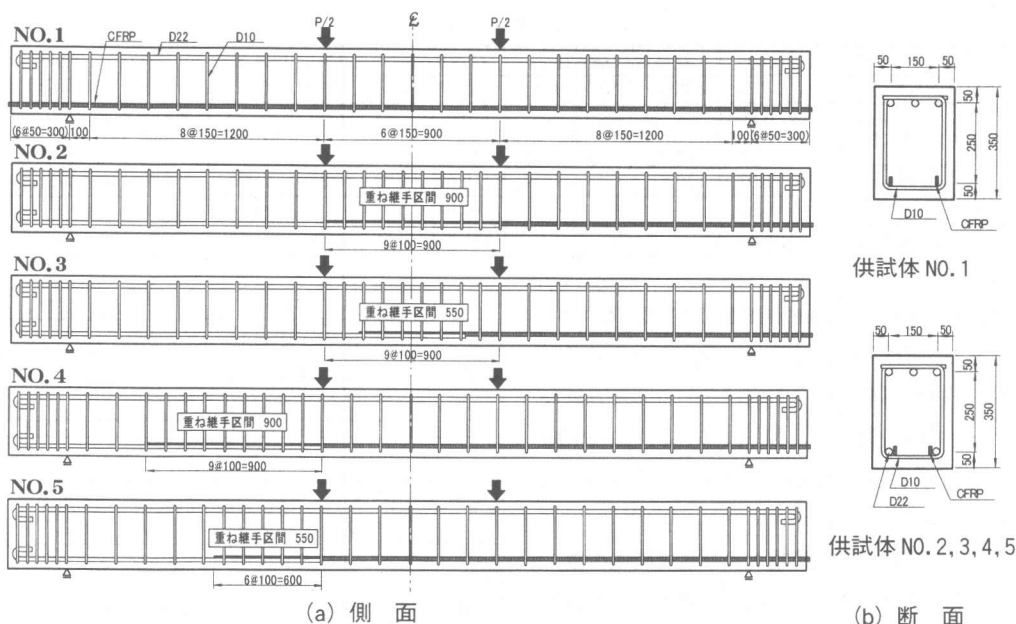


図-2 供試体配筋図

手長とし、その位置をはり中央部の曲げ区間に設定した。供試体 NO.3 は限界状態設計法による鉄筋の基本定着長(550mm)を重ね継手長とし、はり中央部の曲げ区間に設けた設計上最も継手長が短く厳しい構造断面である。供試体 NO.4 および NO.5 は、それぞれ供試体 NO.2 および NO.3 の重ね継手位置をはりせん断区間に設けた供試体である。なお全ての供試体において、軸方向圧縮鉄筋として D22 を全長に配置し、せん断補強筋はせん断耐力が曲げ耐力の 2 倍以上となるように D10 鉄筋を 15cm 間隔で配置した。特に重ね継手区間に関しては、土木学会コンクリート標準示方書の最小間隔の規定を考慮し、10cm 間隔で配置した。CFRP 補強筋は、端部定着フックを設けていない。各供試体の軸方向引張補強筋比は、実際に施工された円形立坑の設計断面を参考にして決定した。

3. 3 実験方法および計測項目

本実験は、図-3 に示すように一方向繰返し中央 2 点曲げ載荷で行い、保証曲げ耐力の 50% および 75% で一旦除荷した後、CFRP の破断に至るまで静的載荷した。ここで保証曲げ耐力とは、供試体 NO.1 の終局曲げ耐力の計算値であり、この時の CFRP 破断荷重はメーカー保証値

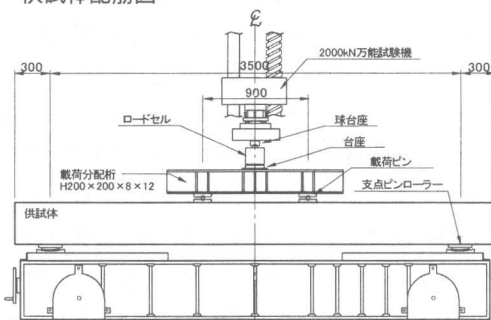


図-3 載荷方法

を用いて算出した。載荷制御方法は、ひび割れ発生まで荷重制御とし、それ以後ははり中央変位計の値を用いた変位制御を基本とした。

計測項目は、載荷荷重、はりの鉛直方向変位(5 点)、はり側面上下縁と上面のコンクリートひずみ、補強筋ひずみおよびひび割れ幅である。

4. 実験結果および考察

4. 1 曲げ挙動

各供試体における曲げひび割れ発生荷重、鉄筋降伏荷重、CFRP 破断荷重、コンクリートの圧壊荷重、はり中央部における最大変位量および最終破断形態について表-4 にまとめた。最終破壊に至る経緯は各供試体によって異なる。供試体 NO.1 は CFRP 破断のみであった。供試体 NO.2 は鉄筋降伏後、局所的なコンクリート

表-4 実験結果

供試体 NO.	ひび割れ荷重(kN)			鉄筋降伏荷重(kN)			CFRP 破断荷重(kN)			圧壊荷重 (kN)	最大変位 (mm)	最終 破壊形態
	実測値	計算値	実/計	実測値	計算値	実/計	実測値	計算値	実/計			
1	20.4		0.89	—	—	—	139.0		0.98	—	88.1	CFRP 破断
2	20.7		0.91	123.5		1.01	147.0		1.04	145.0	95.0	CFRP 破断
3	23.4	22.8	1.03	120.5	121.8	0.99	(119.6)	142.0	(0.84)	115.6	52.7	継手部引抜け
4	20.3		0.89	—	—	—	149.9		1.05	145.0	88.0	CFRP 破断
5	20.7		0.91	—	—	—	139.2		0.98	135.2	82.9	CFRP 破断

の圧壊がみられ、CFRP が破断した。供試体 NO.3 は NO.2 同様鉄筋は降伏したが、その後継手部鉄筋の付着力低下から引抜けを起こしたと思われる。詳細に関しては後述する。供試体 NO.4 および NO.5 は、局所的なコンクリートの圧壊後、CFRP 破断に至った。

(1) ひび割れ発生荷重および最終破壊荷重

各供試体の曲げひび割れ発生荷重の実測値と計算値との比率をみると、表-4 より 10%程度低下していることが分かる。これは、乾燥収縮による影響などが考えられる。

鉄筋降伏荷重は、曲げ区間に鉄筋が配置されている供試体 NO.2 および NO.3 のみを考え、終局強度理論による計算値と極めて良く一致した。

CFRP 破断荷重は、どれも実測値と計算値が良く一致しているが、供試体 NO.3 は 15%程度低い値で最終破壊（継手部鉄筋引抜け）をむかえた。これは、限界状態設計法によって決まる基本継手長をモーメントの大きい曲げ区間に設定したため、構造的に厳しく、終局状態で平面保持の仮定が成立しないことによる影響と思われる。なお CFRP の方は、測定データから付着力の低下や破断などの現象は読み取れず、比較的健全な状態を保持していたものと思われる。

(2) ひび割れ状況と曲げ変形モード

各供試体のひび割れ発生状況を図-4 に示す。同図において、網かけ部分は重ね継手があるエリアを表し、コンクリート上端の荷重点付近にある黒色部は、コンクリートの圧壊部分を示している。図-5 は、中央変位量が最大となった時のはり変形モードである。

ひび割れの発生状況に関しては、全供試体とも部材引張側に CFRP 補強材を配置した区間で

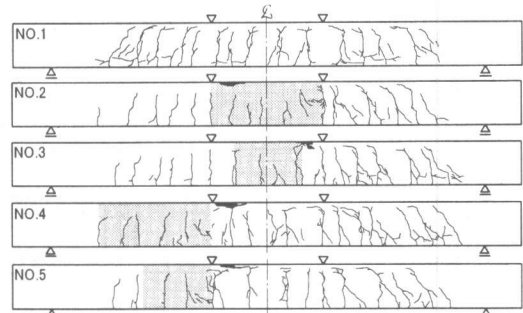


図-4 ひび割れ図

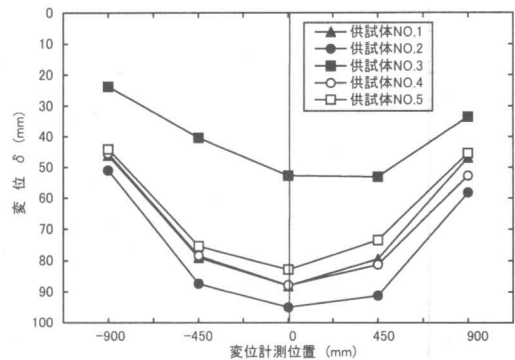
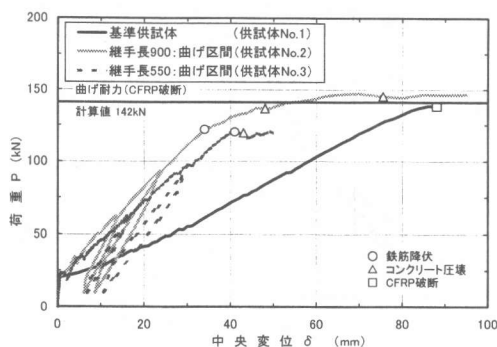


図-5 最大曲げ変形モード

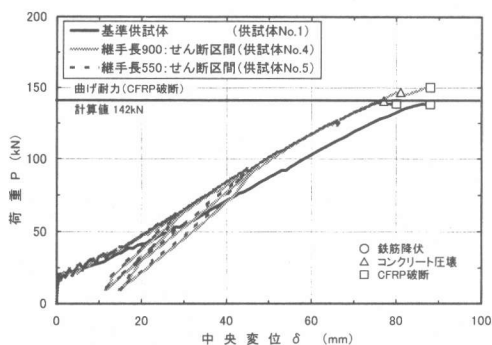
若干ひび割れが多く発生しているが、全体としては分散性は良好であった。最大曲げ変形モードに関しては、供試体 NO.2 は NO.1 同様、比較的左右対称に近い変形をしているが、継手長の短い供試体 NO.3 については、CFRP 側の継手端部（荷重点近傍）のひび割れが卓越して角折れに近い変形状態となった。供試体 NO.4 および NO.5 は、NO.3 同様に CFRP 側の継手端部の変形が若干でているものの、大きな局所的変形は認められず、継手位置をせん断区間に設定した場合、継手長に関わらず曲げ変形部材として好ましい性状を示した。

(3) 荷重と中央変位の関係

図-6(a)は、重ね継手位置が曲げ区間にあり、

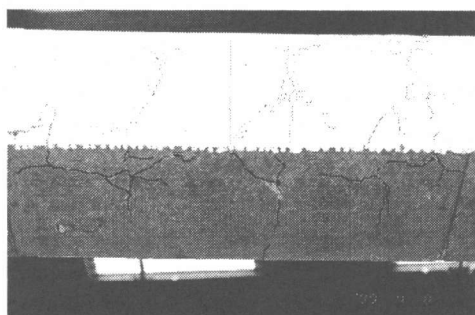


(a) 供試体 NO.1, NO.2, NO.3

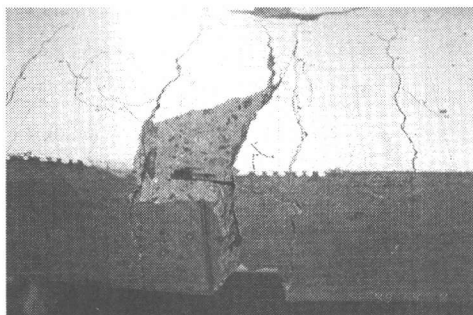


(b) 供試体 NO.1, NO.4, NO.5

図一6 荷重と中央変位の関係



(a) 供試体 NO.3 下面付着ひび割れ



(b) 供試体 NO.4 CFRP 破断状況

写真一1 実験状況

継手長の異なる供試体 NO.2 および NO.3 の荷重と中央変位の関係を示している。さらに比較のため軸方向引張主筋を CFRP とする基準供試体 NO.1 も載せている。同図より、供試体 NO.2 および NO.3 の曲げひび割れ発生荷重は、NO.1 のそれと同等であり、その後の曲げ剛性は曲げ区間に鉄筋が配置されている影響で、NO.1 よりも大きく、それぞれ 3.0 倍、2.5 倍となった。また鉄筋降伏は両供試体ともにスパン中央部ではなく、鉄筋側の重ね継手端部で発生した。鉄筋の降伏荷重は NO.2 および NO.3 の両供試体ではほぼ同等であり、継手長の短い供試体 NO.3 も計算値を満足する結果であった。このことは、限界状態設計法で計算される基本定着長を重ね継手としても、鉄筋に関しては問題ないことを意味していると思われる。しかし、鉄筋降伏後の挙動は、両供試体で相当異なるものとなった。すなわち継手長の長い NO.2 は、鉄筋降伏後も粘

りのある挙動を示し、CFRP 破断に至る曲げ耐力の計算値を満足する結果であった。それに対して、継手長の短い NO.3 は鉄筋降伏後鉄筋の付着力が低下し、継手部で引抜けを起こしたと思われる。限界状態設計法で計算した鉄筋の基本定着長を継手長として曲げ区間に設けた場合、CFRP 破断の曲げ耐力まで達しないことが示された。

次に図一6(b)は、継手位置をせん断区間に設けた場合である。両供試体とも曲げひび割れの発生荷重と位置は NO.1 と同じであり、その後の曲げ剛性も同等の傾向がみられ、継手の影響はほとんど認められなかった。最終的に CFRP の破断に至った時の荷重は、継手長の短い NO.5の方が NO.1 を若干下回り、NO.4 は逆に NO.1 を上回ったが、結果的には曲げ耐力の計算値にほぼ等しくなった。これにより、重ね継手をせん断区間に設けた場合、その継手長は限界状態

設計法で計算される鉄筋の基本定着長でも十分であることが示された。写真-1は、供試体 NO.3 のはり下面にあらわれた付着ひび割れおよび供試体 NO.4 の CFRP 破断状況である。

(4) 荷重と鉄筋ひずみ

供試体 NO.2, NO.3 の荷重と鉄筋ひずみの関係を図-7 に示す。着目した鉄筋ひずみの計測位置は、鉄筋側重ね継手端部と中央部である。

供試体 NO.2 は、継手端部の鉄筋降伏後も中央部鉄筋のひずみは降伏をむかえるまで伸びつづけたが、供試体 NO.3 は中央部の鉄筋ひずみが開放される挙動がみられた。このため NO.3 の付着劣化の疑いを検証するため、中央部での鉄筋と CFRP の張力分担率を荷重履歴ごとに整理した結果を図-8 に示す。同図から、荷重 80kN 付近から鉄筋の付着が低下し始め、120kN 時に大きくすべっていると思われる。

5. まとめ

CFRP 補強材と鉄筋との重ね継手長を、短期許容応力度設計法および限界状態設計法に準拠して決定し、その位置を曲げ区間およびせん断区間に設けた CFRP コンクリートはりの曲げ載荷実験によって継手性能を評価した。

本実験で得られた結果を以下にまとめる。

- ①軸方向引張補強筋として CFRP 補強材を全長に渡って配置した供試体 NO.1 は、構造部材として好ましい曲げ変形性能を示し、曲げ耐力も計算値を満足するものであった。
- ②許容応力度設計法による CFRP の基本定着長を継手長とし、その位置を曲げ区間に設けた供試体 NO.2 は、鉄筋降伏後も継手部での局部的な劣化はみられず、粘りのある挙動を示した。また、CFRP 破断荷重は供試体 NO.1 を上回る結果を得られた。
- ③限界状態設計法による鉄筋の基本定着長を継手長とし、その位置を曲げ区間に設けた供試体 No.3 は、継手端部鉄筋の付着劣化進行がみられ、CFRP 破断まで達しなかった。
- ④継手位置をせん断区間に設けた供試体 NO.4,

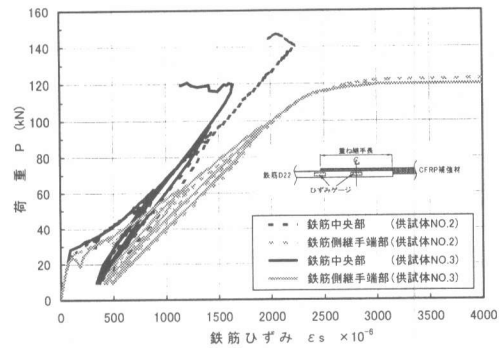


図-7 荷重と鉄筋ひずみ

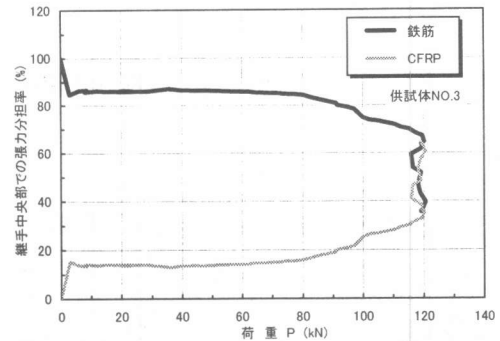


図-8 継手中央部での張力分担率(供試体 NO.3)

NO.5 は、供試体 NO.1 と同等以上の曲げ挙動を示し、継手による影響はみられなかった。

- ⑤CFRP と鉄筋との重ね継手長は、CFRP の設計破断強度を考慮することで、従来の許容応力度設計法で決定できることがわかった。
- ⑥重ね継手長を限界状態設計法の鉄筋の基本定着長として曲げ区間に設けた場合、力学的に厳しい構造となることがわかった。
- ⑦重ね継手長をはりのせん断区間におく場合、継手長は限界状態設計法で算定される鉄筋の基本定着長でも十分である事が分かった。

参考文献

- 1) 園田徹士, 中村稔, 新井時夫, 宮田弘之介, 栗原和夫: NOMST の開発, 土木学会論文集, NO.522/VI-28, pp.31-34, 1995.9.
- 2) 伊東三夫, 関口孝夫, 伊藤忠彦, 田中隆利: NOMST による軟弱地盤中のシールド工事, トンネルと地下, Vol.27, No.2, pp.53-59, 1996.2.