

コンクリートソケット式結合工法による プレキャスト PC 桁架設工法の概要とその施工報告

技術本部	開発メンテナンス部	村井伸康
東日本支社	土木部	伊藤寛恵
東日本支社	札幌支店	竹内輝
土木本部	基礎部	中井将博

概要：コンクリートソケット式結合とは、アンダーパストンネル部の施工において、鉄筋コンクリート構造である側壁部のソケットの中にプレキャスト部材を挿入・設置し、その後隙間に高強度無収縮モルタルを充填することにより剛結合とする工法である。本構造の性能を確認するために、静的載荷試験・疲労載荷試験を行った。その結果計算値以上の耐力および疲労耐久性を有していることが立証された。また、本工法が適用された一般国道12号線札幌市創成改良工事について報告する。

Key Words：ソケット式結合，アンダーパス，剛結合，PCaPC 上床版

1. はじめに

アンダーパスのトンネル部は、通常市街地の交通量の非常に多い交差点に位置する。従来通り場所打ち鉄筋コンクリート（以下 RC）構造により一体施工された場合、それに伴う長期に渡る交通規制は、商業活動および周辺環境にマイナス要因となり、工期が重要な課題となる。例えば、側壁までは路下で事前に施工しておき、夜間に覆工板の撤去、プレキャストプレストレストコンクリート（以下 PCaPC）部材の架設、仮舗装の施工までの一連の工程を終了し、翌日交通開放することができれば、その課題は解決される。

本工法の開発における優先順位の高い構造上の課題は、場所打ち部と PCa 部材との結合方法であった。その結合方法は上記のように限られた時間内に容易に施工できるものでなければならない。また、一般的に結合方法にはヒンジと剛結合とがあるが、今回は施工後の維持管理および地下水の遮水性を重要視し、剛結合の適用が適当であると判断した。これまでの結合方法は鉄筋の継手によるものおよび PC 鋼材によるものであり、（1）継手位置におけるかぶり確保のために断面が拡大したり、（2）継手により工費が増大したり、（3）工種の増加により工期が遅延したり等の問題があった。また、側壁と頂版とを結合する場合、ある程度の施工誤差（X、Y 方向およびねじれ）を考慮する必要がある。従来の結合方法では、上記誤差を吸収することが難しく施工に支障を及ぼすことが懸念された。これらの問題点を払拭できる結合方法として、支柱の受台として用いられていたソケット基礎の構造形式の適用を提案し、アンダーパストンネル部の側壁と頂版との結合に求められている性能の確認を行った。特に頂版結合部に載荷される繰返し荷重に対する疲労耐久性能に注目した。

本稿ではソケット式結合の構造特性および実施工で適用された一般国道12号線札幌市創成改良工事について報告する。



村井伸康



伊藤寛恵



竹内輝



中井将博

2. ソケット式結合の概要

ソケット式結合とは、桁高を抑え軽量化を図った門型の PCPCa 部材である頂版を、側壁のコンクリートの上端に設けられたソケット部に差込み、隙間に高強度モルタルを充填し剛結合を行うものである。ソケット方式剛結合の構造は、下記のコンセプトに従って考案した。

①側壁のソケットの施工誤差, PCPCa 部材の設置し易さおよび定着するためのモルタルの最小厚さを考慮して, ソケット断面寸法を決定する。

②ソケット内に PCa 部材の荷重方向の断面寸法の 1.5 倍以上挿入する。

③ソケット内面と PCa 部材外面には付着を向上させる処理を行う。

④注入するモルタルは, 5cm 程度の隙間を自然流下により充填でき, PCa 部材と同等以上の圧縮強度を有する。

⑤破壊は損傷の軽減・復旧の迅速性を考慮し, 頂版柱部の付け根で生じるものとする。

⑥常時最大荷重時に発生する曲げモーメントを, 200 万回結合部に載荷しても耐力低下が生じない。

図-1 に本構造と上記コンセプトの関係を示す。

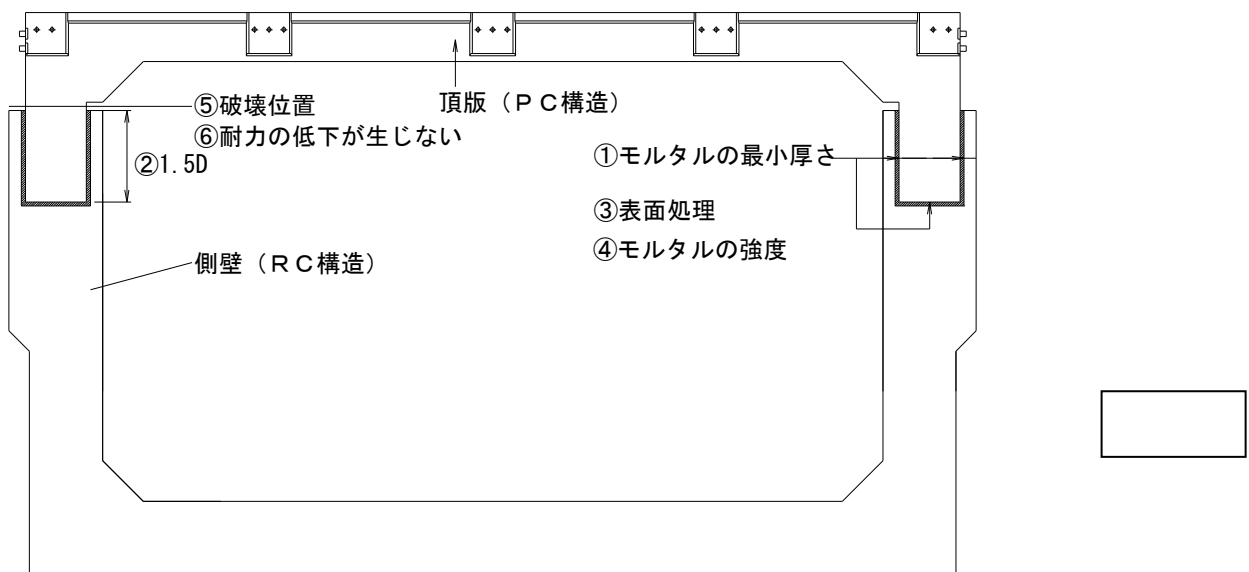


図-1 本構造とコンセプトとの関係

3. 構造性能評価実験

3.1 供試体

一般国道12号線札幌市創成改良工事の断面を1/2に縮小した試験体を3体製作し、静的載荷実験を2体、疲労載荷実験を1体行った。また、疲労試験を行った供試体については、その後静的載荷実験を行い、疲労試験に伴う耐力の低下の確認を行った。供試体概要を図-2に、配筋概要を図-3に示す。

供試体の諸元を表-1に示す。

3.2 載荷方法

静的載荷実験は、載荷点が水平方向に移動可能な二軸載荷試験機を使用し、鉄筋降伏までは荷重制御で載荷を行い、その後は変位制御で行った。静的載荷試験の状況を写真-1に示す。疲労載荷実験は、隅角部に作用する曲げモーメントのうち、活荷重相当分を200万回載荷させた。疲労載荷実験の状況を写真-2に、荷重載荷パターンを図-4に、使用材料を表-1に示す。

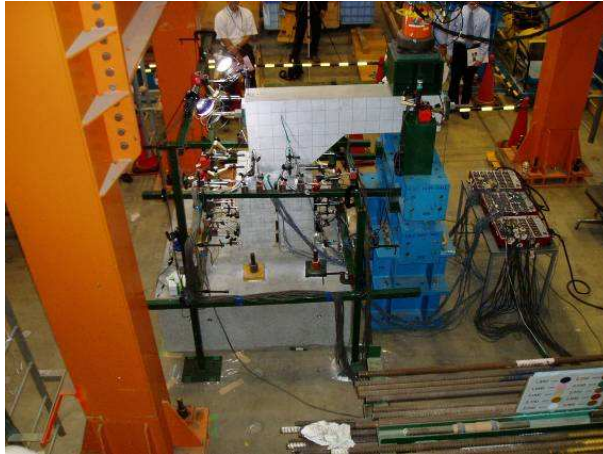


写真-1 静的載荷試験状況



写真-2 疲労載荷試験状況

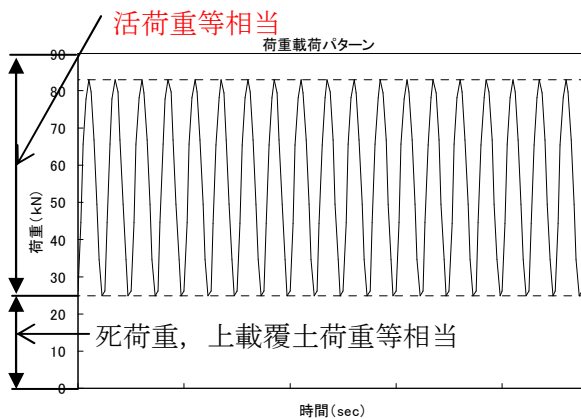


図-4 荷重載荷パターン

表-1 使用材料強度 (N/mm²)

		ソケット	頂版柱部
コンクリート	設計基準強度	24	50
	静的載荷試験時 1	35.3	62.2
	静的載荷試験時 2	38.9	60.5
	疲労載荷試験時	36.8	60.3
鉄筋	SD345	399	
PC 鋼材	PC 鋼棒 φ26	B 種 1 号 SWPR930/1080	
無収縮モルタル	静的載荷試験時 1	82.1	
	静的載荷試験時 2	103.7	
	疲労載荷試験時	107.0	

3.3 鉄筋応力度及び耐力の計算値

一般国道 12 号線札幌市創成改良工事の常時相当における鉄筋応力度について、RC 構造計算により、載荷試験日のコンクリート圧縮強度および材料試験成績表の鉄筋降伏強度を用い算出した。応力算定位置を図-5に、各断面形状寸法及び配筋を表-2に、計算値を表-3に示す。また、それぞれの位置における、ひび割れ・初降伏・終局モーメントの値と、対応する載荷点の荷重を表-3に併せて示す。表-3より終局荷重の最も小さい頂版柱部(断面③)で破壊が生じることが想定される。

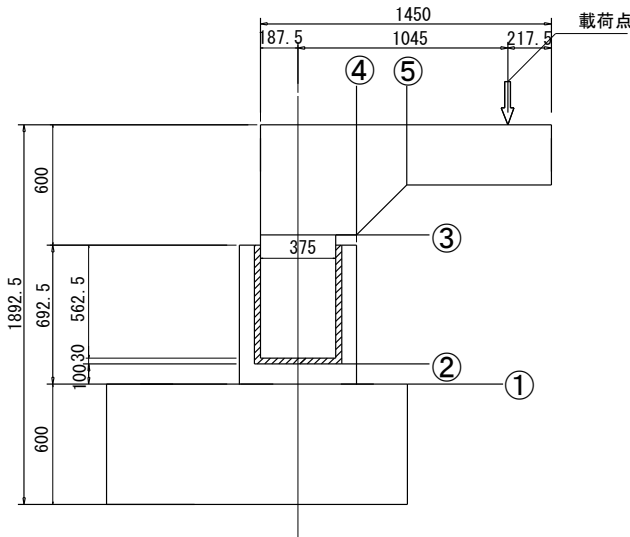


図-5 応力算定位置

表-2 断面形状寸法及び配筋

断面	① 側壁部	② ソケット部	③ 頂版柱部	④ 上床ハンチ部	⑤ 頂版上床部
形状					

表-3 鉄筋応力度及び耐力の計算値

断面	常時 鉄筋応力度 (N/mm ²)	ひび割れ モーメント (kN・m)	ひび割れ 荷重 (kN)	初降伏 モーメント (kN・m)	初降伏 荷重 (kN)	終局 モーメント (kN・m)	終局 荷重 (kN)
①	136.8	-75.2	72.0	-210.6	201.5	-263.9	252.5
②	152.9	-57.4	54.9	-204.9	196.1	-255.7	244.7
③	145.1	-31.1	29.7	-221.4	211.9	-238.3	<u>228.0</u>
④	-10.6	-140.6	186.9	-410.8	545.9	-477.4	634.4
⑤	41.7	-35.1	69.8	-149.4	297.2	-162.5	323.4

4. 静的載荷試験結果

4.1 破壊に至るまでの過程

試験体の挙動は、ソケット部と柱部が終始一体とした挙動を示した。載荷重 60kN で柱部の付け根にひび割れが発生し、載荷重約 250kN で柱部の鉄筋が降伏した後は、耐荷力を保持しながら変形量のみが増加した。当初の想定通り頂版柱部で破壊が生じた。2体の供試体に測定結果のバラツキはほとんど無く、200万回疲労載荷試験を行った供試体においても性能の低下は無かった。供試体終局時のひび割れ発生状況を図-6に示す。

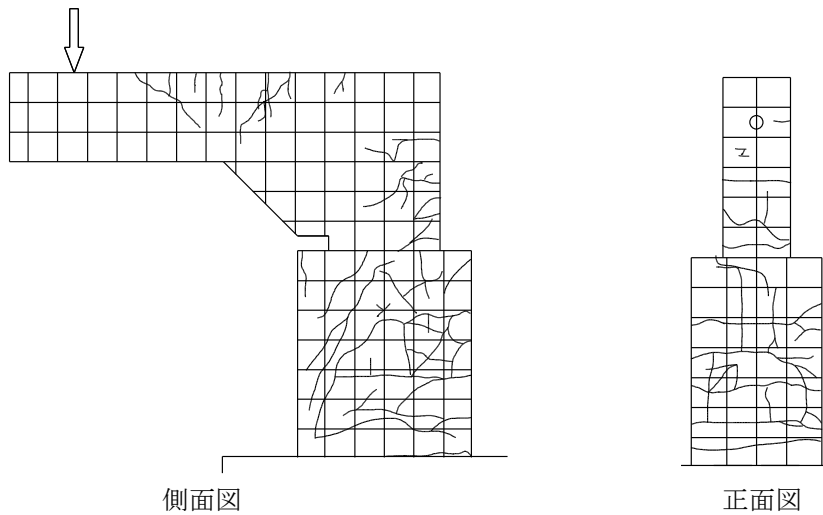


図-6 供試体終局時ひび割れ発生状況

4.2 荷重と載荷点変位との関係

荷重と変位との関係を図-7に示す。ここでの変位は載荷点位置での変位（基部の回転を補正）である。想定通り頂版柱部（断面③）で終局状態になった。終局荷重は計算値（終局耐力最小ケース断面③）を上回っており、本構造が十分な耐力を有していることが確認された。また、疲労試験による耐力の低下は生じなかった。

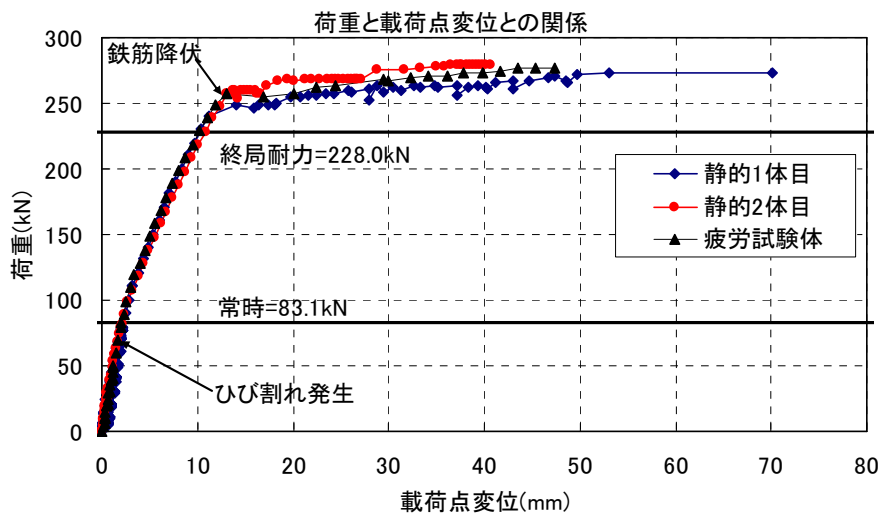


図-7 荷重と載荷点変位との関係

4.3 頂版柱部およびソケット部の軸方向鉄筋応力度の計算値との比較

荷重と頂版柱部軸方向鉄筋応力度の関係を図-8に、計算値と実験値との比較を表-4にそれぞれ示す。頂版柱部の軸方向鉄筋応力度はMT1,2が最大であり、これは図-5および表-2の断面③に対応している。常時の荷重（一般国道12号線創成改良工事）における軸方向鉄筋応力度の計算値 145.1N/mm^2 に対し、本実験での応力度はほぼ計算値と同程度であった。また、鉄筋降伏荷重についても降伏耐力の計算値と同程度であった。

また、荷重とソケット部軸方向鉄筋応力度の関係を図-9に、計算値と実験値との比較を表-5にそれぞれ示す。ソケット部の軸方向鉄筋応力度はMS7,8が最大であり、これは図-5および表-2の断面①に対応している。常時における軸方向鉄筋応力度の計算値 136.8N/mm^2 に対し、本実験での応力度は半分程度であった。また、降伏荷重は計算値以上であった。

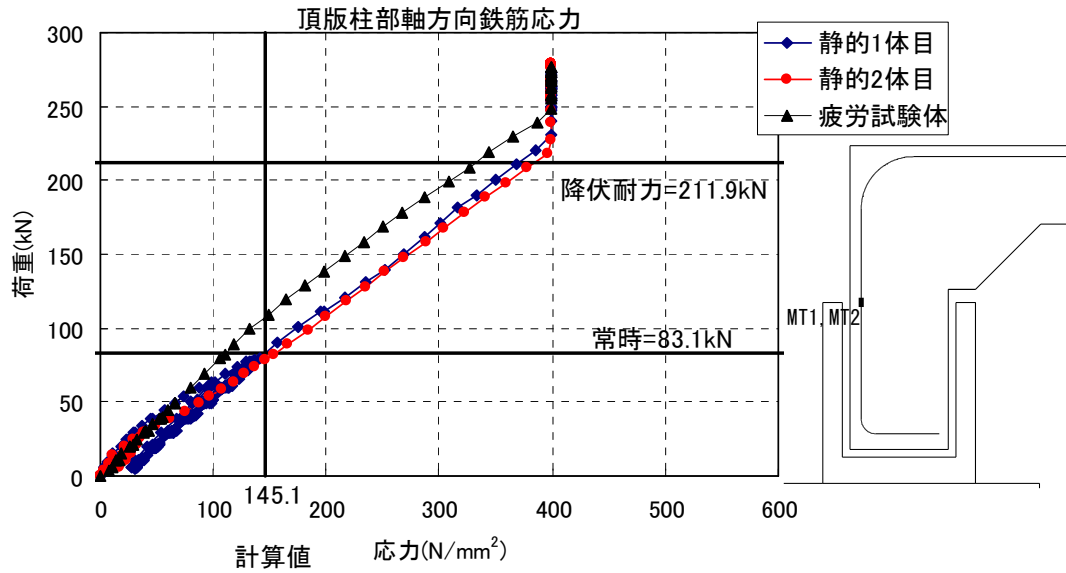


図-8 頂版柱部軸方向鉄筋応力度

表-4 頂版柱部軸方向鉄筋における計算値と実験値との比較

	実験値			計算値
	1体目	2体目	疲労試験体	
常時 (応力度)	150N/mm ²	145N/mm ²	110N/mm ²	145.1N/mm ²
降伏時 (荷重)	230kN	220kN	239kN	211.9kN

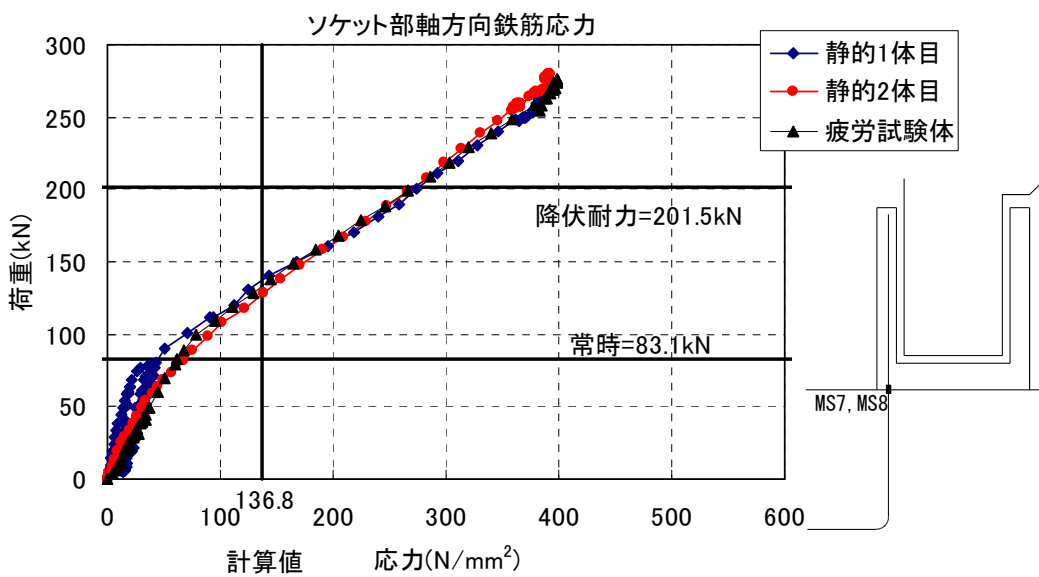


図-9 ソケット部軸方向鉄筋応力度

表-5 ソケット部軸方向鉄筋における計算値と実験値との比較

	実験値			計算値
	1体目	2体目	疲労試験体	
常時 (応力度)	45N/mm ²	70N/mm ²	68N/mm ²	136.8N/mm ²
降伏時 (荷重)	245kN	降伏に至らず	277kN	211.9kN

4.4 柱部およびソケット部の一体挙動の確認

主鉄筋最外縁鉄筋中心からの距離における鉄筋応力分布により、平面保持の仮定に基づく一体挙動の確認を行った。検討箇所を図-10に、応力分布を図-11、図-12、図-13にそれぞれ示す。上段については、設計荷重段階で頂版柱部にひび割れが発生しており、柱部引張鉄筋の荷重負合が大きくなっている。中段および下段については、設計荷重時 83.1kN で直線分布を示しており、平面保持が成り立ち一体挙動を示す。下段においては、平面保持が成立している状態から、頂版柱部の主鉄筋の降伏後 (230 kN), 荷重の負担がソケット部の引張鉄筋に移行していることがわかる。

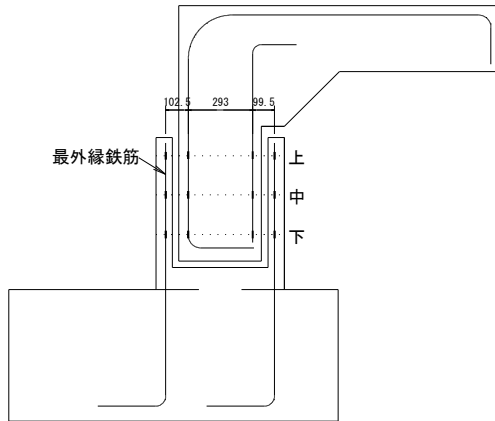


図-10 平面保持検討箇所

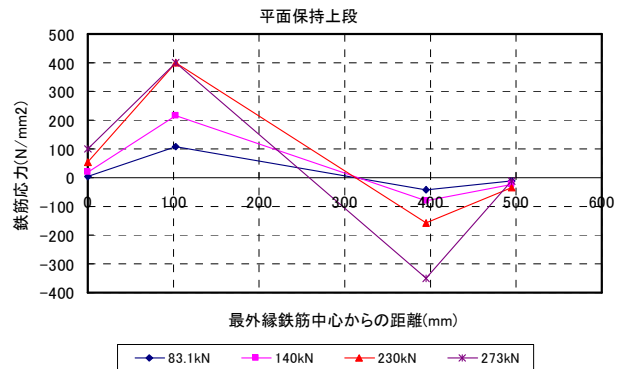


図-11 上段における応力分布

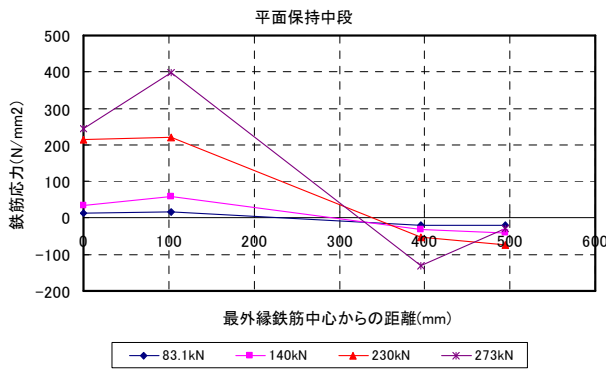


図-12 中段における応力分布

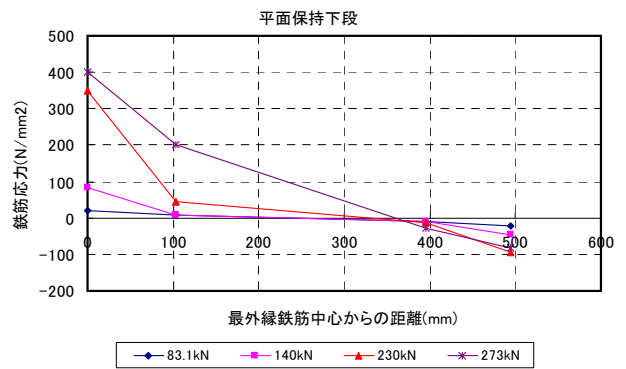


図-13 下段における応力分布

5. 疲労載荷試験結果

5.1 経時変化

各載荷回数での試験体状況を写真-3に示す。繰返し回数が増加しても試験体に大きな変状は無かった。

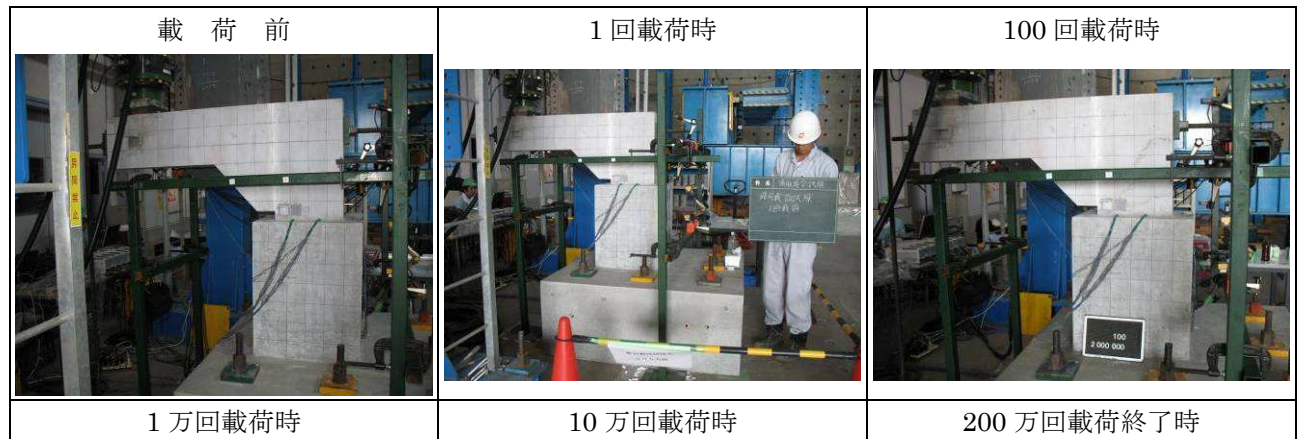




写真-3 経時変化

5.2 繰返し回数と載荷点変位との関係

繰返し回数と載荷点における変位との関係を図-14に示す。繰返し回数100万回程度までは、変位が徐々に増加したが、静的載荷時の変位程度であり、また繰返しによる著しい変位の増加は無かった。

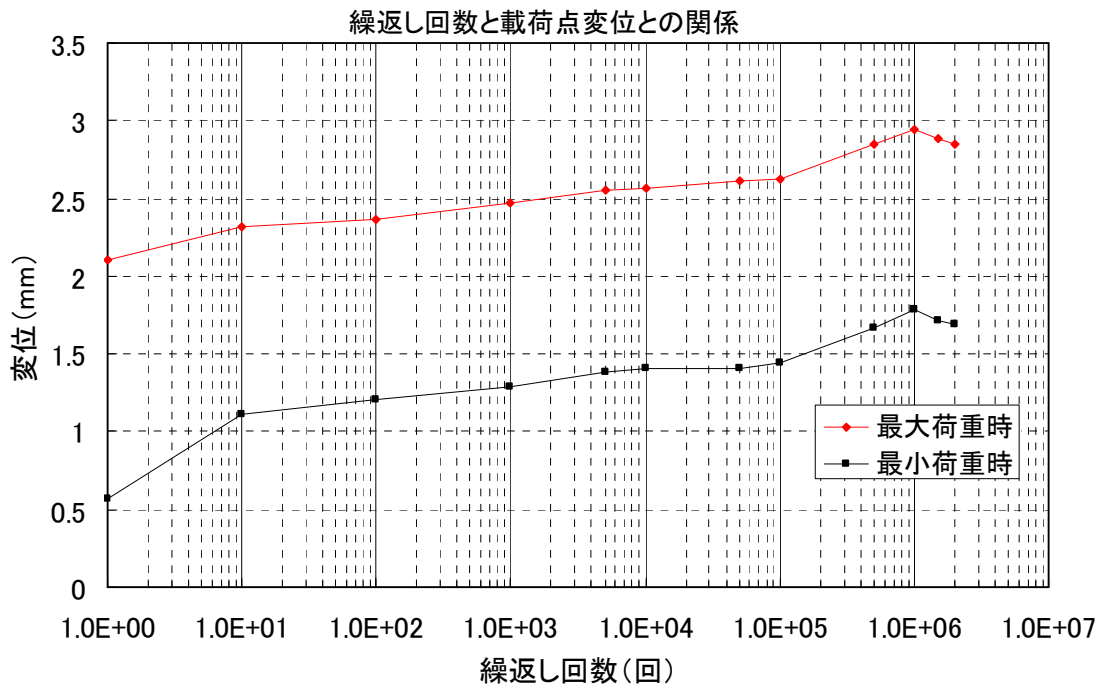


図-14 繰返し回数と載荷点変位との関係

5.3 繰返し回数と柱部およびソケット部の軸方向鉄筋応力度

上限荷重における頂版柱部軸方向鉄筋応力の経時変化を図-15に示す。繰返し回数を増加させても、上限荷重時の鉄筋応力の増加はほとんどなく、断面③の最大でも 140N/mm^2 以下であった。また、上限荷重時におけるソケット部軸方向鉄筋応力の経時変化を図-16に示す。繰返し回数を増加させるにつれて、徐々に鉄筋応力が増加したが、断面①の最大でも 70N/mm^2 以下であった。

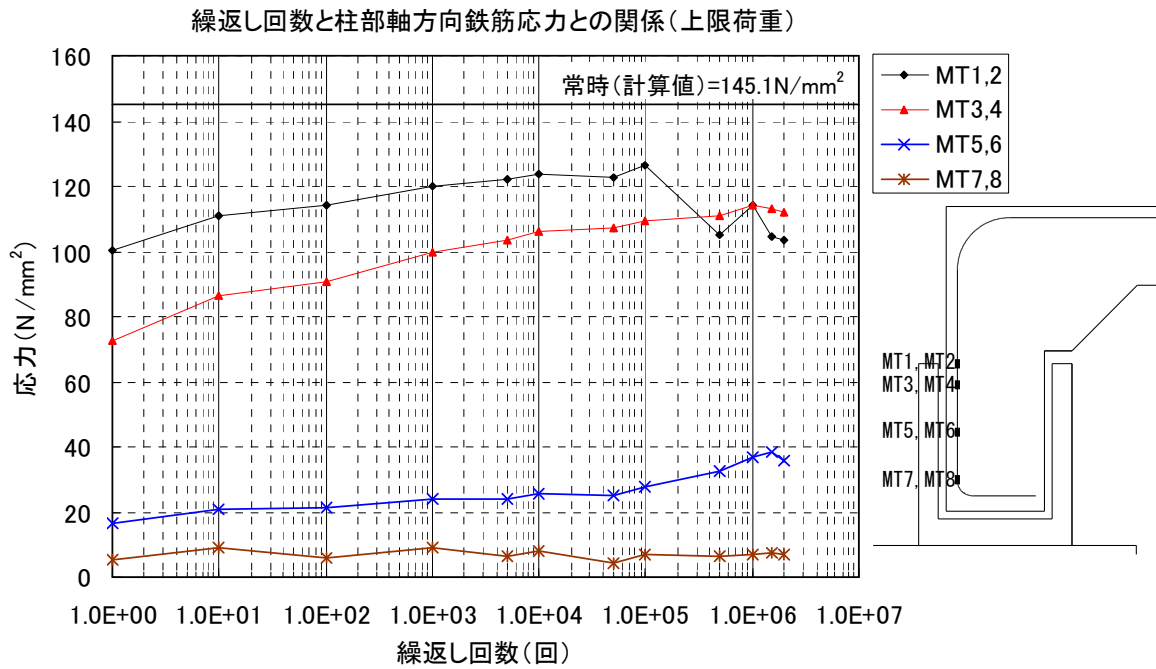


図-15 繰返し回数と頂版柱部鉄筋応力との関係

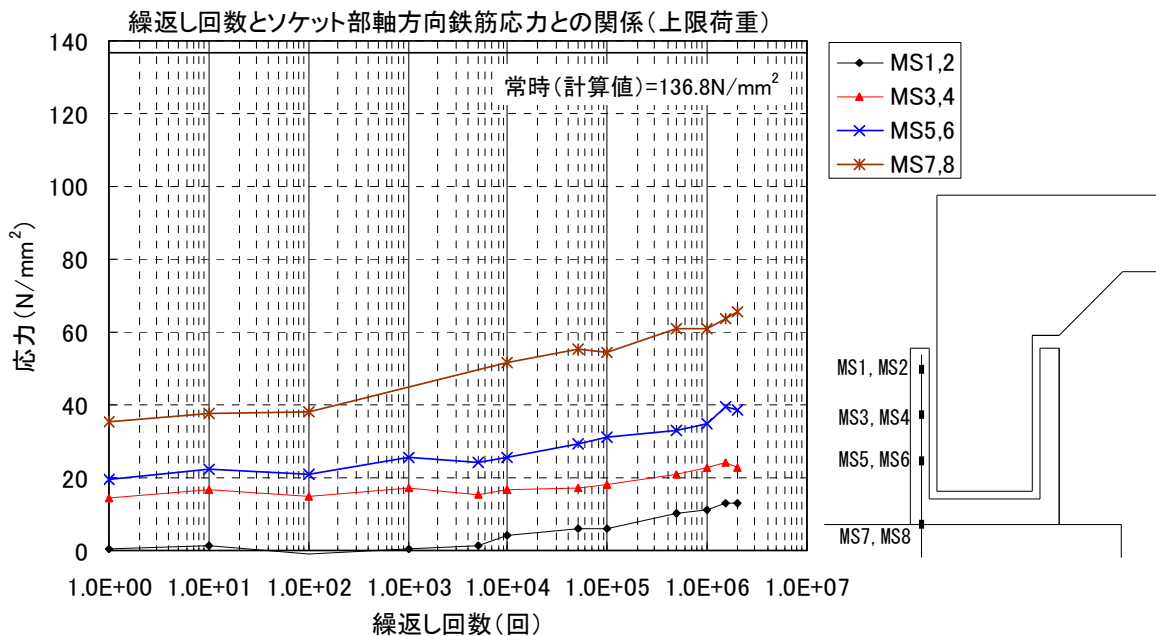


図-16 繰返し回数とソケット部鉄筋応力との関係

5.4 柱とソケット間の付着劣化が構造系に及ぼす影響

繰返し载荷中に付着劣化が生じた場合、ソケット部の鉄筋・コンクリート応力度の増加が生じると思われる。既往の研究では柱とソケット間の摩擦係数で付着劣化を表現している。そこで、付着劣化が生じ摩擦係数が見込めなくなった不利な状態での構造系を想定し、ソケット部帯鉄筋および軸方向鉄筋の応力度の照査を行った。本検討は、コンセプト⑤で述べたように破壊をソケット底面位置では生じさせないために行うものである。

ソケット部の力の釣合いを図-17、図-18に示す。外力は、 N_d 、 M_d 、 V_d であり、それらと釣合う力は、ソケット天端および底面近くの水平力 $H_{top,d}$ および $H_{bot,d}$ 、さらにソケット壁面の摩擦力 $F_{fri,bot,d}$ および

$F_{fri,top,d}$ である.

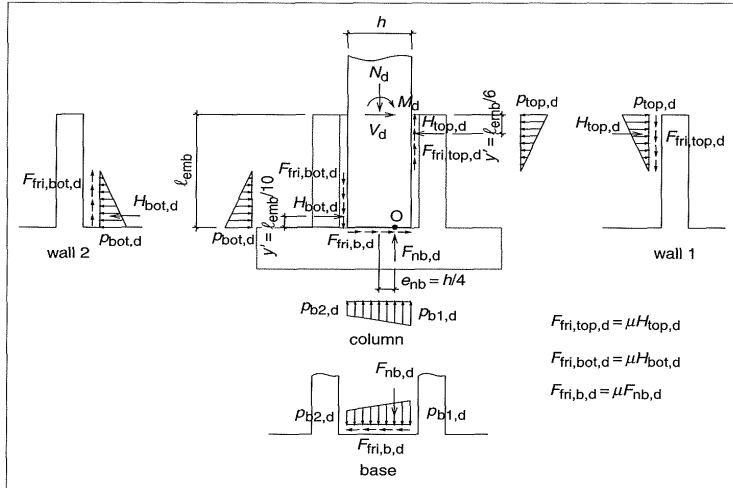


図-17 ソケットの力の釣り合い

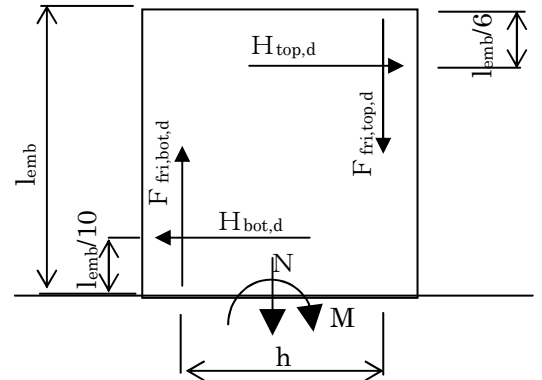


図-18 ソケットに作用する力

a)鉛直方向の力の釣り合い条件から,

$$N_d - F_{nb,d} - F_{fri,top,d} + F_{fri,bot,d} = 0$$

b)水平方向の力の釣り合い条件から,

$$V_d + F_{fri,b,d} - H_{top,d} + H_{bot,d} = 0$$

c)点oにおけるモーメントの釣り合い条件から,

$$M_d - N_d e_{nb} + V_d \ell_{emb} - H_{top,d} (\ell_{emb} - y) + H_{bot,d} y' - F_{fri,top,d} (0.5h - e_{nb}) - F_{fri,bot,d} (0.5h + e_{nb}) = 0$$

$$F_{fri,top,d} = \mu H_{top,d}$$

$$F_{fri,bot,d} = \mu H_{bot,d}$$

$$F_{fri,b,d} = \mu F_{nb,d}$$

以上より, 下記の式が導かれる.

$$H_{top,d} = \frac{M_d - N_d [e_{nb} + (\mu y' - \mu^2 (0.5h + e_{nb})) / (1 + \mu^2)] + V_d [\ell_{emb} - (y' - \mu (0.5h + e_{nb})) / (1 + \mu^2)]}{\ell_{emb} - y - y' + \mu \cdot h}$$

d) ソケット底面位置に発生する曲げモーメント (M) および鉛直力 (N) の算定

図-13より, M, Nは下記のように表される.

$$M = H_{top,d} \times \ell_{emb} (1 - 1/6) - H_{bot,d} \times (\ell_{emb}/10) + (F_{fri,top,d} + F_{fri,bot,d}) \times (h/2)$$

$$N = F_{fri,top,d} - F_{fri,bot,d}$$

e) 入力値 (常時載荷重: 83.1kN の時)

$$M_d = 86.86 \text{ kN} \cdot \text{m}, N_d = 83.1 \text{ kN}, V_d = 0 \text{ kN}, h = 0.375 \text{ m}, \ell_{emb} = 0.5625 \text{ m}, e_{nb} = h/4, y = \ell_{emb}/6, y' = \ell_{emb}/10$$

1) 摩擦係数と $H_{top,d}, H_{bot,d}, F_{fri,top,d}, F_{fri,bot,d}$ との関係

図-19に摩擦係数が0~1.0変化した時の, ソケット天端および底面に生じる力の変化を示す. これより, 柱部とソケット部壁面の付着があり摩擦係数が大きいほどソケット天端および底面に生じる水平力 ($H_{top,d}$,

$H_{bot,d}$ は小さくなる. よって, 摩擦係数がソケット壁に配置する帯鉄筋の量に影響を与えることがわかる.

摩擦係数と作用力との関係

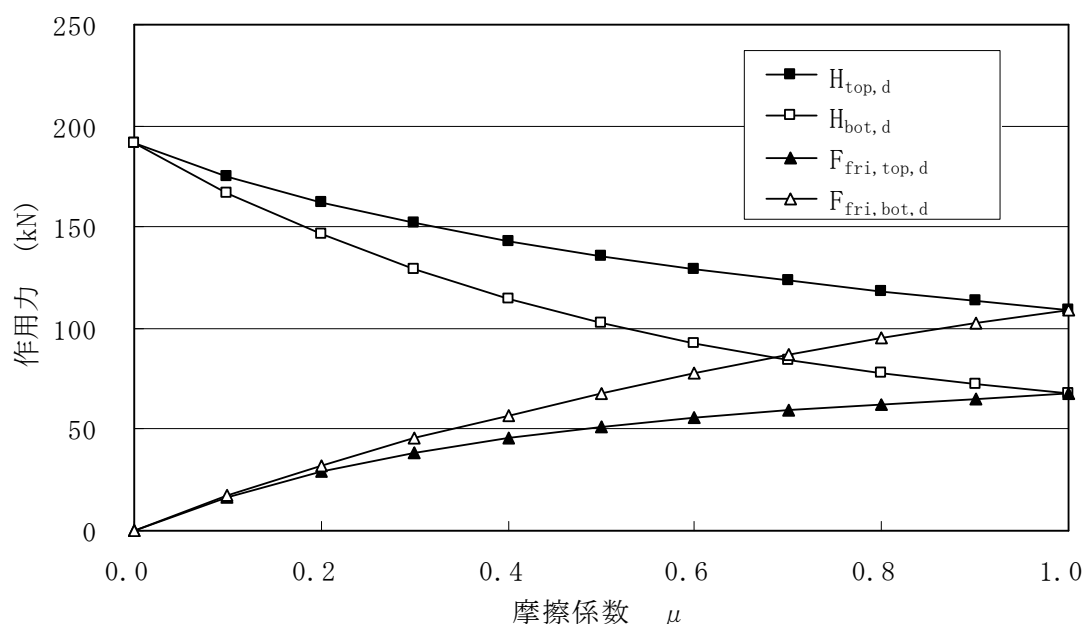


図-19 摩擦係数と作用力との関係

2) 摩擦係数とソケット部軸方向鉄筋応力度との関係

表-6に摩擦係数が0~1.0と変化した時の, ソケット部軸方向鉄筋応力度に与える影響を示す. これより, 摩擦係数が0.1以上であれば許容値 180N/mm^2 を満足することがわかる. 既往の研究では摩擦係数0.6を用いている.

表-6 摩擦係数とソケット部軸方向鉄筋応力度との関係 (常時)

摩擦係数 μ	$H_{top,d}$ (kN)	$H_{bot,d}$ (kN)	$F_{fri,top,d}$ (kN)	$F_{fri,bot,d}$ (kN)	M (kN.m)	N (kN)	σ_s (N/mm^2)
0.0	191.7	191.7	0.0	0.0	79.1	0.0	189.1
0.1	175.2	167.0	16.7	17.5	79.1	-0.8	172.8
0.2	162.1	146.1	29.2	32.4	79.3	-3.2	159.9
0.3	151.6	128.7	38.6	45.5	79.6	-6.9	149.6
0.4	143.0	114.3	45.7	57.2	79.9	-11.5	141.1
0.5	135.7	102.4	51.2	67.8	80.2	-16.6	133.9
0.6	129.3	92.7	55.6	77.6	80.4	-22.0	127.6
0.7	123.7	84.6	59.2	86.6	80.6	-27.3	122.0
0.8	118.5	78.0	62.4	94.8	80.7	-32.4	116.9
0.9	113.8	72.4	65.2	102.4	80.7	-37.2	112.2
1.0	109.3	67.8	67.8	109.3	80.6	-41.6	107.8

3) 実験値と計算値との比較

本実験において帯鉄筋に発生する応力から, ソケット部に作用する水平力 ($H_{top,d}$, $H_{bot,d}$) の推定を行った. 帯鉄筋の計測位置と推定水平力位置を図-20に, 疲労載荷試験の200万回載荷時における水平力を帯鉄筋に発生する応力から換算し, 表-7に示す. $H_{top,d}$ に対しては上側3本の帯鉄筋で抵抗するものとしている. 200万回疲労載荷時においてソケット部に作用する水平力 ($H_{top,d}$) は, 表-6の値と比較して, かなり小さ

い値となっており、ソケット部にほとんど水平力が発生していない。これは、側面の摩擦（付着）が大きく、終始ソケット部側壁と柱部とが合成して一体として挙動したため、ソケット前面の水平力（ $H_{top,d}$ ）および背面の水平力（ $H_{bot,d}$ ）が生じなかったものと思われる。

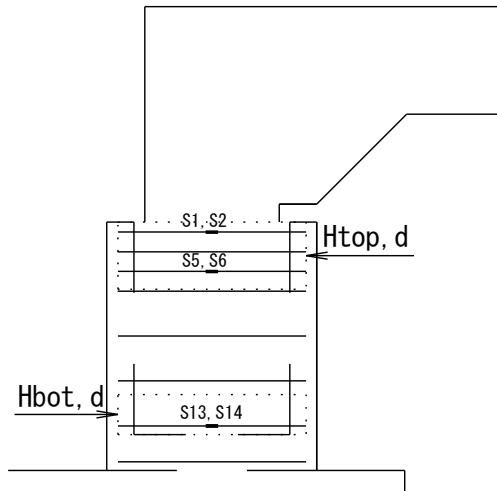


図-20 ソケット部に作用する水平力

表-7 常時における水平力

$H_{top,d}$			$H_{bot,d}$		
	応力 (N/mm ²)	作用力 (kN)		応力 (N/mm ²)	作用力 (kN)
S1,S2	0.19	0.05	S13,S14	-0.28	-0.07
平均	1.47	0.37			
S5,S6	2.75	0.70			
計		1.12	計		-0.07

6. 载荷試験後のソケット部の健全度確認

6.1 モルタル付着健全度の確認

疲労载荷試験供試体のソケット部モルタルをはつり、赤インクがどの範囲まで染込んでいるか調べ、付着切れの範囲を確認した。供試体はつり位置を図-21に、ソケット部付着健全度を写真-4に示す。ソケット天端より約50mm下方に頂版柱部の破壊面があり、その位置までは赤インクが染込んでいた。しかし、頂版柱部破壊面より下方へは至っていなかった。破壊面より下方では、モルタルが打継ぎ材の凹凸に入込んで、コンクリートとの一体化が確認された。

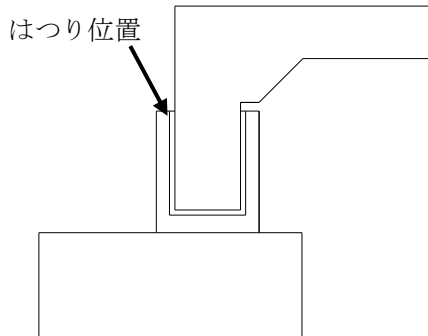


図-21 供試体はつり位置



写真-4 ソケット部付着健全度の確認

6.2 帯鉄筋溶接部健全度の確認

頂版柱部およびソケット部破壊面のかぶりコンクリートをはつり、帯鉄筋フレー溶接部の健全度の確認を行った。供試体はつり位置を図-22に、帯鉄筋溶接部健全度を写真-5に示す。その結果、頂版柱部およびソケット部共にフレー溶接部に損傷は無く健全であった。

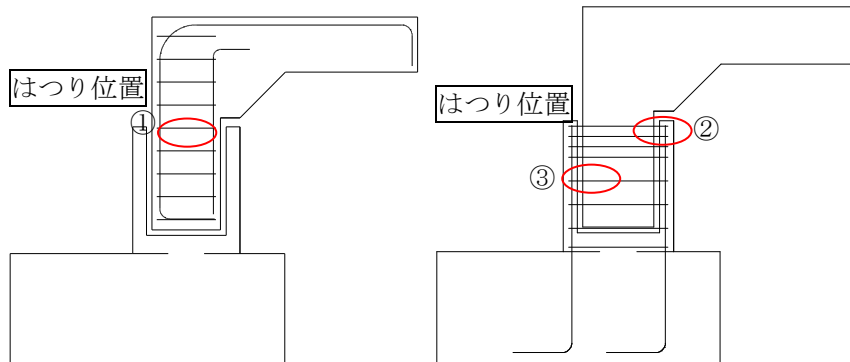
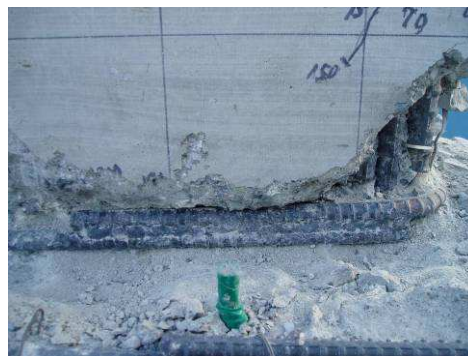


図-22 供試体はつり位置



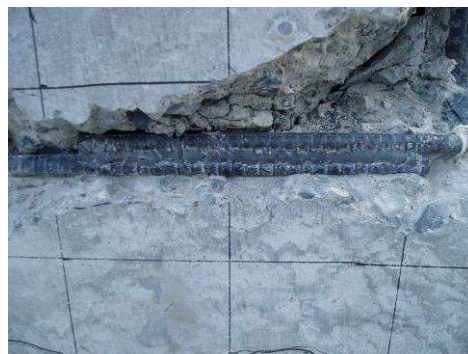
はつり調査全景



はつり位置②



はつり位置①



はつり位置③

写真-5 帯鉄筋溶接部健全度の確認

7. 一般国道12号線札幌市創成改良工事施工報告

7.1 工事概要

「一般国道12号札幌市創成改良工事」は、札幌市南5条通から北3条通を結ぶ延長1.1kmの地下道を構築するアンダーパス連続化事業のうち創成川通と国道12号線の交差点部約37m区間である。本工事は、内空高さ5.4m、幅9.6mのアンダーパス上下線(2車線×2)のカルバートを建設するものである。

工事概要を以下に、施工箇所を写真-6に示す。

工事名：一般国道12号線創成改良工事

工事箇所：北海道札幌市

発注者：北海道開発局 札幌開発建設部

施工者：鹿島建設株式会社

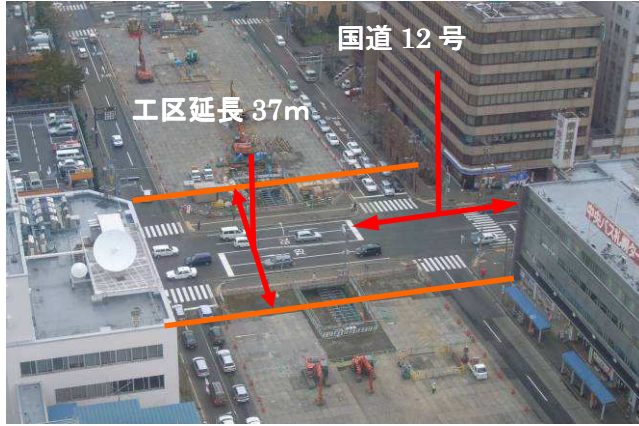


写真-6 施工箇所

本工事は、厳冬期の施工となり、路上交通規制を伴う場所打ちコンクリート部を減らすため、上床版のフルプレキャス化を図った。上床版と側壁の接合部にはソケット式結合を採用した。このソケット式結合を用いたボックスカルバートの施工について紹介する。

7.2 構造概要

図-23にボックスカルバートの概要図を示す。側壁の上部をソケット構造とし、PCPCa部材の上床版をはめ込むかたちで施工した。上床版のPCPCa部材幅は覆工板上に設置できるクレーンの能力から720mmとし、側壁ソケット部とPCPCa部材の隙間は、施工誤差・製作精度などを考慮し50mmとした。

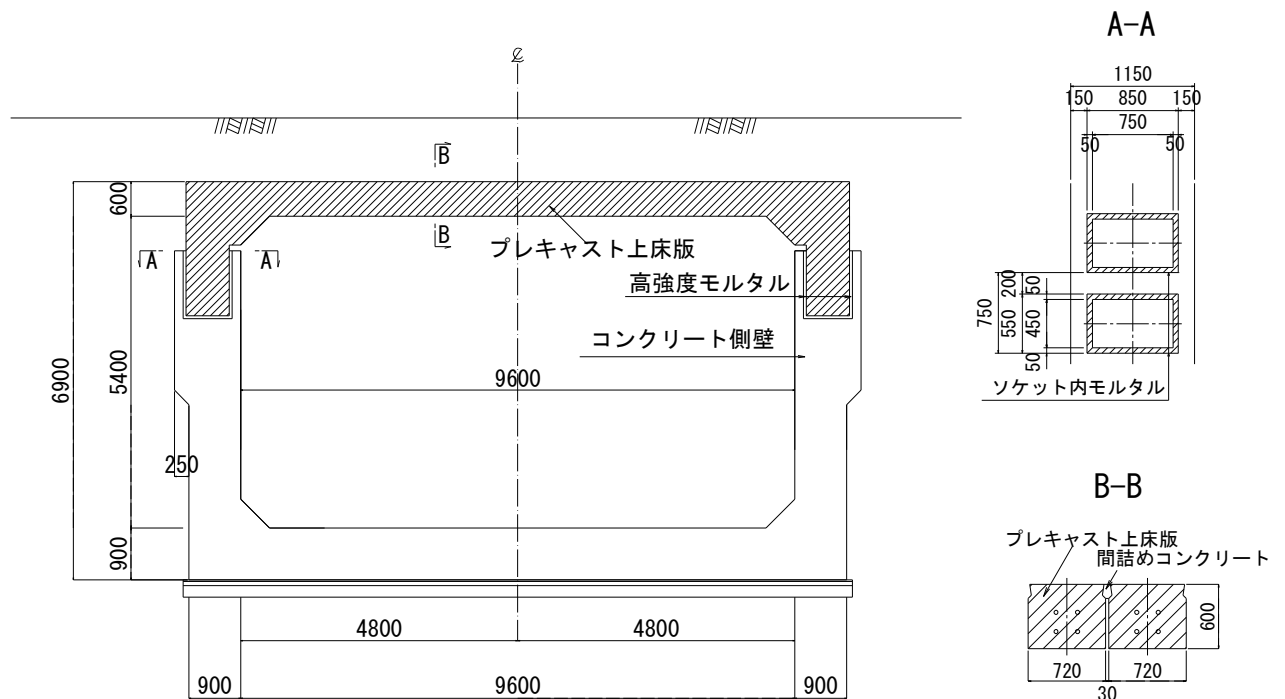


図-23 ボックスカルバート概要図

7.3 施工

アンダーパス上床版部施工における施工ステップを図-24に示す。

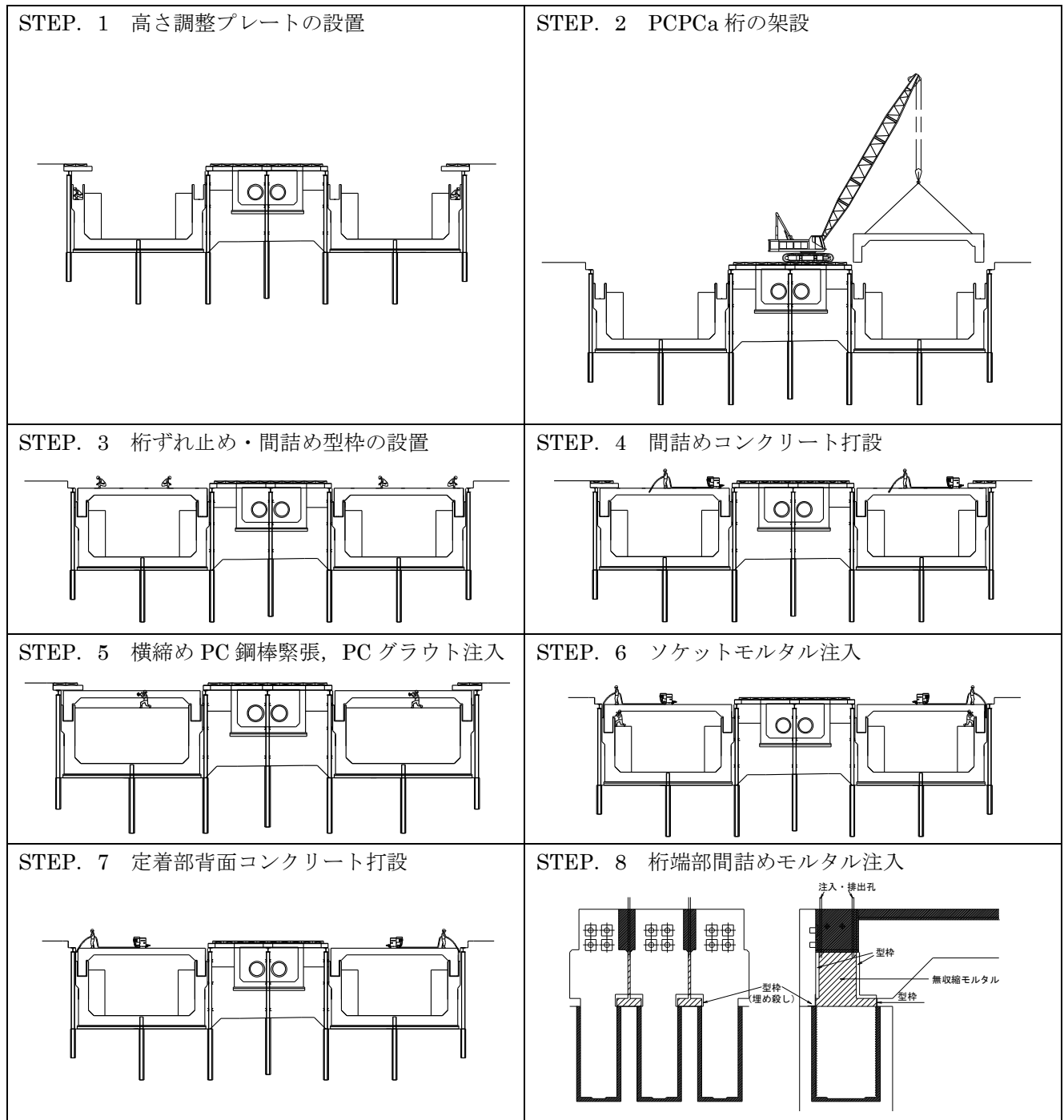


図-24 施工ステップ

上床版の設置は、道路の規制が可能な夜間に行った。作業帯設置後に覆工板を撤去し、現場打ちで先行施工された側壁上部に設けたソケット（写真-7）にPCaPC上床版をクレーンにて架設した（写真-8）。上床版の設置後は覆工板を復旧し、交通解放後に間詰めコンクリートを打設し、硬化後縦締めPC鋼棒の緊張・PCグラウトの注入、ソケット部の隙間に無収縮のモルタルを充填した。本施工法により、上床版の施工における工期が短縮でき、交通規制の短縮が可能となった。



写真-7 ソケット部完成状況

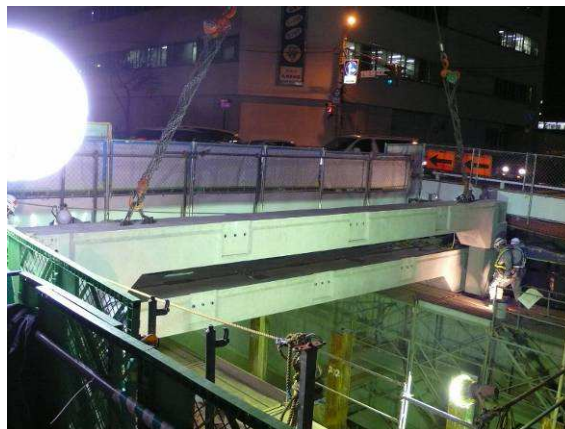


写真-8 上床版架設状況



写真-9 上床版完成状況

8. まとめ

場所打ちコンクリート側壁と PCaPC 部材の上床版とのソケット式結合構造に関して、静的載荷試験および疲労載荷試験を行い、その性能を明らかにした。その結果、静的載荷試験においては、終局荷重は設計耐力を上回る結果であり、常時に相当する荷重載荷時の鉄筋応力度は計算値以下であった。疲労載荷試験においては、繰返し回数の増加に伴う試験体の大きな変状は無く、問題となる鉄筋応力・変位の増加も無かった。また、疲労載荷試験終了後に行った静的載荷試験においても、耐力の低下は見られなかった。以上より本接合方法は活荷重による繰返し載荷を受ける箇所においても、十分な耐力並びに疲労耐久性能を有する剛結合であることが確認された。

また、実施工において、場所打ち部を減らしたフルプレキャストの上床版と簡易に結合できるソケット式結合方式を採用することで、施工の省力化を図ることができた。

謝辞

コンクリートソケット式結合の開発は、鹿島建設株式会社と株式会社ピーエス三菱との共同研究において実施したものである。開発に関しては鹿島建設の土木設計本部の方々の、施工に関しては国道12号線創成改良工事事務所の方々の貴重なご助言、ご指導を頂いている。また、供試体の製作にあたっては、技術研究所の方々に多大なご協力を頂いた。これら関係各位に、心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) F.レオンハルト, E.メニヒ: レオンハルトのコンクリート講座③ 鉄筋コンクリートの配筋, 鹿島出版会, 昭和60年
- 2) R.M.Canha: Structural Concrete, Journal of the fib Volume8 Number 1, March 2007 pp3-6