

PC定着部への削孔の影響に関する実験的検討

(独)土木研究所 正会員 ○田中 良樹
 (独)土木研究所 正会員 工修 木村 嘉富
 (独)土木研究所 工修 村越 潤
 (独)土木研究所 工修 吉田 英二

Abstract : Girders near expansion joints in highway bridges often suffer from severe corrosion due to drainage and leakage water containing deicing salts. Currently, chloride induced deterioration near the anchorage zone of prestressed concrete girders has been increasing. When drilling for determining the chloride profiles or chipping for repair is conducted at the anchorage zone under complex stresses due to several high compression forces, the influence of the works on the structures should be estimated in order to save workers and bridges. As the first approach, uniaxial compression tests, in which the load was carried on the local area, using the three concrete specimens having drilled holes or a circular opening were conducted. This paper presents the results containing the principal stresses measured using five-axes embedded strain gauges, and circumferential strain profiles measured inside the opening.

Key words : Anchorage zone, Stress concentration, Drilling, Opening, Principal stress, Bearing capacity

1. はじめに

道路橋桁端部は、狭隘なため湿気がこもりやすい上に、場合により塩分を含む水が伸縮装置から漏水すること等により、腐食しやすい部位である(図-1)¹⁾。著者らは、鋼橋、コンクリート橋を問わず、既設橋桁端部の腐食対策として、腐食原因除去などの腐食環境の改善方法および劣化調査方法や補修方法について検討を行っている。コンクリート橋に関して、国内では沿岸部の飛来塩分による著しい塩害事例が多く見られるが、今日、凍結防止剤の散布に起因した塩害事例の報告も徐々に増加しつつある。特に、プレストレストコンクリート(PC)桁の桁端部は、PC鋼材の定着部が集中していて、高い圧縮応力を含む、複雑な応力状態にある(図-1)。このため、調査の試料採取や補修のはつりを行うには、作業員の安全の確保および橋自体の安全の確保が不可欠である。

PC橋の黎明期である1950～60年代に、PC鋼材の定着部付近のひび割れ事例が多く見られたため、定着部付近の応力解析やひび割れ防止のための配筋方法に関する研究が行われた²⁾。それらの研究成果や経験による知見を踏まえて、定着体周囲の配筋やディテールが改善された。しかし、定着体付近におけるドリル削孔やはつりがひび割れの発生や破壊性状に及ぼす影響は明確でなく、上記のPC桁端部の安全に及ぼす影響も明確でない。その検討の第一段階として、削孔がある場合のコンクリートの局部応力や破壊性状を把握するため、PC主桁の桁端部を模擬した、コア削孔やドリル削孔による円孔を有するコンクリート供試体3体の局部圧縮荷重試験を実施した。

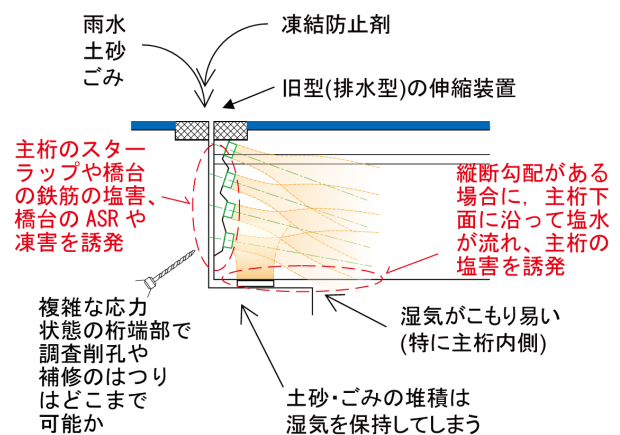


図-1 PC 橋桁端部の腐食環境と主応力分布 (概念図)

2. 試験方法

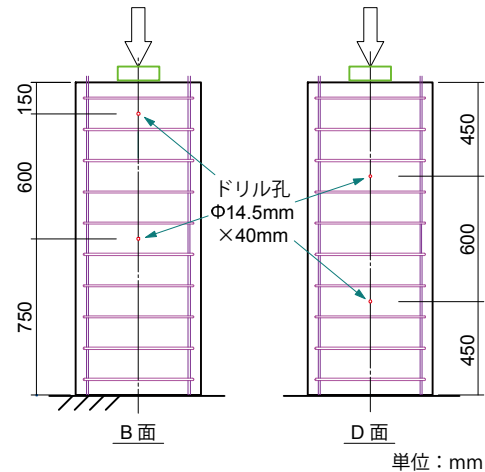
表-1に供試体の種類を、図-2に供試体の形状寸法と載荷方法を示す。載荷方法は、既往の研究(例えば文献3)などを参考に、定着部付近の応力状態を想定した、局部圧縮載荷とした。供試体の幅600mm、載荷面積200mm×200mmは、それぞれ支間30m程度のPCT桁の端部の幅とPCの定着板を実寸で模擬した。また、帯鉄筋の径と間隔も、同PC桁の桁端部付近のスターラップを模擬した。供試体Nは円孔のない供試体として製作した。供試体O-1、O-2は、いずれも直径100mmの貫通円孔を載荷板直下に位置するように配置した。実際には、この位置にPC鋼材が配置されているため、貫通削孔は行われぬが、モデルを単純化するためこの位置とした。また、桁端部において直径100mmのコア削孔は実際には行われぬと想定されるが、円孔内部の縁ひずみを測定するためのひずみゲージの貼り付けを精度よく行うために、この大きさが必要であった。円孔は、打設前に塩化ビニル管を配置しておき、コンクリートがある程度硬化した時点で塩化ビニル管を引き抜いた。供試体Nは、2000 kNまで載荷試験を行った後、約1年後に4箇所ドリル削孔(桁端部側面への削孔を想定)を行った上で破壊までの載荷試験を行った。本文では、ドリル削孔後の供試体をNRとして示す。表-2に、コンクリートの配合および打設結果を示す。また、表-3にコンクリートの強度試験結果を示す。鉄筋はすべて、D10, SD295Aであり、降伏点(3本の引張試験結果)は357N/mm²であった。試験は、供試体上端の中央に鋼製載荷板を配置して、鉛直方向に荷重を静的に載荷した。載荷中、載荷点における変位、コンクリートの円孔縁ひずみ、5軸モールドゲージ(写真-1, ゲージ長60mm)によるコンクリート内部のひずみ、鉄筋ひずみを含む、各部の変位、ひずみを

表-1 供試体の種類と最大荷重, 破壊状況

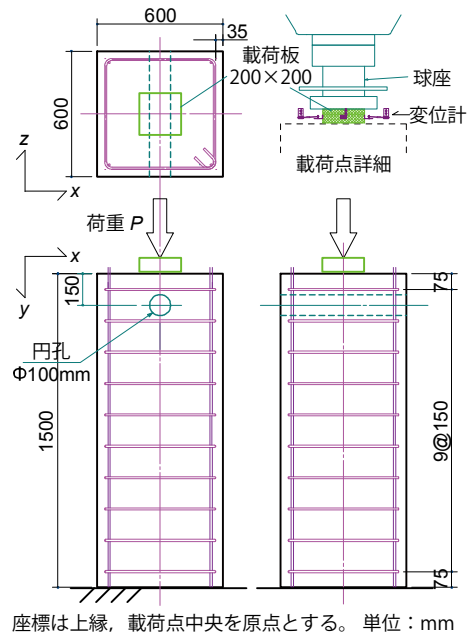
供試体	円孔	円孔位置 ¹⁾ (mm)	最大荷重 ²⁾ (kN)	破壊状況
N	円孔なし	—	(2000)	外見上の損傷なし
NR 再載荷	ドリル孔 φ14.5mm ×40mm	B面 150, 750 D面 450, 1050	3430	載荷板の押し込みとともに、四方の側面に鉛直方向のひび割れ
O-1	φ100mm の貫通孔	A, C面 150	1790	円孔の上下から鉛直方向のひび割れ、円孔を中心に斜め方向の放射状ひび割れ、載荷板に沿った陥没
O-2	φ100mm の貫通孔	A, C面 300	(2000)	円孔の上下から鉛直方向のひび割れ

注1) 円孔中心の位置, 上端からの距離

2) 括弧内は終局破壊なし, 試験機最大能力(2000kN)による。その後, NRは他の試験機で再載荷した。



(a) 供試体 NR (ドリル削孔後の供試体 N)



(b) 貫通孔を有する供試体(O-1の例)

図-2 供試体の形状寸法と載荷方法

表-2 コンクリートの配合および打設記録

W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SL (cm)
			W	C	S	G	AE	
57.0	4.7	46.9	178	312	831	968	3.34	18.0

普通ポルトランドセメント, AE減水剤(No.70)
最大粗骨材寸法 20mm, 目標圧縮強度 24 N/mm²

表-3 コンクリートの強度試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン 比	割裂引張強度 (N/mm ²)	材齢 (日)
載荷前	32.4	21.8	0.147	2.6	131
載荷後	32.1	22.4	0.162	2.8	140
再載荷後	39.3	27.9	0.198	2.5	470

注) 供試体と同じ養生によるコア 3本の平均値。ただし, 再載荷後のデータは試験後の供試体 NRの底面から採取したコア 3本の平均値

測定した。載荷点の変位は、載荷板の4辺(図-2(b))で測定した値の平均で表す。変位計は供試体を設置した圧盤上に架台を設けて支持した。ドリル孔付近のひずみおよび円孔縁のひずみの測定に使用したひずみゲージは、応力集中によるひずみの局所的な急変を捉えるため、ゲージ長を10mmとした。

3. 結果

3.1 荷重-変位関係と破壊状況

(a) ドリル孔を有する供試体

図-3 に、荷重-載荷点変位の関係を示す。また、図-4 にピーク直後のひび割れを、図-5 に切断後の内部のひび割れをそれぞれ示す。供試体 NR は、3000 kN で上縁から 150 mm 位置のドリル孔の近くに概ね鉛直方向のひび割れが発生し、若干の荷重の低下が見られた。その後、さらに荷重が増加して、3430 kN で全側面に鉛直方向のひび割れが急激に進行して、荷重が低下するとともに、変位が増加した。さらに載荷を続けたが、ピーク荷重を超えることはなかった。

3000 kN で発生したドリル孔付近のひび割れは、表面のドリル孔縁から数 mm 離れていたが、ドリル孔の奥に鉛直方向のひび割れが発生していた(写真-2)。このことから、ドリル孔先端(奥)における応力集中が、3000kN 時のひび割れ発生に影響したことが考えられる。

供試体 NR に関して、ドリル削孔がないとした場合の計算破壊荷重は、支圧耐力を既往の文献 3)を参考に $1.1 f'_c (A/A')^{0.45} A'$ 、ここに f'_c はコンクリートの一軸圧縮強度、 A は上端のコンクリートの面積、 A' は載荷面積、で評価した場合に 4650 kN であるが、試験での最大荷重は 3430 kN で計算値

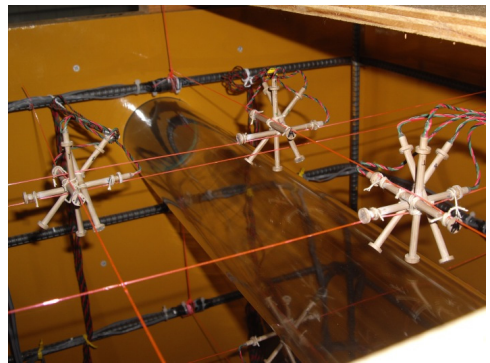


写真-1 5軸モールドゲージの配置

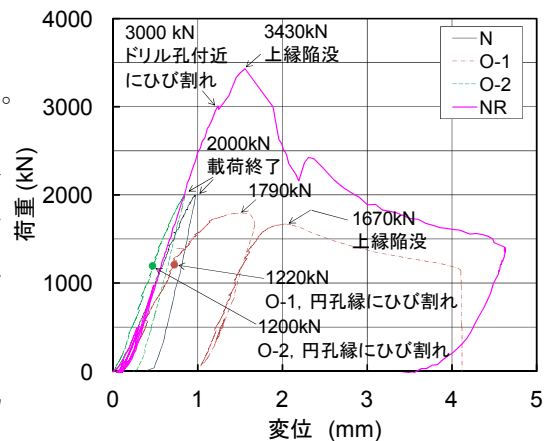


図-3 荷重-変位の関係

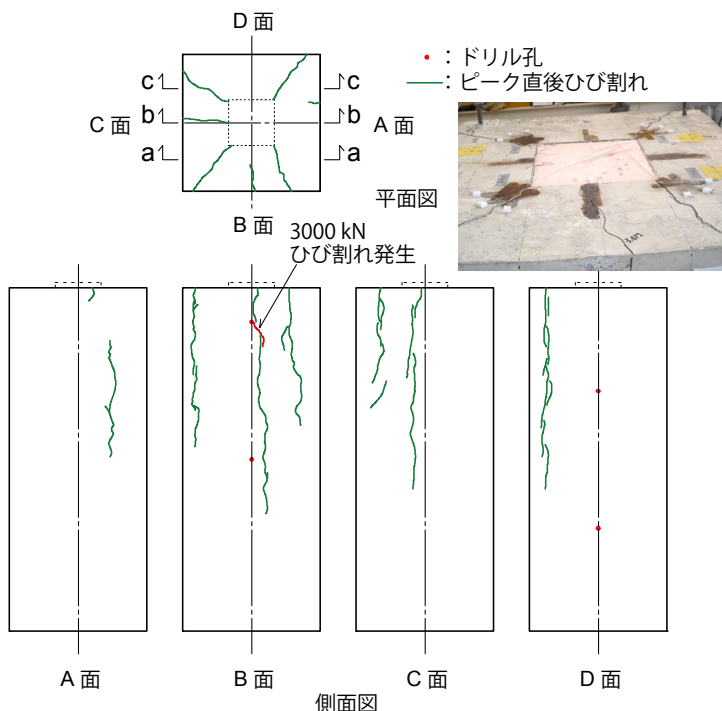


図-4 供試体 NR のピーク直後のひび割れ
注) 右上の写真は試験終了後の上縁陥没状況を示す。

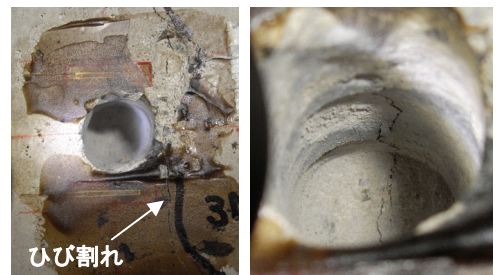


写真-2 ドリル削孔付近のひび割れ

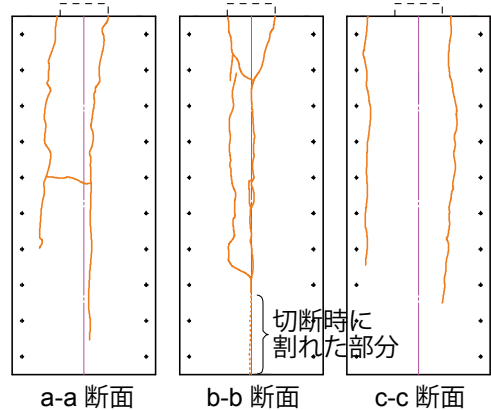


図-5 供試体 NR 内部のひび割れ
注) 試験終了後の状態であり、図-4 と異なる。

の74%であった。

(b) 貫通孔を有する供試体

図-3には、供試体 O-1 と O-2 の荷重-載荷点変位の関係も示した。また、図-6, 7に、円孔を有する供試体のひび割れ図を示す。円孔を有する供試体 O-1 と O-2 は、いずれも1200kN 程度で円孔の表面付近の上端から鉛直上方にひび割れが発生し、その後、円孔下端から鉛直下方にもひび割れが発生した。供試体 O-1 は、1790kN で荷重が低下し始めた。一旦除荷した後、再度載荷を行ったが、1 回目のピーク荷重を超えることなく、上縁コンクリートの陥没が、目視で明確に確認できる状態まで進行した。供試体 O-1 は、1 回目のピーク時に、上縁から円孔につながる斜めのひび割れが左右に見られるとともに、円孔下方にも B 面、D 面に向かう斜め方向のひび割れが見られた。また、供試体 O-1 の上縁には、図-6 の平面図に示すように、円孔に概ね平行なひび割れが見られた。2000kN で試験を終えた供試体 O-2 は、載荷点での陥没が見られなかった。

写真-3 に、供試体 O-1 の円孔内部の破壊状況を示す。1 回目ピーク時は、表面付近のひび割れを除いて、少なくとも顕著なひび割れは見られなかったが、2 回目の載荷の後には、上縁の載荷板に沿って、著しい陥没が見られ、円孔内にも大きなひび割れが発生していた。一方、供試体 O-2 の円孔内部には、ひび割れがほとんど発生しておらず、表面付近に見られた円孔の上下に見られたひび割れの深さは、A 面側、C 面側ともに表面から 70mm 程度であった。

供試体 O-1 に関して、円孔がないとした場合の計算破壊荷重を供試体 NR と同様に算出すると 3820 kN (試験時圧縮強度の違いにより供試体 NR と異なる)であるが、試験での最大荷重はその 47%(1790kN)であった。

3.2 コンクリート中の主応力

弾性理論における次式⁴⁾の3次元応力状態の関係に基づき、5軸モールドゲージから得られたデータから、コンクリート内の主応力および最小主応力方向を算出した。

$$\left. \begin{aligned} (S - \sigma_x)l - \tau_{xy}m - \tau_{xz}n &= 0 \\ -\tau_{xy}l + (S - \sigma_y)m - \tau_{yz}n &= 0 \\ -\tau_{xz}l - \tau_{yz}m + (S - \sigma_z)n &= 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1 \quad (2)$$

ここに、S: 主応力(式(1)の行列式より3個の解 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ が得られる),

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: x, y, z 各軸方向の直応力, τ_{ij} : ij 面に平行なせん断応力,

l, m, n: 主応力の x, y, z 各軸となす角度の余弦(cos)

ただし、未測定 of τ_{xz} は測定位置の対称性から 0 と仮定した。そのうち、供試体 NR の載荷点直下、上縁から 75mm および 225mm の位置での結果を図-8 に示す。最小主応

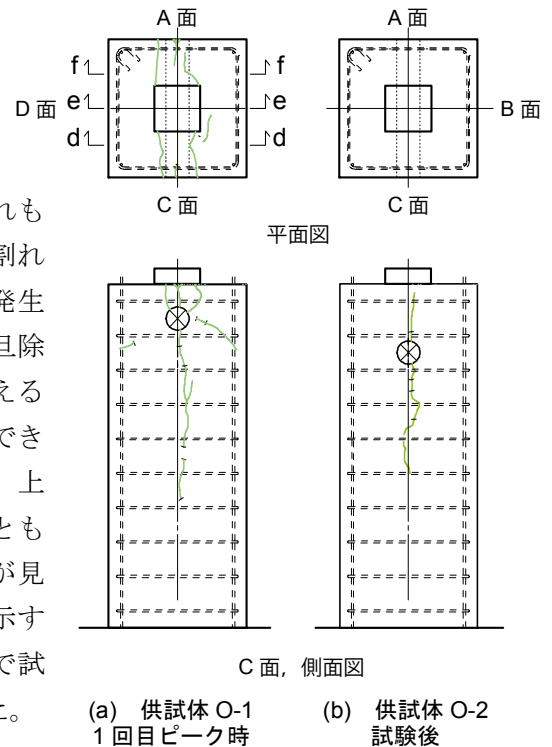


図-6 供試体 O-1, 2 のひび割れ図

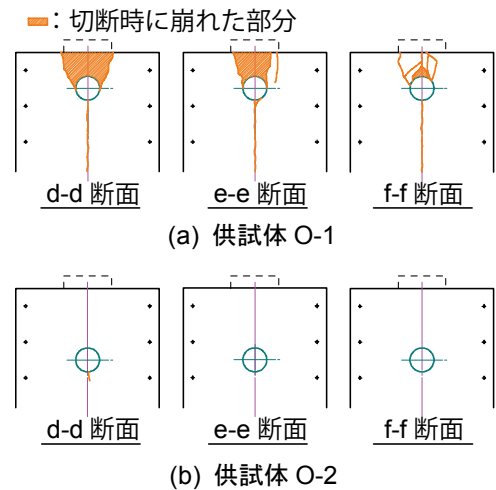


図-7 供試体 O-1, 2 内部のひび割れ



写真-3 試験終了後の供試体 O-1 の円孔内部の破壊状況(A 面側から撮影)

力(負号が圧縮側)の方向 θ は、載荷方向(鉛直方向, y 軸)に対する角度で表わす。上縁から 75mm の位置(CL1)では、載荷板に近いことから、載荷開始時より三軸圧縮応力下に置かれ、高い圧縮応力が作用していたこと(弾性係数を一律としているために値が大きい部分も含まれる)、ピーク荷重後に引張応力が生じたことがわかる。上縁から 225mm の位置(CL2)は、図-8(b)中の参考図に示すとおり、局部圧縮による押し抜き部分の先端付近に位置しており、この位置では引張の主応力も生じていた。940 kN 以降、引張主応力はコンクリートの割裂引張強度の 2.5 N/mm^2 を超えていたことから、内部でひび割れが発生し始めていた可能性がある。なお、モールドゲージは両端の突起により、ひび割れ発生後、ある程度の伸びまで(突起破断まで)、ひび割れを含む平均ひずみを表わすものと考えられる。

3.3 ドリル孔付近のひび割れと主応力

図-9 に、3000kN 時にひび割れが発生したドリル孔付近のコンクリート表面(B 面)のひずみを荷重との関係で示す。ドリル孔の上下にはともに引張ひずみが作用しており、特に孔下のコンクリート表面のひずみは 1600kN 時で既に 120μ に達していた。しかし、目視で明確にひび割れが確認できたのは、3000kN でわずかに荷重の低下が見られたときであった。また、図-10 にそのドリル孔に最も近いモールドゲージ位置での主応力を示す。この位置では、780kN 時で引張主応力が 2.5 N/mm^2 を超えた。そのモールドゲージ位置での主応力方向は、3000kN より少し小さい 2860kN 時に変化が表れていた。

3.4 円孔縁のひび割れと主応力

図-11 に、供試体 O-1 の 500kN 時の円孔縁のひずみ測定結果を示す。載荷点直下の円孔縁と A 面から 75mm の円孔縁における円周方向のひずみ分布を示す。円孔縁の

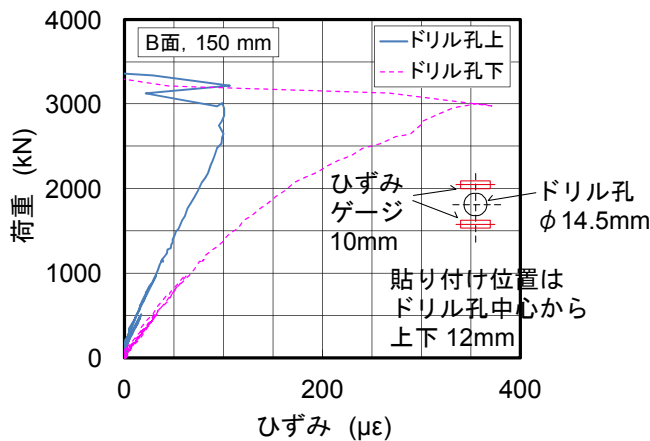
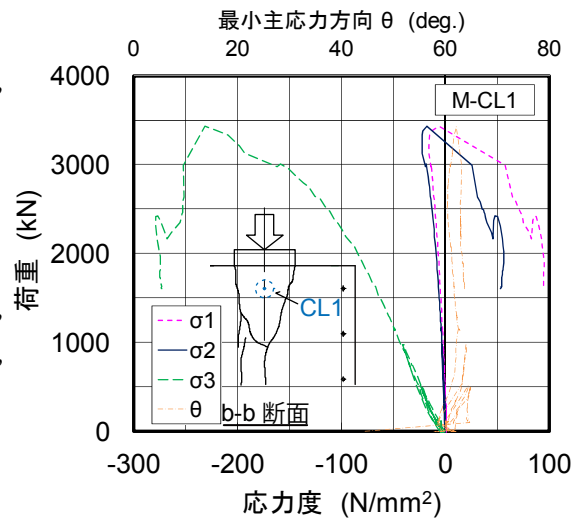
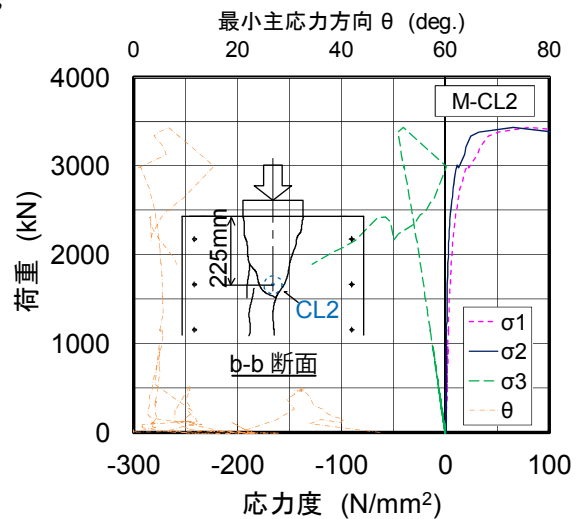


図-9 ひび割れが発生したドリル孔付近のコンクリートひずみ

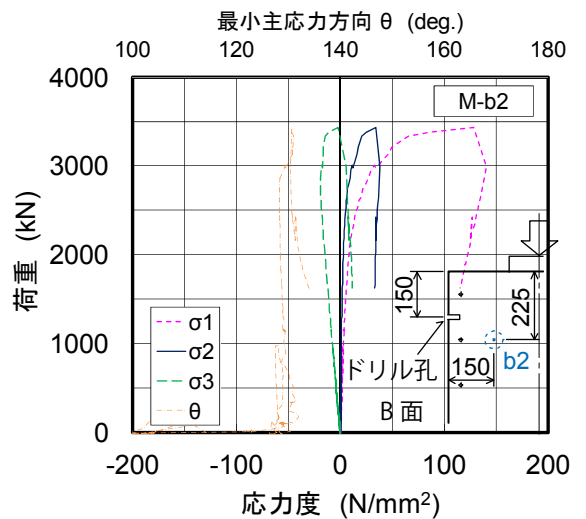


(a) $(x, y, z) = (0, 75, 0)$



(b) $(x, y, z) = (0, 225, 0)$

図-8 供試体 NR の載荷点直下におけるコンクリート中の主応力の変化



$(x, y, z) = (-150, 225, 0)$

図-10 ひび割れが発生したドリル孔付近におけるコンクリート中の主応力の変化

引張ひずみは、荷重点直下の上端で最も大きく、500kN 時で既に 3000μ に達し、**図-11(b)**に示した表面付近の円孔縁の最大値よりも著しく大きい値であった。

1200kN で見られたひび割れは、供試体側面および表面に近い円孔縁に見られた。しかし、**図-12** に示すように、供試体 O-1 の円孔縁のひずみは、57 kN で既に 118μ になっており、鉄筋コンクリート梁の下縁であれば、曲げひび割れが発生するレベルにあった。円孔縁では 3000μ に達した箇所も見られたが、応力集中による引張ひずみは円孔縁からの深さに応じて急激に減少する傾向にあることから、曲げひび割れの場合と異なり、ひび割れの深さ方向への進展が遅く、よってひび割れ幅の進展も遅かったことから、ひずみゲージが直ちに損傷することなく測定できたと考えられる。1200kN 程度までは、これらの応力集中が供試体 O-1 全体の挙動に顕著に影響を及ぼすことがなかったのも、このことが一因であったと考えられる。

図-13 に、**図-11(a)**に示した円孔縁ひずみ測定位置の直下(かつ荷重点直下)におけるモールドゲージ位置の主応力を示す。900kN での引張主応力は 3N/mm^2 であり、それ以降加速的に値が増加した。また、同荷重で主応力方向の急な変化が見られた。

なお、供試体 O-1 の帯鉄筋のひずみは 1550kN で上から 1 段目の帯鉄筋の内側から降伏し始め、最大荷重の前に上から 3 段目の帯鉄筋の降伏が始まるとともに、1~3 段目の鉄筋ひずみが急激に増加した(**図-12**)。

4. まとめ

PC 桁端部を模擬した供試体 3 体の局部圧縮荷重試験を行い、解析手法の検証に用いる、荷重点付近のコンクリート内部の応力や破壊性状に関する情報を得た。そのうち、ドリル孔は、削孔深さが 40mm 程度であっても、削孔位置によってはコンクリートのひび割れを誘発して、耐力にも影響を及ぼす可能性があることがわかった。

参考文献

- 1) 田中良樹, 村越潤 : 道路橋桁端部における腐食環境の評価と改善方法に関する検討, 土木技術資料, Vol.50, pp. 16-19, 2008.11.
- 2) 藤井学 : PC に対する設計上の諸問題(静定構造), プレストレストコンクリート最近の進歩, 昭和 41 年度講習会テキスト, 土木学会関西支部, pp. 37-56, 1966.11.
- 3) 六車熙, 岡本伸 : 局部荷重を受けるコンクリートの支圧強度に関する研究, プレストレストコンクリート, 5-5, pp. 22-29, 1963.10.
- 4) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., Theory of Elasticity, Third Ed., McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., pp. 567, 1970.

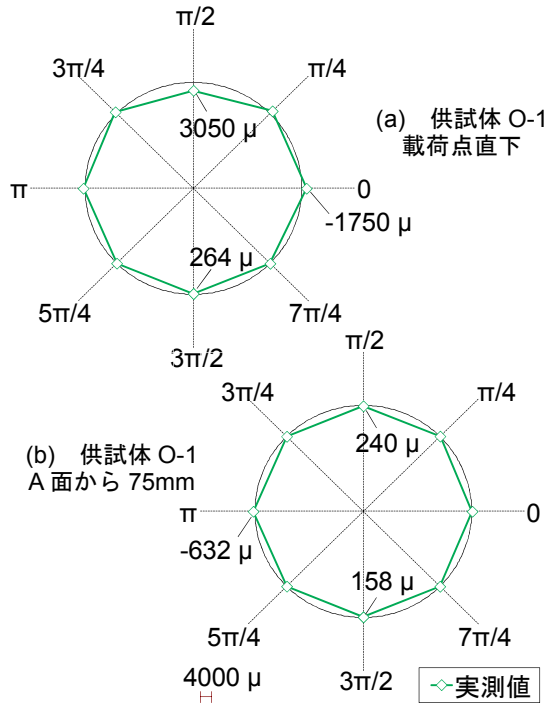


図-11 500kN 時、円孔縁の円周方向ひずみ

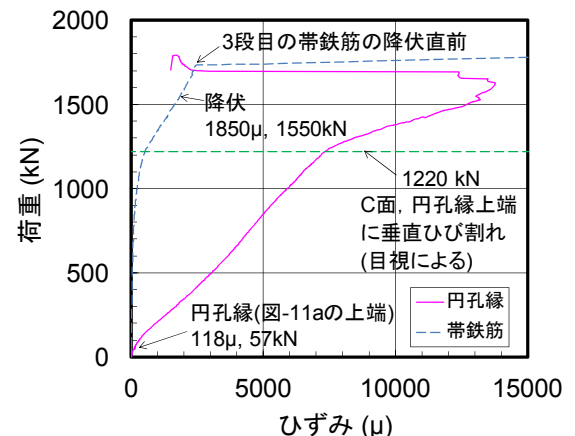


図-12 円孔縁と最上段の帯鉄筋のひずみ

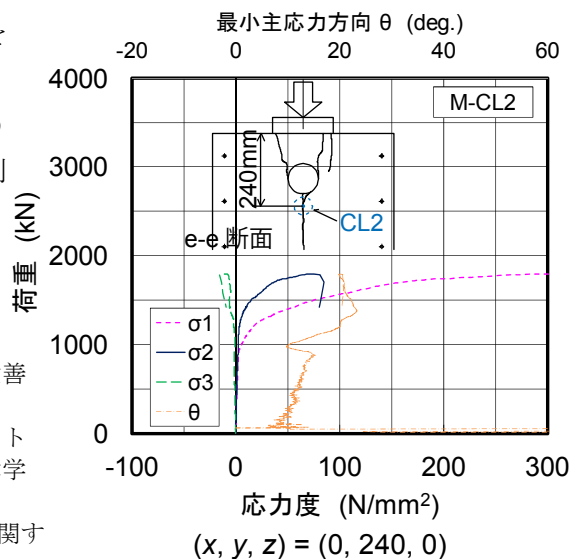


図-13 供試体 O-1 の円孔直下におけるコンクリート中の主応力の変化