

(14) コンクリート合成構造の結合面の水平せん断強度に関する実験的研究

建設省 土木研究所 構造橋梁部 橋梁研究室

西川 和廣

同 上

内田 賢一

同 上

廣松 新

プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員〇菅谷 晃彦

1. まえがき

コスト縮減や施工の省力化を目的に、従来のPC合成げたの見直しを図るため、建設省土木研究所と(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会は、平成8年度から共同でPC合成げた橋(PC合成床版タイプ)に関する研究を行った。具体的には、PC合成床版の疲労耐久性とPCげたとの合成構造に関する研究¹⁾²⁾を報告したがさらに、より合理的な設計・施工の推進のため、けたと床版の部材相互の結合面における水平せん断強度に関する研究を行った。本論文はこの研究成果を報告するものである。

2. 研究目的

本研究では、結合面の仕上げ状態やずれ止め鉄筋の配置量の影響による水平せん断強度の確認を目的としてプッシュオフ試験を、コンクリート合成げたの結合面における水平せん断破壊挙動と水平せん断強度の確認を目的として、はり供試体の静的荷重試験(以下、はり荷重試験)を行った。

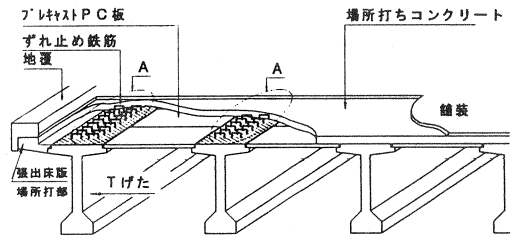


図-1 PC合成げた橋(PC合成床版タイプ)の構造を示す。けたと床版の間の結合面におけるずれ止め鉄筋は、図中Aの部分に配置されている。

3. 試験方法

3.1 プッシュオフ試験

図-2に供試体の形状寸法を、図-3に結合面の仕上げ方法を示す。供試体は、一次コンクリート打設後の結合面をそれぞれホウキ目1、ホウキ目2、洗い出し、金ゴテによる仕上げとし、一次コンクリートの硬化後に二次コンクリートを打設して製作した。さらに、比較用に結合面を有さない一体型も加えた。

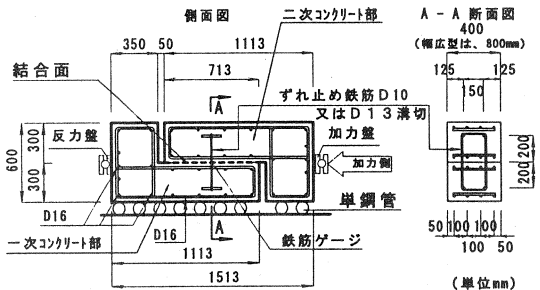


図-2 試験供試体(例 杓目1・鉄筋比0.05%)
ここで、ホウキ目1とは、一次コンクリート打設後2.0時間以内に、結合面にホウキ目を入れたもので、その後レイタンスが結合面に浮き上がると考えられる仕上げ状態である。これに対し、ホウキ目2とは、一次コンクリート打設後3.5時間以降に、レイタンスを掻き出すように結合面にホウキ目を入れたものである。図-4にずれ止め鉄筋の配置を、表-1に供試体の一覧を示す。ここで鉄筋の配置量については、ずれ止め鉄筋比(以下「鉄筋比」と呼ぶ)0.2%以上とされた現行道路橋示方書の規定以下とし、鉄筋量がせん断強度に及ぼす影響を確認するものとした。また、供試体は、ホウキ目1の仕上げ状態で、ずれ止め鉄筋を荷重作用方向に並べたもの(表中Cタイプ)と、これに対し、比較的均一に並べたもの(Dタイプ)も加え、計38体製作した。

実験は、図-2に示すように、結合面を垂直方向に拘束しないように設置し、加力盤側から水平方向に静

的に荷重を増加させて、結合面のせん断破壊が生じるまで行った。

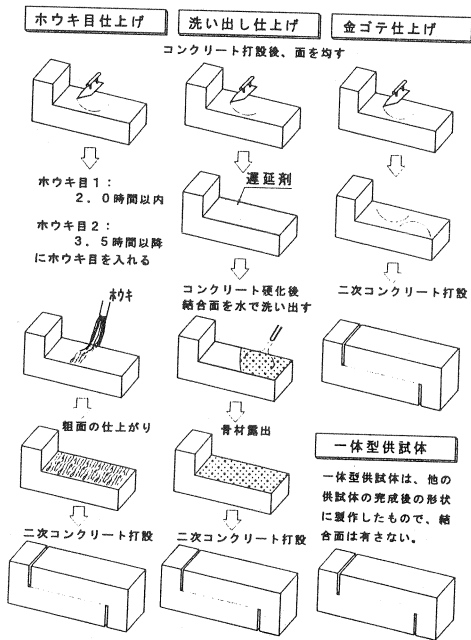


図-3 結合面の仕上げ方法

表-1 プッシュオフ試験供試体一覧

結合面状態	鉄筋比	供試体数	コンクリート強度 kgf/cm ²
ホウキ目1	0.05%	3体	326
	0.10%	3体	326
	0.15%	3体	326
	0.20%	3体	233
洗い出し	0.10%	3体	398
	0.20%	3体	398
金ゴテ	0.10%	3体	336
	0.20%	3体	336
一体型	0.10%	1体	389
	0.20%	1体	389
Cタイプ	0.10%	3体	387
Dタイプ	0.10%	3体	387
ホウキ目2	0.10%	3体	262
	0.20%	3体	266

表-2 はり載荷試験供試体一覧

洗い出し	0.10%	1体	518
ホウキ目2	0.10%	1体	529
ホウキ目2	0.20%	1体	437

コンクリート強度は、一次と二次コンクリート部の小さい方を示した。

3.2 はり載荷試験

図-5に供試体の形状寸法を表-2に供試体一覧を示す。供試体は、結合面の状態を洗い出し・鉄筋比0.1%としたものと、結合面の状態をホウキ目2・鉄筋比0.1%およびホウキ目2・鉄筋比0.2%とした各々1体の計3体を製作した。また供試体には、床版と腹部の結合面ですれ破壊が生じるまでは、曲げ破壊を起こさないようにPC鋼棒(φ36B種1号)によりプレストレスを導入した。

実験は、供試体を支間5mで単純支持し、支間中央から左右に1mの位置で静的に載荷して、床版と腹部

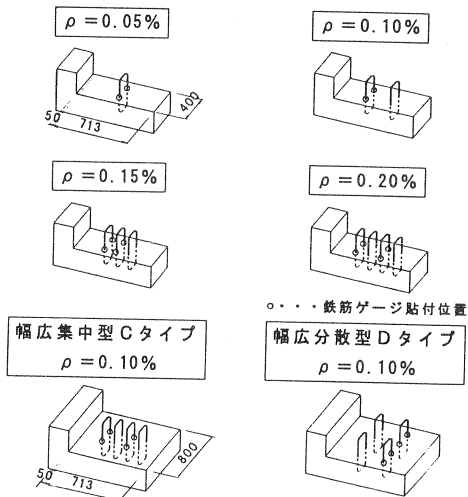
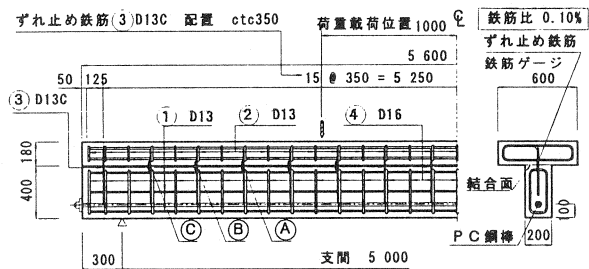
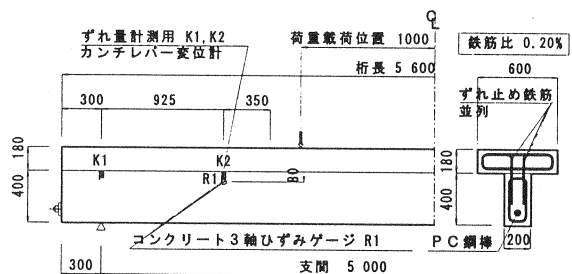


図-4 結合面位置の各鉄筋比における鉄筋配置



①②③は、鉄筋ゲージ貼付位置

ずれ止め鉄筋配置と計測位置 (単位mm)



ずれ量・コンクリートひずみ計測位置 (単位mm)

図-5 はり供試体

の結合面にずれ破壊が生じるまで行った。

4. 研究結果

4.1 実験結果と国内外の許容応力度との比較

図-6 (a)に、実験結果である水平せん断強度 (以下「せん断強度」と呼ぶ) と鉄筋比の関係を示す。試験供試体のコンクリート圧縮強度にはバラツキが生じたため、このことによるせん断強度への影響を考慮して実験値を補正した。図-6 (b)に、この補正した値と国内外の許容値との関係を示す。なお、縦軸のせん断強度は、各々実験の載荷荷重に対し式. 1、式. 2を用いて計算したものである。補正方法は、土木学会「コンクリート標準示方書 (平成8年制定)・6章6.3.7設計せん断伝達耐力」を参考にし、せん断強度の実験値に、基準値 (ここでは 300kgf/cm^2 とした) の平方根をコンクリート強度材料試験値の平方根で除した値を乗じる方法で行った。

図中の各実験結果の値を結んだ線分は、結合面の条件 (仕上げ状態と鉄筋比) が同じである供試体の各々3体の実験値のうち最低値を結んだものである。なお、国外の規定については、アメリカにおける規定を参考³⁾⁴⁾⁵⁾にした。また、ループ式は、カルガリー大学の、結合面が粗面の状態における終局限界状態の実験値である。ここで、AASHTO-LRFDは限界状態設計法における規定であり、AASHTO-1とAASHTO-2は、AASHTOにおける許容応力度法の規定で、前者は結合面が粗面でない状態、後者は結合面が粗面の状態の規定である。

以下、図-6 (b)を対象に、結合面のせん断強度と仕上げ状態との関係、鉄筋の配置方向の関係、鉄筋比の関係について、および国内外の許容値との比較を行った。そして、次の内容を確認した。

- ①プッシュオフ試験において、結合面の仕上げ状態によるせん断強度は、洗い出しとホウキ目2が大きく、次に、ホウキ目1、金ゴテの順であった。ここで、ホウキ目2はホウキ目1に対し、鉄筋比0.1%の場合で1.6倍程度、鉄筋比0.2%の場合で1.4倍程度を示し、せん断強度の差が顕著に現れた。洗い出しは、鉄筋比0.1%の場合では、ホウキ目2のせん断強度を上回ったが、鉄筋比0.2%の場合では、ホウキ目2を下回った。
- ②プッシュオフ試験において、鉄筋の配置方法によるせん断強度は、CタイプがDタイプを上回ったがその差は小さく、結合面の幅やずれ止め鉄筋の配置方法が強度に与える影響は小さいものと考えられる。
- ③プッシュオフ試験において、鉄筋比によるせん断強度は、ホウキ目1、ホウキ目2、および金ゴテにおいて鉄筋比の増加にともない増加した。
- ④はり載荷試験において、ホウキ目2は、洗い出しのせん断強度を上回った。
- ⑤はり載荷試験のせん断強度は、全体的にプッシュオフ試験結果より大きく、ホウキ目2では鉄筋比0.1%で 30.3kgf/cm^2 、鉄筋比0.2%で 34.9kgf/cm^2 を示し、プッシュオフ試験結果に比べて、各々2.2倍、1.8倍であった。

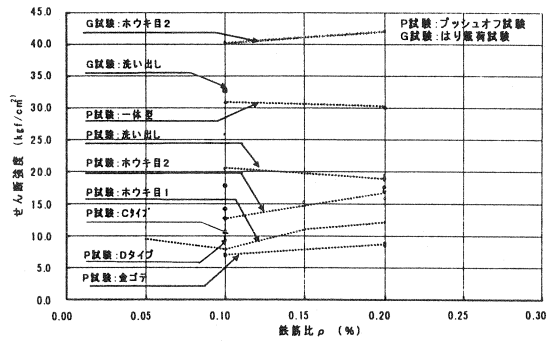


図-6 (a) せん断強度と鉄筋比の関係 (補正前)

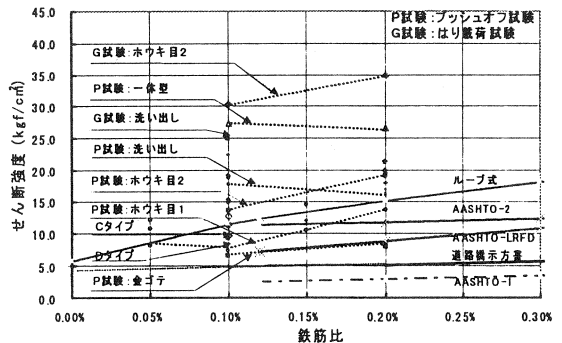


図-6 (b) せん断強度と国内外の許容値 (補正後)

プッシュオフ試験: $\tau = \text{水平荷重} / \text{結合面面積}$ (式. 1)
 はり載荷試験: $\tau = S \cdot Q / (b \cdot l)$ (式. 2)
 道路橋示方書IIIコンクリート橋編9.3の項参照

表-3 補正した値と国内外許容値との比 (はり載荷試験)

仕上げ	鉄筋比	ループ式	AASHTO-LRFD	AASHTO-2	道路橋示方書
洗い出し	0.10%	2.17	3.65	2.22	5.57
ホウキ目2	0.10%	2.65	4.45	2.71	6.79
ホウキ目2	0.20%	2.31	3.96	2.97	6.81

⑥表-3に、はり載荷試験結果の補正した値と国内外の許容値との比を示す。ホウキ目2のせん断強度は、現行の道路橋示方書の許容値に比べ約6.8倍を示した。

4.2 結合面のずれ止め鉄筋ひずみに関する破壊までの挙動

図-7(a)と図-7(b)にプッシュオフ試験とはり載荷試験の、各々鉄筋比0.1%と0.2%の場合における、結合面のせん断応力度と鉄筋ひずみの関係を示す。なお、横軸のせん断応力度の値は、前項4.1の式1、式2を用いて計算したものである。

図中のプッシュオフ試験供試体の鉄筋ひずみは、結合面の条件(仕上げ状態と鉄筋比)が同じである3体の供試体の内、せん断強度が最も低い値を示した供試体における図-4に示した鉄筋ゲージ位置より計測した値の平均値である。また、はり載荷試験供試体の計測位置A,B,Cは、図-5中に示した鉄筋ひずみ計測位置に対応している。

プッシュオフ試験の鉄筋ひずみは、鉄筋比の異なるいずれの供試体も、せん断応力度の増加にともない鉄筋ひずみが増加し、一体型では、線形的に増加した。洗い出しの鉄筋ひずみは、せん断応力度が13から15kgf/cm²程度まで他の供試体に比べ、一体型に近い値で線形的に増加し、それ以後は破壊時まで急激に増加した。また、鉄筋比0.1%の場合、金ゴテとホウキ目1の鉄筋ひずみは、近い値でせん断応力作用初期の頃から急激な増加を示した。ホウキ目2の鉄筋ひずみは、鉄筋比0.1%の場合、せん断応力度が10kgf/cm²程度まで、鉄筋比0.2%の場合では18kgf/cm²程度まで、最大7μ程度の小さい値で増加した。それ以後は、せん断応力度の増加にともない急激な増加の傾向を示し、結合面がせん断破壊を起こした直前でも最大150μ程度を示し降伏ひずみよりかなり小さい値であった。

はり載荷試験の鉄筋ひずみは、ホウキ目2の計測位置A,Cでは、鉄筋比0.1%の場合にせん断応力度が破壊直前の31kgf/cm²程度まで、鉄筋比0.2%の場合にはせん断応力度が30kgf/cm²程度まで、洗い出しの計測位置Cでは25kgf/cm²程度まで圧縮ひずみを示した。これらのことから、計測位置Aと計測位置Cの結合面には圧縮応力が作用し、結合面のせん断耐力を増大させているものと考えられ、これがプッシュオフ試験結果に比べはり載荷試験結果のせん断強度が大きく現れた理由と考えられる。

4.3 プッシュオフ試験供試体のせん断破壊までの挙動

次に、プッシュオフ試験供試体のずれ破壊時までの、結合面の垂直方向応力度とせん断応力度の関係について確認した。確認の対象としたのは、鉄筋比0.1%のホウキ目1と一体型の供試体である。図-8にコンクリート3軸ひずみゲージの貼付位置を、図-9(a)に荷重により計算したせん断応力度P/Aとコンクリートゲージの計測結果から求めた結合面垂直応力度σ_yの関係を、図-9(b)に荷重により計算したせん断応力度P/Aとコンクリートゲージの計測結果から求めたせん断応力度τ_{xy}の関係を示す。

ここで、ホウキ目1の垂直応力度は、結合面を挟んで上下に貼付したコンクリートゲージにより計測した結果である。

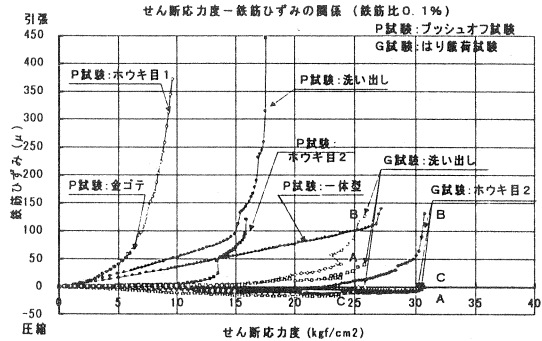


図-7(a) せん断応力度-鉄筋ひずみ(鉄筋比0.1%)

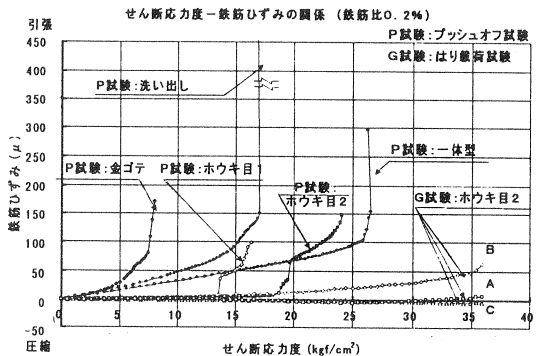


図-7(b) せん断応力度-鉄筋ひずみ(鉄筋比0.2%)

図-9(a)から、両供試体の計測位置では、水平荷重により結合面に垂直な引張応力が作用し、この引張応力は、一体型では線形的に増加し、ホウキ目1ではせん断応力作用初期の頃から一体型より小さく、また、せん断応力度が 2.5kgf/cm^2 の頃から緩やかに減少している様子が分かる。あわせて、図-7(a)ではホウキ目1の鉄筋ひずみが、せん断応力作用初期の頃から急激に増加していることから、ホウキ目1では結合面に働く垂直引張応力により、結合面の付着作用が低下するとともに、結合面位置で引張応力が鉄筋に伝達され引張ひずみを増加させ、コンクリート結合面のせん断強度が小さく現れたものと考えられる。

図-9(b)から、一体型とホウキ目1のせん断応力 τ_{xy} は、横軸のせん断応力 P/A の増加ともない線形的に増加したことが分かる。また、両供試体のせん断応力 τ_{xy} は、せん断応力 P/A に比べその $1/4$ 程度の小さい値で進行した。

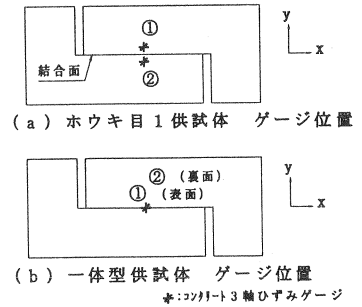


図-8 供試体コンクリート・ゲージ貼付位置

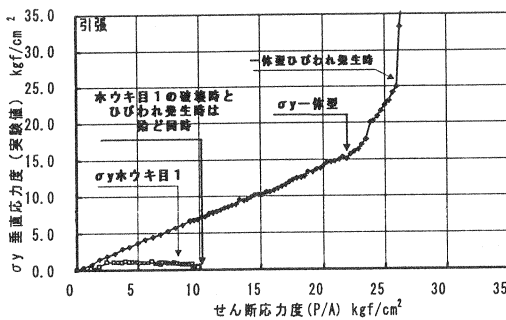


図-9(a) せん断応力 P/A -垂直応力 σ_y

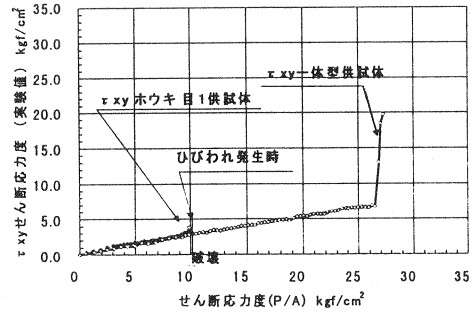


図-9(b) せん断応力 P/A -せん断応力 τ_{xy}

4.4 はり供試体のせん断破壊までの挙動

次に、はり載荷試験において、載荷荷重による結合面ずれ破壊時までの、結合面のずれ量、コンクリートに伝達されたせん断応力度を確認した。

図-10にせん断応力度とずれ量の関係、図-11にせん断応力度と載荷荷重による結合面付近のコンクリートに伝達された水平せん断応力度の関係を示す。どちらの図も結合面がホウキ目2の状態、鉄筋比0.1%の供試体における実験結果である。なお、図-10の縦軸と図-11の横軸のせん断応力度は、載荷荷重により、前項4.1の式、2を用いて計算した値である。図-11縦軸のせん断応力 τ_{xy} は、図-5に示したコンクリート3軸ひずみゲージの計測値から算出したものである。また、図-10と図-11の(′)を付加した記号は、供試体の支間中央において対称の位置に設置した計測器・ゲージを表したものである。

ずれ破壊は、載荷点付近から支点側に向かって急激に発生したことから、載荷点に近い図-10、K2の結果から判断すれば、破壊は、ずれ量が $0.04\text{mm} \sim 0.06\text{mm}$ の間で発生したと考えられる。

せん断応力度は、図-11に示すように、載荷荷重により計算したせん断応力度とせん断応力 τ_{xy} は

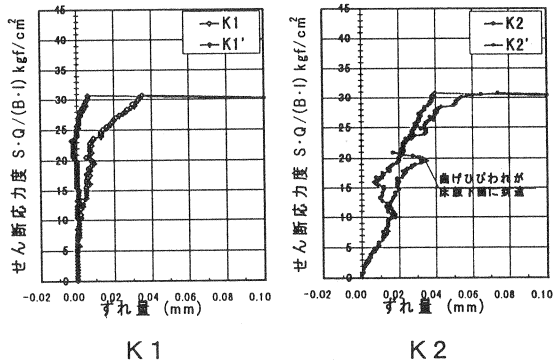


図-10 せん断応力度とずれ量の関係

良く一致し、載荷荷重の増加にともない線形的に増加した。

5. まとめ

本研究において、結合面の仕上げ状態やずれ止め鉄筋の配置量の影響による水平せん断強度の確認を目的として、プッシュオフ試験とはり載荷試験を実施した結果、以下のことを確認した。

1) 結合面の仕上げ状態の違いによるせん断強度への影響についてプッシュオフ試験では、せん断強度の大きさは、ホウキ目2と洗い出しが同程度で大きく、次にホウキ目1・金ゴテの順に現れた。はり載荷試験では、ホウキ目2が洗い出しを上回った。

ここで、プッシュオフ試験ではホウキ目2のせん断強度がホウキ目1のせん断強度を大きく上回ることが確認され、施工についてはレイタンスを除去することが重要であることが分かった。

2) プッシュオフ試験では、ずれ止め鉄筋比の0.1%から0.2%の増加によるせん断強度への影響は、ホウキ目2、ホウキ目1および金ゴテの場合においてのみ、せん断強度が大きくなる傾向を示した。洗い出しの場合では、せん断強度の増加の傾向は示さなかった。

3) はり載荷試験のホウキ目2では、鉄筋比0.1%と0.2%の場合でせん断強度はそれぞれ30kgf/cm²と35kgf/cm²程度を有し、どちらの場合も国内外の許容値に比べ高い値を示した。

4) はり載荷試験における供試体結合面の水平せん断強度は、載荷荷重により結合面に働く圧縮応力の影響により、プッシュオフ試験と比較して大きくなる。

6. あとがき

PC合成げた橋(PC合成床版タイプ)は、平成8年度から平成9年度にかけて建設省の「試験フィールド制度」の適用を受けて3橋が、「特定技術活用パイロット事業」として1橋がすでに施工された。現場での施工性も検証されたことで、今後さらなる普及が期待される。本研究がその一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 西川、神田、内田、澤田：“PC合成げた橋(PC合成床版タイプ)に関する実験および解析”
第7回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集 P.61～64 平成9年10月
- 2) 西川、内田、管谷：“PC合成床版(PC合成げた橋)の耐久性に関する実験的研究”第2回日本道路会議 P.842～843 平成9年12月
- 3) AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS SI Units First Edition 1994
- 4) ACI STANDARD/COMMITTEE REPORT 318/318R-156～160
- 5) PCI DESIGN HANDBOOK FOURTH EDITION Precast and Prestressed Concrete PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE(PCI)
- 6) 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編 社団法人 日本道路協会 平成8年12月
- 7) コンクリート標準示方書 設計編 土木学会 P.69～71 平成8年制定

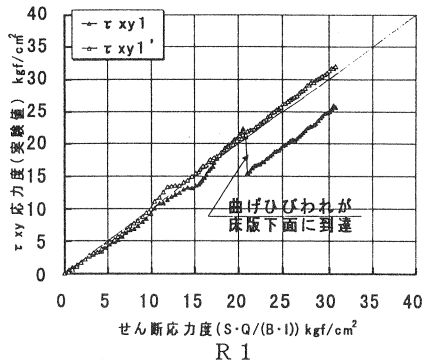


図-1.11 せん断応力度 $S \cdot Q / (B \cdot l)$ とせん断応力度 τ_{xy} の関係