

鉄筋比を変化させた AFRP シート下面接着 RC 版の静載荷実験

Static loading test of RC slabs bonded with AFRP sheet in case varying rebar ratio

三井住友建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学 正会員 澤田 純之 (Sumiyuki Sawada)
室蘭工業大学大学院 ○ 学生会員 作田 大幸 (Hiroyuki Sakuta)

1. はじめに

近年、炭素繊維製やアラミド繊維製などの連続繊維シート（以後、FRP シートまたは単にシート）を既設鉄筋コンクリート（以後、RC）構造物に接着して補強する工法が盛んに採用されている。道路橋床版を例にとると、押抜きせん断耐力の増大には、上面増厚工法が有効であることが知られているが、施工のためには道路を一部占有する必要があるなどの課題があり、特に交通量の多い基幹道路では、その採用が困難な場合も見受けられる。このような場合、床版下面からの吹き付け等の増厚工法、鋼板接着工法などが採用されてきたが、前者は既設 RC 構造物との界面における力の伝達の確実性、後者は鋼材の腐食という重大な課題を有している。FRP シートによる床版下面補強工法は前述の課題を解決する一つの工法であると思われる。しかし、本工法に関する研究事例は少なく、合理的な補強設計法の確立には至っていないのが現状である。

著者らは、既往の研究^{1), 2)}において、FRP シートによる道路橋床版などの面部材の下面補強を想定し、RC 版の押抜きせん断耐荷性状に関する検討を実施してきた。その結果、1) FRP シートで下面補強した RC 版の押抜きせん断耐力の増大は、主としてかぶりコンクリートの押抜きせん断抵抗が寄与すること、2) 下縁かぶり部のせん断耐力増分は提案式により算定可能であるものの、RC 版の鉄筋比の影響を受けるため、補強効果係数を適切に設定する必要があること、などを明らかにしている。

本研究では、既往の研究における提案式の適用範囲を検討するため、特に鉄筋比の極端に大きい、もしくは小さい RC 版を対象に AFRP シートを下面接着し、静的押抜きせん断実験を実施した。

2. 試験体概要

表-1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、鉄筋比を 5 種類、シートの補強層数を各々無補強試験体および 1, 2 層とした計 3 種類の全 15 体である。表中、試験体名の第 1 項目は主鉄筋比 (A: 0.56%, B: 1.56%, C: 1.66%, D: 2.12%, E: 2.25%) を示しており、第 2 項目の N は無補強、S はシート補強を示している。なお、S に付随する数値はシート補強層数を示している。実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 32.9 ~ 36.7 MPa であった。表-2 には、二方向 AFRP シートの力学的特性値を示している。

図-1 には、本実験に用いた RC 版の形状寸法、配筋状

表-1 試験体一覧

試験体名	下端鉄筋 (主鉄筋比)	コンクリート強度 (MPa)	繊維目付量 (g/m ²)	シート層数	引張剛性 $E \cdot t$ (MN/m)
A-N	D10	36.7	-	-	-
A-S1	@100		435/435	1	28.3
A-S2	(0.56 %)		(二方向)	2	56.6
B-N	D16	32.9	-	-	-
B-S1	@100	36.7	435/435	1	28.3
B-S2	(1.56 %)		(二方向)	2	56.6
C-N	D22	32.9	-	-	-
C-S1	@200		435/435	1	28.3
C-S2	(1.66 %)		(二方向)	2	56.6
D-N	D22	36.6	-	-	-
D-S1	@150		435/435	1	28.3
D-S2	(2.12 %)		(二方向)	2	56.6
E-N	D19		-	-	-
E-S1	@100		435/435	1	28.3
E-S2	(2.25 %)		(二方向)	2	56.6

表-2 AFRP シートの力学的特性値

繊維目付量 (g/m ²)	厚さ t (mm)	弾性係数 E (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
435/435	0.24/0.24	118	2.06	1.75

況および補強概要図を示している。RC 版の寸法は、2,000 × 2,000 × 180 mm であり、下端鉄筋を平均芯かぶりが 40 mm となるように配置した。鉄筋は A, B, E 試験体で D10, D16, D19 を 100 mm 間隔、C, D 試験体で D22 をそれぞれ 200, 150 mm 間隔で格子状に配置している。また、鉄筋は 4 辺の外縁に配置した溝型鋼に溶接定着し、定着を確保している。下面接着シートには、目付量 435/435 g/m² の二方向 AFRP シートを用い、両支点の 50 mm 手前まで貼り付けた。なお、RC 版底面のシート接着部のコンクリート表面には、付着性能の向上に有効であるショットブラスト処理 (処理深さ 1 ~ 2 mm 程度) を施している。

RC 版の支持条件は四辺単純支持であり、支持間隔は 1,750 mm である。支点部は回転を許容し、浮き上がりを拘束するピン支持に近い構造となっている。載荷盤には直径が 60 mm の鋼製厚肉円盤を用い、RC 版中央部に設置した。

本実験における測定項目は、静荷重測定用ロードセルによる載荷荷重、レーザ式変位計による版中央部変位および鉄筋、シートに貼付したひずみゲージによるひずみである。これらの出力は、連続的にデジタルメモリに一括収録し、各物理量に変換している。なお、実験終了後には主鉄

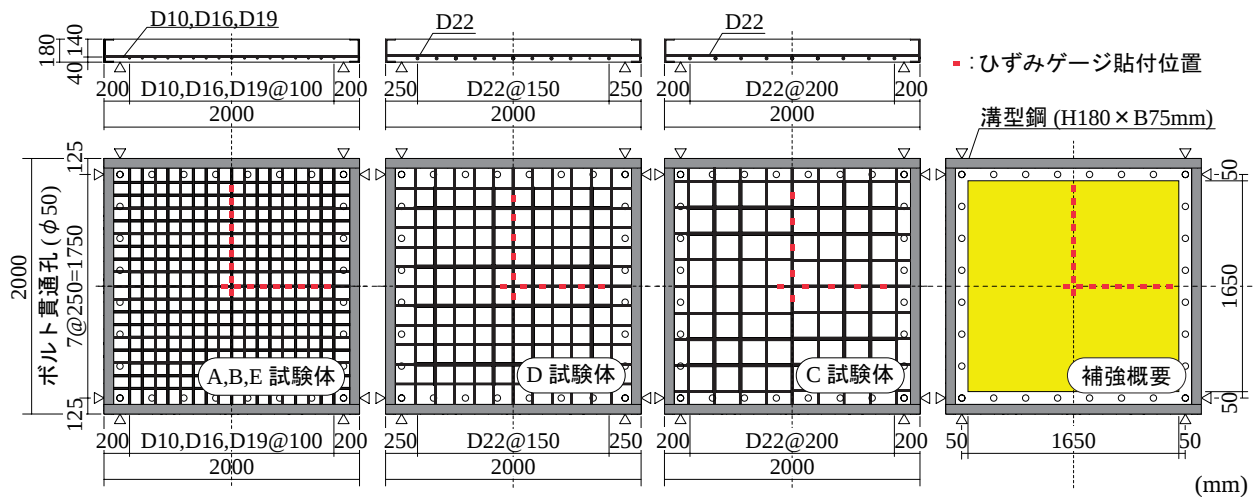


図-1 RC版の形状寸法、配筋状況および補強概要

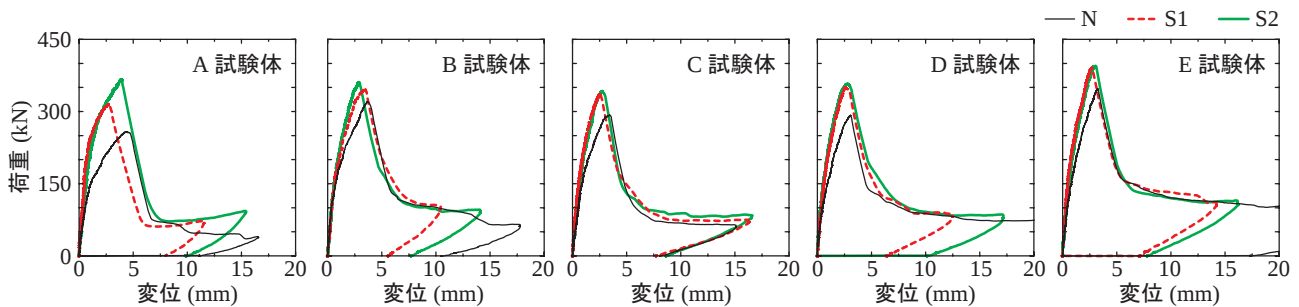


図-2 荷重-変位関係

筋方向の版中央部を切断し、破壊面の観察を行っている。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-変位関係

図-2には、各試験体の荷重と版中央部変位(以後、変位)の関係を試験体ごとに示している。

図-2より、比較的鉄筋比の小さいA試験体は、無補強のA-N試験体で荷重初期にひび割れ発生に伴う曲げ剛性の低下が見られ、その後最大荷重約250kN、変位約5mmで押抜きせん断破壊に伴う急激な荷重低下が見られる。一方、シート補強したS1,S2試験体は、N試験体に比較して全体的に剛性勾配や最大荷重が大きく示されていることが分かる。また、シート層数の増加に伴う荷重の増加も大きい。なお、A-S1試験体では他の試験体に比較して変位が小さい状態で破壊しているが、これは押抜きせん断面に片寄りが生じ、他の試験体に比較して早期にシートが部分剥離したためと考えられる。

鉄筋比が1.5%以上のN試験体を見ると、鉄筋比の小さいA-N試験体に比較して剛性勾配は大きく示されるものの、全体的な性状は同様であることが分かる。また、各試験体のS1,S2試験体は、補強層数にかかわらず剛性勾配や最大荷重はほぼ同程度である。

3.2 ひび割れ分布性状

写真-1には、実験終了後における版中央部切断面のひび割れ分布性状を示している。なお、写真には鉄筋比が最小のA試験体と最大のE試験体の結果を示している。写真-1より、A試験体の場合、シート補強の有無にかかわらず押抜きせん断破壊により終局に至っていることが分かる。すなわち、荷重端部より斜め下方に押抜きせん断面が

形成されている。また、シート補強した試験体の下縁かぶり部における押抜きせん断ひび割れ角度は、補強層数の増加とともに増大する傾向にあるものの押抜きせん断コーンは小さくなる傾向にある。

一方、E試験体の場合、いずれの試験体も押抜きせん断破壊によって終局に至っており、補強層数が多いほど、押抜きせん断コーンが小さく示されている。また、下端鉄筋位置で鉄筋に沿うひび割れが顕在化している。これは、鉄筋比が大きいため、下端鉄筋がダウエル作用によって押抜きせん断力に対して大きく抵抗するためと考えられる。

以上より、押抜きせん断ひび割れの角度は、既往の研究と同様に無補強試験体で最も緩やかであり、補強層数が多くなるほど角度が大きくなる傾向にあることが明らかとなった。

3.3 シートおよび鉄筋に発生する張力分布

図-3には、A,E試験体の最大荷重時における、シートおよび鉄筋の張力分布を示している。なお、図中の値は、鉄筋は1本あたりに発生する張力を示しており、シートは鉄筋1本分が分担する領域、すなわち鉄筋間隔分の張力を分担するとして算出した。

図-3より、A試験体を見ると、無補強のN試験体で荷重点近傍を上底とする台形状の分布性状を示している。また、シート補強した試験体は、N試験体の鉄筋の分担張力が全体的に低下する性状を示し、シートの分担張力が鉄筋の張力減少分を補う傾向にある。また、A-S2試験体では荷重点近傍の鉄筋およびシートの分担張力がほぼ同程度を示しており、シートの補強効果が十分に発揮されている状況にあるものと考えられる。

一方、E試験体では、全体的な性状はA試験体と同様

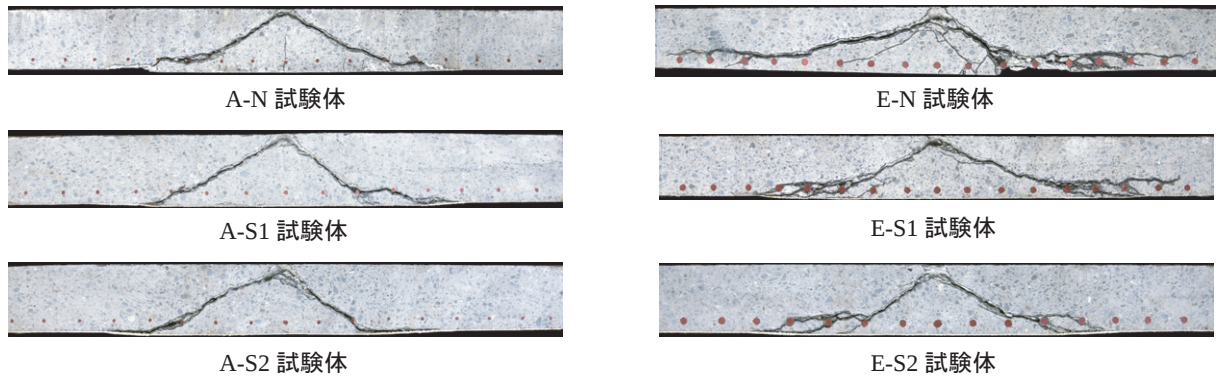


写真-1 版中央部切断面のひび割れ分布性状

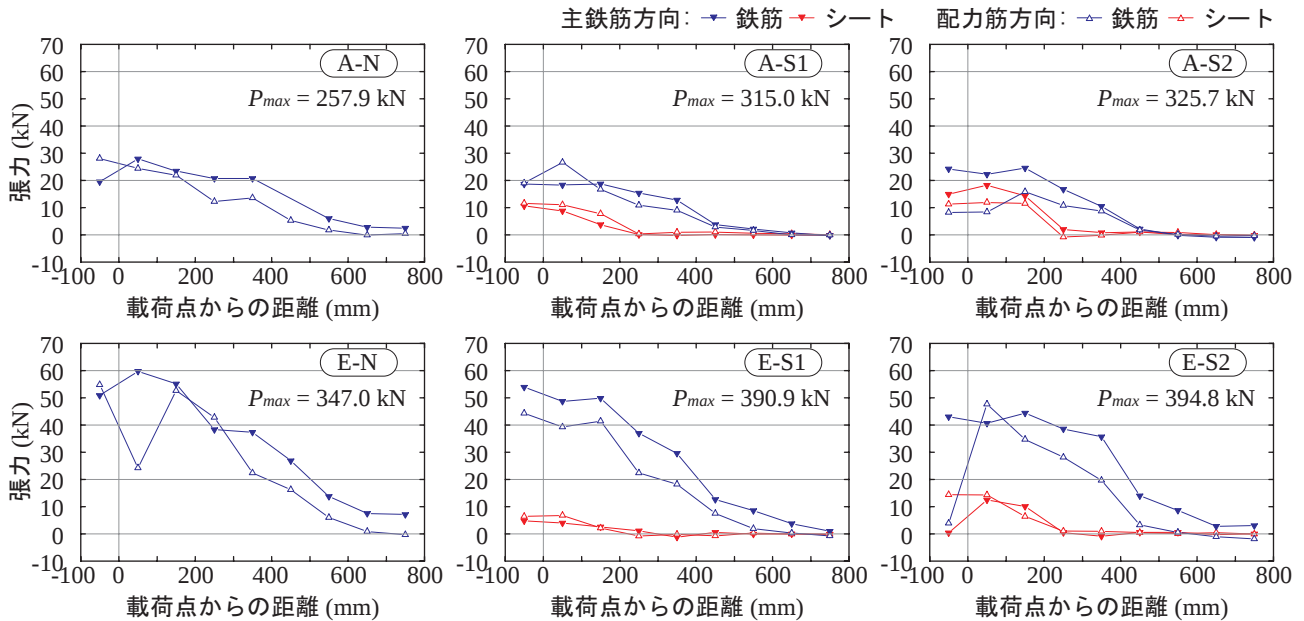


図-3 シートおよび鉄筋の張力分布

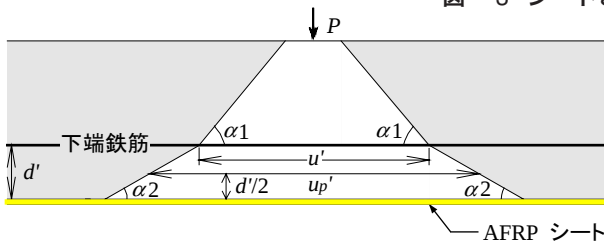


図-4 押抜きせん断性状のモデル化

であるものの、鉄筋の分担張力がシートのそれに比較して大幅に大きく示されている。このことから、鉄筋比が大きい場合は鉄筋の張力分担に対してシートの分担張力が小さく、シートの補強効果が大きく出現しにくいことが分かる。

3.4 押抜きせん断耐力の評価

著者らは既往の研究において、コンクリート標準示方書³⁾を基にしたFRPシート下面接着RC版の押抜きせん断耐力評価式を提案している。

式(1)に、著者らが提案するかぶりコンクリートの押抜きせん断耐力評価式を示す。

$$CV_{pcd} = \alpha \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u'_p \cdot d' \quad (1)$$

$$\alpha = 0.54/P_t, \quad f_{pcd} = 0.20\sqrt{f'_{cd}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d'} \text{ (d': m)}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p}, \quad \beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u'/d')$$

ここで、式(1)中の各定数は、

α : 補強効果係数, P_t : 主鉄筋比

f'_{cd} : コンクリートの圧縮強度

u' : 載荷面の周長, u'_p : 設計断面の周長

d' : かぶり厚さ, $p (=n_f \cdot A_f / (b \cdot d'))$: 補強筋比

A_f : AFRPシートの断面積, b : 幅

$n_f (=E_f/E_s)$: 弾性係数比 (AFRPシート/鉄筋)

なお、式(1)は、実験終了後の切断面から図-4に示すような押抜きせん断性状のモデル化を行い、それに基づいて構成している。すなわち、 α_1 の角度で下端鉄筋位置までひび割れが進展した際の周長を載荷面の周長(u')とし、下縁かぶり部において α_2 の角度でかぶりコンクリートに押抜きせん断断面が形成されるものとして設計断面の周長(u'_p)を求め、さらに鉄筋比の影響を考慮した補強効果係数 $\alpha = 0.54/P_t$ を乗じることで評価することとしている。なお、版下面のAFRPシートは、鉄筋との弾性係数比を用いて補強筋比として考慮している。

表-3には、各々のRC版の実験より得られた実測せん断耐力、無補強試験体に対する補強試験体の実測耐力増分、切断面より得られた α_2 、計算せん断耐力、式(1)より得られる $\alpha = 1.0$ とした場合のかぶり部が寄与する計算耐力増分、 α を考慮した計算耐力増分、補強効果係数 α 、お

表-3 実験結果一覧

試験体名	実測せん断耐力 (kN) (i)	実測耐力増分 (kN) (ii)	α_2^*	計算せん断耐力 (iii) (α を考慮)	計算耐力増分 ($\alpha = 1.0$) (kN) (iv)	計算耐力増分 (α を考慮) (kN)	補強効果係数 α	せん断耐力比 (i)/(iii)	耐力増分比 (ii)/(iv)
A-N	257.9	-	-	228.2	-	-	0.964	1.13	-
A-S1	315.0	57.1	16.2	310.6	85.6	82.4		1.01	0.67
A-S2	367.3	109.4	23.5	322.1	97.5	93.9		1.14	1.12
B-N	320.9	-	-	306.9	-	-	0.346	1.05	-
B-S1	346.1	25.2	11.7	354.1	109.6	47.2		0.98	0.23
B-S2	361.1	40.2	11.7	362.7	134.5	55.8		1.00	0.30
C-N	292.4	-	-	327.7	-	-	0.325	0.89	-
C-S1	336.5	44.1	10.5	360.1	99.5	32.4		0.93	0.44
C-S2	342.6	50.2	10.4	368.7	125.9	41.0		0.93	0.40
D-N	292.1	-	-	355.6	-	-	0.255	0.82	-
D-S1	351.6	59.5	9.8	381.6	102.3	26.1		0.92	0.58
D-S2	357.3	65.2	17.0	382.6	106.2	27.1		0.93	0.61
E-N	347.0	-	-	346.8	-	-	0.240	1.00	-
E-S1	390.9	43.9	9.2	370.9	100.5	24.1		1.05	0.44
E-S2	394.8	47.8	11.5	374.6	115.7	27.8		1.05	0.41

*: 左右の α_2 の平均値

よび実測値を計算値で除したせん断耐力比, 耐力増分比を一覧にして示している。なお, 本計算における α_1 は 45° と仮定し, α_2 は実測値を用いている。また, 計算押抜きせん断耐力は, 各無補強試験体の押抜きせん断耐力に補強効果係数を考慮した計算耐力増分を加算したものである。

表中, せん断耐力比を見ると, 鉄筋比の小さい A 試験体で, 1.0 程度を示しており, 本提案式で耐力の算定が可能であることが分かる。また, 鉄筋比の比較的大きい試験体を見ると, B, E 試験体で概ね 1.0 程度と提案式と良く一致している。しかしながら, C, D 試験体は 0.9 程度と危険側の結果となっている。これは, 無補強の C/D 試験体においても 0.82 ~ 0.89 を示していることから, 示方書式による N 試験体の計算押抜きせん断耐力が実測値を大きく上回っていることが要因と考えられる。

以上のことから, 提案の押抜きせん断耐力評価式による計算耐力は, 鉄筋比が 1.5 % 程度以下の場合には, 実測値と概ね対応することが明らかになった。

3.5 補強効果係数 α と主鉄筋比の関係

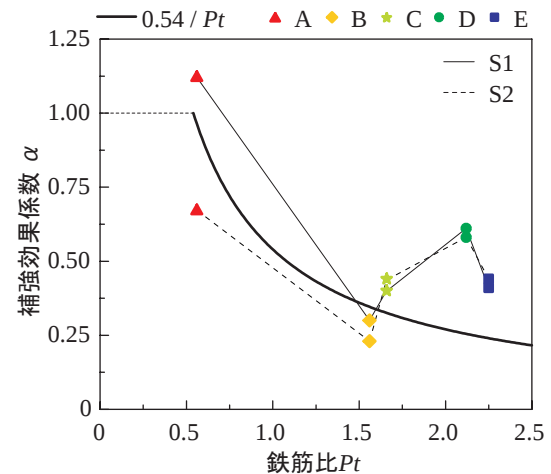
図-5 には, 縦軸に補強効果係数 α を, 横軸に各試験体の主鉄筋比 P_t を示している。また, 図中には提案式の補強効果係数 $\alpha = 0.54/P_t$ も併せて示している。なお, 本実験における補強効果係数 α と 表-3 に示す耐力増分比は同義である。

図-5 より, A 試験体で提案式 ($0.54/P_t$) を一部下回っているものの, 全体的に補強効果係数 α が提案式と同等, あるいは上側に位置し, 大略安全側に評価していることが分かる。

4. まとめ

本研究では, 既往の研究で提案した FRP シート下面接着 RC 版の押抜きせん断耐力評価式の適用範囲を検討するため, 鉄筋比の大きい, もしくは小さい RC 版を対象に静的押抜きせん断実験を実施した。本研究の結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 鉄筋比の小さい場合には, シートの補強効果は大きく現れるのに対して, 鉄筋比の大きい場合には, シート

図-5 補強効果係数 α と主鉄筋比の関係

の補強効果は小さく, シートの補強層数を増やしても耐力の増加は微小である。

- 2) 鉄筋比が 1.5 % 程度以下の場合には, 提案式を用いた計算押抜きせん断耐力と実測値は比較的良好に対応する。
- 3) 提案の補強効果係数 $\alpha = 0.54/P_t$ とすることにより, シート層数にかかわらず, 本実験結果を大略安全側に評価できる。

参考文献

- 1) 三上 浩, 岸 徳光, 藤田 学, 澤田 純之: AFRP シート下面接着 RC 版の押し抜きせん断性状に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1299-1307, 2005
- 2) 三上 浩, 岸 徳光, 藤田 学, 澤田 純之: 鉄筋比の異なる AFRP シート下面接着 RC 版の押し抜きせん断性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1459-1464, 2006
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 (構造性能照査編), 2002